



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

Nayara Juliana Jargemboski Piazero Benkendorff

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM USO DE ESCÓRIA DE  
BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO

Joinville  
2024

Nayara Juliana Jargemboski Piazero Benkendorff

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM USO DE ESCÓRIA DE  
BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO

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.

Joinville  
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Benkendorff, Nayara Juliana Jargemboski Piazero  
Avaliação de misturas asfálticas densas com uso de  
escória de bateria de chumbo-ácido / Nayara Juliana  
Jargemboski Piazero Benkendorff ; orientador, Breno  
Salgado Barra, 2024.  
161 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Escória de bateria  
de chumbo-ácido. 3. Formulação. 4. Misturas asfálticas. 5.  
BBSG. I. Barra, Breno Salgado. II. Universidade Federal de  
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e  
Ciências Mecânicas. III. Título.

Nayara Juliana Jargemboski Piazero Benkendorff

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM USO DE ESCÓRIA DE  
BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO

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. 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, 2024.

*“La meilleure façon de prédire l'avenir c'est de le créer.”*

Peter Drucker.

Dedico este trabalho a minha mãe, aos meus irmãos, ao meu esposo Fernando Piazero Benkendorff e ao meu filho Arthur Jargemboski Maiocki. Por sempre acreditarem em mim, por todo amor, incentivo e paciência, minha eterna gratidão.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre colocar pessoas maravilhosas em meu caminho, as quais me fazem acreditar em um mundo melhor e me encorajam a prosseguir. Obrigada por nunca soltar a minha mão e me guiar em todos os momentos.

À minha mãe Eliane Mara Bino Guedes, que nunca mediu esforços para me mostrar o caminho do bem, dando o seu melhor para me educar e ensinar a nunca desistir dos meus sonhos, sempre me apoiando em todas as etapas da minha vida. Sem você, eu não chegaria até aqui. Muito obrigada por tudo! O amor que sinto por você é incondicional.

Aos meus irmãos, sinônimo de amor e união. Obrigada por acreditarem no meu sonho e sempre me motivarem a seguir em frente. É muito bom saber que posso contar com vocês em todos os momentos. Não importa a que distância, vocês sempre estão comigo. Amo vocês!

Ao meu esposo Fernando Piazero Benkendorff, por todo amor, carinho, compreensão e apoio em tantos momentos difíceis desta caminhada. Obrigado por permanecer ao meu lado, mesmo sem a atenção devida e depois de tantos momentos de lazer perdidos. Obrigado pelo presente de cada dia, pelo seu sorriso e por saber me fazer feliz. Agradeço do fundo do meu coração. Serei eternamente grata, por acreditar em mim e por estar sempre ao meu lado nas horas mais difíceis.

Ao meu príncipe, Arthur Jargemboski Maiocki, por todo amor incondicional que você sempre me deu. E mesmo na sua inocência, sempre entendeu a minha ausência nos momentos de estudo. Inúmeras foram as vezes que pela madrugada, fui até o seu quarto e lá permaneci, feliz por você fazer parte da minha vida, por me permitir a dádiva de ser sua mãe. A sua existência é o reflexo mais perfeito da presença de Deus.

Aos meus colegas e amigos do LDTPav, Rafael Fronza, Natan Medeiros, e Thiago Persike, pela colaboração nas etapas laboratoriais deste trabalho. Vocês tornaram os dias de trabalho muito mais leves e divertidos.

Ao meu orientador, professor Breno Salgado Barra, Dr. Eng., pela oportunidade de realizar este trabalho. Obrigada pela confiança e por me atender com paciência todas as vezes que bati em sua porta. Agradeço por todo conhecimento transmitido durante o curso de Mestrado, todos os ensinamentos compartilhados de forma admirável, e por me guiar nos primeiros passos da pós-graduação. Muito obrigada por tudo!

Agradeço às empresas Rudnick Minérios e CBB Asfaltos, aos Laboratórios de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) e de Pavimentação (LabPavi), da

UFSC em Joinville e Florianópolis, respectivamente, por disponibilizarem os insumos e infraestrutura necessários à realização da pesquisa.

Agradeço ainda à empresa Baterias Pioneiro, por confiarem a mim a matéria-prima desta pesquisa, e pelo apoio e auxílio nos ensaios laboratoriais, sempre com o intuito de contribuir na realização deste trabalho científico.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta pesquisa, o meu sincero agradecimento.

## RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é avaliar misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), com a incorporação de escória de bateria de chumbo-ácido, a fim de verificar a viabilidade técnica deste rejeito industrial no âmbito da demanda ambiental progressiva e global pela utilização de materiais sustentáveis aplicados nos serviços de pavimentação. Para tanto, a curva granulométrica foi concebida com base na metodologia teórica, utilizando as equações de Fuller-Talbot. O diâmetro máximo da série de peneiras foi estabelecido em 12,7 mm. A escória bruta foi obtida a partir de passivo estocado e oriundo da reciclagem de bateria veicular. A caracterização, após classificação por peneiramento, foi realizada a partir de análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de Raios-X (DRX), espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX), textura superficial por adsorção de Nitrogênio (BET), espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR) e, termogravimetria e calorimetria diferencial (TGA/DSC). A incorporação da escória de bateria de chumbo-ácido nas misturas asfálticas compreendeu a substituição de frações passantes no intervalo de peneiras 0,30 mm a 0,075 mm, relacionadas à curva granulométrica de projeto, tendo sido testadas duas variações percentuais (7,0 % e 15,0 %), as quais foram comparadas às formulações de referência, previamente estudadas e compostas integralmente 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, em razão de dispor de estreita e comprovada relação campo/laboratório, conferindo credibilidade aos resultados obtidos. Os aspectos funcionais e mecânicos avaliados abrangeram a 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. Ainda, análises de lixiviação também foram realizadas, com o intuito de investigar a capacidade da escória de chumbo-ácido em causar impacto e dano ao meio ambiente. Os resultados obtidos indicam, com base no contexto da campanha experimental realizada, que a incorporação da escória de chumbo-ácido estudada demonstrou ter pouca viabilidade técnica quando comparada às formulações de referência, em razão do maior grau de insalubridade e menor trabalhabilidade nos procedimentos de manipulação e usinagem, respectivamente, bem como menor habilidade de compactação, ocorrência de carbonatação, forte risco de contaminação do meio ambiente por lixiviação de metais pesados, e maior dispêndio econômico de produção devido ao consumo de ligante betuminoso mais elevado demandado nas dosagens. Em contrapartida, aspectos como a boa resistência à ação deletéria da água e, resultados de resistência à deformação permanente compatíveis com as classes normativas das formulações do tipo BBSG, apontam para a possibilidade de se utilizar a escória de chumbo-ácido nas misturas asfálticas, desde que se desenvolvam técnicas capazes de encapsular adequadamente o material, em consonância à utilização de ligantes betuminosos mais consistentes e modificados.

**Palavras-chave:** escória de bateria de chumbo-ácido; metodologia francesa de formulação; misturas asfálticas densas.

## ABSTRACT

The main goal of this research is to evaluate dense asphalt mixes so-called *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG) by adding lead-acid battery slag, aiming to verify the technical feasibility of this industrial waste, with regards to progressive and global environmental demands for using sustainable materials in paving works. The aggregate gradation was designed based on theoretical method, considering Füller-Talbot equations. The maximum diameter of the sieve series was set at 12.7 mm. The raw slag was collected from stored waste amounts and generated after recycling of vehicular batteries. The characterization of the slag, after sieving classification, was carried out by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence spectrometry (XRF), surface texture by Nitrogen adsorption (BET), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and thermogravimetry and differential scanning calorimetry (TGA/DSC). Incorporation of the lead-acid battery slag into asphalt mixes comprised substitution of fractions passing through the sieve range from 0.30 mm to 0.075 mm, related to designed aggregate gradation, being tested two percent variations (7.0 % and 15,0 %), which were compared to the reference formulations, previously studied and developed entirely with gneissic crushed rock particles. Neat asphalt binder was classified as 30/45 by penetration tests. French methodology scope was considered for the experimental campaign, due to present narrow and proven field/laboratory ratio, providing reliability to the results obtained. Functional and mechanical performances were determined by tests such as compaction ability at gyratory shear press, resistance to action of water in Duriez test at 18 °C and to rutting at 60 °C. Furthermore, leaching analyses were also carried out, in order to verify the lead-acid slag capacity of causing environmental damage and impact. The results obtained indicate, taking into account the context explored along the experimental campaign, that the incorporation of the lead-acid slag studied demonstrated lower technical feasibility when compared to the reference formulations, due to the higher degree of unhealthiness and lower workability during manipulation and production procedures, respectively, as well as lower compaction ability, carbonation occurrence, strong risk of environmental contamination by leaching of heavy metals, and higher economical production expenditure due to the consumption of bituminous binder required. However, aspects such as good resistance to action of water and compatible rutting results to the standardized BBSG classes, point to the possibility of using lead-acid slag in the asphalt mix formulations, since suitable and effective encapsulating techniques be developed, in line with the use of stiffen and modified asphalt binders.

**Keywords:** lead-acid battery slag; French formulation methodology; dense asphalt mixes.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	– Fluxograma da pesquisa.	27
Figura 2.1	– Estrutura de pavimento de concreto asfáltico.	34
Figura 2.2	– Estrutura típica de pavimento francês.	36
Figura 2.3	– Estrutura típica de pavimento francês do tipo <i>chaussée souple</i> .	37
Figura 2.4	– Estrutura típica de pavimento francês do tipo <i>chaussées bitumineuse épaisse</i> .	38
Figura 2.5	– Carga elétrica inerente ao tipo de rocha matriz.	41
Figura 2.6	– Representação esquemática dos grupos fracionários presentes no ligante betuminoso.	43
Figura 2.7	– Molhagem de um sólido por um líquido.	46
Figura 2.8	– Superfícies de falha de uniões adesivas.	48
Figura 3.1	– Galena minério primário de Chumbo (Pb).	52
Figura 3.2	– Usos do chumbo.	54
Figura 3.3	– Percentual de reciclagem de chumbo contabilizado pela produção LAB nos principais países usuários de chumbo.	56
Figura 3.4	– Componentes básicos de uma bateria chumbo-ácido tipo <i>VRLA</i> .	59
Figura 3.5	– Ciclo do sistema de logística reversa de pilhas e baterias.	61
Figura 3.6	– Fluxograma do processo de reciclagem de baterias automotivas.	67
Figura 3.7	– Esquema do processamento de baterias chumbo-ácido.	69
Figura 3.8	– Esquema de um forno rotativo de fundição.	69
Figura 3.9	– Escória como resultada do processamento da reciclagem do chumbo.	70
Figura 4.1	– Deformação permanente em pavimentos asfálticos.	72
Figura 4.2	– Tipos de deformação permanente em um pavimento flexível.	73
Figura 4.3	– Deformação permanente por fluência.	74
Figura 4.4	– Deformação permanente estrutural.	75
Figura 4.5	– Efeito do teor de ligante betuminoso na formulação de uma mistura asfáltica formulada com a mesma composição granulométrica.	77
Figura 4.6	– Efeitos da pressão de insuflagem.	79
Figura 5.1	– Representação gráfica da curva granulométrica <i>BBSG 0/14</i> .	83
Figura 5.2	– Distribuição granulométrica do Pó de Pedra, RCD e Escória de Chumbo-Ácido.	84

Figura 5.3	– Frações granulares utilizadas na formulação das misturas asfálticas de referência.	85
Figura 5.4	– Frações granulares com incorporação de 7,0 % de escória de chumbo-ácido.	85
Figura 5.5	– Frações granulares com incorporação de 15,0 % de escória de chumbo-ácido.	86
Figura 5.6	– Escória de bateria chumbo-ácido: (a) visão geral das partículas (aumento de 500 vezes), (b) macrotextura subangular e microtextura rugosa (aumento de 1000 vezes), (c) e (d) superfície escamosa e núcleos de porosidade (aumento de 3000 vezes).	87
Figura 5.7	– Amostras de pó de pedra: (a) visão geral das partículas por microscopia ótica de alta resolução e (b) por MEV (aumento de 300 vezes).	89
Figura 5.8	– Difratoograma da escória de chumbo-ácido.	94
Figura 5.9	– Difratoograma do pó de pedra.	95
Figura 5.10	– TGA/DTGA da amostra de ligante betuminoso + 7,0 % de escória.	97
Figura 5.11	– TGA/DTGA da amostra de ligante betuminoso + 15,0 % de escória.	98
Figura 5.12	– Espectros por FTIR das amostras: (preta) ligante betuminoso puro (vermelha) ligante betuminoso + 7,0 % de escória, e (azul) ligante betuminoso + 15,0 % de escória.	99
Figura 5.13	– Curva de viscosidade <i>Saybolt-Furol</i> do ligante betuminoso 30/45.	102
Figura 5.14	– Níveis de avaliação da metodologia francesa para a formulação de misturas asfálticas.	103
Figura 5.15	– Ensaio <i>MVR</i> .	105
Figura 5.16	– (a) Prensa de Compactação Giratória ( <i>PCG-3</i> ) e (b) seu princípio de funcionamento.	107
Figura 5.17	– Controle de temperatura com auxílio de termopar digital.	108
Figura 5.18	– Preparação e extração das amostras.	109
Figura 5.19	– Corpos de prova desmoldados após o ensaio.	109
Figura 5.20	– Análise gráfica gerada pela interface computacional da <i>PCG</i> : formulação (a) aprovada e (b) reprovada.	110
Figura 5.21	– Procedimentos de mistura, moldagem por compactação a duplo pistão, e extração dos corpos de prova.	111
Figura 5.22	– Corpos de prova (a) em câmara a seco, (b) durante o processo de saturação à vácuo e, (c) imersos em água a 18 °C.	112
Figura 5.23	– Ruptura à compressão simples dos corpos de prova.	112
Figura 5.24	– Agitador rotativo utilizado no ensaio de lixiviação.	114
Figura 5.25	– Filtro de sistema de filtração de resíduos perigosos.	114

Figura 5.26	–	Compactação das placas para o ensaio de deformação permanente.	115
Figura 5.27	–	Máquina de deformação permanente.	116
Figura 5.28	–	Placa posicionada na máquina com a sonda de monitoramento de temperatura.	116
Figura 5.29	–	Leitura dos afundamentos com o paquímetro.	117
Figura 5.30	–	Pontos de leitura dos afundamentos nas trilhas de roda das placas.	117
Figura 6.1	–	Habilidade de compactação na PCG com 7,0 % de escória de chumbo-ácido.	120
Figura 6.2	–	Habilidade de compactação na PCG com 15,0 % de escória de chumbo-ácido.	121
Figura 6.3	–	Resistência à ação deletéria da água das misturas asfálticas testadas.	123
Figura 6.4	–	Névoa branca formada sobre as amostras condicionadas em água no ensaio de Duriez.	124
Figura 6.5	–	Efeito da carbonatação nas placas utilizadas no ensaio de deformação permanente com (a) 7,0 % e (b) 15,0 % de incorporação de escória de chumbo-ácido.	127
Figura 6.6	–	Aspecto da escória de chumbo-ácido após (a) geração pirometalúrgica em forno rotativo e (b) contato com a atmosfera.	128
Figura 6.7	–	Evolução do afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas de referência.	130
Figura 6.8	–	Evolução do afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas com a incorporação de 7,0 % da escória de chumbo-ácido.	130
Figura 6.9	–	Evolução do afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas com a incorporação de 15,0 % da escória de chumbo-ácido.	131
Figura 6.10	–	Seção transversal das placas antes e depois dos ensaios de deformação permanente.	134

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	– Classes granulares.	40
Tabela 2.2	– Composição química dos ligantes betuminosos convencionais.	43
Tabela 3.1	– Evolução das reservas de chumbo do Brasil.	53
Tabela 3.2	– Balanço nacional da produção secundária de minério refinado de chumbo.	55
Tabela 3.3	– Produção mundial de minério de chumbo no período de 2010- 2021 (¹).	56
Tabela 3.4	– Balanço da produção mundial de chumbo por via secundária (¹).	57
Tabela 5.1	– Caracterização das frações granulares.	80
Tabela 5.2	– Distribuição granulométrica das formulações BBSG.	82
Tabela 5.3	– Pontos de controle estabelecidos para formulações BBSG pela metodologia francesa.	82
Tabela 5.4	– Percentuais passantes e percentuais retidos da distribuição granulométrica do Pó de Pedra do RCD e da Escória de Chumbo-Ácido.	84
Tabela 5.5	– Composição química obtida por EDS no procedimento de MEV.	88
Tabela 5.6	– Análise da superfície específica da escória de chumbo-ácido.	90
Tabela 5.7	– Análise da superfície específica do pó de pedra.	90
Tabela 5.8	– Distribuição percentual dos óxidos componentes da escória de chumbo-ácido e do pó de pedra por FRX.	92
Tabela 5.9	– Parâmetros característicos do ligante betuminoso 30/45.	101
Tabela 5.10	– MVR das misturas asfálticas.	106
Tabela 6.1	– Resultados dos ensaios de habilidade de compactação na PCG.	120
Tabela 6.2	– Concentração de elementos lixiviados na amostra de escória de chumbo-ácido.	125
Tabela 6.3	– pH do resíduo e do extrato lixiviado da escória de chumbo-ácido.	128
Tabela 6.4	– Afundamentos na trilha de roda das misturas asfálticas.	129

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRABAT	Associação Brasileira de Baterias Automotivas e Industriais
ABREE	Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
ANM	Agência Nacional de Mineração
As	Arsênio
BB	<i>Béton Bitumineux</i>
BBD <sub>r</sub>	<i>Béton Bitumineux Drainant</i>
BBM	<i>Béton Bitumineux Mince</i>
BBSG	<i>Béton Bitumineux Semi-Grenus</i>
BBTM	<i>Béton Bitumineux Très Mince</i>
BCI	<i>Battery Council International</i>
BET	Técnica de Adsorção
CBC	Companhia Brasileira de Chumbo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cu	Cobre
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difração de Raios-X
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FeS <sub>2</sub>	Pirita
FRX	Fluorescência de Raios-X
IBER	Instituto Brasileiro de Energia Reciclável
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICZ	Instituto de Chumbo e Zinco
ILA	<i>International Lead Association</i>
ILZSG	<i>International Lead and Zinc Study Group</i>
LAB	<i>Lead Acid Battery</i>
LACAMI	Laboratório de Caracterização Microestrutural
LACAUT	Laboratório de Análises de Combustíveis Automotivos
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
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
Ni-Cd	Níquel Cádmio
PbO	Óxido de chumbo
PbCO <sub>3</sub>	Carbonato de chumbo
PbS	Sulfeto de chumbo
PbO <sub>2</sub>	Dióxido de chumbo
PbSO <sub>4</sub>	Sulfato de chumbo
PCG	Prensa de Compactação Giratória
PEV	Ponto de Entrega Voluntário
PF	Perde de Fogo
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
Pós-ECM	Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas
RGRA	<i>Revue Générale des Routes et Aérodrômes</i>
SATC	Centro Tecnológico/Criciúma-SC
Sb	Antimônio
SLI	<i>Starting, Lighting, and Ignition.</i>

SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de Silício
Sn	Estanho
SETRA	<i>Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes</i>
SINCOPEÇAS	Associação Nacional dos Sincopeças do Brasil
ULAB	<i>Used Lead Acid Battery</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VLRA	<i>Valve Regulated Lead Acid</i>
VRNS	Rede não estruturante
VRS	Rede estruturante

## SUMÁRIO

### CAPÍTULO 1

	<b>INTRODUÇÃO</b>	21
1.1	OBJETIVOS	24
1.1.1	Objetivo Geral	24
1.1.2	Objetivos Específicos	24
1.2	PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR OS OBJETIVOS	25
1.3	DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA	28
1.4	RELEVÂNCIA DO TEMA: JUSTIFICATIVA	28
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	31

### CAPÍTULO 2

	<b>CONSIDERAÇÕES SOBRE MISTURAS ASFÁLTICAS E ESTRUTURAS DE PAVIMENTO</b>	33
2.1	PAVIMENTO	33
2.1.1	Estrutura de pavimento francês	34
2.2	MATERIAIS COMPONENTES DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	38
2.2.1	Materiais granulares	39
2.2.2	Ligante betuminoso	42
2.2.3	Interação granular-ligante	44
2.2.4	Misturas asfálticas de caráter funcional	48

### CAPÍTULO 3

	<b>NOÇÕES GERAIS SOBRE ESCÓRIA DE CHUMBO-ÁCIDO</b>	51
3.1	O CHUMBO	51
3.1.1	Reservas nacionais de chumbo primário	52
3.1.2	A produção nacional de chumbo secundário	53
3.1.3	Cenário internacional	55
3.1.3.1	Produção mundial de chumbo primário e secundário	55
3.2	BATERIAS CHUMBO-ÁCIDO	57

3.3	PROCESSOS DE GERAÇÃO E BENEFICIAMENTO	60
3.3.1	Logística reversa	60
3.3.2	Reciclagem de baterias chumbo-ácido	62
3.3.3	Escória	63
3.3.4	Classificação	63
3.3.4.1	Política de resíduos sólidos	63
3.3.4.2	Classificação de resíduos sólidos	64
3.3.5	Processo de beneficiamento	66

## **CAPÍTULO 4**

	<b>DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS</b>	71
4.1	CATEGORIAS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE	72
4.1.1	Deformação permanente pelo uso	73
4.1.2	Deformação permanente por fluência	73
4.1.3	Deformação permanente estrutural	74
4.2	PARÂMETROS INFLUENTES NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE	75
4.2.1	Materiais granulares	75
4.2.1.1	Curva granulométrica	75
4.2.1.2	Forma, tamanho e textura	76
4.2.1.3	Teor de vazios	76
4.2.1.4	Natureza e teor de ligante betuminoso	77
4.2.2	Temperatura	78
4.2.3	Tráfego	78

## **CAPÍTULO 5**

	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	80
5.1	MATERIAIS	80
5.1.1	Frações granulares	80
5.1.2	Curva granulométrica	81
5.1.3	Caracterização de escória de chumbo-ácido	86

5.1.3.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	87
5.1.3.2	Superfície específica	89
5.1.3.3	Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)	91
5.1.3.4	Difratometria de Raios-X (DRX)	94
5.1.3.5	Termogravimetria e Calorimetria Diferencial	96
5.1.3.6	Espectroscopia Infravermelha por Transformada de Fourier (FTIR)	99
5.1.4	Ligante betuminoso	100
5.2	MÉTODOS	102
5.2.1	Considerações sobre a metodologia Francesa de formulação de misturas asfálticas	102
5.2.2	Massa Volumétrica Real (MVR)	104
5.2.3	Habilidade de compactação	106
5.2.4	Duriez	110
5.2.5	Lixiviação	113
5.2.6	Deformação permanente	115

## **CAPÍTULO 6**

	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	119
6.1	HABILIDADE DE COMPACTAÇÃO NA PCG	119
6.2	DURIEZ	122
6.3	LIXIVIAÇÃO	124
6.4	DEFORMAÇÃO PERMANENTE	129

## **CAPÍTULO 7**

	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	135
	<b>REFERÊNCIAS</b>	138

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Com o objetivo de reduzir custos e manutenção e, ainda, mitigar a exploração dos materiais convencionais, recursos naturais não renováveis, normalmente usados nessas estruturas, à literatura cita diversos estudos relacionados à utilização de diferentes materiais, provenientes de processos industriais. No caso das baterias de chumbo-ácido a reciclagem direta é a maneira mais eficaz e econômica de recuperar matéria prima e reinserir materiais em fim de vida a cadeia produtiva, isso por que a quantidade substancial de baterias em desuso é um motivo de preocupação ambiental, mas também uma oportunidade econômica (Gupta et al., 2024; Torres et al., 2019; Pereira et al., 2019; Yan Xu e You 2015; Specht 2012; Bardini et al., 2012).

As baterias de chumbo-ácido são amplamente utilizadas em todo o mundo devido às suas propriedades únicas, como baixo custo, alta densidade de energia e confiabilidade. No entanto, têm uma vida útil relativamente curta e devem ser substituídos frequentemente, contribuindo assim para um fluxo constante de resíduos. Desta forma um método ambientalmente correto, e econômico é a reciclagem (Ghasemkhani et al., 2023).

À medida que a produção mundial de minério de chumbo primário continua a diminuir, a reciclagem de Chumbo (Pb) de baterias chumbo-ácido exaustas torna-se uma medida muito importante para lidar com a escassez de recursos de chumbo, garantindo assim a circulação estável da indústria de baterias chumbo-ácido (Tian et al., 2017). Do ponto de vista da economia cerca de 80 % a 85 % dos recursos de Chumbo (Pb) consumidos em todo o mundo são usados para produção de baterias de chumbo-ácido (Li et al., 2021).

A recuperação pirometalúrgica tradicional de baterias de chumbo-ácido gastas requer uma temperatura superior a 1000 °C, acompanhado de resíduos difíceis de coletar, como pó de chumbo e óxidos de enxofre, desta forma a pirometalurgia não é a abordagem mais eficiente para a reciclagem de baterias de chumbo-ácido gastas, porém devido às suas vantagens como larga escala de processamento, amplas condições de aplicação e baixo custo quando comparadas ao processo de processo de torrefação a vácuo, por exemplo, o método é o mais utilizado (Wang et al., 2023; Ballantyne et al., 2018; Ebin e Isik, 2016).

No entanto, a recuperação pirometalúrgica de baterias chumbo-ácido gastas ainda precisa enfrentar os seguintes desafios: reduzir o consumo de energia do processo de fundição, reduzir a produção de escória, subproduto gerado no processo de fundição na reoxidação para

obtenção de óxido de chumbo (PbO), evitar a liberação de óxidos de enxofre e poeiras de chumbo na atmosfera. Em geral, a reciclagem de baterias usadas pode ser dividida em processos de pré-tratamento, processos pirometalúrgicos. Estes processos são na maioria das vezes combinados para alcançar um tratamento abrangente, requisitos econômicos e ambientais e a recuperação máxima dos componentes presentes na sua composição (Takacova et al., 2023; Wang et al., 2017; Zhang e Xu, 2016).

Os processos mais comuns e antigos que os países e sociedades têm utilizado são poluidores, provocam acumulação de gases com efeito de estufa na nossa atmosfera e em consequência provocam degradação do nosso meio ambiente. Neste contexto, a produção pirometalúrgica é uma das grandes indústrias consumidoras de energia, constituindo-se também em uma das mais poluidoras, sendo a escória um resíduo sobrando desse processo de produção (Loureiro, 2023).

Recentemente, pesquisadores têm buscado soluções criativas para lidar com esse desafio (Ding et al., 2021; Garcia et al., 2021; Torres e Agregó, 2019). Uma abordagem promissora envolve a reciclagem e também o reaproveitamento das escórias como matéria-prima na construção civil, produção de cimento, pavimentação de estradas. Isso não apenas reduz o desperdício, mas também conserva recursos naturais e reduz as emissões de carbono associadas à produção de materiais tradicionais, pois o correto processo de reciclagem de baterias pode efetivamente diminuir o gasto de energia, reduzir as emissões de gases causadores do efeito estufa e combater a poluição ambiental, atreladas a exploração de recursos minerais primários (Li et al., 2023; Jones e Smith, 2020).

Anualmente, a produção brasileira de escória de siderurgia supera os 3 milhões de toneladas, além do estoque que vem sendo acumulado ao longo do tempo (Prado et al., 2001), sendo a produção de escória de alto forno entre 260 kg e 300 kg para cada tonelada de chumbo reciclado (Crossim, 2015).

A reciclagem de baterias de chumbo-ácido tem se tornado prática devido ao esgotamento ou a ausência total de recursos de matérias-primas primárias e elevados custos de extração (Takacova et al., 2023). O desenvolvimento de métodos para reaproveitamento de resíduos é alvo de estudo, pois estes melhoram a qualidade ambiental, uma vez que transformam resíduos em subproduto para novos processos fabris. O resíduo de escória de chumbo, proveniente da reciclagem de baterias usadas e da extração e refino do chumbo secundário, atualmente têm sido armazenados e descartado em aterros devido à falta de tecnologias alternativas para sua reciclagem. Tecnologias limpas a custo competitivo têm feito que empresas revejam suas políticas priorizando essas soluções (Rafaeli et al., 2023).

O descarte inadequado pode fazer com que a cápsula da bateria se deforme, causando vazamento do lixo tóxico existente no seu interior. O líquido contido dentro do dispositivo é um produto não biodegradável e não decomponível, que causa poluição quando é infiltrado no subsolo, lençóis freáticos, rios e cursos d'água. É, portanto, perigoso para os recursos hídricos, agricultura, animais e seres humanos, causando danos irreparáveis ao meio ambiente (Alves, 2022).

Todos os anos uma elevada quantidade de resíduos industriais é produzida. Atualmente, o Brasil não produz mais o chumbo primário, situação encerrada em 1998 devido ao esgotamento de suas minas de galena, tendo toda a sua utilização proveniente de duas fontes: a reciclagem e a importação. A reciclagem de baterias, prioritariamente de baterias de chumbo-ácido, tanto no Brasil como no resto do mundo, é a principal fonte de matéria-prima de chumbo metálico secundário, representando 95 % em países desenvolvidos (ICZ, 2022).

A parceria com a iniciativa privada possibilitou a coleta de mais de 46 milhões de baterias de chumbo entre 2019 e 2021, o que permitiu a reciclagem de 838 mil toneladas de materiais que foram reinseridos na cadeia produtiva. Isso significa que 43% da frota brasileira foram atendidas com a reciclagem das baterias nos últimos anos (MMA, 2022).

O uso de frações granulares siderúrgicas traz uma série de vantagens em relação às obtidas de fontes primárias. Pode-se citar a redução do consumo de recursos naturais não renováveis, substituindo materiais oriundos de imploração de jazidas e da mineração de rochas e, ainda possibilita a reciclagem de um resíduo industrial, que dará origem a um coproduto para utilização em obras de infraestrutura, minorando a necessidade de aterros de resíduos industriais (IABR, 2010).

Um dos maiores desafios atuais na prevenção dos impactos ambientais, consiste na busca de soluções adequadas à excessiva geração de resíduos ou métodos para seu reaproveitamento (Venzon et al., 2018; Laner et al., 2012; Jacobi, 2011; Besen, 2011; Costa et al., 2010). A preocupação mundial frente a esta situação é crescente, em razão do aumento da produção de resíduos concomitante ao seu gerenciamento inadequado, bem como à falta de áreas para disposição final destes.

Dado o exposto, a motivação desta pesquisa consiste em formular, avaliar o comportamento e, a viabilidade técnica do resíduo oriundo de escória de bateria de chumbo-ácido, quando utilizado composição de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), em substituição parcial às frações granulares britadas de rocha gnáissica, visando reduzir os impactos ambientais atrelados ao processo de estocagem em aterros sanitários, contribuindo para a mitigar danos sobre a saúde do ser humano e do meio ambiente.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar misturas asfálticas densas com uso de escória de bateria de chumbo-ácido, bem como a viabilidade técnica da escória de chumbo-ácido para utilização como material substituto ao granular pétreo natural na formulação de misturas asfálticas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), com base nos parâmetros normativos da metodologia francesa de formulação.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja atingido, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Definir a curva granulométrica, bem como o tipo e os teores de ligante betuminoso a serem utilizados nas dosagens das formulações das misturas asfálticas produzidas;
- Compor os traços das misturas asfálticas com o uso de escória de bateria de chumbo-ácido, considerando a substituição em 7,0 % e 15,0 % de frações granulares na curva granulométrica;
- Caracterizar a escória de bateria de chumbo-ácido por meio das análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de Raios-X (DRX), espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX), textura superficial por adsorção de Nitrogênio (BET), termogravimetria e calorimetria diferencial (TGA/DSC) e, espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR);
- Verificar a habilidade de compactação das formulações com a utilização da Prensa de Compactação Giratória (PCG);
- Avaliar a resistência à ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18 °C;
- Avaliação do extrato lixiviado a partir de ensaios de Lixiviação;

- Determinar a resistência ao afundamento na trilha de roda nos ensaios de deformação permanente;
- Analisar a viabilidade técnica das formulações propostas, em relação ao atendimento dos parâmetros estabelecidos pela metodologia francesa, em relação ao enquadramento como misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), comparando os resultados das formulações propostas com os provenientes das misturas asfálticas de referência, previamente estudadas por Persike (2023), compostas integralmente por frações granulares convencionais oriundas de britagem de rocha gnáissica.

## 1.2 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR OS OBJETIVOS

Para esta pesquisa foram utilizados os materiais disponibilizados por empresas que dispõem de parceria com o Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav). Os granulares foram fornecidos pela empresa Rudnick Minérios Ltda., localizada na região metropolitana de Joinville/SC, enquanto o ligante betuminoso 30/45, em sua forma pura, foi produzido pela Refinaria REPLAN da Petrobrás S.A, e distribuído pela empresa CBB Asfaltos Ltda., situadas em Paulínia/SP e Curitiba/PR, respectivamente. A escória de bateria de chumbo-ácido foi fornecida pela empresa Baterias Pioneiro, situada na cidade de Treze Tílias/SC.

A pesquisa teve início com a coleta das amostras dos materiais de estudo, para posterior classificação de acordo com a tipologia e caracterização por processo de peneiramento mecânico. Para tanto, foi realizada a análise granulométrica da escória de bateria de chumbo-ácido, para verificação de quais seriam as frações com percentual mais representativo em sua distribuição, tendo-se observado que se encontravam a partir daquelas passantes na peneira de abertura 0,3 mm.

Para análise das propriedades das misturas asfálticas e, devido não se ter histórico de outros trabalhos executados com o mesmo material utilizado para esta finalidade, foi testado inicialmente um total de onze teores de ligante betuminoso durante os ensaios para a determinação da massa volumétrica real (MVR) (AFNOR NF EN 12697-5, 2019), a saber: 4,22 %, 4,54 %, 4,86 %, 5,18 %, 5,50 %, 5,82 %, 6,14 %, 6,46 %, 6,78 %, 7,10 %, e 7,42 %.

A curva granulométrica foi formulada a partir do método teórico, com o uso das equações de Füller-Talbot, que tem como característica principal a seleção individual das frações granulares, garantindo ao projetista o controle absoluto da distribuição diametral em cada peneira e, conseqüentemente, melhor qualidade no intertravamento entre as partículas.

Com base na curva granulométrica definida, foram utilizadas duas variações percentuais de substituição da escória de bateria de chumbo-ácido, em relação às frações granulares britadas de rocha gnáissica utilizadas na formulação de referência: 7,0 % (considerando apenas a substituição total das frações passantes na peneira de abertura 0,075 mm), e 15,0 % (considerando a substituição total das frações passantes na peneira de abertura 0,30 mm), tendo como base o contexto da pesquisa prévia desenvolvida por Persike (2023).

As amostras de escória de bateria de chumbo-ácido foram encaminhadas ao Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI), do Centro Tecnológico SATC, em Criciúma, para realização dos ensaios de caracterização, a partir de análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de Raios-X (DRX), espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX), textura superficial por adsorção de Nitrogênio (BET), termogravimetria e calorimetria diferencial (TGA/DSC) e, espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR).

Para os ensaios de Lixiviação, as amostras de escória foram encaminhadas ao Laboratório de Análises de Combustíveis Automotivos (LACAUT), pertencente à Universidade Federal do Paraná (UFPR).

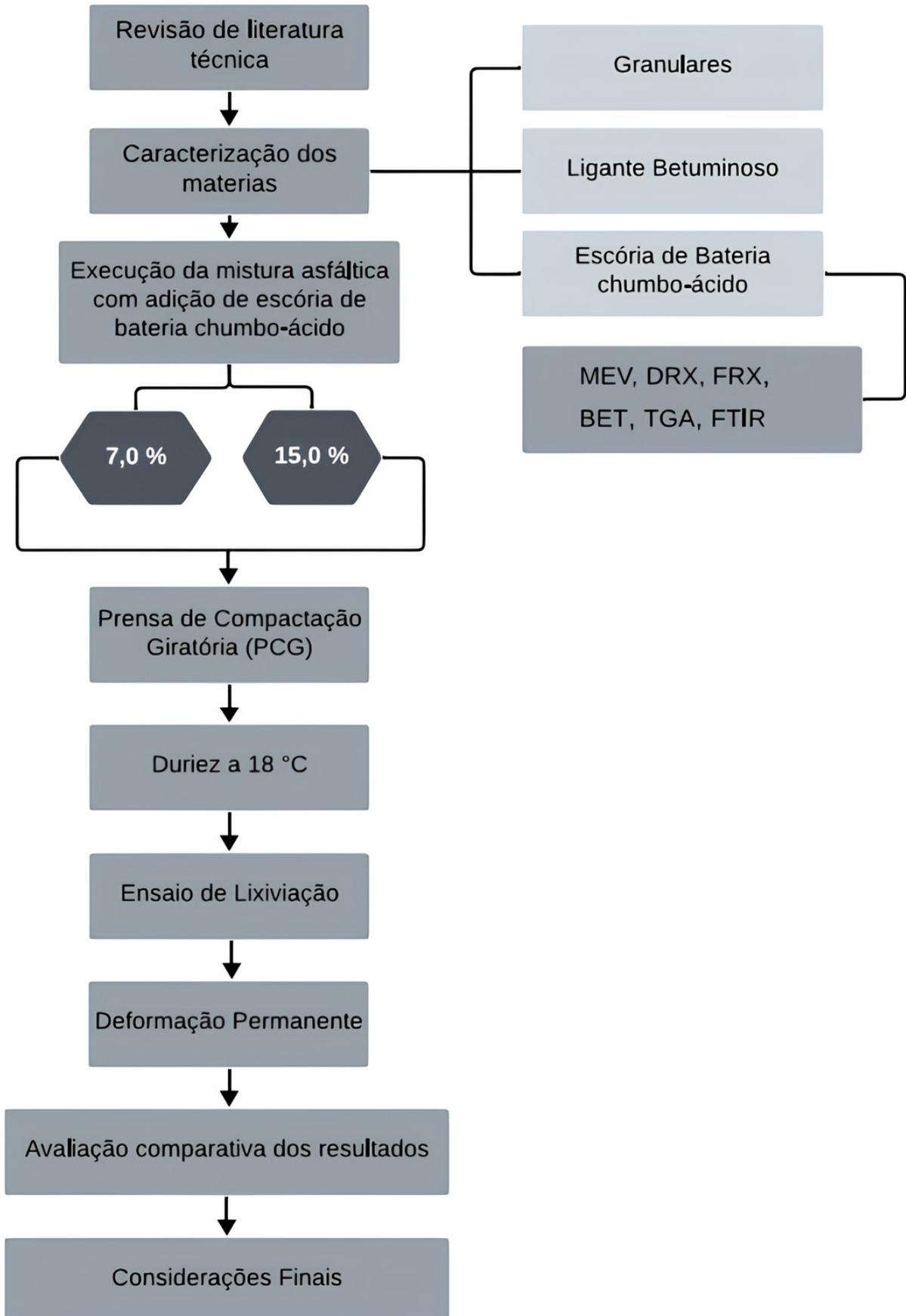
Definidas as propriedades dos materiais selecionados, as avaliações funcionais e mecânicas foram realizadas conforme os parâmetros normativos estabelecidos pela metodologia francesa de formulação (Manuel LPC, 2007), considerando os limites estabelecidos para misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG).

A escolha pela metodologia supracitada ocorreu devido dispor de técnicas e tecnologias de ensaios que possibilitam simular os esforços solicitantes de maneira similar às situações que ocorrem no campo, possuindo estreita e comprovada relação campo/laboratório, fato que remete maior confiabilidade aos resultados obtidos.

Neste contexto, os seguintes ensaios foram realizados: habilidade de compactação com o uso de prensa de compactação por cisalhamento giratória (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019), ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18°C (AFNOR NF EN 12697-12, 2018) e deformação permanente (AFNOR NF EN 12697- 22, 2020).

A Figura 1.1 ilustra o fluxograma estabelecido para execução da pesquisa.

Figura 1.1 - Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Autora.

### 1.3 DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA

O desenvolvimento desta pesquisa foi restrito ao âmbito laboratorial, com cunho teórico-experimental, não sendo parte dos objetivos, em nenhum momento, a proposição de modelizações de qualquer ordem, bem como de procedimentos aplicados em campo.

Quanto à execução da campanha experimental, as atividades previstas foram executadas nos seguintes laboratórios:

- Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI) do Centro Tecnológico SATC, em Criciúma/SC: caracterização da escória de bateria de chumbo-ácido (MEV, FRX, FRX, BET, TGA/DSC e FTIR);
- Laboratório de Análises de Combustíveis Automotivos (LACAUT) da UFPR, em Curitiba/PR: análises de lixiviação;
- Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) da UFSC, em Joinville/SC: peneiramento e triagem de amostras; determinação das massas volumétricas reais (MVR), habilidade de compactação com a PCG; resistência à ação da água no ensaio de Duriez a 18°C e; compactação das placas destinadas aos ensaios de deformação permanente a 60 °C;
- Laboratório de Pavimentação (LabPav) da UFSC, em Florianópolis/SC: ensaios de deformação permanente a 60 °C.

Ressalta-se que as análises realizadas são válidas para esta pesquisa, de acordo com o material estudado e as condições estabelecidas experimentalmente para as misturas testadas.

### 1.4 RELEVÂNCIA DO TEMA: JUSTIFICATIVA

O censo 2022 divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) registrou que a frota nacional foi de 45.029.257, em 2006, para 115.116.532 em 2022, um salto de 155,65% em 16 anos, na média, 4,3 milhões de veículos por ano, o que representa um veículo automotivo para cada quatro habitantes. O Ministério do Meio Ambiente aponta que atualmente estima-se que cerca de 90 % do consumo nacional de chumbo provenha de atividades de reciclagem (MMA, 2022).

Consumidores de chumbo por ordem decrescente de importância são: os fabricantes de baterias ácidas automotivas e industriais, responsáveis por 95,24 % do consumo do chumbo metálico, e os de óxidos, 4,76 %, respectivamente. O processo de produção de chumbo secundário, obtido a partir da reciclagem de baterias de chumbo-ácido gera uma grande quantidade de resíduo sólido durante a etapa de fundição, que é quando o chumbo é recuperado na sua forma metálica. Este resíduo é chamado de escória, a qual é proveniente de forno de fundição de chumbo, sendo constituídas basicamente de ferro e com concentrações menores de enxofre, sódio e chumbo (Silva e Teixeira, 2020).

As baterias automotivas são um dos principais componentes de um veículo, e um dos métodos mais viáveis para a sua produção provém da reciclagem de baterias usadas, visando o reaproveitamento de componentes, sobretudo o chumbo. Porém, esse processo gera resíduos, que se descartados incorretamente podem trazer sérios danos ao meio ambiente e à saúde das pessoas (Griggio e Luvizão, 2021).

Na indústria de reciclagem de baterias chumbo-ácido a escória é o resíduo de maior geração em torno de 15 % a 30 % em massa do material que entra o forno de redução (para cada tonelada de bateria reciclada, é produzido uma média de 671,0 kg de escórias), isso simboliza um alto custo econômico, desta maneira isso representa um grande passivo ambiental relacionado à sua geração e disposição final, e por apresentar toxicidade aos seres humanos, além de contaminar o solo e prejudicar o meio ambiente (Gomes, 2006).

No segundo trimestre de 2023, a produção brasileira do concentrado de chumbo, em metal contido, foi de 16,5 mil toneladas. De acordo com a empresa Nexa a mina em Aripuanã, tem tido alcançadas a produção e a capacidade produtiva a partir do beneficiamento dos concentrados de cobre, de chumbo e de zinco provenientes de sucatas através da reciclagem (IBRAM, 2023).

O acordo assinado em 2019 com a Associação Brasileira de Baterias Automotivas e Industriais (ABRABAT), para implementar o sistema de logística reversa de baterias automotivas de chumbo, com intuito de reduzir a dependência da importação de chumbo para a fabricação de novas baterias. O acordo visa ao final de quatro anos de implementação que o sistema consiga recolher 16 milhões de baterias todos os anos, o que representa 155 mil toneladas de chumbo reciclado (MMA, 2023).

O panorama da situação dos resíduos no Brasil indica que o setor de baterias de chumbo-ácido gera anualmente cerca de 300 mil toneladas de itens que ficam sem uso. A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo deve ser criteriosa e estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe

deu origem. Devido à dificuldade em conferir uma destinação a este resíduo, tem-se como destino final a disposição da escória em aterros para resíduos industriais perigosos. Atualmente, reguladas por uma legislação ambiental mais rigorosa, as indústrias se veem obrigadas a modernizarem suas metodologias ou a oferecer uma destinação definitiva ao resíduo que são gerados por seu processo (ABRABAT, 2020).

A produção de chumbo secundário através da reciclagem de recursos pode complementar as fontes primárias de chumbo no mercado devido à falta de chumbo primário na natureza, e isto também pode promover o desenvolvimento de uma economia circular, reduzindo ao mesmo tempo o impacto das flutuações do mercado para melhorar a segurança dos recursos (Onat e Kucukvar, 2022; Zeng et al., 2022).

A reciclagem de baterias de chumbo-ácido não apenas minimiza a poluição ambiental, mas também atende parcialmente a alta demanda por chumbo para a fabricação de baterias de chumbo-ácido (Meshrama et al., 2023).

A redução da geração de resíduos sólidos é uma meta comum para as indústrias siderúrgicas. No entanto, nos diversos processos produtivos nem sempre é possível atingir a redução total. Logo, estudos que se destinem a investigar a possibilidade do aproveitamento de resíduos siderúrgicos no segmento da pavimentação é de grande importância, pois permite a sua utilização em larga escala. Neste contexto, o aproveitamento da escória de bateria de chumbo-ácido, contribui para o estabelecimento de indicadores positivos de desenvolvimento sustentável, ao reduzir tanto o uso de granulares britados naturais, com o consumo de energia e transporte associados, quanto o descarte de resíduos em aterros sanitários (Khaled et al., 2021).

Outro ponto para relevância da utilização de escória de bateria de chumbo-ácido na formulação de misturas asfálticas, é contribuir com a comunidade internacional no que diz respeito à produção de material técnico-científico a respeito do assunto, pois verificou-se uma forte dificuldade em encontrar bibliografias especializadas sobre este tema, bastante limitado tanto em periódicos quanto em bases de dados. Isso pode ser atribuído a vários fatores, destacando o fato de ser um resíduo considerado como de caráter perigoso (ABNT NBR 10004, 2004), o que acaba refletindo em falta de interesse ou foco em torno do tema.

Ainda, há muitas pesquisas atualmente focadas em áreas como energia renovável, materiais avançados e tecnologias limpas. Outro fator é que a gestão da escória de bateria de chumbo-ácido é uma questão complexa que envolve vários aspectos como: a caracterização do resíduo, a determinação das propriedades físicas e químicas, a identificação de possíveis aplicações, a avaliação dos riscos ambientais e de saúde associados à exposição ao resíduo e, a

identificação de tecnologias de tratamento adequadas. Essa complexidade pode desencorajar pesquisadores de explorar o tema com profundidade.

No entanto, é importante destacar que a gestão adequada da escória de chumbo-ácido é essencial para evitar impactos ambientais negativos e proteger a saúde pública.

Neste sentido, pesquisas importantes (Griggio e Luvizão 2021; Khaled et al., 2021; Oliveira 2020; Neto 2016; Fernandes et al., 2011; Gomes 2006) forneceram informações para este trabalho de pesquisa. Todavia, reitera-se que a revisão de literatura realizada demonstrou grande lacuna ainda existente na exploração do tema de pesquisa proposto, sobretudo no Brasil, reforçando a importância do trabalho desenvolvido.

Dado o exposto, esta pesquisa visa contribuir com estratégias para a tomada de decisão e a mitigação de impacto ambiental, a partir da avaliação de viabilidade técnica correspondente ao aproveitamento de escória de chumbo-ácido, em substituição parcial de frações granulares naturais britadas para a formulação de misturas asfálticas, como solução alternativa e em larga escala nas obras de pavimentação.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

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

Capítulo 2: Apresenta uma revisão bibliográfica, a partir de considerações técnicas sobre misturas asfálticas, estruturas de pavimentos e, os materiais que as constituem.

Capítulo 3: Discorre sobre o chumbo e suas aplicações voltadas à produção de baterias de chumbo-ácido, com destaque para alguns princípios do processo de produção de chumbo secundário. Trata ainda de uma revisão bibliográfica sobre escórias, apresentando dados a respeito do resíduo.

Capítulo 4: Aborda o fenômeno da deformação permanente nas misturas asfálticas, seus mecanismos e fatores influentes para a sua ocorrência.

Capítulo 5: Apresenta os materiais e os métodos utilizados durante a realização da campanha experimental.

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

Capítulo 7: Trata das conclusões da pesquisa e das perspectivas sobre o tema para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO 2**

### **CONSIDERAÇÕES SOBRE MISTURAS ASFÁLTICAS E ESTRUTURAS DE PAVIMENTO**

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

#### **2.1 PAVIMENTO**

De acordo com a ABNT NBR 7207 (2014), o pavimento é uma estrutura construída após o terraplenagem com a função de resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego, resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento e, ainda, melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança.

A principal finalidade das camadas de pavimento é oferecer proteção ao subleito. O pavimento é uma estrutura constituída por múltiplas camadas de distintos materiais que trabalham em conjunto. Portanto, o dimensionamento de um pavimento consiste basicamente em determinar as espessuras de cada uma dessas camadas de modo a resistir e transmitir ao subleito às cargas aplicadas pelo tráfego, sem que ocorra a ruptura do pavimento ou deformações plásticas (afundamentos em trilhas de roda) e deterioração excessiva do revestimento (trincamentos) (Quintero, 2011; Momm, 1998).

A classificação dos pavimentos de concreto asfáltico segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes DNIT-ES 031 (2006) é composta por rígidos, semirrígidos e flexíveis. Sendo que:

- O pavimento rígido é aquele em que o revestimento possui elevada rigidez em relação às camadas inferiores, absorvendo, quase totalmente, as tensões oriundas do carregamento aplicado;

- O semirrígido caracteriza-se pela presença de base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como, por exemplo, uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica;
- O pavimento flexível é aquele em que todas as camadas, quando submetidas a carregamentos, sofrem deformação elástica significativa, com a distribuição da carga aplicada distribuindo-se em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas.

A atual pesquisa trabalhará apenas com pavimentos classificados como flexíveis, e aqui serão tratados como Pavimentos de Concreto Asfálticos (Figura 2.1).

Figura 2.1 - Estrutura de pavimento de concreto asfáltico.



Fonte: Adaptado de Hamlat. (2007).

Para Andrade (2018) essas múltiplas camadas possuem o papel de resistir e distribuir os esforços transmitidos pelos veículos que trafegam sobre a estrutura, com o menor custo de construção possível, dimensionando-as conforme volume e intensidade do tráfego submetido.

Os pavimentos são compostos por estruturas de múltiplas camadas constituídas de materiais distintos que proporcionam o espraiamento de tensões à medida que elas se aproximam do terreno natural de fundação (Pereira e Minhoto, 2022).

### 2.1.1 Estrutura de pavimento francês

As misturas asfálticas, quanto à concepção da estrutura de pavimento francês, podem ser utilizadas tanto em camadas funcionais quanto estruturais. Desta forma, as rodovias são divididas em dois grupos: Vias de Rede Estruturante (VRS), que são destinadas a tráfego médio

e elevadas; e Vias de Rede Não Estruturante (VRNS), que são projetadas para receber tráfego médio e leve.

Na França o projeto de estruturas de pavimentos é baseado no princípio da dissociação das funções das camadas. Este princípio confere as camadas de base um papel estrutural e as camadas superficiais um papel próprio a função de rolamento (interface pneu-pavimento). O pavimento, ou “chaussée” na França, consiste em uma estrutura composta por um conjunto de camadas com o intuito de suportar a circulação dos veículos proporcionando boas condições de conforto e segurança (Hamlat, 2007).

Essa estrutura multicamada é constituída de três partes principais, onde é possível identificar três níveis de camadas principais: a plataforma suporte do pavimento, as camadas intermediárias e as camadas superficiais. (RGRA, 2005), que é representada pela Figura 2.2, onde cada um apresenta um papel bem definido (LCPC, 1994):

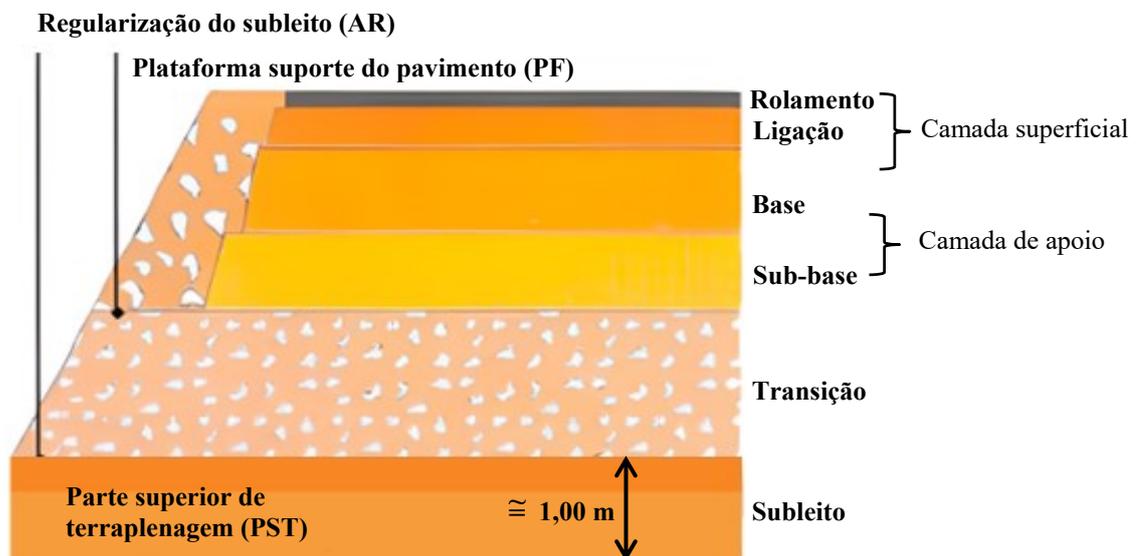
- Camada superficial (*couche de surface*): Camada de Rolamento (*couche de roulement*): parte superior da estrutura em contato direto com os pneumáticos dos veículos. Deve possuir boa aderência, drenabilidade e, em zonas urbanas, é desejável que se emita o menor ruído possível. Deve fornecer aos usuários da via conforto, segurança e economia;
- Camada de Ligação (*binder*) (*couche de liaison*): Situa-se entre as camadas de rolamento e de base. Contribui na resistência de cargas e oferece proteção mecânica, térmica e hidráulica (referente à impermeabilização) da camada de base;
- Camada de apoio (*couche d'assise*): Camada de Base (*couche de forme*): Fornece ao pavimento a resistência estrutural necessária para resistir aos reforços provenientes do tráfego. Além disso, assegura a proteção térmica à camada de forma;
- Camada de Sub-base (*couche de fondation*): Está abaixo da camada de base e tem como função distribuir as cargas verticais provenientes de camadas superiores para a plataforma de suporte do pavimento (*plateforme support de chaussée*) visando mantê-las em um nível admissível;

- Plataforma suporte do pavimento (*Plateforme support de chaussée*): Camada de Reforço do Subleito (*Couche de forme*): Consiste na transição entre o subleito (*sol support*) e a estrutura do pavimento descrita acima.

A implementação dessa camada se dá por dois motivos:

- Proteger o subleito durante as fases de trabalho, além de garantir uma boa qualidade de nivelamento;
- Permite uma melhor homogeneidade das características mecânicas desse material ao longo do tempo, devido à sua constante compactação.
- Subleito (*sol support*): Consiste no corte ou aterro do terreno da região, onde é considerado apenas a sua região superior (considerando apenas um metro de profundidade), onde a sua superfície é conhecida como arado de terraplenagem (*arase de terrassement*).

Figura 2.2 - Estrutura típica de pavimento francês.



Fonte: Adaptado de Guide Technique (1994).

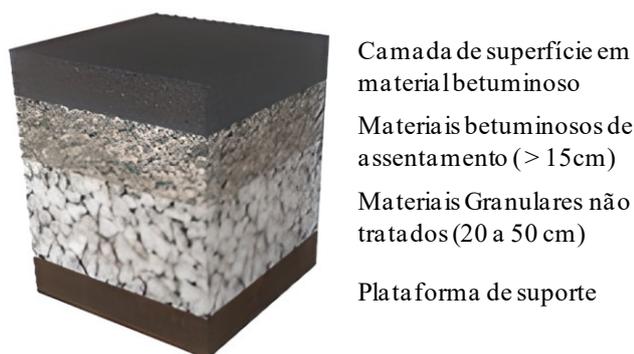
Uma característica da rede rodoviária francesa é a existência de uma grande variedade de estruturas de pavimentos, que são classificadas basicamente em função das características do tráfego.

As camadas de rolamento podem ser projetadas em concretos asfálticos clássicos, tais como (GUIDE TECHNIQUE, 1994):

- BB: concreto betuminoso (*béton bitumineux*);
- BBSG: concreto betuminoso semiaberto (*béton bitumineux semi-grenus*);
- BBM: concreto betuminoso delgado (*béton bitumineux mince*);
- BBTM: concreto betuminoso muito delgado (*béton bitumineux très mince*);
- BBDr: concreto betuminoso drenante (*béton bitumineux drainante*).

As estruturas de pavimento tipo flexível (*chaussée souple*) estão limitadas ao uso na rede não estruturante (VRNS) com tráfego inferior a TC620(T0) e não podem ser utilizadas para a rede estruturante (VRS).

Figura 2.3 - Estrutura típica de pavimento francês do tipo *chaussée souple*.



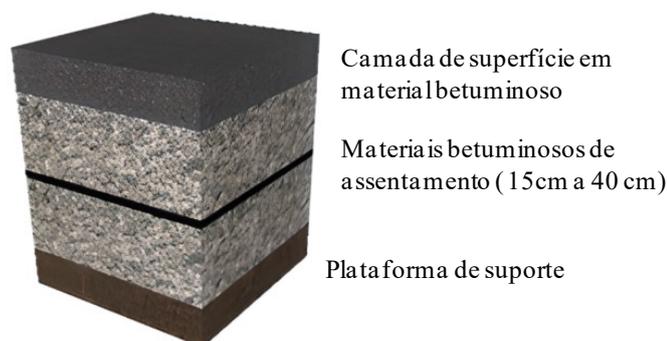
Fonte: Adaptado de Guide Technique (1994).

As estruturas de pavimentos betuminosos espessos (*chaussées bitumineuses épaisses*), por sua vez, são destinadas utilizadas na camada de rolamento e de ligação (quando houver) seguem o mesmo padrão descrito para a estrutura de pavimento flexível (*chaussée souple*) (Guerrero, 2009; Guide Technique, 1994).

Com característica densa, aplicável tanto em camada de rolamento como de ligação (Figura 2.4), com espessuras esbeltas que podem variar no campo de 5,0 cm a 9,0 cm. Para se ter um parâmetro de comparação em relação às espessuras, as camadas asfálticas estruturais nos pavimentos franceses, que suportam os esforços de tração gerados pelo tráfego, podem chegar a 16,0cm, como as misturas de módulo elevado (*Enrobé à Module Élevé - EME*) ou *Grave-*

*Bitume* (GB), em que ambas podem ser utilizadas tanto em camadas de base quanto de sub-base dos pavimentos (Andrade et al., 2020).

Figura 2.4 - Estrutura típica de pavimento francês do tipo *chaussées bitumineuse épaisse*.



Fonte: Adaptado de Guide Technique (1994).

Desta forma, as suas principais características são propiciar em campo condições adequadas de conforto, a partir da resistência ao afundamento na trilha de roda; segurança, com boa rugosidade e rápido escoamento superficial da água, garantindo aderência pneu-pavimento eficiente, além da não ocorrência do fenômeno de hidroplanagem e do efeito spray, e; economia, protegendo as camadas estruturais da ação direta das intempéries, como a precipitação pluviométrica, radiação solar e óleos solventes, propiciando ao pavimento maior tempo de vida útil e menor custo com manutenção (Andrade, 2018).

Portanto, não possui função estrutural, e por esta razão não é considerada no dimensionamento de estruturas de pavimento pela metodologia francesa. Desta forma não necessitam ser avaliadas a partir dos ensaios fundamentais de módulo complexo e fadiga, apenas nos níveis empíricos contemplados pelos ensaios de PCG, duriez e deformação permanente (Guide Technique, 1994).

## 2.2 MATERIAIS COMPONENTES DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas são compostas por uma combinação de agregados minerais, ligante betuminoso e em alguns casos, aditivo. Cada componente desempenha um papel importante na qualidade da mistura asfáltica final e é crucial para garantir a durabilidade e desempenho do pavimento.

Misturas asfálticas são materiais constituídos geralmente por granulares, de diversos tamanhos e formas, envoltos em um ligante betuminosos que atua como agente aglomerante.

Este conjunto pode eventualmente receber aditivos ou adições, em proporções adequadas, visando melhorar seu desempenho. Após sua compactação, este material possui teores de vazios, que não são desprezíveis, já que influenciam diretamente em sua performance (Barra, 2009; LCPC, 2007; Olard 2003; Momm, 1998).

O fato de o ligante betuminoso garantir a coesão das misturas asfálticas a partir da formação de uma película que envolve os granulares, bem como as respectivas interações com as partículas finas na forma de mástique, observa-se que seu comportamento tende a ser elástico a baixas temperaturas, viscoelásticos à temperatura ambiente e líquida viscosa a elevadas temperaturas (Castañeda, 2004; Rivière, 1996).

### 2.2.1 Materiais granulares

Os agregados minerais são a principal fonte de resistência e estabilidade mecânica das misturas asfálticas. Eles podem ser classificados em agregados graúdos e finos, dependendo do tamanho das partículas. O tipo, tamanho e graduação dos agregados têm um impacto significativo na resistência ao desgaste, estabilidade e capacidade de drenagem da mistura. Os materiais granulares também são muito utilizados como constituintes de misturas asfálticas. Nesse caso, as partículas sólidas são agregadas por meio de um ligante betuminoso, formando uma mistura homogênea (Hamlat, 2007).

As frações granulares são o principal constituinte das misturas asfálticas, representando aproximadamente 95 % do peso total do material e 80 % a 85 % do seu volume. Também denominado pelo termo agregado, pode ser definido como um conjunto de partículas de matéria sólida, provenientes de fontes naturais, como depósitos aluviais, ou extraídas de pedreiras por procedimentos mecânicos, podendo surgir também de materiais reciclados ou de processos desenvolvidos integralmente na indústria. Possuem diversos tamanhos, formas e naturezas (Aidara, 2016).

Para Castelo Branco et al., (2006) e Momm (1998) as dimensões, formas, angularidade e textura superficial das partículas dos solos e granulares influenciam na construção do pavimento como um todo e na sua vida útil. Desta forma, os materiais granulares para a produção de misturas asfálticas, devem ser devidamente caracterizadas antes da sua seleção, considerando sua distribuição granulométrica: o tamanho, a dureza, a forma, a graduação, a aspereza da superfície, a sanidade, a adesividade e absorção das partículas.

A dureza está relacionada com a resistência ao choque e ao desgaste do pavimento decorrido da ação do tráfego e movimento de partículas. Ambas as propriedades são avaliadas

através de ensaios normalizados pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), como o ensaio Los Angeles e Treton. A sanidade diz respeito à resistência ao intemperismo que o granular possui, sendo avaliada através da imersão do agregado em uma solução padrão de sulfato de sódio ou magnésio (DNIT-ES 031, 2006).

Através do peneiramento, feito com peneiras de aberturas padronizadas, é possível determinar o tamanho das partículas. A forma dos granulares é uma particularidade da rocha-mãe, que pode ser um pouco modificada pelas técnicas de britagem. Com vista ao objetivo de privilegiar o critério de aderência, a seleção dos granulares recaiu sobre aqueles com forma subangulares com superfície áspera e resistente à abrasão. A adesividade ao ligante identifica a capacidade do granular deixar-se aderir pelo asfalto (Momm, 1998).

Quanto ao tamanho da partícula, os diâmetros das peneiras que permitem distinguir as diferentes categorias são diferentes, conforme o referencial normativo considerado. Assim, de acordo com os padrões franceses (AFNOR NF EN 13043, 2003), as diferentes classes granulares são definidas por um tamanho de grão mínimo ( $d$ ) e máximo ( $D$ ). A razão  $d/D$  é definida como 1,4 para evitar dispersão excessiva de tamanho dentro de cada classe.

Os tamanhos dos grãos são determinados a partir da análise da distribuição do tamanho de partícula usando um arranjo de peneiras padrão. Três grandes classes são definidas pela Norma Europeia supracitada (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Classes granulares.

Classes	D (mm)	d (mm)
Grosso (cascalho)	$\leq 45$	$> 2$
Médio (areia)	$\leq 2$	$> 0,063$
Fino (fíler)	$\leq 0,063$	-

Fonte: Adaptado de AFNOR NF EN 13043 (2003).

A partir da Tabela 2.1, tem-se que além dos granulares graúdos e médios, partículas finas com diâmetro inferior a  $63 \mu\text{m}$ , chamadas de fíler, são adicionadas à mistura. Essas partículas devem ser analisadas com maior atenção, pois podem estar presentes na superfície de todos os diâmetros, normalmente aderidas sob a forma de poeira.

Dada a sua grande área superficial específica, os finos interagem com grande parte do ligante betuminoso constituindo o mástique, que confere coesão à mistura asfáltica. As propriedades do mástique, produzidas pela interação elétrica do conjunto fino-ligante, são determinantes para a boa resistência e comportamento mecânico das formulações produzidas (Sohm, 2011; Di Benedetto e Corté, 2004).

Dois tipos de finos são considerados pela Norma Europeia (AFNOR NF EN 13043, 2003):

- Finos naturais: dispostos naturalmente no ambiente ou oriundo de recursos naturais com ajustes em tamanhos desejados por processo de britagem de blocos de rocha. Estão contidos principalmente em materiais caracterizados como areia. Representa normalmente 4,0 % a 7,0 % da massa total da mistura asfáltica;
- Finos artificiais: fabricados industrialmente para atingir desempenhos mecânicos específicos, e melhorar ou aportar propriedades não atingidas por insumos naturais. Representam cerca de 0,5 % a 6,0 % da massa da mistura asfáltica. O mais utilizado é a cal hidratada, por apresentar boa interação elétrica com o ligante betuminoso.

A composição mineralógica, e a interação do granular na mistura asfáltica, dependem de alguns fatores principalmente a capacidade do granular em se unir ao ligante betuminoso, garantindo boa resistência à degradação. A maioria dos granulares é formada por um composto de vários minerais que podem ter características muito diferentes, outra característica que afeta a afinidade (adesividade) do ligante ao agregado, é a carga elétrica do granular, inerente ao tipo da rocha matriz. Estes aspectos os classificam em eletronegativos e eletropositivos, respectivamente (Tapsoba, 2012), (Figura 2.5).

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



Fonte: Adaptado de Santana (1992).

Os granulares minerais ferromagnéticos (básicos) são mais sensíveis ao desgaste e à fragmentação do que os ricos em feldspatos e quartzo (ácidos), em que estes últimos por serem mais duros, fornecem propriedades de alta resistência. No caso das ocorrências graníticas, gnáissicas e alguns arenitos, são normalmente usados na formulação de misturas betuminosas, devido apresentarem elevada resistência à fragmentação (Cardona, 2016).

Contudo, a principal influência da natureza petrográfica do granular nas misturas asfálticas diz respeito à interação elétrica com o ligante betuminoso, para fins de adesão do conjunto. Os calcários, ao contrário dos materiais silicosos, apresentam boa adesão. Além disso, as partículas mais sensíveis à degradação por umidade são aquelas que contêm quantidades significativas de quartzo, ou seja, ricos em sílica (Siroma, 2018).

### 2.2.2 Ligante betuminoso

O ligante betuminoso é o agente aglutinante responsável por gerar e manter a coesão do conjunto granular-ligante. É uma substância de cor azul muito escura, próximo à preta, obtida do refino de óleos crus (petróleo bruto) em torres de destilação fracionária. Geralmente representa menos de 6,0 % em massa dos constituintes da mistura asfáltica convencional, quando formuladas com graduação densa, e cerca de 10 % a 15 % do seu volume. Porém, é o insumo que confere as propriedades viscoelásticas do material finalmente acabado (Kakpo, 2017).

O ligante betuminoso é composto praticamente por Carbono (80 % a 87 %) e Hidrogênio (H) (8 % a 12 %). Além disso, há uma pequena quantidade de heteroátomos Enxofre (S), Nitrogênio (N) e Oxigênio (O) e vestígios de metais Vanádio (V), Níquel (Ni) e Ferro (F). Dentre esses elementos, os heteroátomos possuem um papel importante nas propriedades químicas e físicas do ligante, já que sua taxa aumenta com o envelhecimento, permitindo a associação de asfaltenos, induzindo assim o endurecimento do ligante betuminoso (Lesueur, 2009), conforme demonstrado abaixo Tabela 2.2.

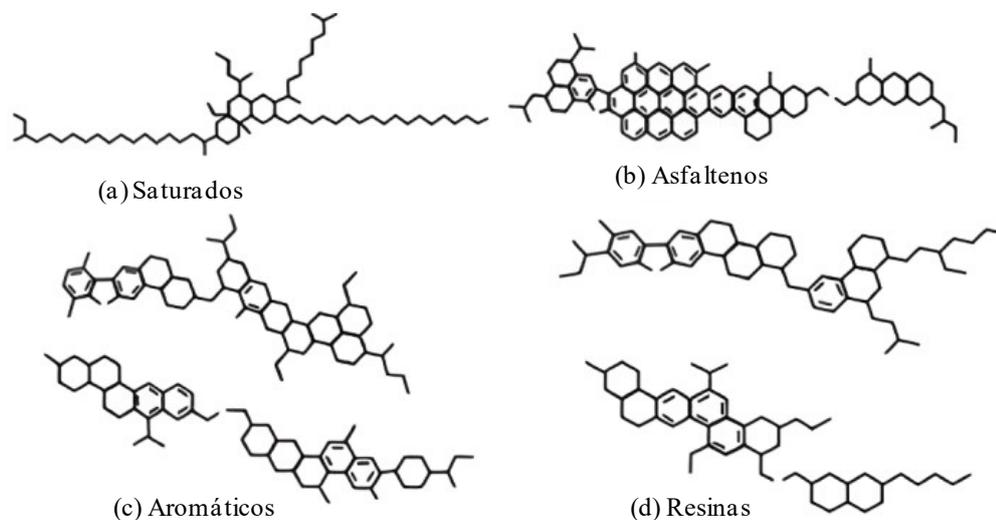
Tabela 2.2 - Composição química dos ligantes betuminosos convencionais.

Origem	Mexicano	Boscan Venezuela	Califórnia Estados Unidos	Cabiúnas Brasil	Cabiúnas Brasil	Árabe Leve Oriente Médio
Refinaria	-	RLAM Bahia	-	REGAP Minas Gerais	REPLAN São Paulo	REDUC Rio de Janeiro
Carbono (%)	83,8	82,9	86,8	86,5	85,4	83,9
Hidrogênio (%)	9,9	10,4	10,9	11,5	10,9	9,8
Nitrogênio (%)	0,3	0,8	1,1	0,9	0,9	0,5
Enxofre (%)	5,2	5,4	1,0	0,9	2,1	4,4
Oxigênio (%)	0,8	0,3	0,2	0,2	0,7	1,4
Vanádio (ppm)	180	1380	4	38	210	78
Níquel (ppm)	22	109	6	32	66	24

Fonte: Adaptado de Leite e Menezes (2003).

É muito difícil determinar uma fórmula química precisa do ligante betuminoso, devido à sua alta complexidade. Um método largamente utilizado é a quantificação de estruturas moleculares médias, onde este procedimento consiste em separar o ligante betuminoso em diferentes frações conforme sua solubilidade em solventes de diferentes polaridades, denominado de frações SARA (saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos) (Mouazen, 2011). Na Figura 2.6 são ilustradas as representações das cadeias de hidrocarbonetos.

Figura 2.6 - Representação esquemática dos grupos fracionários presentes no ligante betuminoso.



Fonte: Adaptado de Shell (2003).

Os três primeiros constituem o conjunto de frações maltênicas, que conferem elasticidade à composição e constituem o meio coloidal do material. Os asfaltenos aportam rigidez e viscosidade à composição, de forma crescente à medida que aumenta o seu percentual de participação (Lambert, 2018).

No que diz respeito ao seu comportamento mecânico, o ligante betuminoso é caracterizado principalmente pela sua suscetibilidade térmica e cinética, dependendo da combinação de fatores como temperatura (T), amplitude de deformação ( $\epsilon$ ) e número de ciclos de carregamento aplicados (N) (Olard et al., 2005).

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

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

### 2.2.3 Interação granular-ligante

A ancoragem mecânica explica a ligação grânulo-ligante betuminoso pela textura da superfície e pelas características físicas do agregado. O ligante betuminoso penetra nas irregularidades da superfície rugosa do agregado; as forças de coesão e residual geradas pelo resfriamento do ligante fornecem uma rede de engrenagens que são adicionadas à âncora para a absorção do ligante no poro agregado, unindo fortemente o ligante e os minerais (Ishai et al., 1977).

Conforme Liu e Amirkhanian, (2012), a interação granular-ligante é influenciada por diversas propriedades dos materiais constituintes, como a composição química, a textura superficial e a temperatura. Composição química dos materiais: A composição química dos agregados e do ligante pode afetar a interação entre eles. Por exemplo, agregados que contêm impurezas como sílica e alumina podem ter uma adesão reduzida ao ligante.

Textura superficial dos materiais: A textura superficial dos agregados também pode influenciar a adesão ao ligante. Estudos mostram que agregados com uma textura mais rugosa tendem a ter uma melhor adesão ao ligante (Zhang et al., 2016).

Temperatura dos materiais: A temperatura de mistura e compactação dos materiais também pode afetar a interação granular-ligante. Estudos mostram que a adesão do ligante aos agregados é reduzida em temperaturas mais baixas, devido à viscosidade mais elevada do ligante. Por outro lado, temperaturas muito elevadas podem resultar em uma redução da coesão do ligante e, conseqüentemente, da adesão aos agregados, (Hesp et al., 2015).

O ligante betuminoso é um material complexo, composto de diversos tipos de componentes e grupos funcionais. Estudos foram realizados visando analisar a afinidade de cada um desses componentes presentes no ligante com a superfície de diversos granulares, como granito, calcário, cascalho, entre outros. Através desses resultados, os componentes que apresentaram uma maior afinidade, ordenadas em forma decrescente são: sulfóxidos; ácidos carboxílicos; bases nitrogenadas; fenóis; cetonas; pirrol; e anéis aromáticos (Petersen e Plancher, 1998).

Conforme Curtis e Brannan (1992), quando há incidência de água em misturas asfálticas, os componentes que possuíam maior afinidade, como os ácidos carboxílicos e os sulfóxidos, foram imediatamente desprendidos da superfície do agregado, enquanto componentes fenólicos e de base nitrogenada resistiram de maneira eficaz aos efeitos da água. Logo se notou que os componentes que possuíam maior afinidade com os agregados eram os mais suscetíveis à presença da água.

Em misturas asfálticas, a adesividade entre ligante e agregado é efetivada devido a duas características: a capacidade do ligante de envolver o agregado e a habilidade deste, por sua vez, de promover a aderência do ligante à sua superfície. A primeira propriedade é conhecida como adesividade ativa e a segunda como adesividade passiva. A aderência entre o agregado mineral e a mistura asfáltica depende do estreito contato entre os dois materiais e da atração de suas superfícies (Lytton, 2004).

- Adesividade ativa

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 encontrados nesse tipo de interação (Petersen e Plancher, 1998; Curtis e Brannan, 1992).

Durante a produção das misturas asfálticas, a molhabilidade dos granulares pelo ligante betuminoso é uma etapa essencial. Para tanto, o ligante deve estar suficientemente líquido, a fim de que possa se espalhar da melhor forma possível sobre a superfície das partículas. Além disso, os granulares devem possuir temperatura adequada para manter a fluidez do ligante betuminoso na superfície de contato, facilitando também a penetração parcial do ligante em seus poros, que garante ancoragem interfacial ao conjunto (Castañeda, 2004).

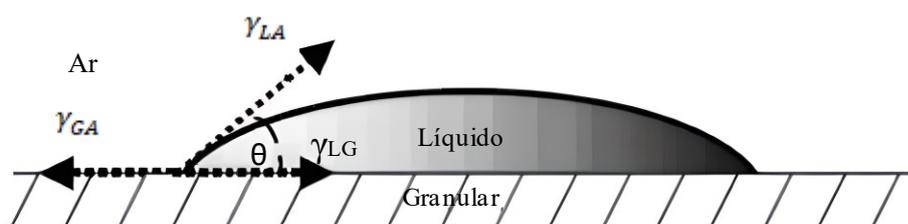
Quando se derrama um líquido sobre a superfície de um sólido, não há uma molhagem completa da superfície, mas ocorre uma conformação sobre a estrutura em que atua até que atinja um estado de equilíbrio. Este estado, caracterizado pelo ângulo de contato líquido-sólido, foi descrito em 1805 por Young, em função das tensões de superfície dos materiais existentes (Kinloch, 1990), conforme a Equação 2.1 e demonstrado na Figura 2.7.

$$\gamma_{LG} - \gamma_{GA} + \gamma_{LA} \cos \theta = 0 \quad (2.1)$$

Onde:

- $\gamma_{LG}$  : tensão interfacial líquido-granular;
- $\gamma_{GA}$  : tensão superficial do granular;
- $\gamma_{LA}$  : tensão superficial do líquido;
- $\theta$  : ângulo formado entre os vetores da  $\gamma_{LG}$  e  $\gamma_{LA}$ .

Figura 2.7 - Molhagem de um sólido por um líquido.



Fonte: Castañeda (2004).

A tensão superficial é o conjunto de forças moleculares que permite ao líquido ou ao sólido conservar seu estado (coesão) e a tensão interfacial é a força resultante do equilíbrio de dois corpos existentes e que geram interface. Esta tensão determina a força de adesão. Quando o ângulo de contato é superior a  $90^\circ$ , o líquido não molha o sólido. Um ângulo de  $0^\circ$  se forma quando o líquido molha completamente a superfície do sólido. A molhagem se produz quando existem fracas tensões de superfície no sólido e no líquido ( $\gamma_{GA}$  e  $\gamma_{LA}$ ) e uma tensão interfacial ( $\gamma_{LG}$ ) relativamente elevada (Castañeda, 2004).

- Adesividade passiva

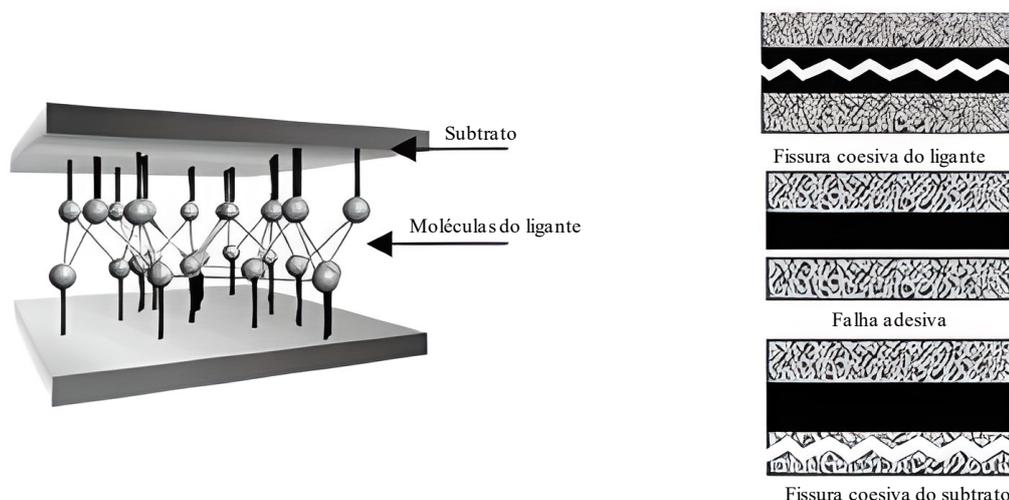
A segunda etapa do processo de interação do conjunto granular-ligante betuminoso, denominada de adesividade passiva, é muito importante no que diz respeito à durabilidade da mistura asfáltica. Essa fase corresponde à força de interação na interface entre dois materiais na presença de água. Portanto, a adesividade passiva é a capacidade do ligante betuminoso de permanecer ancorado à superfície do granular sem o risco de deslocamento, devido à ação da água e do tráfego durante a sua vida útil de serviço (Pasandín e Perez, 2015).

Uma falha adesiva presente na interface do referido conjunto na presença de água, pode ser explicada por uma baixa adesão inicial, ainda na fase ativa, em razão de pouca molhabilidade, ou por uma perda gradual desta aderência, na fase passiva, devido ao enfraquecimento das forças de interação entre os compostos. Quanto à adesão inicial, algumas causas físicas e químicas (Lamothe, 2014).

As propriedades químicas presentes nos materiais que compõem as misturas asfálticas têm grande influência na qualidade da adesividade passiva que rege a interação granular-ligante betuminoso ou granular-mástique quando há incidência de água na mistura asfáltica. Um exemplo disso é a boa adesividade constatada entre ligantes asfálticos, que possui um caráter ácido devido à presença de ácidos naftênicos em sua composição, com agregados calcários, que são compostos por carbonatos de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), quando comparados com granulares ácidos, como granito, quartzos e compostos de Silicatos ( $\text{SiO}_3$ ) (Castañeda, 2004).

A adesividade passiva é à força de ligação existente na interface entre dois materiais na presença da água, que pode ser avaliada efetuando um teste de adesividade. A superfície de falha pode se apresentar de três formas (Figura 2.8): por coesão do ligante betuminoso, quando a fissura ocorre nas moléculas que o constitui; por adesão, quando a separação se produz na interface entre o substrato e o ligante betuminoso; e por coesão do substrato, quando a fissura se produz dentro das moléculas do substrato (Ramond, 1977).

Figura 2.8 - Superfícies de falha de uniões adesivas.



Fonte: Adaptado de Castañeda (2004).

Como demonstrado, existem várias causas e mecanismos que conduzem à perda de adesividade na interface do conjunto granular-ligante betuminoso, tornando difícil determinar quais propriedades dos constituintes têm a maior influência no ganho ou perda de adesão.

De acordo com Ramond (1977), no que dizem respeito à adesividade, as características físicas e químicas do granular são as que mais afetam a resistência à decapagem do ligante betuminoso. Além disso, ligantes com elevada viscosidade possuem maior resistência à decapagem, pois são mais resistentes à remoção pela água.

#### 2.2.4 Misturas asfálticas de caráter funcional

De acordo com Momm (1998), as misturas asfálticas para camadas estruturais devem ter propriedades concernentes aos fenômenos físicos que afetam o desempenho dos materiais e propriedades relativas aos parâmetros fundamentais ao dimensionamento (a rigidez e as deformações admissíveis). Quanto aos fenômenos físicos, as misturas são preparadas para apresentarem habilidade à compacidade (certos limiares de trabalhabilidade), resistência ao efeito da presença da água (dentro de certos limiares), resistência à deformação permanente.

De acordo com Manuel LPC, 2007, as principais misturas que integram um caráter funcional são:

- Béton Bitumineux Semi-Grenus (BBSG): Objeto desta pesquisa possui uma elevada quantidade de granulares e é formulada para ser empregada como

camada de rolamento, ou de ligação, com espessuras compreendidas entre 5 cm a 9 cm. Esses tipos de mistura são classificados conforme sua resistência à deformação permanente, que pode ser Classe 1; Classe 2; e Classe 3;

- *Béton Bitumineux à Module Élevé (BBME)*: Possui seu módulo superior ao da mistura BBSG, entretanto é empregada para as mesmas camadas com os mesmos limites de espessura. Esse tipo de mistura asfáltica é calculado conforme sua resistência à deformação permanente e pelo seu módulo;
- *Béton Bitumineux pour chaussée souples à faible trafic (BBS)*: São formuladas para serem implantadas em camadas superficiais para estruturas de pavimento flexível que suporta baixo tráfego. Diferente das outras citadas até aqui, os ensaios preconizados para dessas misturas são apenas as integrantes do Nível 1;
- *Béton Bitumineux Mince (BBM)*: Possui espessura média entre 3 cm a 5 cm e sua granulometria é geralmente descontínua. Nesse caso as categorias A, B e C são em função do seu intervalo de descontinuidade. Nesse caso eles são classificados de acordo com sua resistência à deformação permanente;
- *Béton Bitumineux Très Mince (BBTM)*: Possui espessura média de 2 cm a 3 cm com uma curva granulométrica geralmente descontínua. Essas misturas são classificadas conforme seu teor de vazios a 25 giros da Prensa de Compactação Giratória (PCG);
- *Béton Bitumineux Drainant (BBDr)*: São misturas que possuem um teor de vazios comunicantes elevados, permitindo assim a passagem de água e de ar, visando assim dotar a mistura asfáltica com característica drenantes e redutora de ruídos. Essa mistura pode ser aplicada em camadas de rolamento com espessuras entre 3 cm a 4 cm para BBDr6 ou entre 4 cm a 5cm para BBDr10. Esse tipo de mistura pode ser classificado entre tipo 1 e tipo 2, que depende do teor de vazios obtidos pelo ensaio da PCG.

As misturas asfálticas de caráter funcional são empregadas geralmente na camada de superfície, que compreende as camadas de rolamento e a de ligação. Além de protegerem a estrutura do pavimento contra intempéries e das solicitações provenientes do tráfego, ainda deve possuir boa qualidade e garantir o atingimento dos seguintes parâmetros:

- Segurança: Está relacionada à macrotextura superficial, que fornece uma aderência pneu/pavimento adequada, além de garantir um escoamento rápido de águas superficiais, evitando assim a hidroplanagem;
- Conforto: Fundamentado na regularidade da via, que não gere um desconforto ao usuário durante seu deslocamento;
- Economia: Ao trafegar em uma via que se enquadra nos parâmetros citados anteriormente, o desgaste do carro e o consumo de combustível serão muito menores, quando comparado ao tráfego de uma via cheia de irregularidades.

## CAPÍTULO 3

### NOÇÕES GERAIS SOBRE ESCÓRIA DE CHUMBO-ÁCIDO

O objetivo deste capítulo é apresentar a fundamentação sobre os aspectos essenciais das baterias chumbo-ácido. Serão discutidas as propriedades físicas e químicas do chumbo, ciclo e ocorrência na natureza, cenário mundial, principais utilizações, fontes geradoras de resíduos, legislação ambiental, além de aspectos relacionados à sua toxidez.

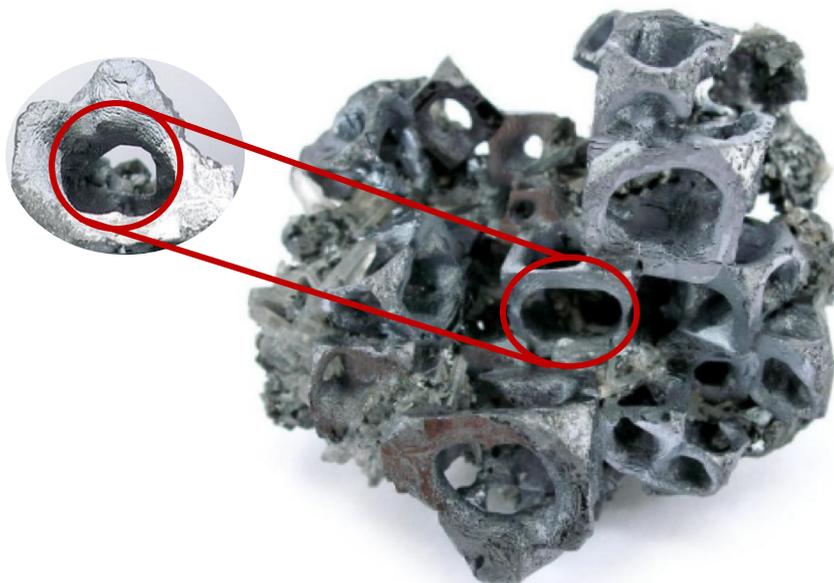
#### 3.1 O CHUMBO

O Chumbo (Pb) é utilizado pelo homem há mais de 5000 anos e é o sexto metal de maior utilização, com grande potencial para se manter nesse cenário, principalmente na utilização em baterias chumbo-ácido. No Brasil não existe produção de chumbo primário, entretanto, toda a matéria prima para a fabricação de baterias é oriunda de um processo solidificado de reciclagem e reutilização das sucatas (Gomes e Heck, 2018).

O chumbo é um dos metais mais antigos usados, pelo homem, e muitas das primitivas aplicações têm persistido através dos séculos. Era conhecido pelos antigos egípcios, que o utilizaram há mais de oito mil anos. Os Jardins Suspensos da Babilônia eram assoalhados com folhas de chumbo soldadas e as pedras das pontes eram ligadas por ganchos de ferro soldados com chumbo. O chumbo tem a propriedade singular de absorver radiações de ondas curtas, tais como, as emanações do rádio ou produzidas pelos raios-X. As características demonstradas e a facilidade de se combinar com outros elementos, fazem do chumbo um dos metais de maior emprego na indústria moderna, tanto puro, como sob a forma de composto. É um dos principais metais do grupo dos não ferrosos (Fernandes et al., 2011).

A produção de chumbo “puro” pode ocorrer de duas maneiras: a primeira através da extração do chumbo nos minérios (denominado de chumbo primário), tais como, a galena (principal minério) que se cristaliza no sistema cúbico, quase sempre em octaedros conforme demonstrado na Figura 3.1, cerussita, anglesita, piromorfita, vanadinita e a wulfenita; a segunda maneira é por meio de reciclagem (denominado de chumbo secundário), principalmente de baterias de chumbo-ácido retornando à sua forma “pura” (Diniz, 2009).

Figura 3.1 - Galena minério primário de Chumbo (Pb).



Fonte: Wikimedia Commons (2010).

### 3.1.1 Reservas nacionais de chumbo primário

De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2020), as reservas de chumbo no Brasil totalizavam cerca de 4,7 milhões de toneladas. Esse número corresponde a aproximadamente 3,6 % das reservas mundiais desse mineral. As maiores reservas de chumbo no Brasil estão localizadas nos estados de Minas Gerais, Bahia, São Paulo, Paraná e Mato Grosso do Sul, sendo que a maior parte se encontra na forma de minério oxidado.

Atualmente, estão fazendo uma reavaliação das reservas, inclusive do rejeito que será aproveitado devido à presença de chumbo, cádmio, ouro, ferro e prata. De acordo com a Agência Nacional de Mineração (ANM), a produção brasileira de concentrado de chumbo está, atualmente, restrita à mina de Morro Agudo, localizada no município de Paracatu, Minas Gerais (ANM, 2020).

Em 2020, o consumo de chumbo no Brasil foi de aproximadamente 116.510 toneladas, dos quais cerca de 40 % foram utilizados na produção de baterias automotivas. Sendo que em 2019 a importação de produtos manufaturados contendo chumbo foi de aproximadamente 59.672 toneladas (DNPM, 2020).

Portanto, é possível observar que a produção primária de chumbo no Brasil é bastante limitada, conforme apresentado na tabela 3.1, e a maior parte do consumo é suprida através de importações ou da remanufatura, principalmente de baterias automotivas.

Tabela 3.1 - Evolução das reservas de chumbo do Brasil.

Ano	Reservas de chumbo (milhões de toneladas)
2017	3,6
2018	3,1
2019	2,8
2020	2,3

Fonte: Adaptado de ABMM (2021).

No Brasil, a produção de chumbo primário é realizada por apenas uma empresa, a Companhia Brasileira de Chumbo (CBC), que é responsável por cerca de 95 % da produção nacional de chumbo primário. A CBC opera uma fábrica de chumbo primário em Santo Amaro, no estado da Bahia, que utiliza tecnologia de forno de redução com sopro de ar para produzir chumbo metálico, que é posteriormente oxidado para produzir o chumbo primário (CBC, 2021).

### 3.1.2 A produção nacional de chumbo secundário

O país é franco importador de chumbo desde 1960. A geologia brasileira não é favorável à ocorrência de jazidas de chumbo primário, bem como de zinco, atualmente a principal fonte de chumbo, na produção primária não representa mais de 8 % a 10 % do consumo interno, sendo o concentrado mineral exportado integralmente, pois as usinas metalúrgicas de chumbo foram desativadas em 1996. O suprimento de chumbo é atendido em parte pela reciclagem de sucata de chumbo, complementado pela importação de chumbo eletrolítico (Paoliello e Chasin, 2001).

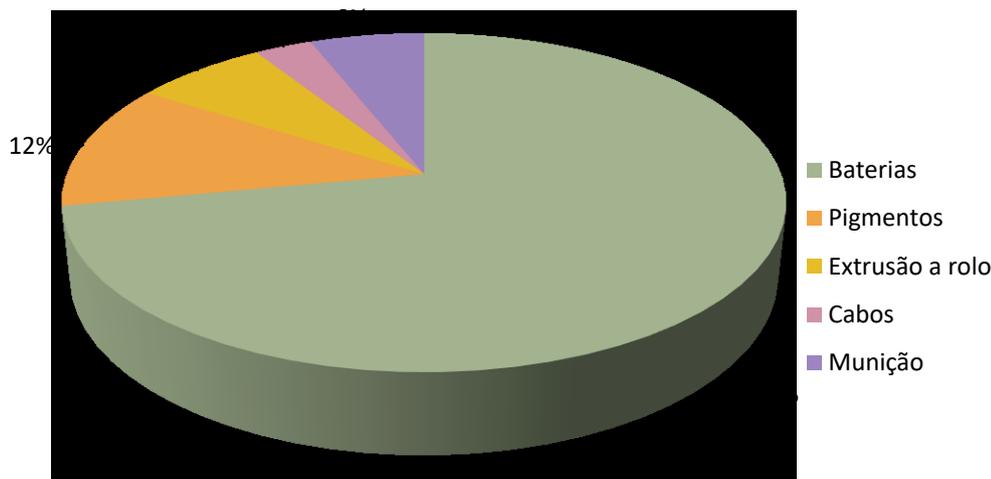
No Brasil a produção de chumbo é toda oriunda de reciclagem, principalmente dos resíduos de baterias chumbo-ácido, sendo a escória resultante classificada como resíduo perigoso, segundo a ABNT NBR 10004 (2004).

O mais amplo uso do chumbo é na fabricação de acumuladores elétricos. É componente importante em ligas para solda, condutores elétricos, em produtos laminados, munição, bem como bronze e latão (ICZ, 2022).

A escória de chumbo-ácido é um resíduo industrial, que é obtido pela reciclagem de baterias, também conhecido com produção secundária de chumbo, as fontes primárias de chumbo secundário são sucata de chumbo, que são sucatas de baterias veiculares, escória de chumbo-ácido que são adquiridas como resíduos de outros processos metalúrgicos e invólucro de chumbo que são cabos telefônicos (Sobral et al., 2012).

A maior destinação do chumbo é para a produção de baterias chumbo-ácido, que representam cerca de 80 % do consumo mundial de chumbo (ILA, 2021), como pode ser visto na figura 3.2, que apresenta um gráfico das suas diversas aplicações.

Figura 3.2 - Usos do chumbo.



Fonte: Adaptado de Paoliello e Chasin (2001).

A produção primária de chumbo no Brasil é relativamente baixa e a maior parte da demanda é suprida através da importação de concentrados de chumbo e de produtos manufaturados contendo chumbo. De acordo com o (DNPM), em 2019, a produção de chumbo primário no Brasil foi de apenas 25 toneladas, enquanto a importação de concentrados de chumbo foi de 245.286 toneladas.

A reciclagem do chumbo desempenha um papel fundamental na indústria, permitindo a reutilização dos materiais e reduzindo a dependência das reservas naturais. Segundo dados do International Lead and Zinc Study Group (ILZSG), em 2020, a taxa global de reciclagem de chumbo foi de aproximadamente 82 %. Isso significa que a maioria do chumbo consumido no mundo é proveniente de fontes recicladas.

De acordo com Bezerra (2021), No Brasil, por exemplo, a importação do chumbo primário corresponde a 47 % do consumo do país, ficando 53 % por conta da reciclagem. No entanto, o país enfrenta graves problemas no que diz respeito ao chumbo em relação ao conhecimento e tecnologia para coleta / reciclagem seletiva; descarte em locais inapropriados; e a falta de ferramentas para implantação de legislação reguladora.

Em consequência desses fatores, foi assinado em 14 de agosto de 2019, um acordo entre ABRABAT, a Associação Nacional dos Sincopistas do Brasil (SINCOPEÇAS-BR) e o Instituto Brasileiro de Energia Reciclável (IBER) para a implantação do sistema de logística reversa dessas baterias. Este acordo foi pautado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída por Lei em 2010.

Observando-se a Tabela 3.2, percebe-se a importância da produção de chumbo secundário no Brasil que, graças a várias recicladoras instaladas por todo país são responsáveis pelo abastecendo do mercado interno (ANM, 2020):

Tabela 3.2 - Balanço nacional da produção secundária de minério refinado de chumbo.

Ano	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Metal secundário (t)	165.397	151.964	160.393	152.161	156.186	166.695	158.972	145.882	170.773

Fonte: Agência Nacional de Mineração (ANM) (2020).

Nesse contexto, um dos mercados promissores e importantes na reciclagem atualmente é a mineração urbana, conhecido como uma mina de valiosos materiais recicláveis. A mineração urbana é a recirculação ou reciclagem de produtos e materiais pós-consumo na forma de matéria-prima secundária, como forma de se minimizar os impactos ambientais, valorizar os resíduos, bem como criar e otimizar os benefícios econômicos em prol de um ambiente sustentável (Xavier e Lins 2018).

### 3.1.3 Cenário internacional

#### 3.1.3.1 Produção mundial de chumbo primário e secundário

A produção de baterias de chumbo-ácido (Lead Acid Battery - LAB) representa 85 % do uso global de chumbo, uma vez que elas são usadas em quase todos os 1,3 bilhões de veículos do mundo em uso e na construção de energia de reserva fornecida (Lee e Tan, 2019).

A Global Lead and Zinc Market Analysis and Insight calcula que a produção secundária de chumbo representou cerca de 50 % do total global da produção refinada de chumbo em 1990, mas essa participação agora aumentou para pouco mais de 75 %. Isso representa um aumento de cerca de 3 Mt em 1990 para 10 Mt em 2018. Ao mesmo tempo, a produção global de mina de chumbo aumentou de 3,2 Mt (chumbo em concentrados de chumbo e granel) para apenas 3,4 Mt em 2018 (Roberts, 2020).

De acordo com as estimativas do ILZSG (2019) e do United States Geological Survey-USGS (2021), a produção mundial de minério de chumbo primário (mina), em metal contido, atingiu no ano de 2018 um total de 11,1 milhões de toneladas, sendo o continente asiático o maior produtor, superando o continente americano. Também verifica-se que os continentes da

Europa, África e a Oceania estão mantendo suas produções de minério em comparação com a América, conforme está apresentado na Tabela 3.3 abaixo.

Tabela 3.3 - Produção mundial de minério de chumbo no período de 2010- 2021 <sup>(1)</sup>.

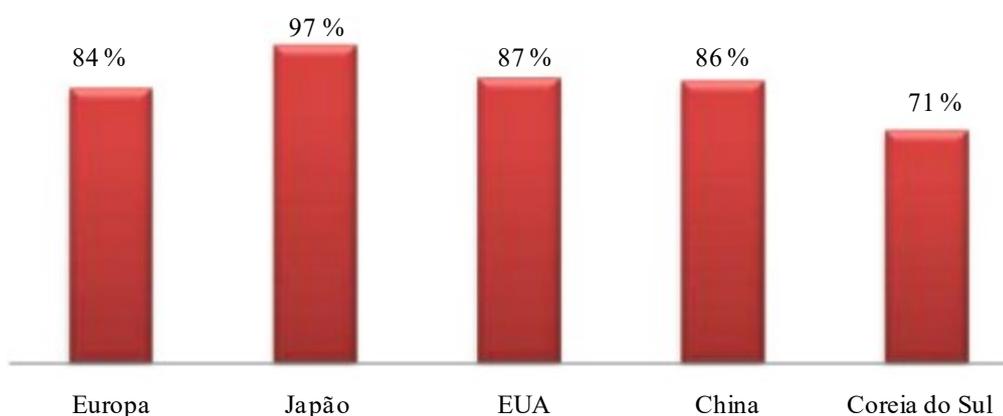
País	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
China	4.480	4.390	4.460	4.600	4.900	5.330	5.800	6.240	5.940	5.690	5.600	5.800
Austrália	831	745	740	739	680	734	800	820	821	772	710	690
Estados Unidos	372	358	331	304	289	259	270	288	270	265	242	240
Índia	560	524	523	503	487	446	505	515	526	518	489	480
Peru	669	668	693	679	658	690	709	692	712	710	704	680

Fonte: Adaptado de United States Geological Survey (USGS) (2021).

Nota: <sup>(1)</sup> Dados em metal contido e inclui minérios e concentrados de chumbo e outros minérios e concentrados, tendo o chumbo como bi-produto ou subproduto.

De acordo com ILZSG (2020), as (LABs) são amplamente utilizadas para armazenamento de energia, força motriz e partida/iluminação/ignição de veículos. Quase todos os ULABs podem ser coletados, classificadas e recicladas como consequência de seu valor econômico, alta reciclabilidade e vários regulamentos existentes sobre reciclagem obrigatória. Esse número é ainda maior nos principais países usuários de chumbo, com Japão e Estados Unidos da América em 97 % e 87 %, respectivamente como mostra a Figura 3.3 abaixo.

Figura 3.3 - Percentual de reciclagem de chumbo contabilizado pela produção LAB nos principais países usuários de chumbo.



Fonte: Lead and Zinc Study Group (ILZSG) (2021).

Segundo o ILZSG, a produção secundária do chumbo, em 2019, representou 88 % da produção mundial do chumbo refinado. Isto demonstra o grau de sustentabilidade que a sociedade mundial tem buscado para garantir o futuro da humanidade. Ainda de acordo com a

ILZSG, a participação da produção do metal secundário no consumo mundial de chumbo, conseguida através de recuperação de sucatas, tem crescido em relação ao metal produzido, e a recuperação mundial de chumbo secundário entre os anos de 2015 até 2019 por continente pode ser observada na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Balanço da produção mundial de chumbo por via secundária (¹).

Continente	2015	2016	2017	2018	2019
Ásia	2.926	3.161	3.503	3.717	2.745
América	1.819	1.881	1.936	1.951	1.460
Europa	1.511	1.529	1.625	1.636	1.194
África	113	121	122	125	102
Oceania	45	41	43	33	21

Fonte: Adaptado de Lead and Zinc Study Group (ILZSG) (2019).

Unidade: 10³ t.

Nota (¹): Chumbo refinado e ligas de chumbo (conteúdo de chumbo) produzido a partir de materiais secundários (sucata e refugo).

### 3.2 BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

Inventada pelo francês, Gastón Plante, em 1859, a bateria de chumbo-ácido ou acumulador de chumbo é uma associação de pilhas, chamadas de elementos, na linguagem da indústria de baterias, ligadas em série. A bateria de chumbo-ácido é constituída de dois eletrodos; um de chumbo esponjoso e o outro de dióxido de chumbo em pó, ambos mergulhados em uma solução de ácido sulfúrico dentro de uma malha de liga chumbo-antimônio (Pavlov, 2017).

Esta liga é mais resistente à corrosão que o chumbo puro. Quando o circuito externo é fechado, conectando eletricamente os terminais, a bateria entra em funcionamento (descarga), ocorrendo a semirreação de oxidação no chumbo e a de redução no dióxido de chumbo. Durante o funcionamento normal de um automóvel, a bateria fornece eletricidade para dar partida; para acender os faróis; ligar o rádio, limpador de para-brisa, luzes de direção, buzina, etc. e recebe energia do gerador para se recarregar (Clube da Química, 2018).

As baterias de chumbo-ácido são o tipo mais antigo de bateria recarregável e têm sido amplamente utilizadas em muitos campos, como automóveis, veículos elétricos e armazenamento de energia devido às características de grande relação peso / potência e baixo custo (Kumar, 2017).

As baterias de chumbo-ácido têm as seguintes vantagens em comparação com outros tipos de baterias: tecnologia madura, o maior mercado da indústria global, preço baixo, boa estabilidade, alta segurança e manutenção conveniente (Shi et al., 2020).

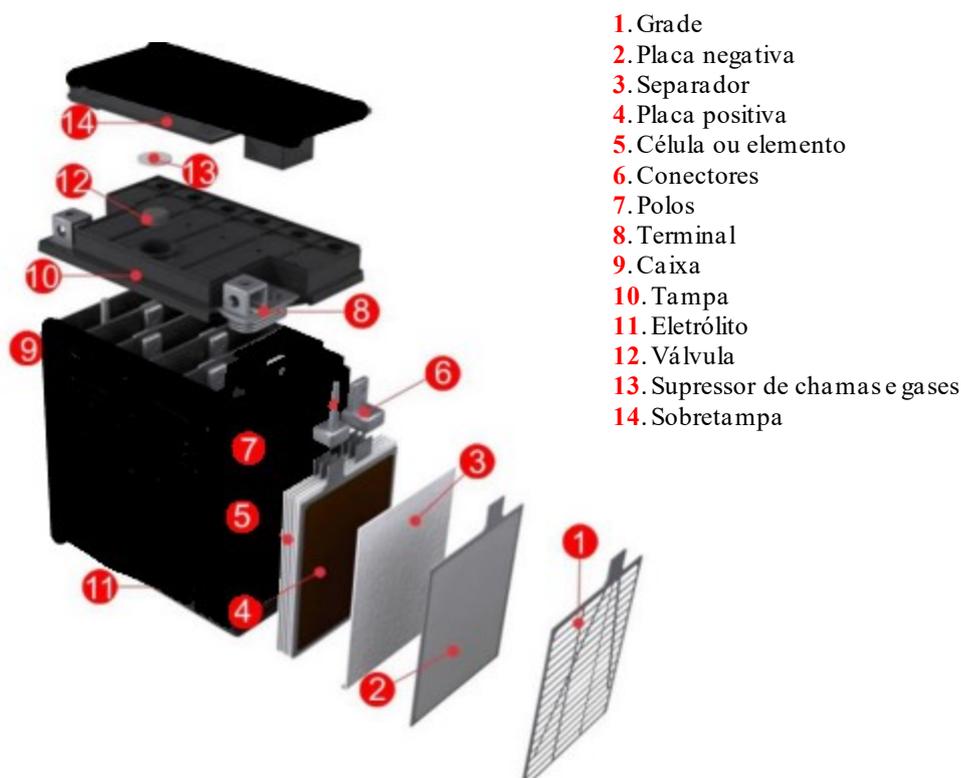
Elas são usadas como um sistema de armazenamento de energia porque são compactas, implantáveis e fornecem uma resposta imediata à entrada e saída de corrente (Varshney et al., 2020). Geralmente, o ânodo é feito de chumbo, o cátodo é de dióxido de chumbo e esses eletrodos são mergulhados em uma solução eletrolítica de ácido sulfúrico (Mihaila et al., 2020).

De acordo com Cabral Neto (2016), os principais componentes de uma bateria de chumbo-ácido são:

- Placas positivas e negativas - composição entre grades metálicas e massa de material ativo responsável pelas reações químicas;
- Separadores - envelopes plásticos que impedem o contato direto entre as placas positivas e negativas, evitando o curto-circuito;
- Conectores: pequenas peças de chumbo que fazem as conexões entre os elementos da bateria;
- Solução de ácido sulfúrico - usualmente composta por 35 % de ácido sulfúrico e 65 % de água destilada, é um elemento fundamental no processo das reações químicas;
- Caixa/Tampa - composta de polipropileno (PP), tem por função acondicionar os elementos e a solução, isolando-os do contato com o exterior;
- Polo positivo e negativo - peças de chumbo que desempenham a função de terminais, positivo e negativo da bateria, respectivamente.

A Figura 3.4 abaixo representa os componentes básicos de uma bateria chumbo-ácido tipo VLRA (do inglês: Valve Regulated Lead Acid), ou seja, bateria chumbo-ácido regulada por válvula.

Figura 3.4 - Componentes básicos de uma bateria chumbo-ácido tipo VRLA.



Fonte: Adaptado de Baterias Route (2011).

As baterias de chumbo-ácido representam cerca de 80 % do consumo total de chumbo no mundo (Zhang et al., 2018; Zhang et al., 2016; Worrell e Reuter, 2014). Embora a vida útil das baterias de chumbo-ácido possa chegar a 5 a 10 anos muitas vezes elas precisam ser substituídas com frequência (Ruetschi, 2004).

Como resultado, mais de 1,5 milhão de toneladas de baterias são descartadas por ano. Baterias de chumbo-ácido usadas são classificadas como resíduos perigosos, mas também é uma fonte vital para o processamento secundário de chumbo (Worrell e Reuter, 2014; Moseley et al., 2004).

De acordo com ABRABAT (2020), na prática, 99 % do chumbo, do ácido e do plástico podem ser reaproveitados para produção de novas baterias, garantindo assim uma alta taxa de circulação e um alto nível de utilidade. As baterias de chumbo-ácido podem ser 100 % recicladas e serem reutilizados os compostos para fabricação de novas baterias e ainda tem um alto valor de mercado, mesmo sendo nocivos ao ser humano e o meio ambiente (Cspower, 2009).

O mercado de baterias chumbo-ácido no Brasil registrou importantes movimentos em 2021. Os dados, consolidados no Relatório Anual produzido pelo IBER mostram aumento

expressivo nas importações de acumuladores automotivos e industriais e um grande salto nas exportações de baterias para motocicletas. No total, 384,8 mil toneladas de baterias foram inseridas no mercado nacional de reposição, sendo que 73 % desse volume tem participação do IBER na gestão da logística reversa. As importações de baterias automotivas e industriais cresceram 133 % em 2021, na comparação com o volume auferido em 2020. Isso fez com que as importações passassem a representar 8 % da produção nacional. Já as exportações de baterias para motocicletas alcançaram 643 % de taxa de crescimento na comparação ano a ano (IBER, 2021).

### 3.3 PROCESSOS DE GERAÇÃO E BENEFICIAMENTO

#### 3.3.1 Logística reversa

O sistema de logística reversa de pilhas e baterias foi instituído pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA nº 401 (2008) que foi alterada pela Resolução CONAMA nº 424 (2010), e que estabeleceu os limites máximos de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias comercializadas no território nacional e os critérios e padrões para o seu gerenciamento ambientalmente adequado.

De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos do Ministério do Meio Ambiente (MMA), do ano de 2022, as pilhas e baterias são equipamentos eletroquímicos que funcionam como “mini usinas” portáteis e possuem a habilidade de converter a energia química em energia elétrica e podem ser classificadas de diversas formas, dependendo do formato, composição e sua finalidade. Se descartados de forma inadequada, esses resíduos podem causar contaminação do solo e da água com metais pesados, tais como chumbo, mercúrio, níquel e cádmio, a depender da composição destes materiais.

Ainda de acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos do Ministério do Meio Ambiente (MMA), (2022), os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de pilhas e baterias devem disponibilizar aos consumidores locais para o recebimento das pilhas e baterias inservíveis. Os consumidores devem levá-las até o ponto de entrega voluntária (PEV) mais próxima. Os PEVs armazenam as pilhas recebidas e, ao atingir determinada quantidade, esses resíduos são encaminhados para o sistema de coleta e triagem. A partir destes pontos de entrega secundários, o material é transportado para empresas de reciclagem.

As baterias de chumbo-ácido são dispositivos acumuladores de energia compostos por placas positivas e negativas, constituídas de chumbo, sendo o eletrólito uma solução de ácido

sulfúrico. São utilizadas essencialmente em veículos automotores bem como em outras aplicações industriais sendo que, ao final de sua vida útil, tornam-se um resíduo perigoso que deve ser gerenciado de forma ambientalmente adequada (Salomone, 2005).

Sendo assim, é muito importante o cumprimento dos mecanismos estabelecidos para que o consumidor possa efetuar a devolução destas baterias ao setor empresarial para que este se encarregue de sua destinação final ambientalmente adequada. Em cumprimento ao que determina a regulamentação da logística reversa de baterias chumbo-ácido, esses produtos, após o uso, devem ser descartados no mesmo estabelecimento comercial em que for feita a sua troca ou reposição SINIR (2021).

Ainda de acordo com o MMA, as Entidades Gestoras responsáveis pela operacionalização deste sistema são a Green Eletron e a Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos (ABREE). A Figura 3.5 ilustra o ciclo da logística reversa de pilhas e baterias.

Figura 3.5 - Ciclo do sistema de logística reversa de pilhas e baterias.



Fonte: SINIR (2021).

De acordo com IBER, no ano de 2021, 290.342 toneladas de baterias de chumbo-ácido foram recolhidas.

### 3.3.2 Reciclagem de baterias de chumbo-ácido

À medida que a bateria é usada, a concentração de ácido sulfúrico diminui e aumenta a concentração de sulfato de chumbo ( $\text{PbSO}_4$ ). Uma das razões para isso é o fato de o produto da descarga (sulfato de chumbo) ser insolúvel no eletrólito e permanecer junto das placas, isolando o contato do eletrólito com o material ativo (em geral, nas células não recarregáveis, os produtos se perdem por serem gases ou se precipitam no eletrólito). Uma vez descarregada, total ou parcialmente, uma fonte externa de energia elétrica, reverte às reações anteriores, regenerando o chumbo e o óxido de chumbo das placas e o ácido sulfúrico do eletrólito, esse processo de carga/descarga é chamado de vida cíclica da bateria, sendo está limitada. Essas baterias, quando inutilizadas ou descarregadas, tornam-se um resíduo perigoso e necessitam ser coletadas para posterior reciclagem (Cempre, 2010).

O setor de baterias de chumbo-ácido gera anualmente a quantidade aproximada de 300.000 (trezentas mil) toneladas de baterias inservíveis, que tem origem no mercado de reposição (ABRABAT, 2018).

Na reciclagem de baterias chumbo-ácido, durante a etapa de fundição, no momento em que o chumbo é recuperado na sua forma metálica, uma grande quantidade de resíduo sólido é gerada. As impurezas presentes nas matérias-primas, juntamente com outros materiais adicionados para promover as reações necessárias ao referido processo, formam a escória proveniente de fornos de fundição de chumbo. Essa escória é um resíduo de alta alcalinidade, sendo essencialmente constituída de Ferro (Fe) e com concentrações de Enxofre (S), Sódio (Na) e Chumbo (Pb). Há outros metais, que estão como impurezas nas matérias-primas, que também podem ser encontrados em menores concentrações. Aproximadamente 15 % a 30 % em massa de todo material que entra no forno de redução formam a escória (Gomes, 2006).

Não importa qual o método de reciclagem a serem realizadas, as baterias sempre devem ser drenadas antes de sofrer o processo de reciclagem, uma vez que o eletrólito ácido produz várias complicações. O pré-tratamento da sucata de chumbo é a remoção parcial dos contaminantes metálicos e não metálicos contidos na mesma. Durante esse processo ocorre a trituração e separação do plástico, fusão do chumbo em forno rotativo, com a posterior separação e destinação da escória de fundição e o refino do chumbo. Como subprodutos do processo obtêm-se uma solução eletrolítica que é tratada em uma estação de tratamento de efluentes (ETE), (neutralizada e tratada), transformada em água industrial limpa (Andrade, 2011).

### 3.3.3 Escória

Na literatura estima-se que em média são gerados cerca de 300 – 350 kg de escória para cada tonelada de chumbo metálico produzido, e cerca de 5 % dessa escória são compostos de chumbo (Jost, 2001). A escória proveniente da operação do alto forno contém minerais e muitas impurezas metálicas, incluindo de 2 % a 4 % de chumbo. A escória da pirometalurgia do chumbo tem sido sempre reciclada no processo para propiciar a máxima recuperação das impurezas metálicas que permanecem após processo de fusão (Sobral et al., 2012).

Desta forma uma atenção especial deve ser dada ao percolado, que pode ser produzido se entrar em contato com água ou ar úmido. A fim de evitar problemas ambientais e a saúde humana deve se planejar a construção de um abrigo para armazenar esse material, enquanto este não tiver sua disposição em aterros para resíduos industriais perigosos (Basel Convention, 2003).

### 3.3.4 Classificação

#### 3.3.4.1 Política de resíduos sólidos

A regulamentação de leis ou políticas sobre o gerenciamento de resíduos sólidos perigosos aconteceu de forma gradativa de diversas formas, umas delas é a Resolução CONAMA nº 401, atualmente em vigor no Brasil, que estabelece uma diminuição ainda mais significativa nos teores de Mercúrio (Hg), Chumbo (Pb) e Cádmio (Cd) nas pilhas e baterias portáteis, nas baterias chumbo-ácido, automotivas e industriais, e nas pilhas e baterias dos sistemas eletroquímicos Ni-Cd e óxido de mercúrio (HgO) (Brasil, 2008).

A resolução pretende ainda dar mais efetividade à responsabilidade pós-consumo dos fabricantes e importadores de pilhas e baterias, segundo a qual estes passam a obrigar-se pelo ciclo total de seus produtos, e não somente até serem adquiridos pelos consumidores (Mantuano et al., 2011).

Conforme Oliveira (2016), essa responsabilidade é fator relevante para a minimização dos problemas ambientais, principalmente no tocante a indústria de baterias devido à emissão de gases e particulados decorrentes do processo produtivo ou ainda pela escória classificada como resíduo do chumbo não aproveitado destinado ao aterro sanitário, o que aponta um fator prejudicial por gerar impacto no solo e agredir o meio ambiente.

Política Nacional de Resíduos Sólidos foi regulamentada pelo Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010 que em seu artigo 1º determina:

Art. 1 - Este Decreto estabelece normas para execução da Política Nacional de Resíduos Sólidos, de que trata a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010.

A Lei nº 12.305, de 2010 foi um marco para gestão ambiental no Brasil, que estabelece:

Art. 1º Esta Lei institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluída os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis.

Na PNRS (2010), um dos itens mais importantes é a obrigatoriedade da Logística Reversa que está diretamente ligada ao princípio da responsabilidade compartilhada, pelo ciclo de vida dos produtos entre fabricantes, comerciantes, consumidores e poder público. Está previsto na lei que seis tipos de produtos, cujo descarte seja incorreto podem causar danos ao meio ambiente e põe em risco a saúde pública, são eles:

- Embalagens de agrotóxicos;
- Embalagens de óleos lubrificantes e seus resíduos;
- Pilhas e baterias;
- Pneus;
- Lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista;
- Produtos eletrônicos e seus componentes.

#### 3.3.4.2 Classificação de resíduos sólidos

Conforme a ABNT NBR 10004 (2004), os acumuladores elétricos a base de chumbo e seus resíduos, baterias automotivas de acordo com o anexo A, são identificados como F042 – Chumbo (Pb) e Ácido Sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) são os constituintes perigosos e suas características perigosas são produtos tóxicos e corrosivos. Por essa razão esse material deve seguir regras para o seu tratamento de destinação final. Não podendo ficar estocada em galpões de reciclagens, em oficinas automotivas e muito menos descartada no lixo comum ou no meio ambiente.

As baterias automotivas são normalmente do tipo chumbo-ácido, o que faz com que sejam classificadas como de elevado risco ambiental. Se descartadas inadequadamente, poderão acarretar sobre os seres vivos em geral, efeitos negativos devido a sua toxidez e seu efeito acumulativo no organismo. O CONAMA através da Resolução nº 257 (1999) trata da questão relacionada com o descarte de pilhas e baterias usadas e trata de sua disposição final.

A Resolução CONAMA nº 401 (2008), determina que todos os estabelecimentos que comercializam baterias de chumbo-ácido são responsáveis pela destinação final após o consumo (troca), encaminhando-as para a destinação ambiental correta.

Que é de responsabilidade dos fabricantes e importadores. O repasse pode ser feito aos recicladores desde que tenham licenças para trabalhar e transportar o material que é considerado tóxico pela NBR 10.004/2004.

Desta forma no Brasil, a classificação de resíduos sólidos industriais é feita com base na ABNT NBR 10004 (2004), segundo a qual se dividem os resíduos em duas classes, sendo que uma apresenta duas subclasses:

- Resíduos classe I- Perigosos;
- Resíduos classe II- Não-perigosos;
- Resíduos classe II A- Não-inertes;
- Resíduos classe II B- Inertes.

Um resíduo é perigoso quando apresenta uma ou mais características que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, tenham ABNT NBR 10004 (2004):

- Risco a saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices;
- Risco ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

O resíduo também é perigoso se apresentar uma das características descritas a seguir:

- Inflamabilidade: resíduos que podem inflamar-se sob certas condições ou que são espontaneamente inflamáveis;
- Corrosividade: resíduos corrosivos são ácidos ou bases que são capazes de corroer metais;

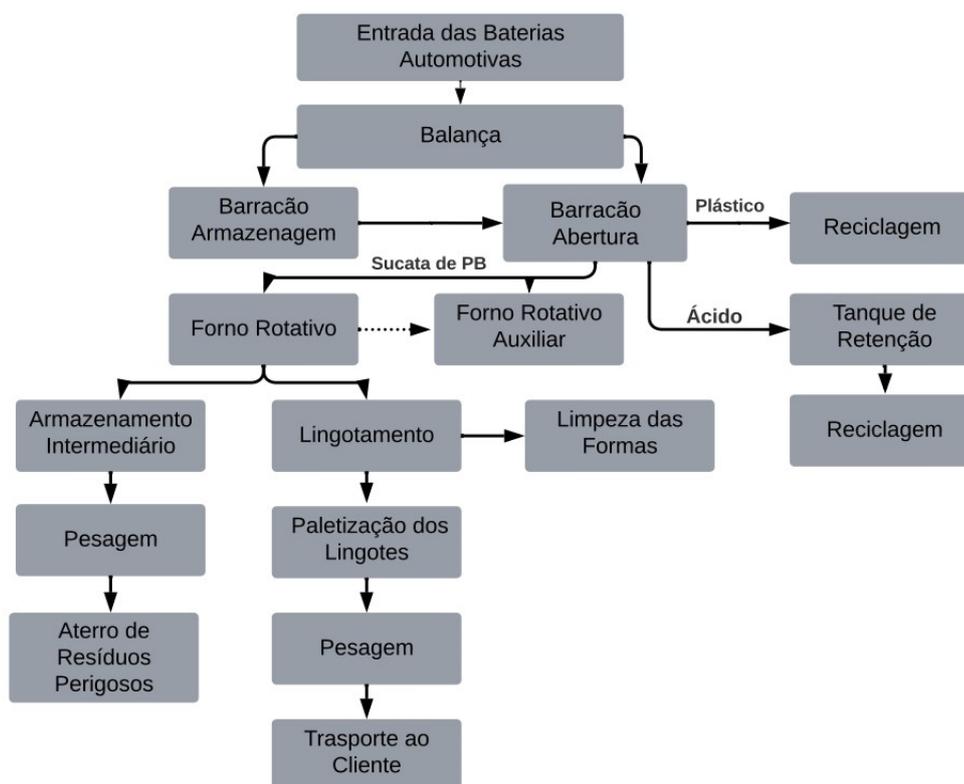
- Reatividade: resíduos reativos são instáveis sob condições "normais". Eles podem causar explosões, fumaças tóxicas, gases ou vapores quando misturados com água;
- Toxicidade: resíduos tóxicos são prejudiciais ou fatais quando ingeridos ou absorvidos. Quando resíduos tóxicos são dispostos no solo, pode ocorrer lixiviação e poluir o lençol freático. A toxicidade é definida através de ensaios em laboratório conforme a norma ABNT NBR 10005 (2004), de lixiviação de resíduos. A partir dos ensaios, são identificadas as concentrações máximas dos contaminantes no lixiviado, acima dos quais o mesmo passa a ser prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente. Um resíduo também pode ser considerado tóxico se possuir uma ou mais substâncias constantes no anexo C da norma ABNT NBR 10004 (2004), juntamente com a avaliação de alguns fatores:
  - Natureza da toxicidade apresentada pelo resíduo;
  - Concentração do constituinte no resíduo;
  - Potencial que o constituinte, ou qualquer produto tóxico de sua degradação, tem para degradar-se em constituintes não perigosos, considerando a velocidade em que ocorrer a degradação;
  - Extensão em que o constituinte, ou qualquer produto tóxico de sua degradação, é capaz de bioacumulação nos ecossistemas;
  - Efeito nocivo pela presença de agente teratogênico, mutagênico, carcinogênico ou ecotóxico, associados a substâncias isoladamente ou decorrentes do sinergismo entre as substâncias constituintes do resíduo;
  - Patogenicidade: resíduos patogênicos contêm substâncias ou micro-organismos que causam doenças em homens, animais ou vegetais.

### 3.3.5 Processo de beneficiamento

Segundo a ABINEE (2019), o processo de reciclagem de chumbo através do beneficiamento de baterias automotivas exaustas é constituído de várias etapas que tem os seguintes objetivos: selecionar o material da bateria passível de reciclagem, separar o chumbo de outros metais e contaminantes e minimizar a emissão de poluentes.

A Figura 3.6 abaixo apresenta o fluxograma do processo de beneficiamento das baterias automotivas, contendo a descrição de todo o processo de beneficiamento das baterias automotivas gerando a escória de chumbo-ácido utilizada nesta pesquisa.

Figura 3.6 - Fluxograma do processo de reciclagem de baterias automotivas.



Fonte: Adaptado de Sobral (2012).

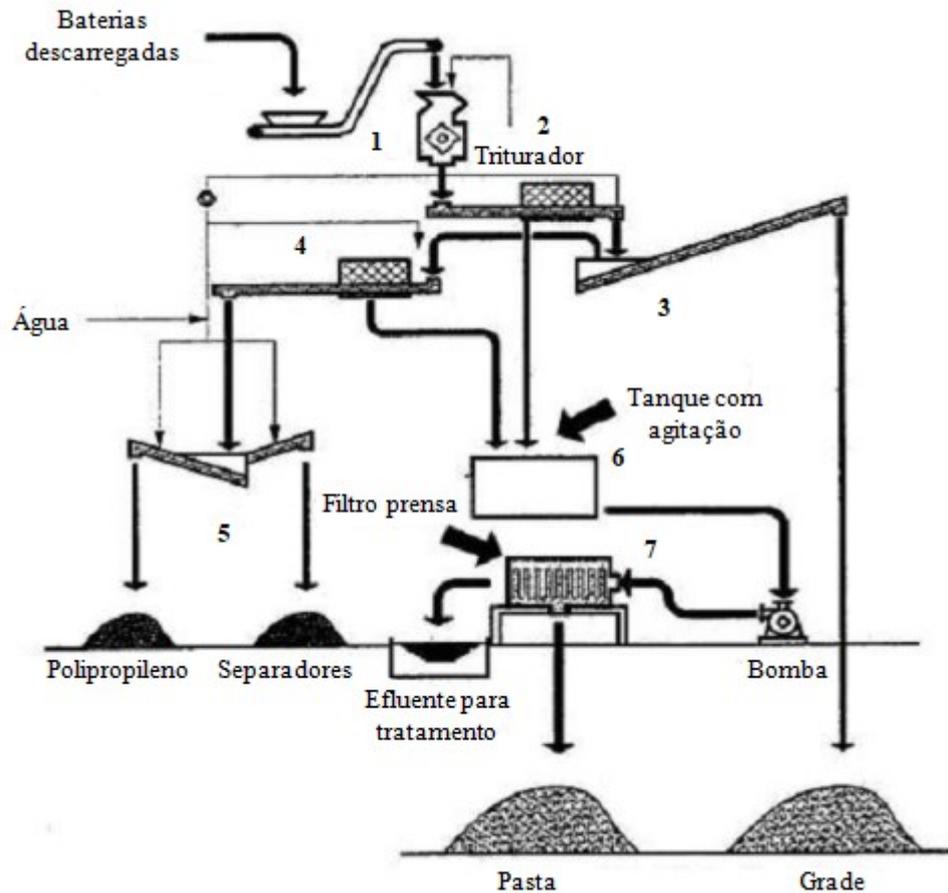
O fluxograma do processo de reciclagem demonstra do recebimento até o destino final da sucata de baterias, compreendendo nas fases:

- **Entrada:** A sucata é recebida pela empresa e separada conforme as características que diferenciam os tipos de baterias, armazenadas, em áreas cobertas com solo impermeabilizado;
- **Processamento:** A sucata de bateria e a sucata plástica são cortadas e moídas. A separação dos componentes presentes na bateria é dada da seguinte forma: separação do óxido, polipropileno, metal e ácido da bateria. A tampa e a caixa são posteriormente, enviadas para uma unidade que recicla o polipropileno. No setor de moagem acontecem quatro procedimentos distintos: (i) a sucata de bateria e a sucata plástica são moídas, separadas, lavadas e remoídas; Em seguida o ácido é drenado e recolhido em reservatório e posteriormente encaminhados para a Estação de Tratamento de Efluentes (ETE). Após a drenagem as placas de Pb são retiradas da caixa e encaminhadas para a unidade de reciclagem. (ii) a lama do processo (pasta da placa negativa, grade e o

chumbo metálico da placa negativa) é separada e encaminhada para o setor de fundição em local apropriado; (iii) o polipropileno (PP) é moído, acondicionado em *bags* e enviado para ao setor da extrusão; (iv) (Gomes e Heck, 2018) (Figura 3.7);

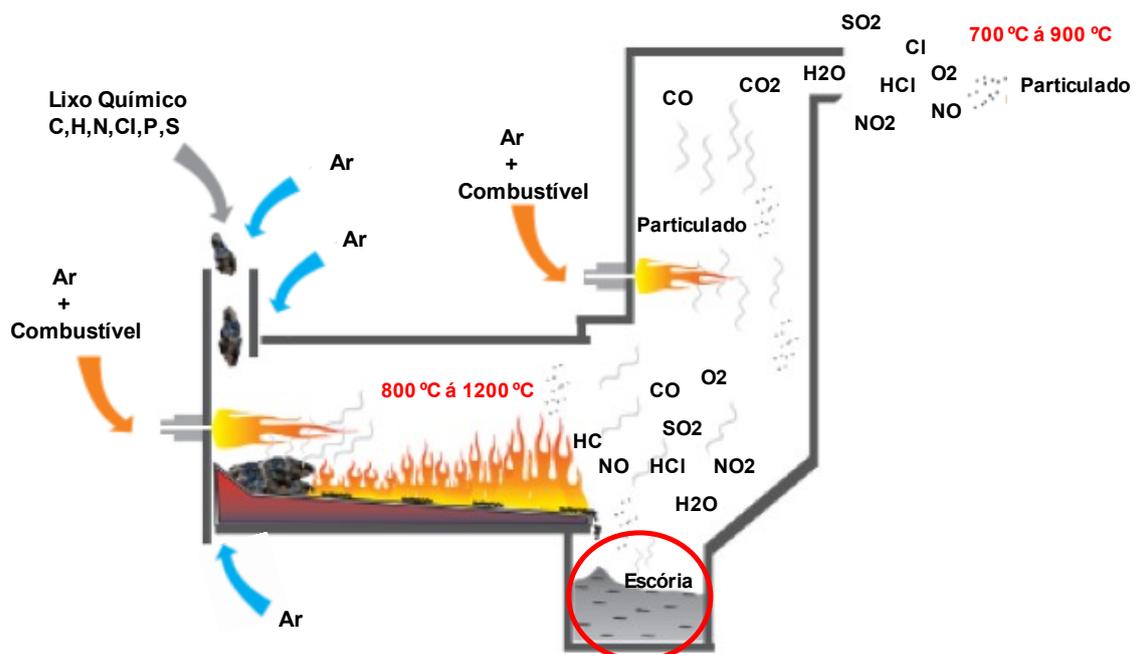
- Fundição: Os componentes de chumbo serão separados conforme a sua pureza e liga específica e colocados no forno rotativo, toda a pré-mistura é colocada em seu interior para que se inicie o processo de reciclagem do chumbo. O forno opera a uma temperatura estimada de 1200 °C. O processo de fusão, etapa onde o material é fundido, leva aproximadamente 2,5 horas, e o chumbo convertido é drenado. Depois desse tempo a escória formada é drenada por aproximadamente 1 hora para que uma nova batelada seja carregada no forno rotativo. Todo o processo leva cerca de 6 horas até o novo carregamento (Pioneiro Ecometais, 2023). A Figura 3.8 ilustra um esquema de forno rotativo e geração de escória;
- Saída – Após o refino do chumbo, este material é drenado e transformado em lingote. Esses lingotes, após serem identificados de acordo com a exigência do cliente, serão separados em lotes, estocados em galpões e posteriormente enviados ao destino final. É nesta etapa que a outra parte, o resíduo do chumbo não aproveitado, denominado escória de chumbo-ácido irá para o aterro industrial, conforme ilustra a Figura 3.9. O processo de produção de chumbo através da reciclagem de baterias chumbo-ácido gera uma quantidade grande de resíduo sólido durante a etapa de fundição, que é quando o chumbo é recuperado na sua forma metálica (Pioneiro Ecometais, 2023).

Figura 3.7 - Esquema do processamento de baterias chumbo-ácido.



Fonte: Adaptado de Gomes (2006).

Figura 3.8 - Esquema de um forno rotativo de fundição.



Fonte: Adaptado de Confor (2022).

Figura 3.9 - Escória como resultada do processamento da reciclagem do chumbo.



Fonte: Pioneiro Ecometais (2023).

Diante da descrição de como ocorre o processo de extração de chumbo de baterias chumbo-ácido pelo processo pirometalúrgico, tem-se que a utilização deste processo é considerada desvantajosa e prejudicial ao meio ambiente, pois a desvantagem dos processos pirometalúrgico para a concentração de metais a partir de placas de circuito impresso associadas às emissões gasosa, etc. Desta forma o processo pirometalúrgico gera grandes impactos. Quando das transformações pirometalúrgicas do chumbo metálico e seus compostos, cuidados devem ser tomados visando livrar o operador, dos fornos de fusão, dos vapores de chumbo metálico que causam danos irreversíveis ao sistema respiratório, com possibilidade de transformações químicas orgânicas gerando compostos orgânicos contendo chumbo (organo-metálicos) com acesso direto à corrente sanguínea (Sobral et al., 2012).

## CAPÍTULO 4

### DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

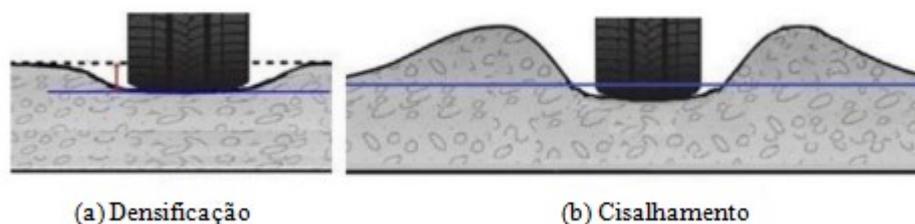
Materiais granulares não ligados sofrem carregamentos cíclicos repetitivos devido ao tráfego de veículos, onde essas forças têm magnitudes variadas dependendo do tipo de veículo e das cargas presentes. Esses materiais não se rompem abruptamente com cargas cíclicas, mas a falha pode ocorrer gradualmente e é influenciada pelo número de ciclos de carga e pela magnitude das tensões. As tensões impostas resultam em deformações recuperáveis e irrecuperáveis nas camadas estruturais do pavimento. Durante cada ciclo de carregamento, a deformação permanente desenvolvida nos agregados granulares pode ser relativamente pequena. No entanto, a acumulação de tais pequenas deformações permanentes podem causar a falha das camadas de base/sub-base do pavimento como resultado de sulcos excessivos (Saberian et al., 2019).

De acordo com Arulrajah et al. (2019) e Zhang et al. (2015), tensão desviadora, tensão confinante, teor de umidade e grau de compactação, são os principais parâmetros que influenciam a deformação permanente de agregados granulares.

A deformação permanente é o fenômeno de fluência da mistura asfáltica no domínio viscoelástico e é uma das patologias mais recorrentes em pavimentos asfálticos no Brasil. A deformação permanente de camadas betuminosas representa, juntamente com os danos por fadiga, um dos principais modos de degradação dos pavimentos de concreto asfáltico. É um fenômeno facilmente mensurável e visível na superfície do pavimento, que se manifesta na forma de desníveis longitudinais nas trilhas de roda dos veículos, com possível ocorrência de elevações ao longo das bordas, em razão de ser uma deformação ocasionada por fluência da mistura asfáltica (Kakpo, 2017).

A deformação permanente em misturas asfálticas pode ser causada por densificação e/ou movimento lateral (deformação por cisalhamento) desse material sob a ação do tráfego (Figura 4.1) (Bastos et al., 2017).

Figura 4.1 - Deformação permanente em pavimentos asfálticos.



Fonte: Ferreira (2015).

Em regiões de clima quente, sujeitas a tráfego pesado, os efeitos da deformação permanente se tornam um dos mais importantes problemas dos concretos asfálticos. O travamento do esqueleto de agregados, para certo teor de ligante, contribui com o aumento da estabilidade da mistura asfáltica e da resistência aos afundamentos por deformação permanente (Leandro et al., 2021).

#### 4.1 CATEGORIAS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Conforme White et al. (2002), as trilhas de rodas podem ser classificadas em três níveis, em função de suas profundidades, como: pequenas (6 mm a 12,5 mm); médias (12,5 mm a 25 mm) e elevadas (acima de 25 mm).

Este processo é um dos precursores do fenômeno de deformação permanente das misturas asfálticas, que resulta em diversas patologias visualmente identificáveis e que prejudicam o conforto e trafegabilidade do usuário, sobretudo como a formação de afundamentos na trilha de roda (Cimbeton, 2019).

Entretanto é possível observar a presença de três tipos de deformação permanente em estruturas de pavimentos de concreto asfáltico em função do aspecto da forma de seu corte transversal, sendo elas deformação por uso, deformação por fluência e deformação estrutural (Figura 4.2) (Ali, 2006).

Figura 4.2 - Tipos de deformação permanente em um pavimento flexível.



Fonte: Ali (2006).

#### 4.1.1 Deformação permanente pelo uso

A deformação permanente por uso resulta do desgaste provocado pelos pneus, especialmente por pneus providos por correntes para situações de pista com gelo para melhorar a aderência. É um defeito que ocorre primordialmente em regiões frias, portanto é um defeito menos encontrado em pavimentos brasileiros (Andrade, 2018).

#### 4.1.2 Deformação permanente por fluência

Deformação por fluência: Se dá através de um deslocamento lateral do material na camada superior do pavimento. As deformações por fluências ocorrem com mais frequência em estruturas de pavimento espessa (*chaussée bitumineuse épaisse*), onde essas deformações geralmente são manifestadas com um afundamento de “pequeno raio”, que consiste na largura das bandas de rolamento. Essas deformações consistem em um problema mais ligado à formulação das misturas asfálticas, que é em função dos diversos constituintes e da execução das misturas. (Figura 4.3) (Heck, 2001).

Figura 4.3 - Deformação permanente por fluência.



Fonte: CNT (2018).

#### 4.1.3 Deformação permanente estrutural

Deformação estrutural: Se dá devido às deformações verticais que ocorrem nas camadas inferiores. A deformação estrutural ocorre geralmente em estruturas de pavimento de concreto asfáltico que suportam baixo tráfego (*chaussée souple à faible trafic*), e é classificada como “grande raio”, que engloba cada uma das trilhas de roda (Heck, 2001).

De acordo com Verstraeten (1994), referente aos tipos de deformação permanente, a deformação permanente estrutural se dá devido a um sub-dimensionamento das camadas da estrutura do pavimento para o tráfego ao qual é submetido. Bem como falhas no processo construtivo, como defeitos de execução (falta de compactação) e também devido à drenagem insuficiente do subleito, (Figura 4.4).

Figura 4.4 - Deformação permanente estrutural.



Fonte: CNT (2018).

## 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 e tráfego.

### 4.2.1 Materiais granulares

#### 4.2.1.1 Curva granulométrica

De acordo com Momm (1998) a distribuição granulométrica em misturas asfálticas é a responsável pela organização interna dos granulares de modo que haja o embricamento dos mesmos, de forma que os grãos menores ocupem os vazios deixados pelos grãos maiores.

Ao se formular uma curva granulométrica com graduação contínua, o preenchimento dos vazios entre os granulares graúdos é mais facilmente realizado pela presença de partículas de menor diâmetro, o que confere melhor habilidade de compactação à mistura asfáltica, devido ao aumento dos pontos de contato e bloqueios intergranulares, melhorando assim, a rigidez, a estabilidade e a resistência à deformação permanente (Meunier, 2012).

#### 4.2.1.2 Forma, tamanho e textura

Em relação ao tamanho desempenha um papel fundamental na resistência à deformação permanente. A presença do granular, a fração fina de uma quantidade proporcionalmente adequada deste material na composição granulométrica é benéfica e ajuda a tornar a mistura asfáltica mais resistente à deformação permanente, pois preenche gradualmente os vazios formados pelas partículas com maiores dimensões, contribuindo para a estabilidade granulométrica (Nguyen, 2006; Barra, 2005).

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

#### 4.2.1.3 Teor de vazios

O teor de vazios é um dos fatores que tem maior influência na deformação permanente das misturas asfálticas e depende diretamente do teor de ligante betuminoso, da distribuição granulométrica e da energia de compactação aplicada. Sendo assim, a percentagem de vazios condiciona grande parte das qualidades exigidas para uma mistura asfáltica, como, impermeabilidade ou permeabilidade, módulo de rigidez, resistência à deformação permanente e à fadiga (Momm, 1998).

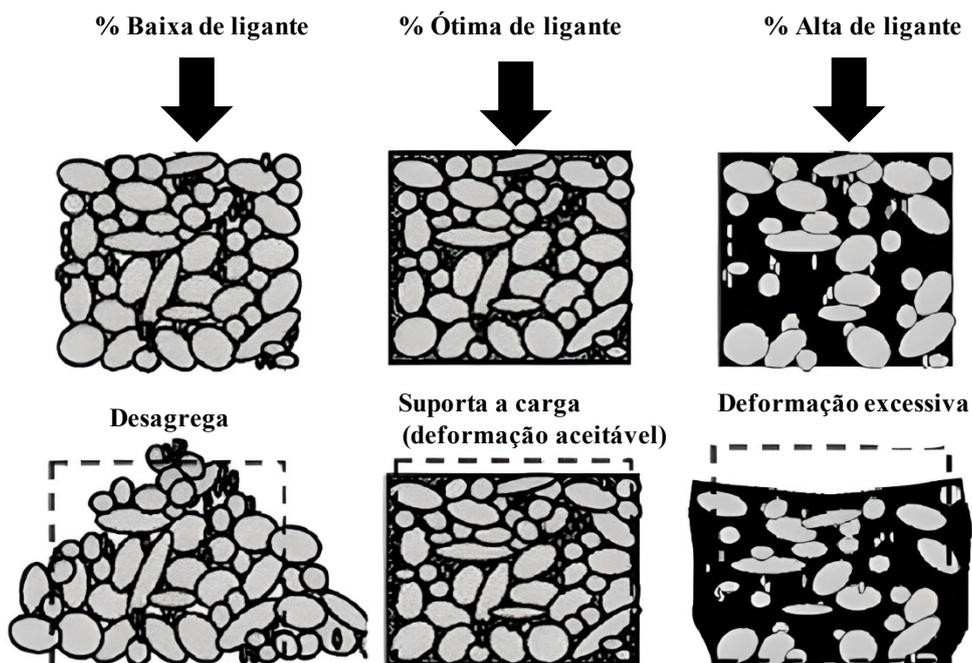
Em geral, uma boa compactação diminui o volume de vazios da mistura asfáltica e aumenta a sua rigidez, fazendo com que ela se deforme menos quando sujeita à passagem do tráfego. Por outro lado, se o volume de vazios resultar elevado, a mistura terá maior sensibilidade à deformação quando solicitada. Isto ocorre devido ao menor contato entre as partículas da composição granulométrica, favorecendo a movimentação de partículas no interior dos arranjos, como resultado de um processo de compactação inadequado (Gardete, 2006; De La Roche, 1996).

#### 4.2.1.4 Natureza e teor de ligante betuminoso

Em razão de o ligante betuminoso ser um material viscoelástico que apresenta suscetibilidade térmica e cinética, devido a sua reologia complexa depender da combinação a temperatura e a frequência de sollicitação do material, tem-se que as misturas asfálticas possuem riscos potenciais de deformação permanente, principalmente em condições de baixa velocidade e elevada temperatura. Logo, pode-se afirmar que quanto mais susceptível termicamente o ligante, mais a mistura asfáltica terá probabilidade de ocorrência de deformação permanente. O teor de ligante é um parâmetro de formulação que influencia de forma decisiva no comportamento mecânico das misturas asfálticas (Meunier, 2012). A Figura 4.5 ilustra os efeitos causados pelo teor de ligante e como ele incide neste comportamento na mistura asfáltica.

Com o intuito de melhorar a resistência à deformação permanente e superar os riscos de ruptura precoce por fadiga, o uso de ligantes modificados tem sido muito presente na formulação de misturas asfálticas. As matrizes modificadoras mais utilizadas atualmente são a partir de polímeros, com destaque para os SBS, SBR e EVA, além da borracha triturada de pneus (Wang et al., 2017).

Figura 4.5 - Efeito do teor de ligante betuminoso na formulação de uma mistura asfáltica formulada com a mesma composição granulométrica.



Fonte: Gardete (2006).

O aumento da espessura do ligante em torno dos granulares distancia as partículas e resulta em um aumento da mobilidade entre elas, esse aumento da lubrificação diminui uma parcela da resistência ao cisalhamento desenvolvida pelo atrito entre grãos (Ng, 2013).

#### 4.2.2 Temperatura

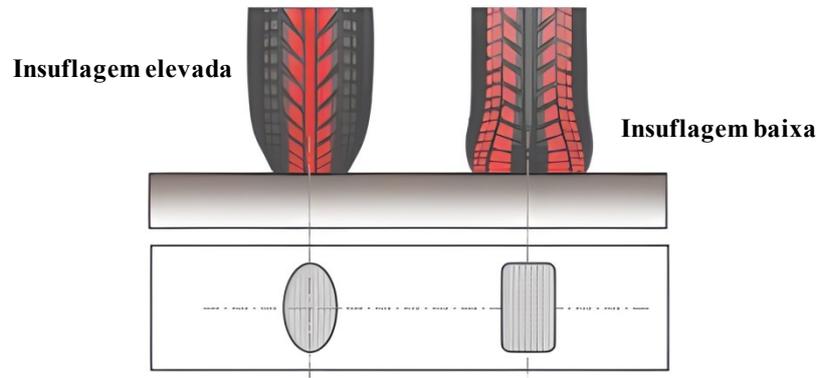
A influência da temperatura está relacionada à susceptibilidade térmica do ligante betuminoso. Quanto maior a temperatura, maior a perda de rigidez e viscosidade da mistura. A rigidez da mistura diminui e a resistência às deformações permanentes, que é assegurada pela sua coesão, também diminui. A mistura é então mais sensível às deformações permanentes (Sohm, 2011).

#### 4.2.3 Tráfego

As cargas provenientes do tráfego são aplicadas sobre o pavimento através dos pneumáticos que transmitem os esforços provenientes dos veículos para a superfície da camada de rolamento. Nesse caso, o modo que as solicitações irão incidir no pavimento depende de alguns fatores: intensidade da carga; tipo de pneus (simples, duplos, etc.), pressão de insuflagem dos pneumáticos (Figura 4.6), e a velocidade dos veículos que por ela irão trafegar (Ali, 2006; Perret, 2003).

Como a mistura asfáltica possui um comportamento viscoelástico a temperatura ambiente, observa que a velocidade de aplicação de carga influenciará no comportamento mecânico desses materiais. A mistura asfáltica quando submetida a um carregamento rápido, possui um comportamento próximo ao elástico, enquanto para carregamentos lentos, tende a apresentar um comportamento predominantemente viscoso. Logo, velocidades de tráfego mais lentas tendem a gerar uma deformação maior em misturas asfálticas (Siroma, 2018).

Figura 4.6 - Efeitos da pressão de insuflagem.



Fonte: Hamlat (2007).

A intensidade do tráfego é determinada pelo número de passagens da frota veicular a uma dada unidade de tempo. Testes comparativos entre cargas cíclicas e fluência de materiais betuminosos demonstraram que não somente a duração de solicitação é importante, mas também a quantidade de ciclos de carga-descarga (Sohm, 2011).

## CAPÍTULO 5

### MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a caracterização dos materiais selecionados e descreve a metodologia utilizada na execução da campanha experimental.

#### 5.1 MATERIAIS

##### 5.1.1 Frações granulares

As frações granulares utilizadas na composição das misturas asfálticas foram obtidas de britagem do maciço rochoso gnáissico pertencente à jazida da empresa Rudnick Minérios Ltda., localizada no distrito de Pirabeiraba, região metropolitana de Joinville/SC.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos parâmetros de caracterização dos granulares pétreos utilizados.

Tabela 5.1 - Caracterização das frações granulares.

ENSAIO	RESULTADOS	LIMITES	NORMA
Abrasão Los Angeles	13,4%	≤ 50%	DNER-ME 35/98
Durabilidade	3,1%	≤ 12%	DNIT-ME 446/2024
Índice de forma	0,65	≥ 0,5	ABNT NBR 7809/2006
Adesividade	Má	-	DNER-ME 78/94
Equivalente de areia	78%	-	DNER-ME 54/97
Teor de material pulverulento	0,1%	≤ 1,0%	DNER-ME 266/97
Absorção	0,3%	-	DNIT-ME 413/2021
Massa específica aparente	2,768 g/cm <sup>3</sup>	-	DNIT-ME 413/2021
Massa específica real	2,812 g/cm <sup>3</sup>	-	DNIT-ME 413/2021

Fonte: Adaptado de Persike (2023).

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 5.1, tem-se que o material rochoso atende às especificações para aplicação em obras de pavimentação, exceto quanto à adesividade que resultou má. Esta condição está associada à origem gnáissica da rocha matriz, pois contém um percentual majoritário de sílica (SiO<sub>2</sub>) em sua composição, constituindo granulares com carga elétrica predominantemente eletronegativa (Clara, 2020).

Cabe destacar, porém, que não foi utilizado nenhum aditivo químico ou adição como melhorador de adesividade às misturas asfálticas, a fim de não interferir no real comportamento da escória de chumbo-ácido incorporada nas formulações.

### 5.1.2 Curva granulométrica

A composição do arranjo granulométrico das misturas asfálticas foi formulada a partir do método racional, também denominado teórico, em que nesta pesquisa foi utilizado o de Füller-Talbot. Neste contexto, as frações granulares são obtidas a partir da separação individualizada dos diâmetros a cada peneira, possibilitando além do controle preciso das frações pelo projetista, o preenchimento de forma gradual dos vazios formados pelos diâmetros maiores dos granulares (Barra et al., 2021).

Desta forma, são fixados o diâmetro máximo (D) e o percentual da composição da curva granulométrica passante na peneira de menor abertura da série escolhida pelo projetista (%pi). A distribuição percentual das frações e o expoente de graduação são calculados a partir das Equações 5.1 e 5.2, respectivamente. Ressalta-se que esta metodologia não utiliza faixas granulométricas, pois a distribuição gradual das frações se dá a partir da normalização proporcional dos percentuais obtidos entre os limites adotados para a curva calculada (Barra et al., 2010).

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

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 da malha de uma dada peneira, em mm;
- D : diâmetro máximo da série de peneiras, em que passa 100 % das frações, em mm;

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:  $D \approx 2d$ ;  $n \approx 1,00$

Ainda, este método não permite a construção de curvas granulométricas com variações descontínuas em suas trajetórias, devido à normalização proporcional que produz, evitando a formação de arranjos granulares instáveis que possam causar desempenhos insatisfatórios no comportamento mecânico das misturas asfálticas (Siroma, 2018).

As Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam a distribuição granulométrica e os pontos de controle estabelecidos pela metodologia francesa para formulações de misturas asfálticas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), respectivamente, bem como e a Figura 5.1 ilustra a curva granulométrica obtida. Cabe destacar que foram utilizados os mesmos dados da pesquisa prévia de Persike (2023), com o intuito de poder realizar análises comparativas com as misturas asfálticas de referência, integralmente compostas por frações granulares britadas de rocha gnáissica.

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	16,00
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

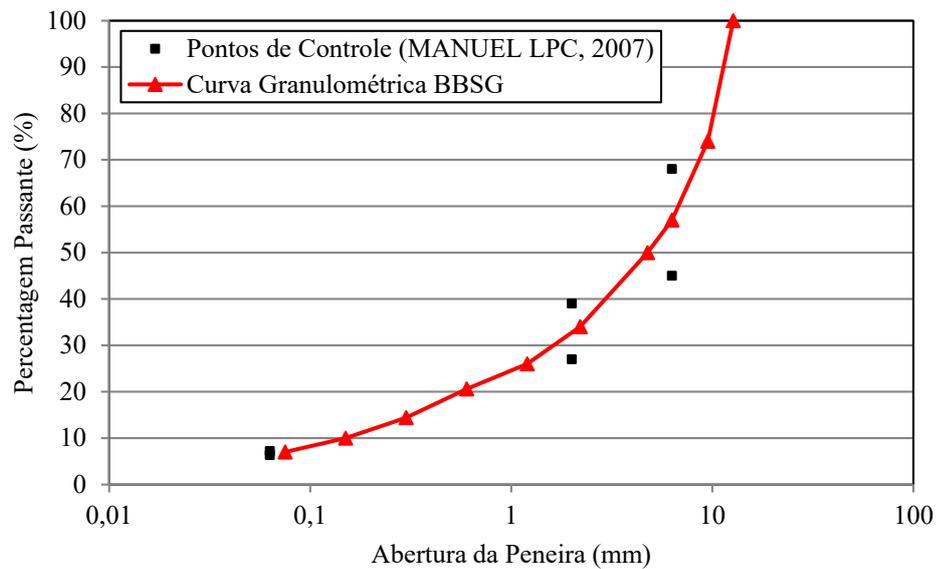
Fonte: Persike (2023).

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

Abertura de Peneira (mm)	Percentual 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: Persike (2023).

Figura 5.1 - Representação gráfica da curva granulométrica BBSG.



Fonte: Adaptado de Persike (2023).

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.

No que tange à definição da graduação do arranjo granulométrico pela metodologia francesa, tem-se que correspondente a 0/14 mm, em razão da proximidade com o diâmetro máximo de 12,7 mm estabelecido na formulação da curva granulométrica de projeto (Tabela 5.1). Logo, os critérios de avaliação das misturas asfálticas seguirão os limites normativos preconizados para formulações do tipo BBSG 0/14 mm.

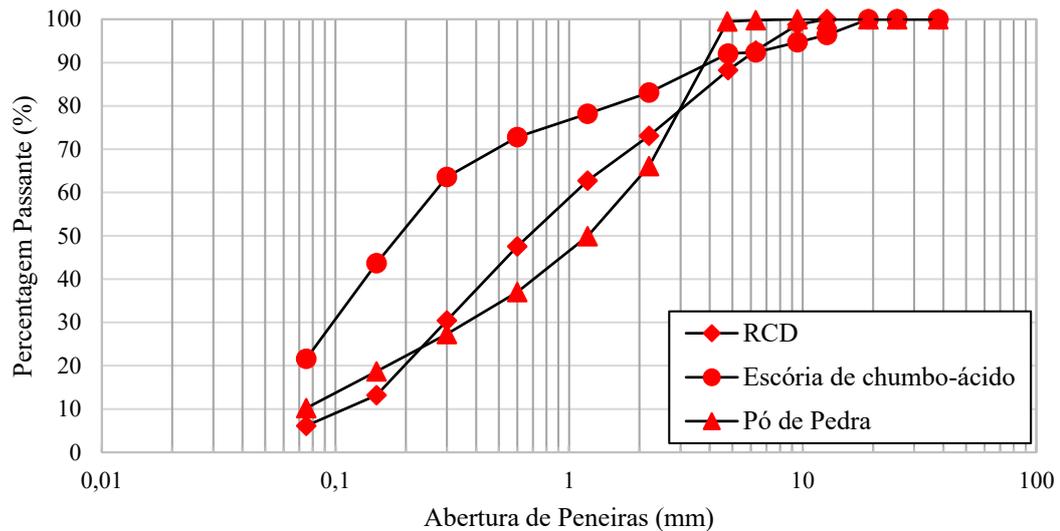
Ainda, com o intuito de verificar quais frações da escória de chumbo-ácido possuíam maior representatividade percentual, foi realizada a análise granulométrica das amostras obtidas, em comparação com o pó de pedra e o resíduo de construção e demolição (RCD) utilizados por Persike (2023). Como resultado, verificou-se que o montante passante na abertura de peneira 0,3 mm compreendia quantidades propícias para substituições em larga escala de escória de chumbo-ácido na produção de misturas asfálticas (Tabela 5.4 e Figura 5.2).

Tabela 5.4 - Percentuais passantes e percentuais retidos da distribuição granulométrica do Pó de Pedra do RCD e da Escória de Chumbo-Ácido.

Abertura de Peneira (mm)	Percentual Passante (%)			Percentual Retido (%)		
	Pó de Pedra*	RCD*	Escória de Chumbo-Ácido	Pó de Pedra*	RCD*	Escória de Chumbo-Ácido
12,7	100,0	100	96,4	-	-	1,37
9,5	100,0	98,8	94,7	-	1,24	1,68
6,3	99,8	92,8	92,4	-	5,97	2,27
4,76	99,5	88,3	92,1	-	4,52	2,55
2,2	66,1	73,1	83,1	0,24	15,17	9,04
1,2	49,9	68,7	78,2	0,77	10,35	4,87
0,6	37,0	47,6	72,8	4,03	15,17	5,40
0,3	27,3	30,5	63,6	10,74	17,12	9,17
0,15	18,7	13,2	43,7	27,05	17,25	19,96
0,075	10,2	6,11	21,6	30,50	7,09	22,05
Fundo	-	-	-	26,67	6,11	21,64

Fonte: Autora e \*Persike (2023).

Figura 5.2 - Distribuição granulométrica do pó de pedra, RCD e escória de chumbo-ácido.



Fonte: Adaptado de Persike (2023).

Desta forma, tomando em conta as frações granulares passantes na peneira 0,3 mm, tem-se que as substituições de pó de pedra pela escória de chumbo-ácido foram procedidas em duas condições, considerando a distribuição percentual da curva granulométrica elaborada para a formulação das misturas asfálticas BBSG (Tabela 5.2), a saber:

- 7,0 %: substituindo apenas o percentual passante na peneira 0,075 mm;
- 15,0 %: substituindo os percentuais passantes na peneira 0,3 mm.

A Figura 5.3 ilustra os diâmetros dos granulares utilizados na formulação de referência por Persike (2023), composta em sua totalidade por frações granulares britadas de maciço rochoso gnáissico, enquanto as Figuras 5.4 e 5.5 ilustram as substituições parciais por escória de chumbo-ácido, indicada na cor amarela, de acordo com os percentuais mencionados.

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



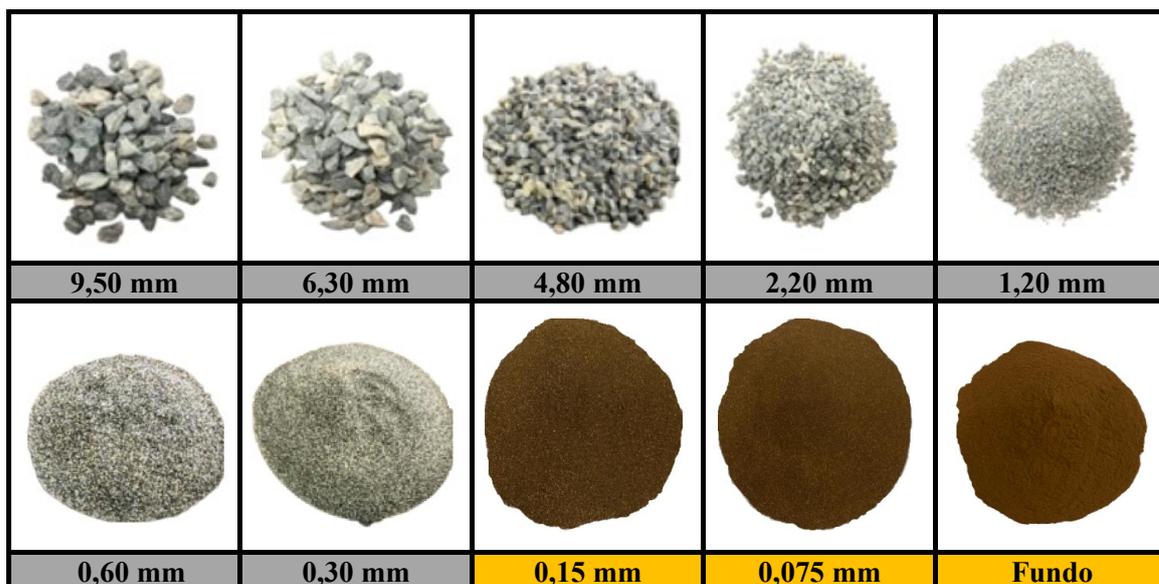
Fonte: Persike (2023).

Figura 5.4 - Frações granulares com incorporação de 7,0 % de escória de chumbo-ácido.



Fonte: Autora.

Figura 5.5 - Frações granulares com incorporação de 15,0 % de escória de chumbo-ácido.



Fonte: Autora.

Neste contexto, é importante esclarecer que na pesquisa de Persike (2023) foram realizadas substituições de pó de pedra por RCD também em 30,0 %, além dos 7,0 % e 15,0 % adotados neste trabalho. Todavia, ao analisar as curvas granulométricas de ambos os materiais (Figura 5.2), é notória a maior presença de frações finas na amostra de escória de chumbo-ácido, sobretudo na região de substituição proposta ( $< 0,3$  mm), o que implica em maior superfície específica do arranjo granular, necessitando de maior quantidade de ligante betuminoso nas dosagens, ensejando maior propensão à ocorrência de afundamentos nas trilhas de roda nos ensaios de deformação permanente.

Esta condição é corroborada pelos resultados indesejados obtidos com a substituição de 30,0 % de RCD na pesquisa de Persike (2023), em que todas as formulações nesta condição foram reprovadas nos ensaios de deformação permanente. Logo, não foi considerada esta possibilidade neste trabalho.

### 5.1.3 Caracterização da escória de chumbo-ácido

Neste contexto, como as frações granulares gnáissicas das misturas asfálticas de referência utilizadas por Persike (2023), que considerou os indicadores característicos do pó de pedra obtidos por Barra et al. (2021), são oriundas de mesma jazida e lote amostral desta pesquisa, tratar-se-á da caracterização dos materiais supracitados de forma comparativa.

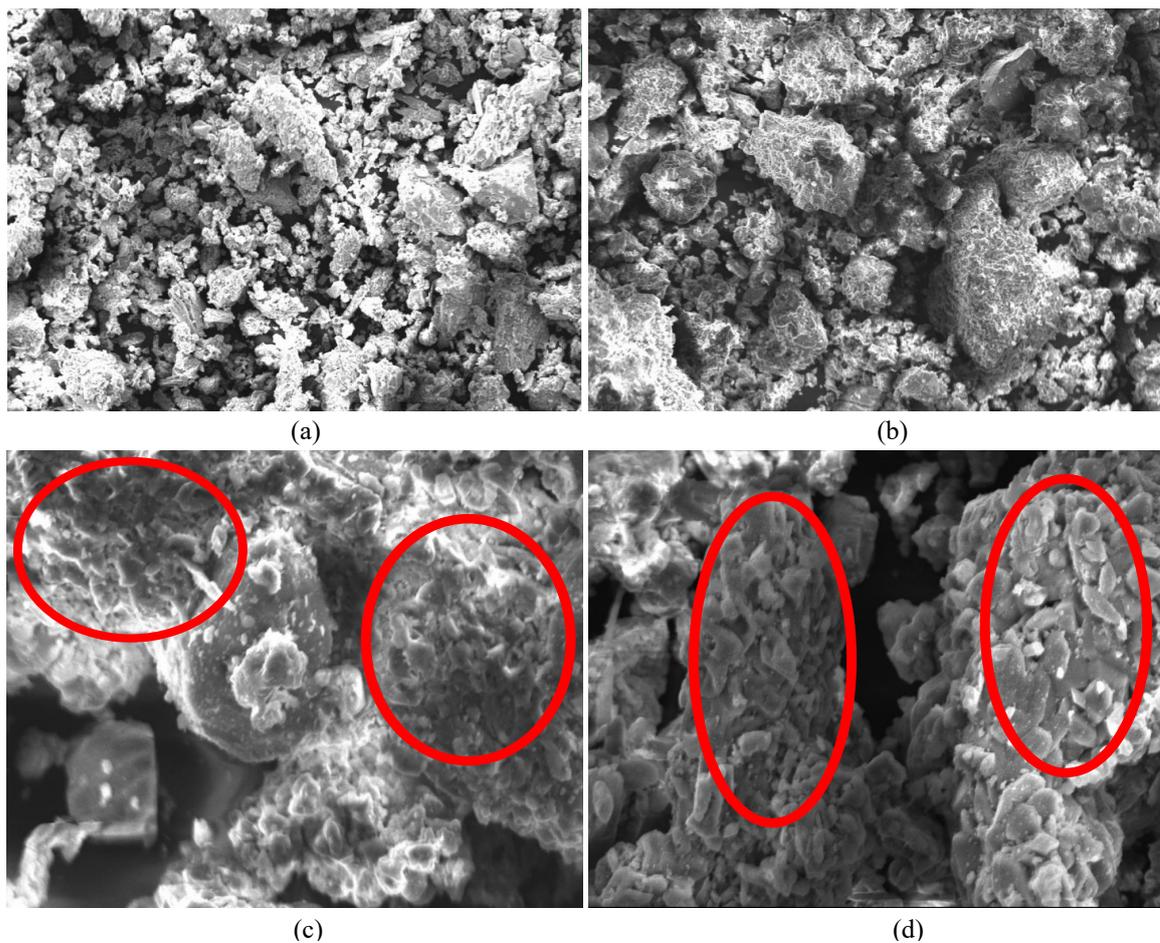
As exceções se dão para as análises Termogravimétrica e de Calorimetria Diferencial (TGA/DSC) e de Espectroscopia Infravermelha por Transformada de Fourier (FTIR), não

realizadas para as amostras de pó de pedra por Barra et al. (2021). Entretanto, estes fatores não prejudicam a compreensão característica de cada insumo.

### 5.1.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da escória de chumbo-ácido ilustram partículas granulares com macrotextura subangular e microtextura rugosa (Figuras 5.6 a e 5.6 b), com destaque para um aspecto superficial escamoso e com núcleos de porosidade facilmente identificáveis, em vermelho, nas imagens com aproximações mais amplas (Figuras 5.6 c e 5.6 d).

Figura 5.6 - Escória de bateria de chumbo-ácido: (a) visão geral das partículas (aumento de 500 vezes), (b) macrotextura subangular e microtextura rugosa (aumento de 1000 vezes), (c) e (d) superfície escamosa e núcleos de porosidade (aumento de 3000 vezes).



Fonte: Autora.

Quanto à escamosidade e porosidade mencionadas, tem-se que estão relacionadas diretamente ao processo de reciclagem da escória de chumbo-ácido, conforme descrito no tópico 3.3.5, pois o procedimento pirometalúrgico realizado nas indústrias ao utilizar fornos tipos cuba, revérberos e rotativos, por exemplo, compreende temperaturas que atingem a escala de 800 °C a 1200 °C, liberando gases como o óxido de Enxofre (SO) e particulados de Chumbo (Pb) para a atmosfera, além de gerar borra metálica (Zhao et al., 2022; Andrade Lima e Bernardez, 2011; Chacón-Sanhueza e Fontanetti, 2006).

Assim, durante o período de resfriamento da escória, o aspecto escamoso das partículas é formado durante o escoamento das fases metálicas, em conjunto com os resíduos de Chumbo esponjoso (Pb) provenientes do eletrodo anódico das baterias de chumbo-ácido, enquanto a porosidade é oriunda de diversos fatores, podendo-se destacar a liberação dos gases nas reações exotérmicas e a acomodação aleatória dos particulados resultantes (Wan et al., 2021; Andrade et al., 2014).

Quanto à composição química determinada por espectrometria de energia dispersiva (EDS) durante a microscopia eletrônica de varredura, após média compilada de doze pontos de análise amostral (Tabela 5.5), foi verificada a presença expressiva dos elementos Ferro (Fe), Oxigênio (O), Enxofre (S) e Silício (Si), o que se deve principalmente às prováveis ocorrências das fases cristalinas de Faialita ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), Pirrotita ( $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$ ), Maghemita ou Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e Hercinita ( $\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_4$ ), compostos muito presentes nas escórias oriundas do processo de reciclagem de baterias de chumbo-ácido (Ji et al., 2022; Bosso e Enzweiler, 2008).

Tabela 5.5 - Composição química obtida por EDS no procedimento de MEV.

Elementos	Percentual (%) em Massa
Ferro (Fe)	41,72
Oxigênio (O)	55,23
Enxofre (S)	31,44
Silício (Si)	3,08
Carbono (C)	4,96
Estanho (Sn)	1,46
Cálcio (Ca)	9,75
Zinco (Zn)	1,19
Alumínio (Al)	1,70
Zircônio (Zn)	0,34

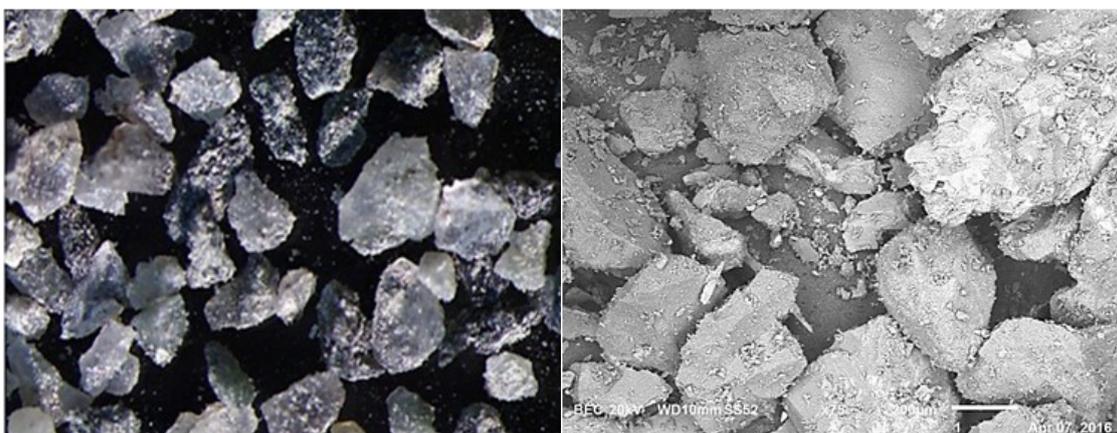
Fonte: Autora.

Ainda, o Oxigênio (O) propicia reações para a formação dos compostos óxidos e da Hidroxila (OH), este último oriundo das fortes pontes de Hidrogênio (O–H) existentes no

material, relacionadas à umidade presente nas amostras, enquanto o Carbono (C) abrange a formação de fases associadas ao Cálcio (Ca), com destaque para o Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Os elementos Alumínio (Al), Estanho (Sn), Zircônio (Zr) e Zinco (Zn), em menor escala, são substâncias inorgânicas basicamente vinculadas às reações produtoras de óxidos (Kanneboina et al., 2023).

Quanto ao pó de pedra, as partículas também apresentam macrotextura subangular e microtextura rugosa, porém, sem aspecto escamoso e com porosidade não identificável à observação direta das imagens de MEV (Figura 5.7). Análises de EDS não foram procedidas para estas amostras na pesquisa de Barra et al. (2021).

Figura 5.7 - Amostras de pó de pedra: (a) visão geral das partículas por microscopia ótica de alta resolução e (b) por MEV (aumento de 300 vezes).



Fonte: Barra et al. (2021).

### 5.1.3.2 Superfície específica

As análises referentes à superfície específica foram realizadas a partir da técnica de adsorção de Nitrogênio a baixas temperaturas. Para tanto, foi utilizado um analisador de superfície da marca Quantachrome, modelo Quadrasorb evo, com processamento dos dados pelo software QuadraWin. O gás adsorvente utilizado foi o gás Nitrogênio 5.0. A Tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.6 - Análise da superfície específica da escória de chumbo-ácido.

Parâmetro	Amostra	Resultado	Unidade
Área superficial	7,0 %	6,582	m <sup>2</sup> /g
	15,0 %	5,389	
Volume total de poros	7,0 %	0,04254	cm <sup>3</sup> /g
	15,0 %	0,02859	
Diâmetro médio de poros	7,0 %	258,5160	Å
	15,0 %	212,1940	

Fonte: Autora.

Observando de forma comparativa os dados obtidos, tem-se que a amostra de 7,0 % possui superfície específica 1,22 vez maior que a de 15,0 %, bem como volume total e diâmetro médio de poros 1,49 e 1,22 vezes maior que as amostras de 15,0 %, respectivamente. Estes indicadores são corroborados pela granulometria das composições de escória, pois enquanto as formulações com 7,0 % abrangem apenas partículas passantes na peneira 0,075 mm, tem-se frações retidas nas peneiras de 0,15 mm, 0,075 mm e passantes na 0,075 mm para as formulações com 15,0 %, conforme abordado no tópico 5.1.2. Logo, a área superficial ocupada por unidade de peso das amostras de 7,0 % é naturalmente maior que a das partículas com 15,0 %.

Quanto ao maior volume total e diâmetro médio de poros das amostras de 7,0 %, parece indicar que a porosidade da escória tende a diminuir com o aumento do tamanho dos grãos.

Com o intuito de comparar as características superficiais da escória de chumbo-ácido com a mesma granulometria e composição percentual das misturas asfálticas de referência, a Tabela 5.7 apresenta os dados de análise para as amostras de pó de pedra.

Tabela 5.7 - Análise da superfície específica do pó de pedra.

Parâmetro	Amostra	Resultado	Unidade
Área superficial	7,0 %*	3,052	m <sup>2</sup> /g
	15,0 %	0,577	
Volume total de poros	7,0 %*	0,01285	cm <sup>3</sup> /g
	15,0 %	0,00721	
Diâmetro médio de poros	7,0 %*	168,4	Å
	15,0 %	499,9	

Fonte: Autora e \*Barra et al. (2021).

Os resultados apresentados nas Tabelas 5.6 e 5.7 demonstram que, em relação às amostras de 7,0 %, a escória de chumbo-ácido apresenta área superficial 2,16 vezes maior que a do pó de pedra, além de volume total e diâmetro médio de poros 3,31 e 1,54 vezes maiores, respectivamente.

No que diz respeito às amostras de 15,0 %, tem-se que a escória de chumbo-ácido apresenta área superficial 9,34 vezes maior que a do pó de pedra, com um volume total de poros 3,97 maiores, em que pese apresentar diâmetro médio dos poros apenas 0,42 vezes em relação às frações rochosas.

Logo, em ambos os casos, depreende-se que os maiores indicadores referentes à superfície específica e volume total de poros pertinentes à escória de chumbo-ácido ensejam a tendência de maiores aportes de ligante betuminoso nas dosagens que as contêm, em comparação com os mesmos percentuais do pó de pedra, para que possa prover o envolvimento adequado das partículas granulares durante os procedimentos de usinagem das misturas asfálticas.

Esta parametrização corrobora a análise discorrida sobre as curvas granulométricas no tópico 5.1.2, em que é possível observar uma graduação mais fina para a amostra de escória de chumbo-ácido quando comparada à do pó de pedra.

#### 5.1.3.3 Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)

A composição dos óxidos da escória de chumbo-ácido por Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX), foi determinada com o uso do equipamento Shimadzu, modelo EDX 7000. As amostras foram preparadas com o teste de perda ao fogo (PF), seguindo a Norma ASTM D7348-07 (2007), a fim de se eliminar matéria orgânica 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 da análise química. A Tabela 5.8, apresenta os óxidos que compõe a escória de chumbo-ácido e do pó de pedra estudado por Barra et al. (2021).

Tabela 5.8 - Distribuição percentual dos óxidos componentes da escória de chumbo-ácido e do pó de pedra por FRX.

Elementos	Teor (% massa)	
	Escória	Pó de Pedra*
SiO <sub>2</sub>	3,149	53,602
CaO	9,224	8,080
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	10,928
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40,424	14,505
MgO	-	3,26
K <sub>2</sub> O	0,398	2,576
SO <sub>3</sub>	34,511	0,435
TiO <sub>2</sub>	-	1,228
ZrO <sub>2</sub>	0,028	0,111
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,103
ZnO	1,057	0,062
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,179	0,049
MnO	0,380	0,033
Rb <sub>2</sub> O	-	0,028
SrO	0,033	0,028
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,020
PbO	3,088	0,013
Na <sub>2</sub> O	-	0,639
SnO <sub>2</sub>	1,207	-
CuO	0,273	-
SrO	0,033	-
Outros	-	-
PF	6,030	2,519
Total	100,000	100,00

Fonte: Autora e \*Barra et al. (2021).

Quanto à escória de chumbo-ácido, verifica-se que o óxido Férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) é predominante na composição, pois durante o processo pirometalúrgico utilizado na reciclagem da escória primária, sobretudo na recuperação do Chumbo (Pb), para que ocorra a redução da sucata metálica a chumbo metálico, são adicionados Carbono (C) e Ferro (Fe) como agentes redutores do potencial oxidante dos elementos anódicos nas reações químicas, gerando a escória secundária (Chen et al., 2023; Machado, 2002).

Em tempo, o Carbono não é identificado nas análises de FRX quando procedimentos de Perda ao Fogo (PF) são realizados, devido ser liberado durante as reações exotérmicas sob a forma de gás carbônico (CO<sub>2</sub>).

No que diz respeito ao trióxido de Enxofre (SO<sub>3</sub>), trata-se do elemento base da formação do ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) quando o SO<sub>3</sub> entra em contato com a água (H<sub>2</sub>O), adquirindo característica fortemente ácida e corrosiva. Na composição das baterias, é a solução

eletrolítica responsável pela imersão dos eletrodos de Chumbo esponjoso (Pb) e em pó (PbO<sub>2</sub>), constituindo os pólos anódicos e catódicos, respectivamente (Carneiro et al., 2017; Garche, 2009). Este aspecto corrobora à classificação pela ABNT NBR 10004 (2004) da escória de chumbo-ácido como um resíduo sólido Classe I – Perigoso.

A presença de óxido de Cálcio (CaO) é justificada, pois em que pese o Pb na forma pura oferecer resistência à corrosão provocada pelo H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, devido inibir a proliferação de gases, trata-se de um material muito maleável, o que dificulta o processo produtivo das baterias. Logo, necessita da formação de ligas com outros elementos, como Antimônio (Sb), Arsênio (As), Bismuto (Bi), Cobre (Cu), Cálcio (Ca) e Estanho (Sn), por exemplo, para viabilizar o processo de fabricação (Burgess, 1995).

O dióxido de Silício ou Sílica (SiO<sub>2</sub>) tem a função separadora nas baterias de chumbo-ácido, estando localizado entre os eletrodos anódico e catódico, na forma de placa. A principal função é separar as substâncias ativas positivas e negativas das placas condutoras, a fim de evitar que os dois polos entrem em curto. Além disso, mantêm a reserva de eletrólito no espaço entre as placas, facilitando assim a condutância eletrolítica (Yang et al., 2014).

O óxido de Chumbo (PbO) tem o Pb como elemento principal da formação das placas das baterias de chumbo-ácido. Neste contexto, tem-se que a reação do Pb na forma pura com o Oxigênio (O) é a base do processo de formação do eletrodo catódico PbO<sub>2</sub> (Santin, 2012).

O dióxido de Estanho (SnO<sub>2</sub>) e o óxido de Zinco (ZnO) são utilizados em conjunto com o Pb na forma pura, com a finalidade de aumentar a resistência à corrosão e a capacidade de recarga para os eletrodos catódicos das baterias de chumbo-ácido (Pantaroto, 2008).

Os demais elementos identificados em menor escala na Tabela 5.8, são substâncias inorgânicas secundárias presentes na constituição das baterias de chumbo-ácido, basicamente vinculadas às reações produtoras de óxidos.

Desta forma, depreende-se que a escória de chumbo-ácido estudada nesta pesquisa possui característica fortemente eletropositiva, pois somando os percentuais apenas dos elementos Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, CaO e PbO, atinge-se 87,27 % da composição da amostra, e incorporando os percentuais correspondentes aos demais elementos catódicos secundários, supera-se a marca de 90,0 %, assemelhando-se bastante à quantificação percentual dos elementos nas análises de EDS no MEV.

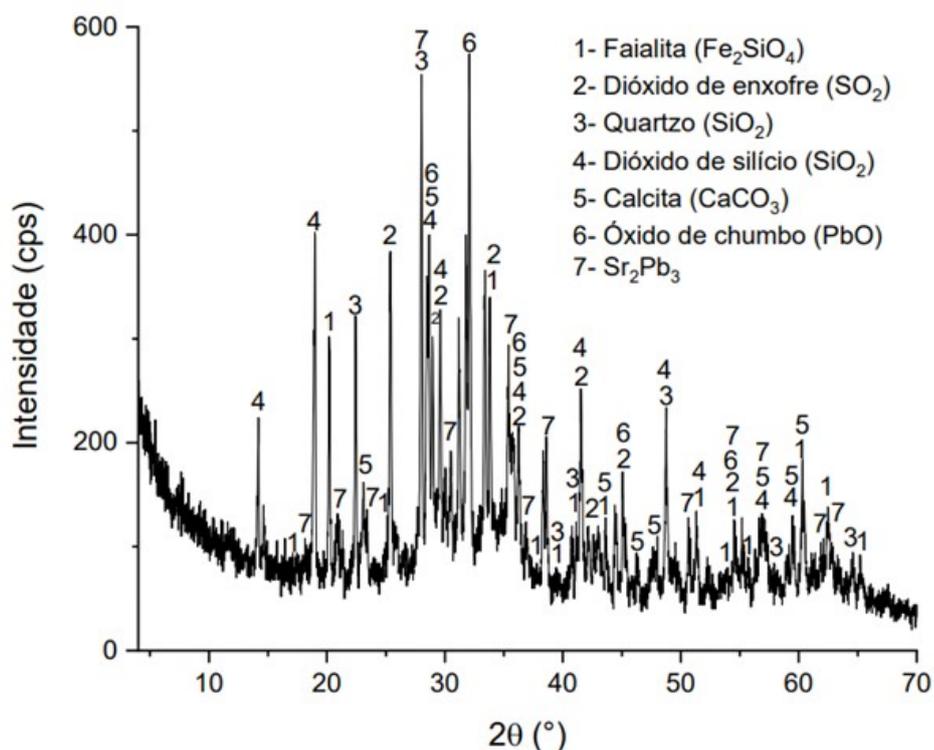
No que diz respeito ao pó de pedra, quando comparado à escória de chumbo-ácido, apresenta concentração de Sílica (SiO<sub>2</sub>) praticamente 50,0 % superior em sua composição. Nestes termos, o teor de SiO<sub>2</sub> do pó de pedra é considerado elevado, se comparado ao da escória,

caracterizando-o como um material de alta eletronegatividade, fator que propicia baixa adesividade ao ligante betuminoso, condição oposta à tendência apresentada pela escória.

#### 5.1.3.4 Difratometria de Raios-X (DRX)

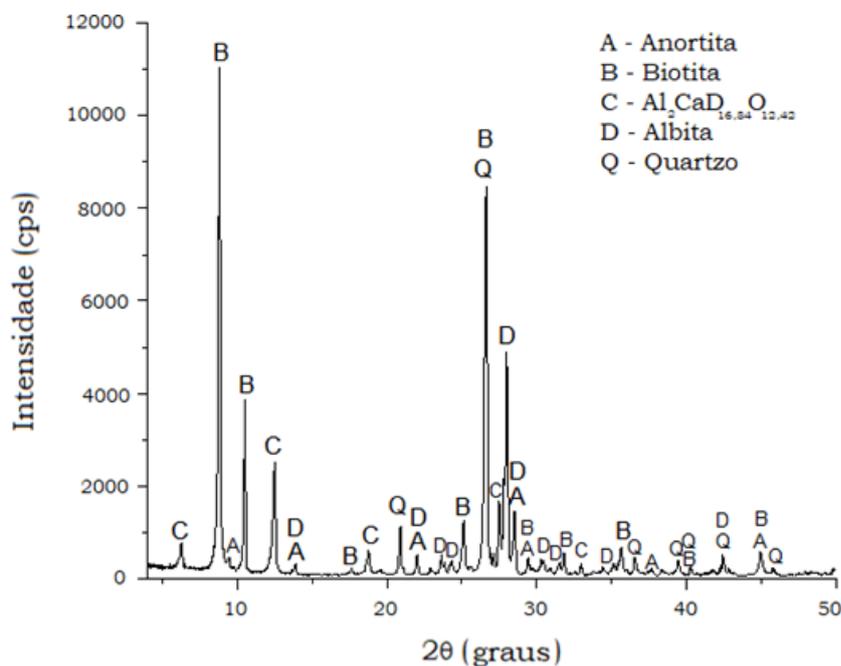
A análise difratométrica foi realizada com o uso do equipamento Shimadzu, modelo LabX XRD-6100. A identificação das fases da escória de chumbo-ácido (Figura 5.8) e do pó de pedra (Figura 5.9) foi obtida a partir da comparação dos resultados com os difratogramas contidos no banco de dados Crystallography Open Database (COD 2018), utilizando os softwares Match!3 e Origin 2019 Professional.

Figura 5.8 - Difrátograma da escória de chumbo-ácido.



Fonte: Autora.

Figura 5.9 - Difratoograma do pó de pedra.



Fonte: Barra et al. (2021).

A partir da análise do difratograma da Figura 5.8, tem-se que as fases metálico-cristalinas são predominantes na composição da escória de chumbo-ácido. Neste contexto, as fases de óxido de Chumbo ( $PbO$ ) e liga de Estrôncio-Chumbo ( $Sr_2Pb_3$ ) são as que apresentam os maiores picos de difração, devido ao Pb ser o elemento principal da composição das placas e eletrodos constituintes das baterias de chumbo-ácido. A associação com o Estrôncio deve-se à sua característica de acumulador de energia, auxiliando no carregamento das placas das baterias.

Quanto às fases dos silicatos ( $SiO_2$ ) sob a forma de óxidos e quartzo, tem-se que estão bastante relacionadas ao Silício (Si) utilizado como agente separador entre os eletrodos catódicos e anódicos, conforme já discorrido no tópico 5.1.3.3.

Corroborando a abordagem do tópico 5.1.3.3, a presença da fase correspondente à Calcita (Ca), gerando o composto Carbonato de Cálcio ( $CaCO_3$ ), ocorre devido a Ca ser utilizada como elemento de fortalecimento do Pb na forma pura durante o processo de fabricação das baterias de chumbo-ácido, enquanto o Carbono (C) é aplicado na condição de redutor oxidativo no beneficiamento da escória secundária. A fase de dióxido de Enxofre ( $SO_2$ ) está diretamente relacionada à composição base do eletrólito ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), que desempenha a função de transformar a energia química em elétrica, no contato com os eletrodos anódicos (Pb) e catódicos ( $PbO_2$ ).

Ainda, tem-se a fase do composto Faialita ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), a qual é oriunda da associação do óxido Férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) com o trióxido de Enxofre ( $\text{SO}_3$ ), ratificando a probabilidade de sua ocorrência suscitada na análise de EDS no tópico 5.1.3.1 no núcleo energético das baterias de chumbo-ácido.

Quanto ao pó de pedra, a Figura 5.9 indica picos referentes às presenças dos minerais anortita, biotita, albita e quartzo, corroborando as análises de FRX. Neste contexto, é possível observar um pico de forte intensidade de quartzo, dividindo destaque com outros silicatos secundários, como por exemplo, a biotita que apresenta variada intensidade de picos, seguida da albita, alumínio silicato e anortita, nesta ordem, os quais também compõe o grupo de formação da sílica ( $\text{SiO}_2$ ).

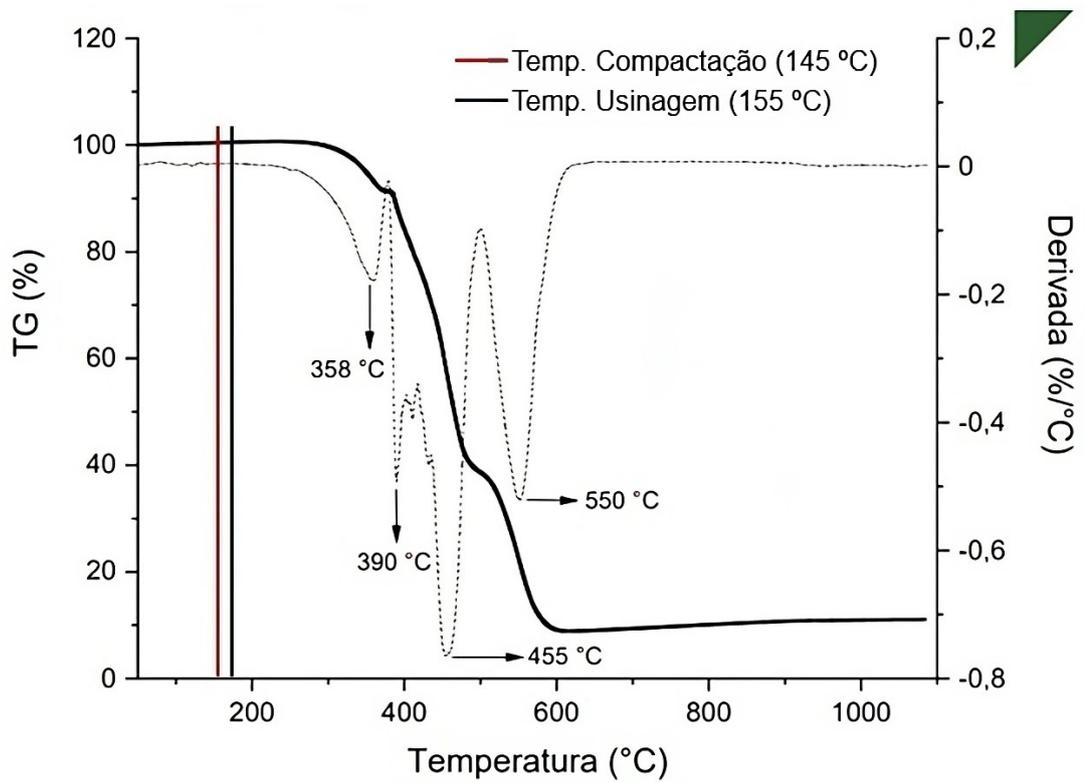
#### 5.1.3.5 Termogravimetria e Calorimetria Diferencial

A determinação da perda de massa foi realizada em função do aumento gradativo da temperatura. O objetivo principal consistiu em verificar a partir de qual temperatura o material começa a perder massa de maneira significativa quando aglutinado ao ligante betuminoso, com o indicativo de que deste ponto em diante as partículas de escória de chumbo-ácido deixam de contribuir gradativamente com as suas propriedades intrínsecas à formulação das misturas asfálticas.

As avaliações foram procedidas com uso do Analisador Termogravimétrico e de Calorimetria Diferencial (TGA/DSC) TA Instruments, modelo Discovery SDT 650. Em todos os casos, a temperatura foi elevada de 50 °C para 1100 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, sob atmosfera de ar sintético. Os dados foram tratados com o uso do software Origin 2019 Professional.

Para a amostra de ligante betuminoso + 7,0 % de escória, a perda de massa total obtida foi de 88,97 %, sendo observados quatro eventos de perda de massa exotérmicos nas temperaturas de 358 °C, 390 °C, 455 °C, e 550 °C. A Figura 5.10 ilustra a evolução da perda de massa (TGA) e sua primeira derivada (DTGA), representadas pelas linhas cheia e tracejada, respectivamente.

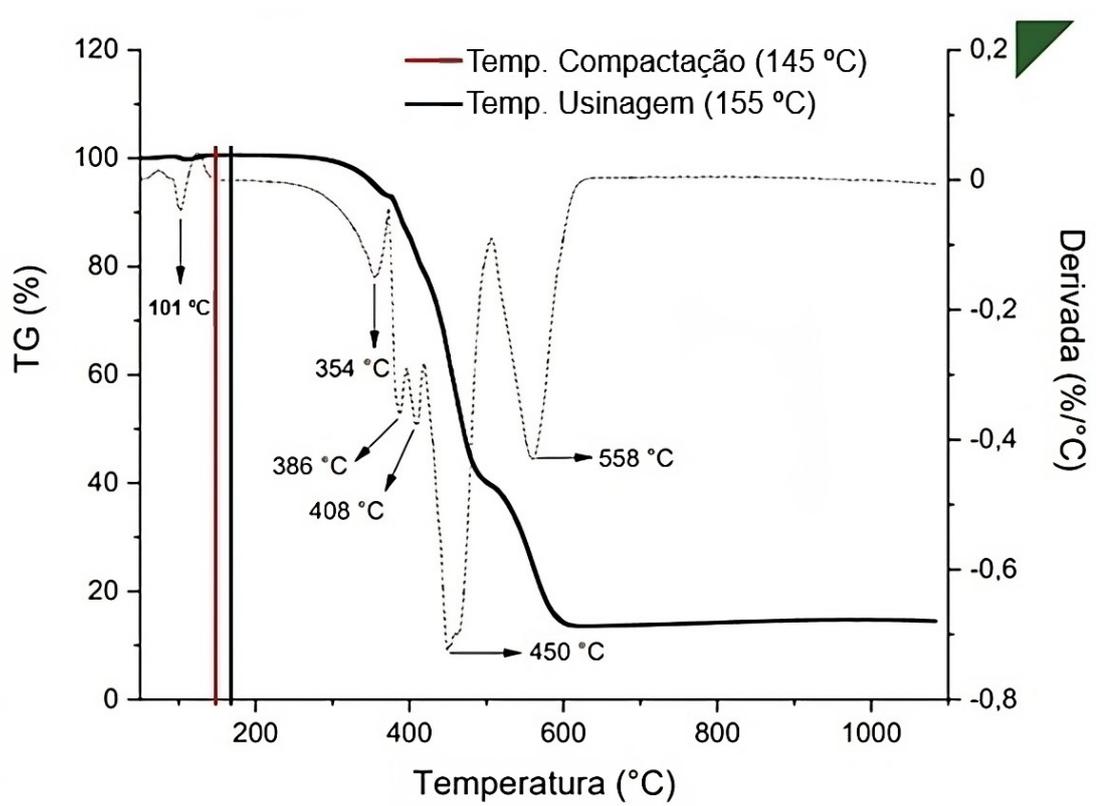
Figura 5.10 - TGA/DTGA da amostra de ligante betuminoso + 7,0 % de escória.



Fonte: Autora.

Cenário similar foi observado para a amostra de ligante betuminoso + 15,0 % de escória, em que a perda de massa total obtida foi de 85,58 %, com ocorrência de eventos exotérmicos às temperaturas de 101 °C, 354 °C, 386 °C, 408 °C, 450 °C e 558 °C. A Figura 5.11 ilustra a evolução da perda de massa (TGA) e sua primeira derivada (DTGA), representadas pela linha cheia e tracejada, respectivamente.

Figura 5.11 - TGA/DTGA da amostra de ligante betuminoso + 15,0 % de escória.



Fonte: Autora.

Analisando os termogramas das amostras, tem-se que as curvas termogravimétricas (TGA) sofreram perdas percentuais não significativas de massa até próximo da temperatura de 250 °C, indicando pouca suscetibilidade térmica da escória nesta faixa de utilização, sendo provocadas principalmente pela evaporação da água presente na composição eletrolítica de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) nas baterias de chumbo-ácido, bem como da volatilização de frações leves do ligante betuminoso.

A única distinção notável entre as amostras foi a verificação de um evento exotérmico a 101 °C e adjacências para 15,0 % de escória, quando comparada à de 7,0 %, o que pode ser explicado pela combinação do ponto de ebulição da água (100 °C) com a proximidade do ponto de fusão do Enxofre (S;  $\cong 112,8$  °C), contribuindo para a liberação de gases, devido serem elementos encontrados em concentração naturalmente superior nas amostras com 15,0 %.

Quanto às perdas de massa observadas na faixa de temperaturas entre 300 °C e 400 °C, tem-se que estão fortemente relacionados ao ponto de fusão do Chumbo (Pb;  $\cong 327,5$  °C), constituindo uma das fases cristalinas de maior proeminência das escórias estudadas, conforme ilustrado na Figura 5.8.

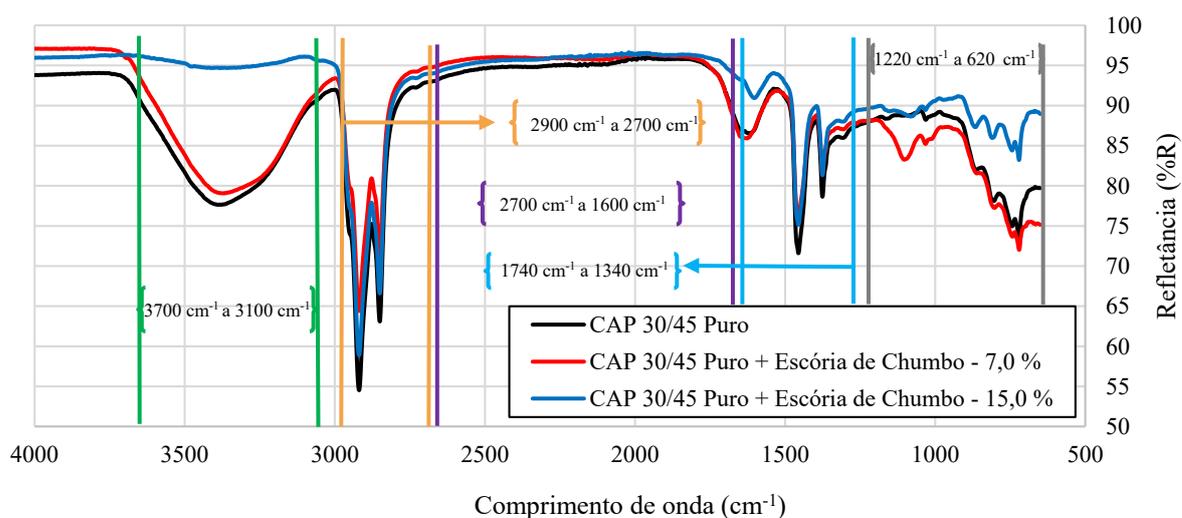
Porém, os fenômenos exotérmicos verificados após 400 °C, sobretudo nas temperaturas de 455 °C e 450 °C, com 7,0 % e 15,0 %, respectivamente, compreendem a região do ponto de ebulição do enxofre ( $S$ ;  $\cong 444,7$  °C), principal componente do eletrólito  $H_2SO_4$  das baterias de chumbo-ácido, e que juntamente com o  $PbO$  representa uma das fases cristalinas mais importantes da escória em análise. Inclusive, é possível perceber que nas temperaturas mencionadas dos termogramas, os percentuais de perda de massa representam praticamente a totalidade do montante verificado em todo o processo termogravimétrico, conforme se observa nas curvas correspondentes às derivadas DTGA.

A partir de 600 °C nota-se a estabilização da degradação estrutural da escória de chumbo-ácido, para ambas as amostras testadas, situação evidenciada pela constância linear das curvas DTGA.

#### 5.1.3.6 Espectroscopia Infravermelha por Transformada de Fourier (FTIR)

As análises foram realizadas a partir da técnica de Espectroscopia Infravermelha por Transformada de Fourier (FTIR). Os espectros obtidos são expressos em percentual de refletância (% R) por comprimento de onda ( $cm^{-1}$ ) (Figura 5.12), com o uso do software Spectrum, utilizando o método de Reflexão Total Atenuada Universal (UATR).

Figura 5.12 - Espectros por FTIR das amostras: (preta) ligante betuminoso puro (vermelha) ligante betuminoso + 7,0 % de escória, e (azul) ligante betuminoso + 15,0 % de escória.



Fonte: Autora.

Analisando comparativamente os resultados obtidos no ensaio de FTIR, é possível perceber uma estabilidade espectral de todas as amostras na faixa de comprimentos de onda compreendida no intervalo entre  $2700\text{ cm}^{-1}$  e  $1600\text{ cm}^{-1}$ , com bandas isoladas a  $1700\text{ cm}^{-1}$  referentes à formação de grupos carbonílicos (C=O), podendo-se destacar a presença dos ácidos carboxílicos, bem como vibrações moleculares pertinentes às ligações do grupo H–O–H.

Cabe ressaltar que os grupos O–H, em que pese serem correlacionados à formação de grupos carboxílicos, também podem ser atribuídos à umidade presente nas amostras, oriundas tanto da higroscopia resultante do contato com a umidade do ar, quanto da presença de água adicionada ao trióxido de Enxofre ( $\text{SO}_3$ ) para a formação do eletrólito ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

Verifica-se a presença de vibrações com forte oscilação na região entre  $3700\text{ cm}^{-1}$  e  $3100\text{ cm}^{-1}$ , principalmente para as amostras de ligante puro e com 7,0 % de escória, provocadas pela presença de grupos relativos às ligações com o átomo de Hidrogênio (H), ou seja, as pontes de Hidrogênio, mais especificamente o Oxigênio (O–H) e formações de Carbonatos ( $\text{CO}_3$ ), com destaque para as associações com a Calcita (Ca). No caso das amostras com 15,0 % de escória, tem-se que as bandas de refletância apresentam pouca oscilação, indicando maior estabilidade nas ligações dos elementos supracitados.

Na faixa entre  $2900\text{ cm}^{-1}$  e  $2700\text{ cm}^{-1}$  as inflexões constatadas se dão devido ao alongamento das vibrações das cadeias asfálticas dos grupos C–H, que caracterizam a natureza do ligante betuminoso como hidrocarboneto, constituindo o maior percentual de sua composição química.

Na região de  $1740\text{ cm}^{-1}$  até próximo de  $1340\text{ cm}^{-1}$  ocorrem diversas variações de bandas atribuídas às ligações moderadas de massa do grupo C–O e C–H. Em torno de  $1220\text{ cm}^{-1}$  a  $620\text{ cm}^{-1}$  destacam-se picos relativos à presença dos grupos sulfóxido (S=O) e silicatos, provenientes tanto do Enxofre (S) contido no eletrólito  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e, em ligações Si–O, Zn–O e Al–O existentes nas placas separadoras e elementos anticorrosivos utilizados na proteção das placas e eletrodos de Pb.

É importante destacar que as descrições espectrais apresentadas estão em consonância com pesquisas conduzidas por diversos autores (Liu et al., 2023; Sun et al., 2020; Zhang et al., 2020; Onisei et al., 2012; Barna et al., 2004).

#### 5.1.4 Ligante betuminoso

O ligante betuminoso utilizado é classificado por penetração como 30/45 (0,1 mm), em sua forma pura, produzido pela refinaria REPLAN da Petrobrás, localizada em Paulínia/SP,

e fornecido pela empresa CBB Asfaltos, de Curitiba/PR. A Tabela 5.9 apresenta as propriedades características do material.

Tabela 5.9 - Parâmetros característicos do ligante betuminoso 30/45.

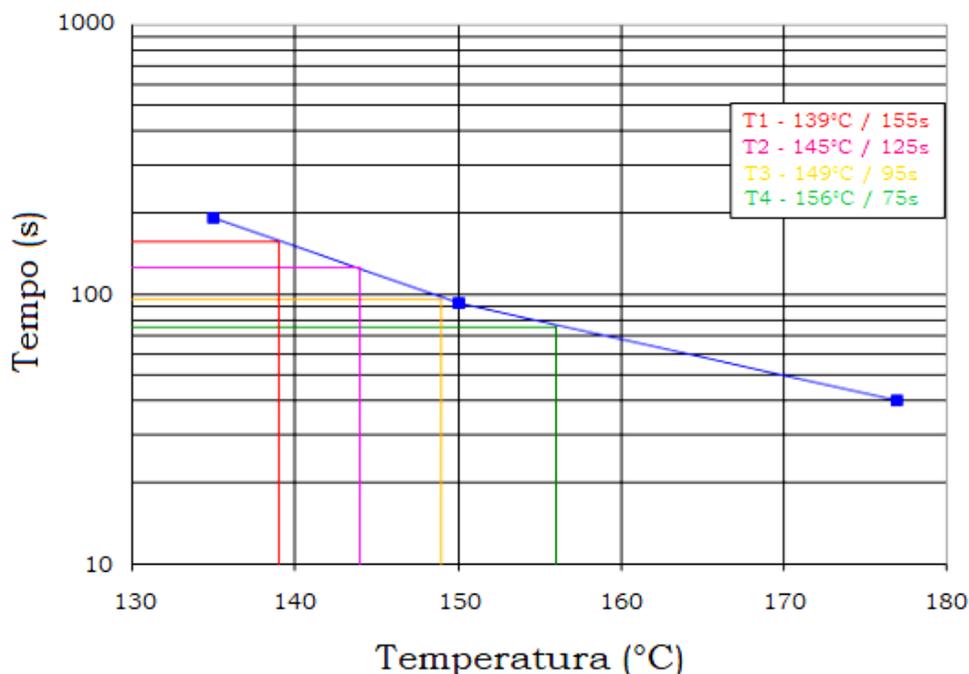
Características	Método	Resultado	Especificação	Unidade
Penetração	D 5	34	30 a 45	0,1 mm
Ponto de amolecimento	D 36	53,5	52 mín.	°C
Ductilidade a 25°C	D 113	> 150	60 mín.	% massa
Solubilidade no tricloroetileno	D 2042	99,9	99,5 mín.	%
Ponto de fulgor	D 92	352	235 mín.	°C
Índice de susceptibilidade térmica	X 18	- 1,2	-1,5 a 0,7	-
Densidade relativa a 24°C	D 70	1,01	-	°C
Aquecimento a 177°C	X 215	Não espuma	Não espuma	°C

Fonte: REPLAN (2018).

Pela Tabela 5.9 é possível constatar que o índice de suscetibilidade térmica (IP) do ligante betuminoso utilizado é de -1,2, ou seja, muito próximo do limite inferior de -1,5, indicando uma suscetibilidade térmica elevada.

A Figura 5.13 ilustra a curva de viscosidade do material, que permitiu determinar as temperaturas de compactação em 145 °C e de usinagem em 155 °C, além do aquecimento dos granulares em 168 °C, ou seja, 13 °C acima da temperatura de usinagem, estando em conformidade com o intervalo de 10 °C a 15 °C normalmente praticado (Bernucci et al., 2022).

Figura 5.13 - Curva de viscosidade Saybolt-Furol do ligante betuminoso 30/45.



Fonte: Siroma (2018).

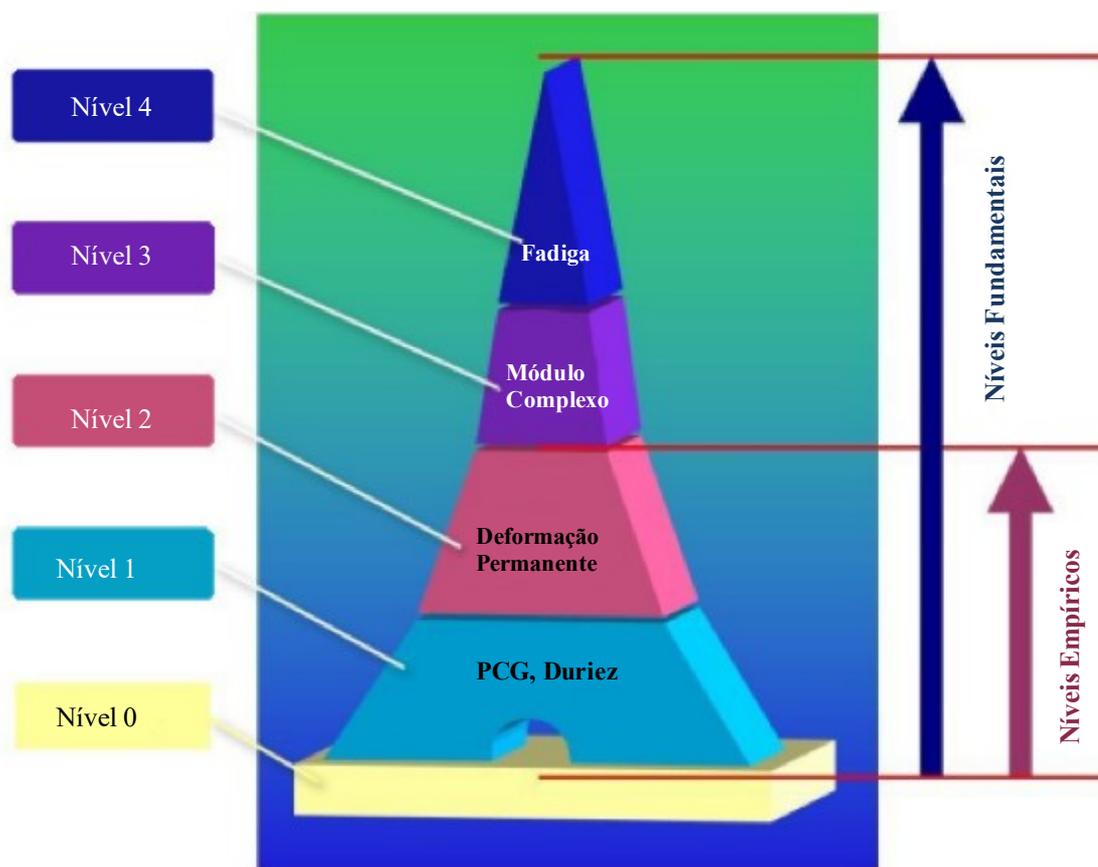
## 5.2 MÉTODOS

### 5.2.1 Considerações sobre a metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas

De acordo com o Manuel LPC (2007), a metodologia francesa para formulação de misturas asfálticas é fundamentada em uma sequência de cinco níveis classificatórios e eliminatórios compostos por diferentes análises, com o objetivo avaliar o comportamento dos materiais submetidos a distintas condições de condicionamento e sollicitação.

Para que uma dada formulação seja considerada apta à aplicação em campo, deverá ser avaliada em cada um dos níveis correspondentes a sua característica de concepção e finalidade na estrutura do pavimento que será composto. Estes ensaios possuem caráter eliminatório, ou seja, a não conformidade em qualquer etapa de análise dos parâmetros estabelecidos normativamente rejeita a formulação testada, tornando necessário o ajuste ou mesmo o projeto de uma nova mistura asfáltica. A Figura 5.14 ilustra a sequência dos níveis de avaliação previstos pela metodologia francesa.

Figura 5.14 - Níveis de avaliação da metodologia francesa para a formulação de misturas asfálticas.



Fonte: Adaptado de Manuel LPC (2007).

O nível 0 estabelece os parâmetros preliminares para a formulação de uma mistura asfáltica, ou seja, consiste no estudo e caracterização dos materiais. Neste nível, define-se também a composição granulométrica pretendida, de forma a enquadrá-la nas características do tipo de mistura que se intenta estudar e que esteja prevista na metodologia francesa, a fim de se estabelecer os critérios normativos que deve atender durante os testes.

O nível 1 avalia a habilidade de compactação da mistura asfáltica na Prensa de Compactação Giratória (PCG) e a resistência à ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18 °C.

O nível 2 avalia a deformação permanente da mistura asfáltica, em relação ao afundamento gerado na trilha de roda a 60 °C.

Os níveis 3 e 4 destinam-se a analisar, respectivamente, o módulo de rigidez complexo e a resistência à fadiga da mistura asfáltica projetada, sob as condições de solitação dinâmica, no domínio frequencial, e com controle do deslocamento.

A metodologia francesa classifica estes níveis em dois grupos, sendo eles: os níveis empíricos e os níveis fundamentais. Os empíricos correspondem aos níveis 0, 1 e 2, e recebem

essa denominação por envolverem uma matriz de variáveis muito amplas, com fenômenos caóticos 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 provocado pela tensão superficial da água. Ou seja, de difícil modelagem matemática, que exigem ao pesquisador realizar experiências com base no conhecimento prévio das propriedades dos materiais e dos conceitos científicos correlatos, a fim de encontrar os melhores parâmetros para a condição analisada.

Os fundamentais compreendem os níveis 3 e 4, e abordam fenômenos já bem descritos e modelados matematicamente, de forma que viabilizam uma avaliação precisa e racional dos parâmetros analisados, sendo utilizados na rotina de dimensionamento das estruturas de pavimento.

É importante salientar que para executar os testes dos níveis fundamentais é necessário atender às exigências dos níveis empíricos (Barra 2009; Guerrero Pérez, 2009; LCPC, 2007; Sauterey et al. 2001). Entretanto, a campanha experimental desta pesquisa abrange apenas a execução dos níveis empíricos (Figura 5.14), sendo os níveis fundamentais (módulo complexo e fadiga) sugestão para trabalhos futuros.

### 5.2.2 Massa Volumétrica Real (MVR)

A Massa Volumétrica Real (MVR) é um parâmetro físico que visa determinar a massa específica real da mistura asfáltica não compactada, sendo necessário como dado de entrada no ensaio de habilidade de compactação com o uso da Prensa de Compactação Giratória (PCG), a ser abordado no tópico 5.2.3.

Os procedimentos operacionais são definidos pela norma AFNOR NF EN 12697-5 (2019). A Figura 5.15 ilustra as etapas de execução.

Figura 5.15 - Ensaio MVR.



Fonte: Autora.

A MVR é determinada com base na média de duas amostras para cada teor de ligante betuminoso (Equação 5.3).

$$MVR = \frac{m_2 - m_1}{1000 V_{pic.} - \frac{m_3 - m_2}{\rho_{\text{água}}}} \quad (5.3)$$

Onde:

- MVR : massa volumétrica real da mistura asfáltica, em g/cm<sup>3</sup>;  
 m<sub>1</sub> : massa do conjunto picnômetro + água, em g;  
 m<sub>2</sub> : massa do conjunto picnômetro + água + amostra, em g;  
 m<sub>3</sub> : massa do conjunto picnômetro + água + amostra, após a bomba de vácuo, em g;  
 V<sub>pic</sub> : volume do picnômetro calibrado, em cm<sup>3</sup>;  
 ρ<sub>água</sub> : massa específica da água a uma determinada temperatura, em g/cm<sup>3</sup>.

Nesta etapa inicial foram testados os seguintes teores de ligante betuminoso para formulação das misturas asfálticas:

- Referência: 4,54 %, 4,70 % e 4,86 % (Persike, 2023);

- 7,0 % e 15,0 % de escória de chumbo-ácido: 4,22 %, 4,54 %, 4,86 %, 5,18 %, 5,50 %, 5,82 %, 6,14 %, 6,46 %, 6,78 %, 7,10 %, e 7,42%.

A Tabela 5.10 apresenta os resultados obtidos no ensaio de MVR para as formulações testadas.

Tabela 5.10 - MVR das misturas asfálticas.

Formulação	Teor de Ligante (%)	MVR (g/cm <sup>3</sup> )
BBSG 0/14 mm – Referência (PERSIKE, 2023).	4,54	2,512
	4,70	2,510
	4,86	2,508
BBSG 0/14 mm – 7,0 % Escória	4,22	2,561
	4,54	2,546
	4,86	2,531
	5,18	2,516
	5,50	2,501
	5,82	2,486
	6,14	2,471
	6,46	2,456
	6,78	2,441
	7,10	2,426
BBSG 0/14 mm – 15 % Escória	7,42	2,411
	4,22	2,633
	4,54	2,616
	4,86	2,600
	5,18	2,583
	5,50	2,566
	5,82	2,549
	6,14	2,532
	6,46	2,516
	6,78	2,499
7,10	2,482	
	7,42	2,465

Fonte: Autora.

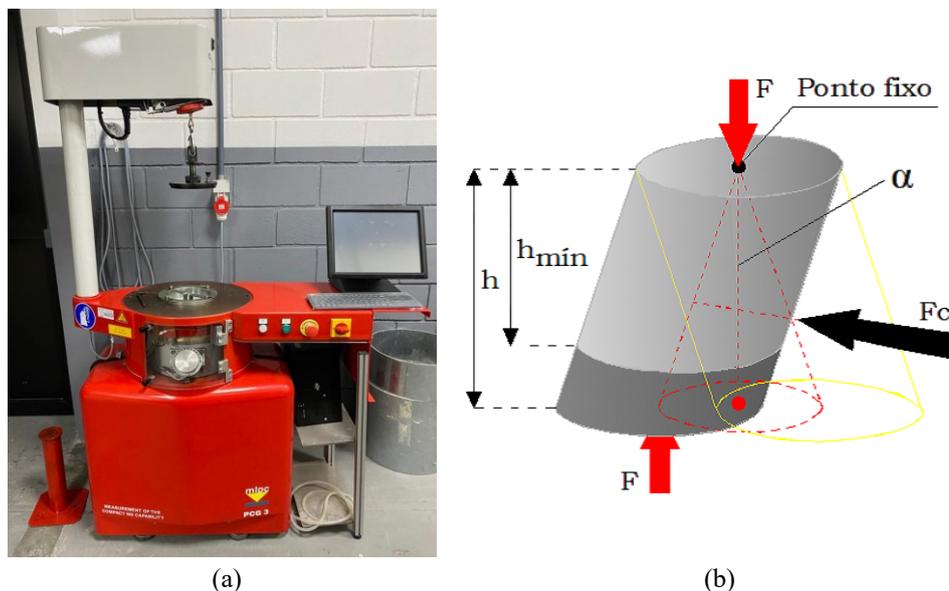
Contudo, durante os ensaios de MVR foi verificado no caso das amostras com 7,0 % e 15,0 % de escória de chumbo-ácido, que as dosagens de ligante betuminoso abaixo de 5,50 % apresentaram difícil trabalhabilidade no processo de mistura e também falhas no recobrimento completo das partículas granulares, indicando a impossibilidade de utilizá-las nos níveis avaliativos seguintes. Por estas razões, foram descartadas.

### 5.2.3 Habilidade de compactação

O princípio deste ensaio é verificar a habilidade de compactação das misturas asfálticas, a partir do uso da Prensa de Compactação por Cisalhamento Giratória (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019), impondo uma compactação lenta e isotérmica sob

compressão estática, executada por um movimento giratório (cisalhante) de uma das faces do corpo de prova em torno do eixo de simetria, aplicando um ângulo  $\alpha$ . A Figura 5.16 apresenta uma PCG-3 e seu princípio de funcionamento.

Figura 5.16 - (a) Prensa de Compactação Giratória (PCG-3) e (b) seu princípio de funcionamento.



Fonte: Autora.

A massa dos corpos de prova foi calculada a partir da Equação 5.4, considerando as dimensões de 150,0 mm, tanto para o diâmetro quanto para a altura mínima ( $h_{\min}$ ) correspondente à condição de máxima densificação da formulação. Os valores de MVR foram considerados de acordo com cada dosagem testada, conforme estabelecido na Tabela 5.10.

$$M = 2,651 MVR; \varnothing = 150,0 \text{ mm} \quad (5.4)$$

Onde:

- M : massa do corpo de prova, em g;  
MVR : massa volumétrica real da mistura asfáltica, em g/cm<sup>3</sup>.

A temperatura de compactação foi definida em 145 °C conforme abordado no tópico 5.1.4, em razão das características de viscosidade do ligante betuminoso utilizado. Cabe destacar que o controle de temperatura da mistura asfáltica na estufa é primordial para a correta execução do ensaio e obtenção de resultados confiáveis, devido à forte sensibilidade da PCG no ato da compactação. Por esta razão, é procedido um controle rigoroso da temperatura com o

auxílio de um termopar digital Autonics TC4S com precisão de  $\pm 1,0$  °C, introduzido na porção central da mistura asfáltica no interior do molde (Figura 5.17).

Figura 5.17 - Controle de temperatura com auxílio de termopar digital.



Fonte: Autora.

A Figura 5.18 ilustra os processos de preparação das amostras e desmoldagem dos corpos de prova, bem como a Figura 5.19 os dispõe após a conclusão de todo o procedimento de ensaio.

Figura 5.18 - Preparação e extração das amostras.



Fonte: Autora.

Figura 5.19 - Corpos de prova desmoldados após o ensaio.



Fonte: Autora.

Durante o ensaio, a medição das alturas  $h_{(ng)}$  e da respectiva percentagem de vazios (%v) é registrada pelo sistema de aquisição de dados do equipamento interligado a um terminal informatizado. De posse das alturas  $h_{(ng)}$  medidas pelo equipamento e da altura mínima ( $h_{min}$ ) do corpo de prova determinada previamente, é possível obter o percentual de vazios para cada número de giros analisado (Equação 5.5).

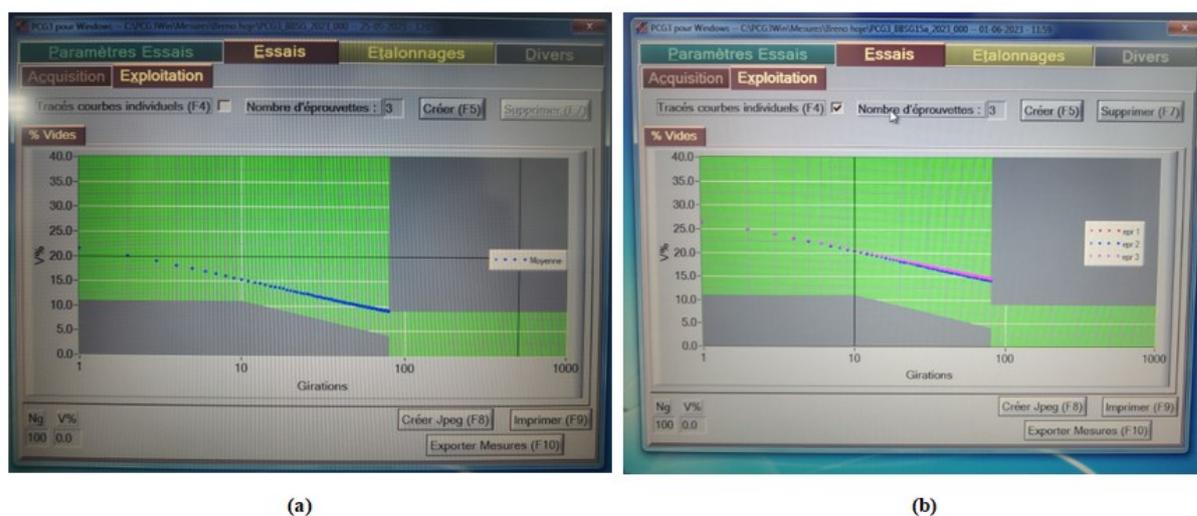
$$\%V = 100 \left( \frac{h_{(ng)} - h_{(min)}}{h_{(ng)}} \right) \quad (5.5)$$

Onde:

- %V : porcentagem de vazios da mistura asfáltica;  
 $h_{(ng)}$  : altura média de três medições da altura do corpo de prova por giro, em mm;  
 $h_{min}$  : altura mínima do corpo de prova, em mm.

O equipamento fornece a evolução gráfica semi-logarítmica do percentual de vazios em relação ao número de giros (Figura 5.20). Pode-se observar a definição dos limites normativos para a mistura asfáltica testada, em que caso os pontos plotados estejam situados fora da condição limítrofe, a formulação é considerada reprovada.

Figura 5.20 - Análise gráfica gerada pela interface computacional da PCG: formulação (a) aprovada e (b) reprovada.



Fonte: Autora.

Para efeito de avaliação pelo projetista, o parâmetro normativo da metodologia francesa para misturas do tipo *Béton Bitumineux Semi Grenus* BBSG 0/14 mm preconiza que a formulação deve conter um percentual de vazios mínimo de 11,0 % a 10 giros, e entre 4,0 % e 9,0 % após 80 giros (Manuel LPC, 2007).

#### 5.2.4 Duriez

O ensaio de Duriez (AFNOR NF EN 12697-12, 2018) avalia a influência da ação deletéria da água nas misturas asfálticas. Foram moldados 12 corpos de prova por teor de ligante

betuminoso, à compressão por duplo pistão, com carga constante de 6,0 t durante 5 minutos (Figura 5.21).

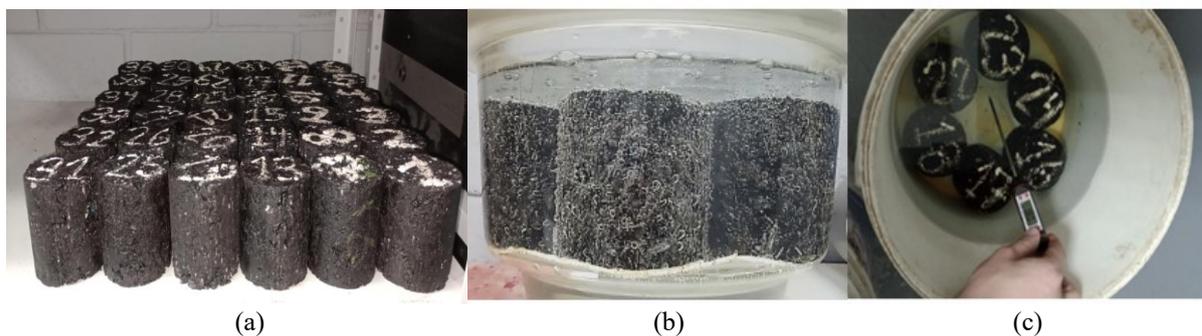
Figura 5.21 - Procedimentos de mistura, moldagem por compactação a duplo pistão, e extração dos corpos de prova.



Fonte: Autora.

Cada conjunto com 12 corpos de prova é dividido em dois subconjuntos com 6 unidades, em que metade é conservada em câmara a seco, com umidade relativa do ar a  $60 \pm 10 \%$ , e a outra parte imersa em água, ambas as situações por 7 dias consecutivos a  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ . Todavia, antes da imersão na água, devem ser submetidos ao processo de desobstrução dos vazios, a partir da aplicação de jatos de ar comprimido, seguido de saturação por 2 horas em dessecador com auxílio de bomba de vácuo, a uma pressão de 350mmHg (Figura 5.22).

Figura 5.22 - Corpos de prova (a) em câmara a seco, (b) durante o processo de saturação à vácuo e, (c) imersos em água a 18 °C.



Fonte: Autora.

Após o período de condicionamento das amostras, todos os corpos de provas são submetidos à compressão simples (Figura 5.23; Equação 5.6), em que os resultados das unidades condicionadas a seco (R) e imersas em água (r), para cada teor de ligante, são expressos na forma de relação média r/R.

Figura 5.23 - Ruptura à compressão simples dos corpos de prova.



Fonte: Autora.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.6)$$

Onde:

F : carga máxima de ruptura do corpo de prova, em kgf;

A : área da seção transversal do corpo de prova, em cm<sup>2</sup>.

$\sigma = r$  : resistência à compressão simples para o corpo de prova imerso em água.

$\sigma = R$  : resistência à compressão simples para o corpo de prova seco.

Para misturas asfálticas do tipo BBSG 0/14 mm, a relação média  $r/R$  de cada conjunto amostral testado deve ser maior que 0,70, isto é, não pode haver mais que 30 % de perda da resistência à compressão simples pela ação deletéria da água.

### 5.2.5 Lixiviação

O ensaio de lixiviação simula a condição de um resíduo quando submetido à ação intempérica, determinando a capacidade de transferência para o solo de substâncias orgânicas e inorgânicas que o constitui.

O processo de transferência se dá pela sua dissolução em um meio extrator. O ensaio consiste do contato do resíduo em estudo com uma solução lixiviante até que se atinja uma condição estável, ou seja, sem que haja a percepção de modificações da textura ou coloração. Após este período, a solução formada pelo contato das fases é filtrada e o líquido obtido é analisado, sendo denominado de extrato lixiviado.

Nesta pesquisa, os ensaios de lixiviação para determinação da toxicidade da escória de chumbo-ácido foram realizados conforme a norma ABNT NBR 10005 (2004), visando diferenciar os resíduos classificados pela ABNT NBR 10004 (2004) como classe I – perigosos e classe II – não perigosos.

A amostra foi obtida por trituração, a fim de se alcançar granulometria com diâmetro da ordem de 9,6 mm, para promover uma boa área superficial de extração. Ato contínuo, foi pesada em três porções de 100 g cada, e colocadas em 2 litros da solução lixiviante previamente preparada. A solução consistiu da adição de 5,7 ml de ácido acético p.a. em água destilada e deionizada, avolumada para 1 litro, com pH entre  $2,88 \pm 0,05$ .

A solução lixiviante com a amostra sólida é misturada a  $30 \pm 2$  rpm, em agitador magnético rotativo durante 18 horas (Figura 5.24).

Figura 5.24 - Agitador rotativo utilizado no ensaio de lixiviação.



Fonte: Merck Millipore (2023).

Após agitação, a solução foi conduzida ao equipamento de filtração de resíduos perigosos (Figura 5.25), constituído por filtros com porosidade de 0,45  $\mu\text{m}$ .

Figura 5.25 - Filtro de sistema de filtração de resíduos perigosos.



Fonte: Merck Millipore (2023).

O extrato lixiviado foi analisado por espectrometria de emissão atômica em ICP-AES (*Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometer*), e os resultados comparados com os limites de concentração previstos no anexo F da norma ABNT NBR 10004 (2004).

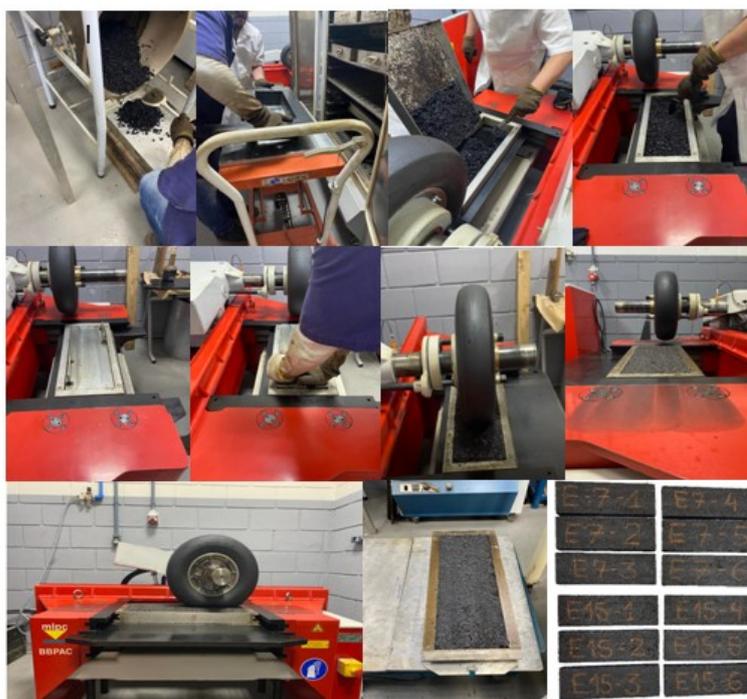
O pH dos resíduos de escória de chumbo-ácido foi determinado de acordo com o procedimento descrito no item 4.2.1.2 da norma ABNT NBR 10004 (2004), em que com o auxílio de um pHmetro foram pesadas 20 g de cada uma das amostras de escória de chumbo-ácido.

Estas amostras foram previamente secas em estufa a 100 °C, dissolvidas em 20 ml de água destilada e deionizada na proporção de 1:1 em massa, e misturadas em agitador magnético por 15 minutos. Após esse processo, foi feita a medição individual do pH dos resíduos com o auxílio do pHmetro previamente calibrado.

#### 5.2.6 Deformação permanente

O ensaio de deformação permanente (AFNOR NF EN 12697-22, 2020) consiste em verificar a resistência das misturas asfálticas ao afundamento nas trilhas de roda, a partir do teste de placas com 50,0 mm de espessura, 180,0 mm de largura e 500,0 mm de comprimento, moldadas em uma mesa eletropneumática de compactação (Figura 5.26).

Figura 5.26 - Compactação das placas para o ensaio de deformação permanente.



Fonte: Autora.

Após a compactação das placas, o ensaio de deformação permanente é realizado utilizando um par de placas por teor de ligante, aplicando-se de ciclos de carregamento com eixo de roda simples e textura lisa, carga de 5,0 kN, pressão de inflação de 0,6 MPa, à frequência de 1 Hz a 60 °C (Figura 5.27). Para tanto, antes do início da aplicação dos ciclos, é necessário que a câmara térmica da máquina seja condicionada a 60 °C por pelo menos 4 horas, sendo monitorada por uma sonda inserida na placa de teste (Figura 5.28).

Figura 5.27 - Máquina de deformação permanente.



Fonte: Autora.

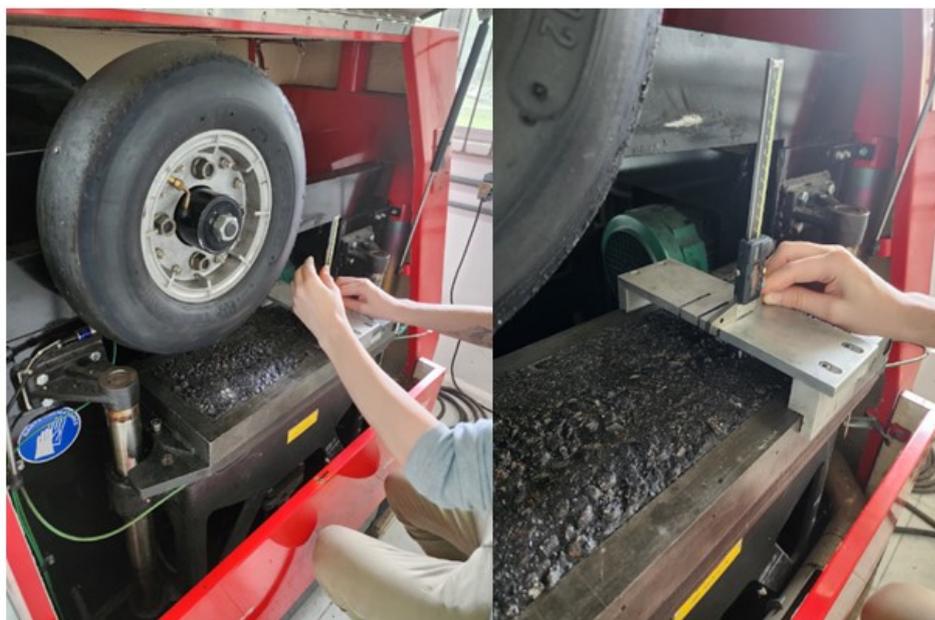
Figura 5.28 - Placa posicionada na máquina com a sonda de monitoramento de temperatura.



Fonte: Autora.

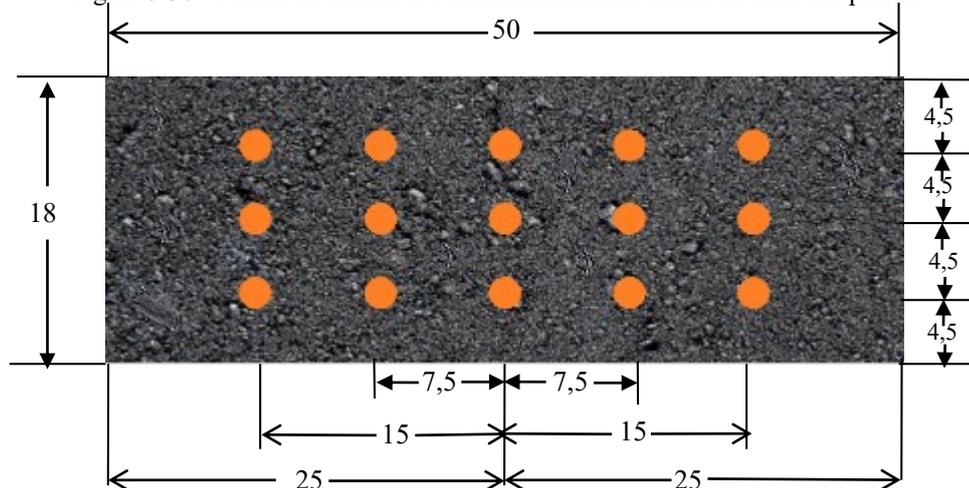
São realizadas leituras de referência com auxílio de um pórtico e um paquímetro (Figura 5.29), para determinar as condições superficiais de partida das placas, em 15 pontos distintos (Figura 5.30).

Figura 5.29 - Leitura dos afundamentos com o paquímetro.



Fonte: Autora.

Figura 5.30 - Pontos de leitura dos afundamentos nas trilhas de roda das placas.



Fonte: Autora.

Em seqencia, os mesmos pontos iniciais ilustrados na Figura 5.30 são utilizados para aferição dos resultados obtidos após 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos, obtendo-se para cada série de ciclos, a média dos afundamentos gerados pela ação do carregamento.

Caso o afundamento médio das placas alcance 15,0 % do valor da espessura inicial, após qualquer série de ciclos de solicitação, o ensaio deve ser imediatamente interrompido. A profundidade das trilhas de rodas é calculada conforme a Equação 5.6.

$$Y = A \left( \frac{N}{1000} \right)^b \quad (5.7)$$

Onde:

- Y : profundidade da deformação em N ciclos;
- A : profundidade da deformação a 1.000 ciclos;
- N : Número de ciclos;
- b : inclinação da reta correspondente à evolução dos afundamentos na trilha de roda.

A metodologia francesa classifica as misturas do tipo BBSG 0/14 mm em três classes distintas, com relação ao percentual de afundamento na trilha de roda (Manuel LPC, 2007), sendo:

- Classe 1: afundamento  $7,51 \% < Y \leq 10,0 \%$  da espessura da placa;
- Classe 2: afundamento  $5,01 \% < Y \leq 7,50 \%$  da espessura da placa;
- Classe 3: afundamento  $\leq 5,00 \%$  da espessura a placa.

Caso o afundamento na trilha de roda obtido após 30.000 ciclos seja maior do que 10 % da espessura da placa, a mistura asfáltica deve ser rejeitada.

## CAPÍTULO 6

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante a campanha experimental da pesquisa, bem como as discussões técnicas correspondentes.

Conforme mencionado nos tópicos 1.1.2 e 1.2, devido Persike (2023) ter executado a mesma matriz de ensaios, com igual formulação (BBSG 0/14 mm) e fontes de materiais utilizados nesta pesquisa, porém, produzida integralmente com frações britadas gnáissicas, foram consideradas como as misturas asfálticas de referência, para o estabelecimento de comparativos de desempenho e análise às formulações propostas com o uso da escória de chumbo-ácido.

Para efeito de informação, a dosagem de referência com 4,70 % de ligante betuminoso foi a escolhida como a mais adequada entre todas as formulações estudadas na pesquisa de Persike (2023), considerando o conjunto dos parâmetros avaliados. Contudo, são também apresentados os resultados obtidos para as dosagens de 4,54 % e 4,86 %, para que tenha uma visão ampla dos cenários testados.

#### 6.1 HABILIDADE DE COMPACTAÇÃO

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 nos critérios normativos da metodologia francesa para misturas asfálticas do tipo BBSG 0/14 mm, com percentual de vazios respeitando o percentual de vazios mínimo de 11,0 % a 10 giros, e entre 4,0 % e 9,0 % após 80 giros (Manuel LPC, 2007) conforme abordado no tópico 5.2.3.

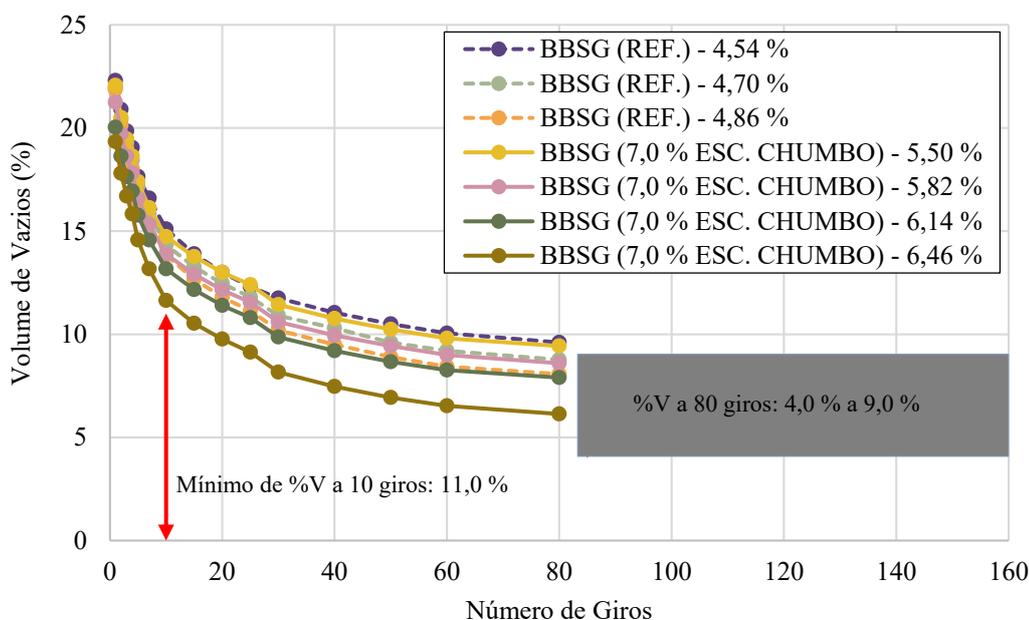
Tabela 6.1 - Resultados dos ensaios de habilidade de compactação na PCG.

Teor de Ligante (%)	Referência*		7,0 % Escória de chumbo-ácido		15,0 % Escória de chumbo-ácido	
	10	80	10	80	10	80
4,54	15,1	9,6	-	-	-	-
4,70	14,3	<b>8,8</b>	-	-	-	-
4,86	13,8	<b>8,1</b>	-	-	-	-
5,50	-	-	14,7	9,4	19,3	14,5
5,82	-	-	13,9	<b>8,6</b>	-	-
6,14	-	-	13,2	<b>7,9</b>	15,5	9,9
6,46	-	-	11,6	<b>6,1</b>	14,2	<b>9,0</b>
6,78	-	-	-	-	12,8	<b>7,4</b>
7,10	-	-	-	-	11,5	<b>6,8</b>

Fonte: Autora e \*Persike (2023).

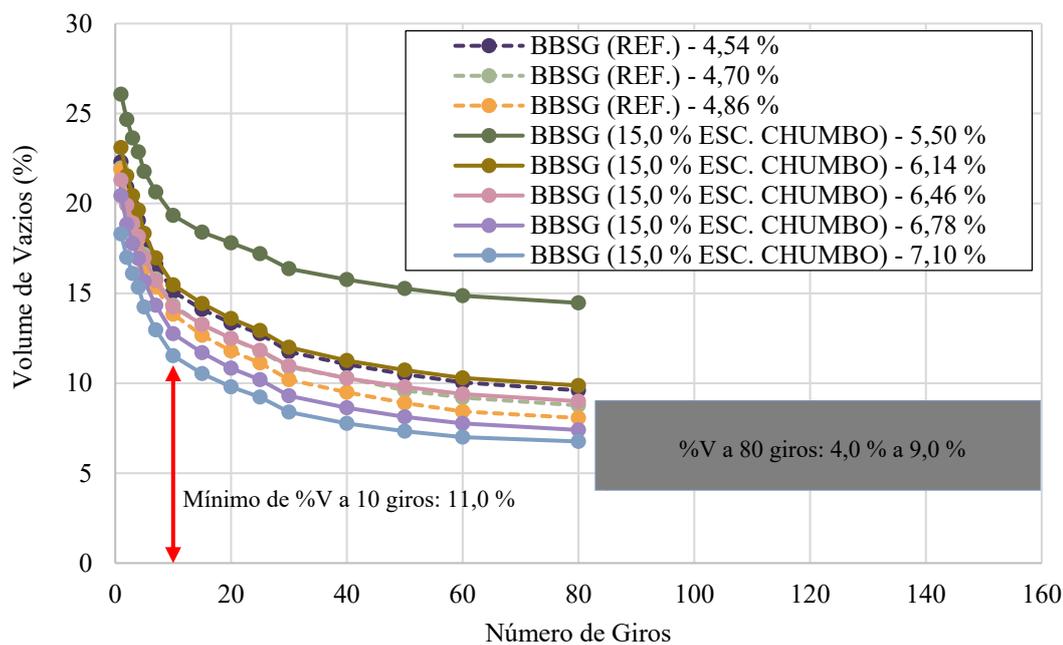
As Figuras 6.1 e 6.2 apresentam a evolução da habilidade de compactação das formulações testadas, correlacionando o percentual de vazios (%V) em função do número de giros. Com a finalidade de facilitar a interpretação dos gráficos, os limites normativos quanto ao teor de vazios mínimo de 11,0 % a 10 giros e de 4,0 % a 9,0 % a 80 giros, estão representados por meio de setas vermelhas. Logo, a formulação que ultrapassar os limites de qualquer das setas é rejeitada, ou seja, não seguirá para o Nível 2 correspondente ao ensaio de deformação permanente na metodologia francesa (Figura 5.14).

Figura 6.1 - Habilidade de compactação na PCG com 7,0 % de escória de chumbo-ácido.



Fonte: Autora.

Figura 6.2 - Habilidade de compactação na PCG com 15,0 % de escória de chumbo-ácido.



Fonte: Autora.

Comparando os resultados obtidos nesta pesquisa com as formulações de referência, observa-se que ao substituir o granular britado gnáissico pela escória de chumbo-ácido, em todos os cenários testados, ocorre aumento do teor de ligante betuminoso nas dosagens.

Esta condição influencia diretamente na habilidade de compactação das misturas asfálticas. Como exemplo, após 80 giros, tem-se que a formulação de referência com 4,70 % de ligante betuminoso alcançou %V = 8,8 %, enquanto com a incorporação de 7,0 % e 15,0 % da escória de chumbo-ácido, os valores mais próximos foram atingidos com as dosagens de 5,82 % (%V = 8,6 %) e 6,46 % (%V = 9,0 %), respectivamente.

Nesse contexto, tem-se que para obter as mesmas condições de habilidade de compactação da mistura asfáltica de referência mencionada, são necessárias três e cinco dosagens superiores para as formulações com a incorporação de 7,0 % e 15,0 % de escória de chumbo-ácido (Tabela 6.1), nesta ordem.

Ainda, devido à proximidade do limite mínimo de %V = 11,0 % a 10 giros, aliada à observação visual do aspecto excessivo de ligante betuminoso durante os procedimentos de mistura, foi decidido por não prosseguir com os testes utilizando dosagens superiores às máximas utilizadas para 7,0 % (Figura 6.1) e 15,0 % (Figura 6.2) de incorporação da escória de chumbo-ácido.

É importante esclarecer que o limite considerado a 10 giros está relacionado à conformação das misturas asfálticas nas primeiras passadas do rolo compactador no campo.

Desta forma, a diminuição excessiva do volume de vazios neste estágio, indica a possibilidade da ausência de intertravamento adequado do arranjo granulométrico ou elevado teor de ligante utilizado na dosagem, e até mesmo ambas as situações. Em conjunto, estes fatores contribuem para a obtenção de formulações com baixa resistência aos esforços de cisalhamento, pouca conformidade às primeiras passadas do rolo compactador com excessiva deformação inicial, e suscetibilidade à ocorrência de deformação permanente.

Quanto às disparidades observadas em relação às dosagens utilizadas para a obtenção de habilidades de compactação similares, as explanações se apoiam no fato das misturas asfálticas de referência serem compostas somente por materiais granulares britados de rocha gnáissica, os quais possuem menores superfície específica, volume total e diâmetro médio de poros, conforme discorrido no tópico 5.1.3.2, e visualizado nas análises de MEV no tópico 5.1.3.1.

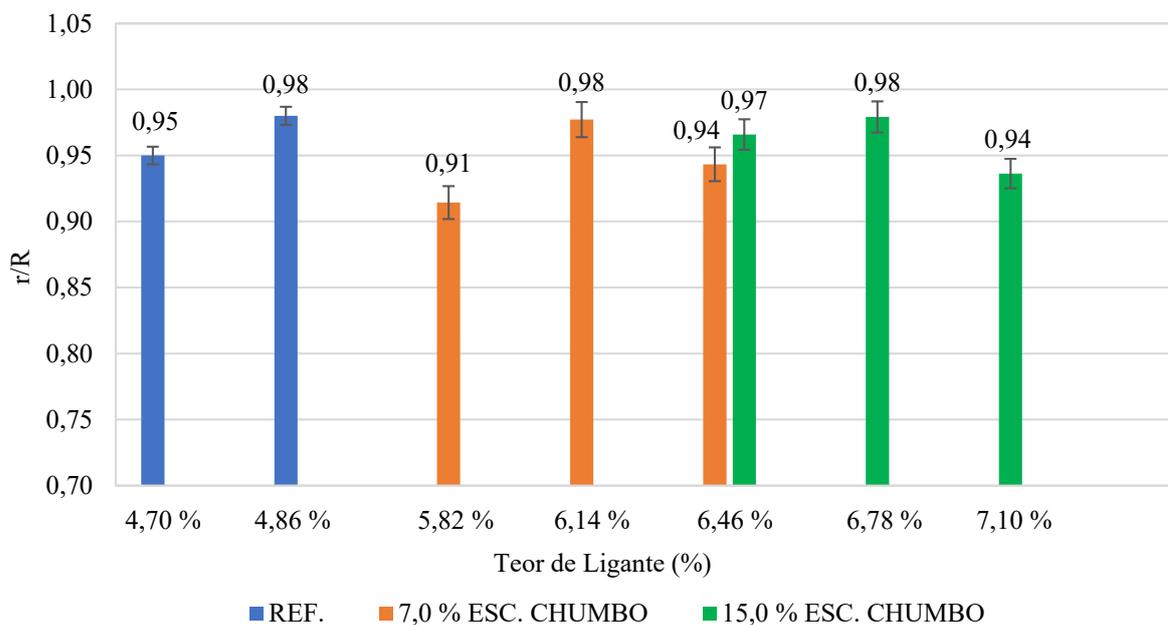
Como resultado, as misturas asfálticas com a incorporação da escória de chumbo-ácido tendem a absorver maiores quantidades de ligante betuminoso que as de referência para um mesmo teor testado, dificultando a trabalhabilidade nos procedimentos de usinagem, requerendo maiores aportes de ligante nas dosagens, fato que corrobora às discussões já procedidas acerca dos resultados relacionados aos resultados dos testes de habilidade de compactação na PCG.

Além disso, em razão da maior superfície específica da escória de chumbo-ácido em relação ao pó de pedra, isto é, dispor de granulometria mais fina (Figura 5.2), quando submetida ao ensaio da PCG, no momento da aplicação simultânea dos esforços de compressão e de cisalhamento, apresenta maior compressibilidade em relação ao granular britado de rocha de gnáissica.

## 6.2 DURIEZ

Para a realização do ensaio de Duriez a 18 °C, os testes foram realizados apenas com as dosagens aprovadas no ensaio da PCG, conforme as indicações em azul apresentadas na Tabela 6.1. Todas as formulações testadas apresentaram resultados bem superiores ao limite mínimo normativo  $r/R > 0,70$ , indicando para a condição deste ensaio boa resistência à ação deletéria da água. A Figura 6.3 ilustra os resultados obtidos.

Figura 6.3 - Resistência à ação deletéria da água das misturas asfálticas testadas.



Fonte: Autora.

Observando a Figura 6.3, é possível depreender que a incorporação da escória de chumbo-ácido não implicou em redução da resistência à ação deletéria da água, quando comparada às misturas asfálticas de referência. Tanto é fato, que todos os resultados atingiram patamares acima de 90,0 %, significando excelente desempenho.

Esta condição pode ser explicada com base nas análises de FRX, abordadas no tópico 5.1.3.3, em que os percentuais de elementos eletropositivos da escória de chumbo-ácido superam a marca de 90,0 %, enquanto o pó de pedra possui cerca de 50,0 % da composição característica eletronegativa. Logo, mesmo com maior porosidade que o pó de pedra, a escória permite a formação de um dipolo com os granulares gnáissicos e com o ligante betuminoso, viabilizando atração elétrica entre os compostos e, conseqüentemente, contribuindo para a obtenção de boa adesão do conjunto formulado.

Além disso, a utilização de maiores teores de ligante betuminoso nas dosagens, em comparação às misturas asfálticas de referência, contribuem para a formação de películas mais robustas de recobrimento dos granulares, diminuindo os vazios intersticiais das formulações com incorporação da escória de chumbo-ácido e, portanto, dificultando a penetração da água e o seu efeito deletério.

Quanto aos granulares gnáissicos, sobretudo no contexto das formulações de referência, em que pese a presença importante de elementos eletronegativos em sua composição, tem-se que a menor porosidade das suas frações aliada à granulometria densa da

formulação BBSG 0/14 mm desenvolvida, impedem que haja absorção importante da água que penetra nos vazios formados nos interstícios das misturas asfálticas.

Porém, um ponto crítico diz respeito à condição em que o ensaio é realizado, pois ainda que se mantenham as amostras imersas na água por 7 dias consecutivos, a temperatura de 18 °C não caracteriza um cenário de forte agressividade às misturas asfálticas, situação que pode contribuir para a obtenção de resultados mais otimistas em relação ao cenário climático real a que estão sujeitas no Brasil (Barra, 2009).

Por fim, é importante destacar que os desvios-padrões médios obtidos, e indicados nas barras de erros da Figura 6.3, foram da ordem de 0,70 % (referência), 1,36 % e 1,20 % (7,0 % e 15,0 % de incorporação da escória de chumbo-ácido, respectivamente), indicando boa reprodutibilidade e homogeneidade da amostragem produzida, bem abaixo do limite máximo de 10,0 % admitido pela metodologia francesa (Manuel LPC, 2007).

### 6.3 LIXIVIAÇÃO

Mesmo com todas as formulações tendo apresentado boa resistência à ação deletéria da água no ensaio de Duriez, uma situação que chamou atenção foi a formação de uma névoa branca sobre a superfície dos corpos de prova com incorporação da escória de chumbo-ácido (Figura 6.4), notadamente das unidades submetidas à imersão na água.

Figura 6.4 - Névoa branca formada sobre as amostras condicionadas em água no ensaio de Duriez.



Fonte: Autora.

Por esta razão, ensaios de lixiviação foram realizados nas amostras de misturas asfálticas com 7,0 % e 15,0 % de incorporação da escória de chumbo-ácido, a fim de identificar a composição deste resíduo. Os resultados das análises são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Concentração de elementos lixiviados na amostra de escória de chumbo-ácido.

Elemento	Concentração lixiviada 7,0 % (mg/l)	Concentração lixiviada 15,0 % (mg/l)	Limite Normativo ABNT NBR 10004 (2004) (mg/l)
Ag	< 0,05	< 0,05	5,0*
Al	< 0,025	< 0,025	0,2
B	6,4± 0,02	< 0,05	-
Ba	1,13±0,01	< 0,05	70,0
Be	< 0,05	< 0,05	-
Bi	< 0,05	< 0,05	-
Ca	1760±0	2190±28	-
Cd	< 0,005	< 0,005	0,5
Co	< 0,025	< 0,025	-
Cr	< 0,025	< 0,025	5,0
Cu	< 0,005	< 0,005	-
Fe	156±1	85±1	-
K	433±105	385±38	-
Li	< 0,025	< 0,025	-
Mg	122,5±0,71	146±0	-
Mn	34±0	38±0	-
Mo	< 0,05	< 0,05	-
Na	-	-	-
Ni	< 0,025	< 0,025	-
P	< 0,025	< 0,025	-
Pb	<b>205±6</b>	<b>204±8</b>	1,0
Sb	< 0,005	< 0,005	-
Se	< 0,005	< 0,005	1,0
Si	66±0	62±0	-
Sn	< 0,05	< 0,05	-
Sr	5±0	6±0	-
Tl	< 0,05	< 0,05	-
V	< 0,025	< 0,025	-
Zn	224±1	219±1	-

Fonte: Autora.

Nota: (\*) Parâmetros e limites máximos no lixiviado extraídos da USEPA - Environmental Protection Agency 40 CFR - Part 261 - 24 - "Toxicity Characteristics".

A partir dos indicadores apresentados, fica evidente que a condição observada na Figura 6.4 compreendeu a lixiviação de metais pesados contidos na escória de chumbo-ácido, principalmente o Chumbo (Pb), destacado em azul, além do fenômeno de carbonatação.

Ainda, a quantidade de Pb lixiviado de ambas as amostras é 200 vezes superior ao limite permitido pelo Anexo F da norma ABNT NBR 10004 (2004), demonstrando que o potencial lixiviador independeu da quantidade de escória incorporada nas formulações, fato que

representa grave risco de impacto e dano ambiental, e ratifica a classificação deste resíduo como Classe I – Perigoso.

Neste contexto, tem-se que após a retirada das amostras da imersão na água no ensaio de Duriez, o contato com o oxigênio ao ar livre acelera o intemperismo oxidativo e promove a formação de fases secundárias de óxidos e carbonatos, os quais liberam elementos tóxicos através do fenômeno da carbonatação. A concentração de elementos tóxicos na escória de chumbo-ácido aumenta com o prolongamento do tempo de lixiviação (Silva et al., 2017).

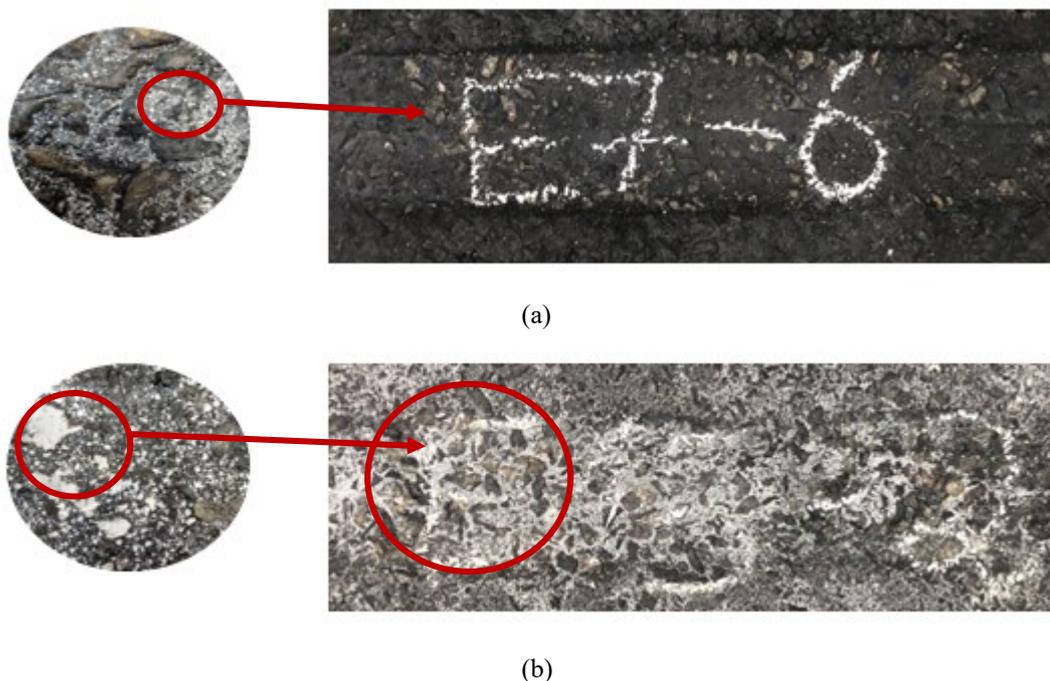
No âmbito prático, verifica-se então que a precipitação de chuvas recorrentes no campo, principalmente as de maior duração e intensidade, contribuirá diretamente para a lixiviação de elementos tóxicos presentes na escória de chumbo-ácido, como Chumbo (Pb) e o Zinco (Zn), causando penetração no solo e resultando assim em contaminação do meio ambiente.

Quanto ao fenômeno da carbonatação dos corpos de prova que ficaram imersos em água no ensaio de Duriez, este se deu pelas presenças de óxido de Cálcio (CaO) nas amostras de escória de chumbo-ácido (Tabelas 5.5 e 5.8), e de Carbono (C) que representa mais de 80,0 % da composição do ligante betuminoso (Tabela 2.2). Estes elementos em reação conjunta com a Hidroxila (OH), presente no meio aquoso, formam o carbonato de Cálcio (CaCO<sub>3</sub>).

Assim, é muito comum o CaCO<sub>3</sub> se manifestar sobre as superfícies de contato na forma de eflorescência, caracterizada pelo depósito de partículas esbranquiçadas solidificadas (sais) (Figura 6.4), após contato do elemento mencionado com o oxigênio ao ar livre.

No caso da ocorrência de carbonatação das placas utilizadas no ensaio de deformação permanente (Figura 6.5) e, que não tiveram qualquer contato com a água, se deu a partir da reação química causada pelas presenças de óxido de cálcio (CaO) nas amostras de escória de chumbo-ácido e de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) na atmosfera. O efeito eflorescente é observado de maneira mais evidente nas formulações com 15,0 % de incorporação da escória, em razão de dispor de maior concentração deste resíduo, logo, com potencial reativo mais intenso.

Figura 6.5 - Efeito da carbonatação nas placas utilizadas no ensaio de deformação permanente com (a) 7,0 % e (b) 15,0 % de incorporação de escória de chumbo-ácido.



Fonte: Autora.

A carbonatação nas amostras é prejudicial à vida útil das misturas asfálticas, pois atua na degradação estrutural do material, principalmente no que diz respeito à resistência à sanidade dos granulares, pois trata-se de um fenômeno formador de sais e com característica expansiva. Portanto, contribui para a penetração destes particulados na porosidade dos granulares, os quais se expandem no contato com a água, causando a ruptura da película do ligante betuminoso que os envolve e, conseqüentemente, maior suscetibilidade à lixiviação de metais pesados como o Chumbo (Pb) presente na escória em estudo, por exemplo.

A estabilidade ambiental da escória de chumbo depende de vários fatores, a saber: mudança de pH, fase mineral ou cristalina, influência da atmosfera e, o tempo de interação entre a escória e a água (Yin et al., 2016). No caso da escória de chumbo-ácido há maior propensão em liberar Zinco (Zn), Ferro (Fe) e Cálcio (Ca) sob condições ácidas, além de reagir facilmente na presença de água.

Neste contexto, foram também realizadas análises de pH das misturas asfálticas com 7,0 % e 15,0 % de incorporação da escória de chumbo-ácido, tanto do resíduo (escória) quanto do extrato lixiviado, em que os resultados são apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - pH do resíduo e do extrato lixiviado da escória de chumbo-ácido.

Amostra	pH do Resíduo	pH do Extrato Lixiviado	Tempo de Lixiviação (h)
7,0 % de escória de chumbo-ácido	5,616	4,979	18
15,0 % de escória de chumbo-ácido	5,887	4,977	18

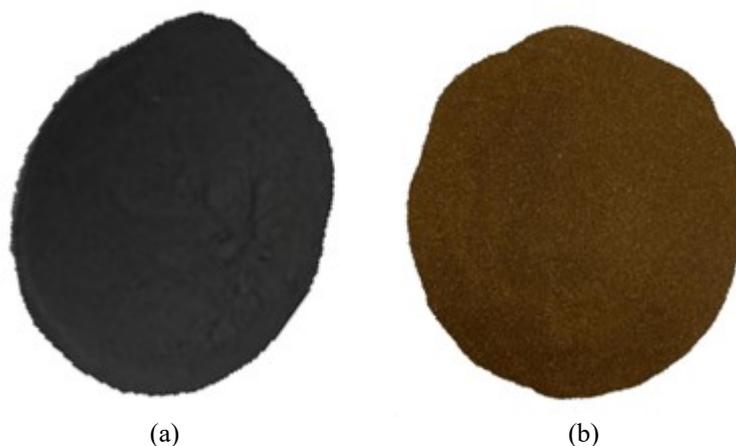
Fonte: Autora.

Os resultados indicam o pH das amostras inferior a 7,0 em todos os casos testados, demonstrando que tanto após a geração no processo de reciclagem quanto após os ensaios de lixiviação, a escória possui característica ácida e corrosiva, com agravante para o extrato lixiviado, devido ter apresentado os menores valores. Estes fatores ratificam os comentários já discorridos sobre os prejuízos à sanidade das partículas granulares rochosas e à diminuição da vida útil das misturas asfálticas.

Um aspecto importante a ser observado é que o pH das amostras, em cada caso analisado, não altera com a concentração de escória de chumbo-ácido, acompanhando a mesma tendência já abordada quanto à concentração de Chumbo (Pb) lixiviado (Tabela 6.2)

Quanto à diminuição do pH do extrato lixiviado, em relação ao resíduo original da escória de chumbo-ácido, verifica-se na prática como este material é fortemente reativo no contato com a água e com o oxigênio ao ar livre. O efeito visual desta reação é percebido na mudança da coloração preta para a marrom (Figura 6.6), em que segundo Coya e Sastre (2000) se deve à oxidação do Ferro (Fe) presente no resíduo gerado após o processo pirometalúrgico em forno rotativo (Figura 3.8).

Figura 6.6 - Aspecto da escória de chumbo-ácido após (a) geração pirometalúrgica em forno rotativo e (b) contato com a atmosfera.



Fonte: Autora.

## 6.4 DEFORMAÇÃO PERMANENTE

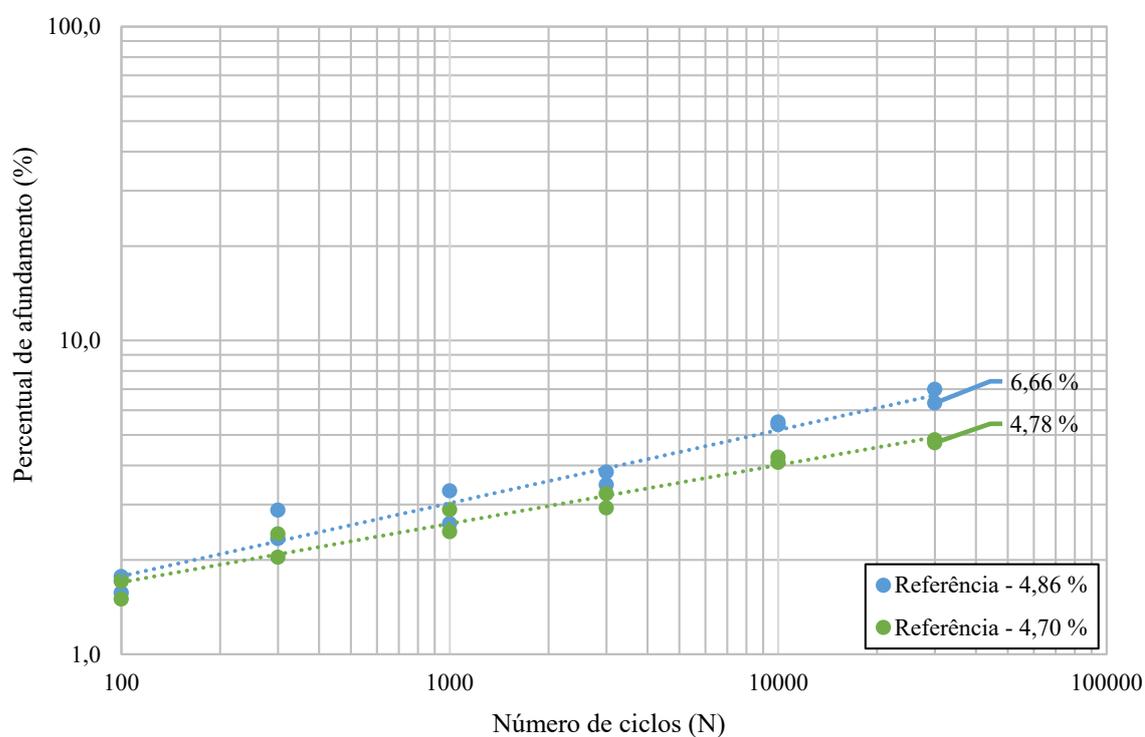
Para esta etapa de avaliação foram testadas as formulações aprovadas no conjunto dos ensaios de PCG e Duriez a 18 °C, em que os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.4, com as médias finais destacadas em azul após 30.000 ciclos, e ilustrados nas Figuras 6.7 a 6.9, respectivamente, considerando cada par de placas moldado por teor de ligante betuminoso.

Tabela 6.4 - Afundamentos na trilha de roda das misturas asfálticas.

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	<b>4,78</b>
		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	<b>6,66</b>
		1,57	2,34	2,61	3,47	5,50	6,32	
7,0 % de escória de chumbo-ácido	5,82	1,16	1,65	1,97	2,49	2,87	3,52	<b>4,61</b>
		1,31	1,90	2,71	3,98	4,80	5,69	
	6,14	1,23	1,84	2,78	4,72	6,08	7,21	<b>6,52</b>
		1,77	2,32	2,95	3,96	4,94	5,83	
	6,46	3,18	4,15	5,39	9,08	12,10	13,97	<b>13,18</b>
		3,80	4,68	5,71	8,42	11,32	12,39	
15,0 % de escória de chumbo-ácido	6,46	2,63	3,37	3,89	4,63	5,44	6,19	<b>7,17</b>
		2,30	2,94	3,87	5,45	7,27	8,15	
	6,78	2,58	3,19	4,22	5,88	8,24	9,03	<b>9,51</b>
		2,54	3,31	4,39	6,38	8,42	9,98	
	7,10	4,87	5,73	7,21	10,37	14,50	-	<b>15,95</b>
		4,52	5,72	7,36	7,36	17,39	-	

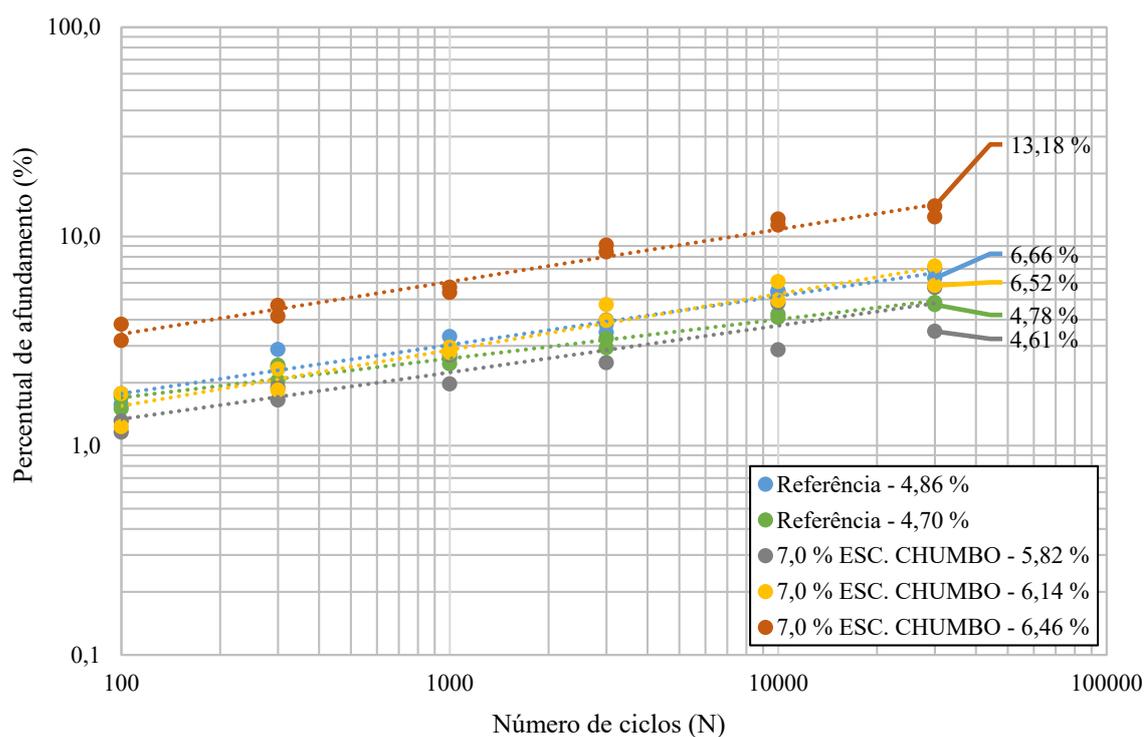
Fonte: Autora e \*Persike (2023).

Figura 6.7 - Evolução do afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas de referência.



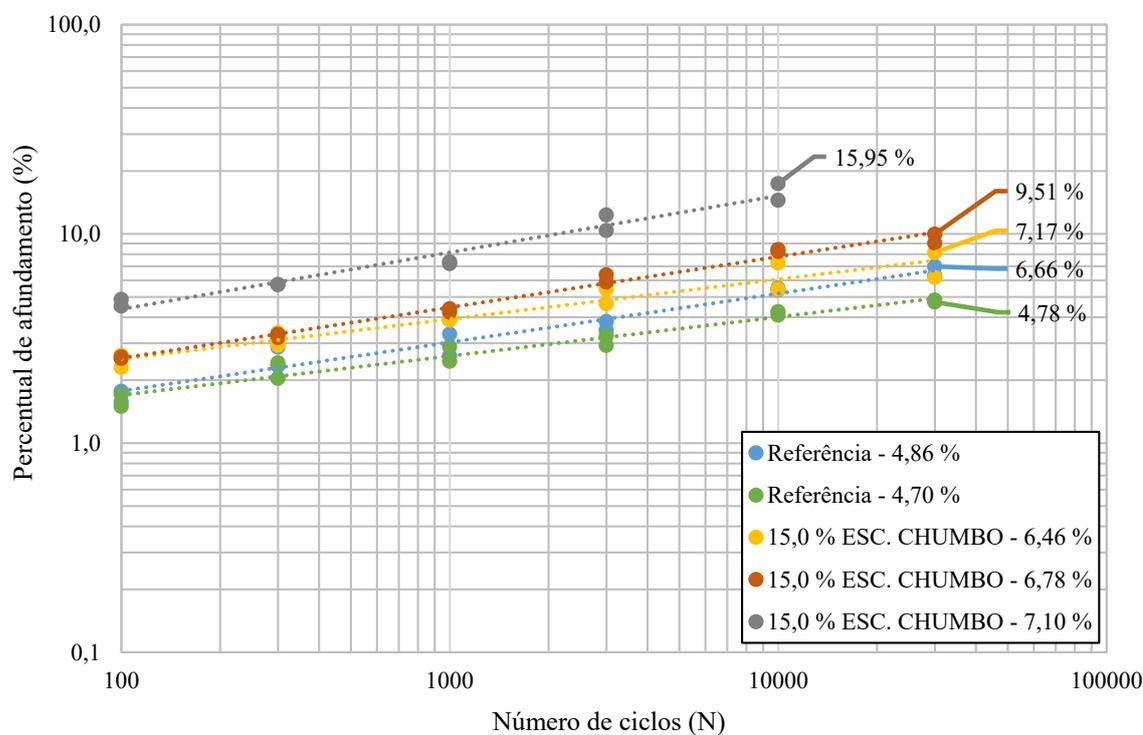
Fonte: Persike (2023).

Figura 6.8 - Evolução do afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas com a incorporação de 7,0 % da escória de chumbo-ácido.



Fonte: Autora.

Figura 6.9 - Evolução do afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas com a incorporação de 15,0 % da escória de chumbo-ácido.



Fonte: Autora.

Com base nos limites normativos indicados no tópico 5.2.6, verifica-se que dentre todas as formulações testadas, apenas a de referência com teor de ligante em 4,70 % alcançou afundamento na trilha de roda  $\leq 5,00$  % (4,78 %) após 30.000 ciclos, que corresponde à classe 3, considerada a mais nobre das misturas asfálticas do tipo BBSG. A dosagem com 4,86 % enquadrou-se na classe 2, tomada como intermediária, após atingir 6,66 % de afundamento nas mesmas condições de teste.

Quanto às classes das misturas asfálticas BBSG, Barra et al. (2010) indicam quais os contextos de aplicação em cada caso:

- Classe 1: aplicadas a tráfegos de regiões com temperatura equivalente em torno de 15°C, 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 (tráfego canalizado, elevada solicitação, zonas de intersecção, rotatórias), bem como climas com temperaturas constantemente elevadas.

Porém, apesar da mistura asfáltica de referência com 4,70 % de teor de ligante ter apresentado uma boa resistência à deformação permanente, é importante destacar que possui uma habilidade de compactação próxima ao limite máximo admissível de %V = 9,0 % após 80 giros (8,8 %; Tabela 6.1).

Portanto, embora a formulação mencionada esteja enquadrada na classe 3 e possa ser utilizada em condições adversas de solitação, é necessário ter muita atenção com o controle de qualidade em larga escala nas usinas. Isto posto, tem-se que qualquer variação na dosagem de ligante betuminoso abaixo do percentual especificado pode conduzir a uma habilidade de compactação que ultrapasse o limite supracitado, tornando-a fora de especificação, isto é, rejeitada. Da mesma forma, variações superiores à dosagem especificada podem acarretar afundamentos na trilha de roda superiores a 5,00 %, ou seja, incompatíveis com a classe 3.

No que diz respeito às formulações com 7,0 % de incorporação da escória de chumbo-ácido, tem-se que a dosagem com 5,82 % de ligante betuminoso também se enquadrou na classe 3, após apresentar afundamento de 4,61 % na trilha de roda. Todavia, como a porosidade dos grãos da escória de chumbo-ácido é uma característica muito presente e variada, conforme abordado nos tópicos 5.1.3.1 e 5.1.3.2, podem ocorrer concentrações granulares com características distintas neste aspecto em cada placa testada, acarretando uma variabilidade nos resultados obtidos do mesmo par de placas testado.

A constatação desta ocorrência se deu nos afundamentos de 3,52 % e 5,69 % após 30.000 ciclos (Tabela 6.4), pois apesar da média final ter sido 4,61 %, com enquadramento da formulação na classe 3, tem-se que uma das placas obteve percentual superior a 5,00 %, ou seja, dentro da faixa limítrofe da classe 2. Logo, percebe-se uma forte influência da porosidade variada dos grãos de escória de chumbo-ácido nos resultados obtidos, fator que também deve ter atenção do projetista ao utilizar este material nas formulações.

Para a dosagem com 6,14 % de ligante betuminoso, o percentual de afundamento médio foi de 6,52 %, valendo as mesmas explicações quanto à variação dos resultados obtidos para o teor de 5,82 % após 30.000 ciclos. Mas, neste caso, ambos os percentuais de afundamento do par de placas testado se enquadraram na faixa limítrofe da classe 2.

A dosagem de 6,46 % foi reprovada, devido ter alcançado afundamento médio de 13,18 %, ultrapassando o limite máximo de 10,0 % previsto para a classe 1 das misturas asfálticas BBSG. Este cenário evidencia uma forte saturação de ligante betuminoso na dosagem utilizada, que acarreta o efeito lubrificante das partículas granulares, diminuindo o intertravamento do arranjo granulométrico, tornando-o menos resistente aos esforços

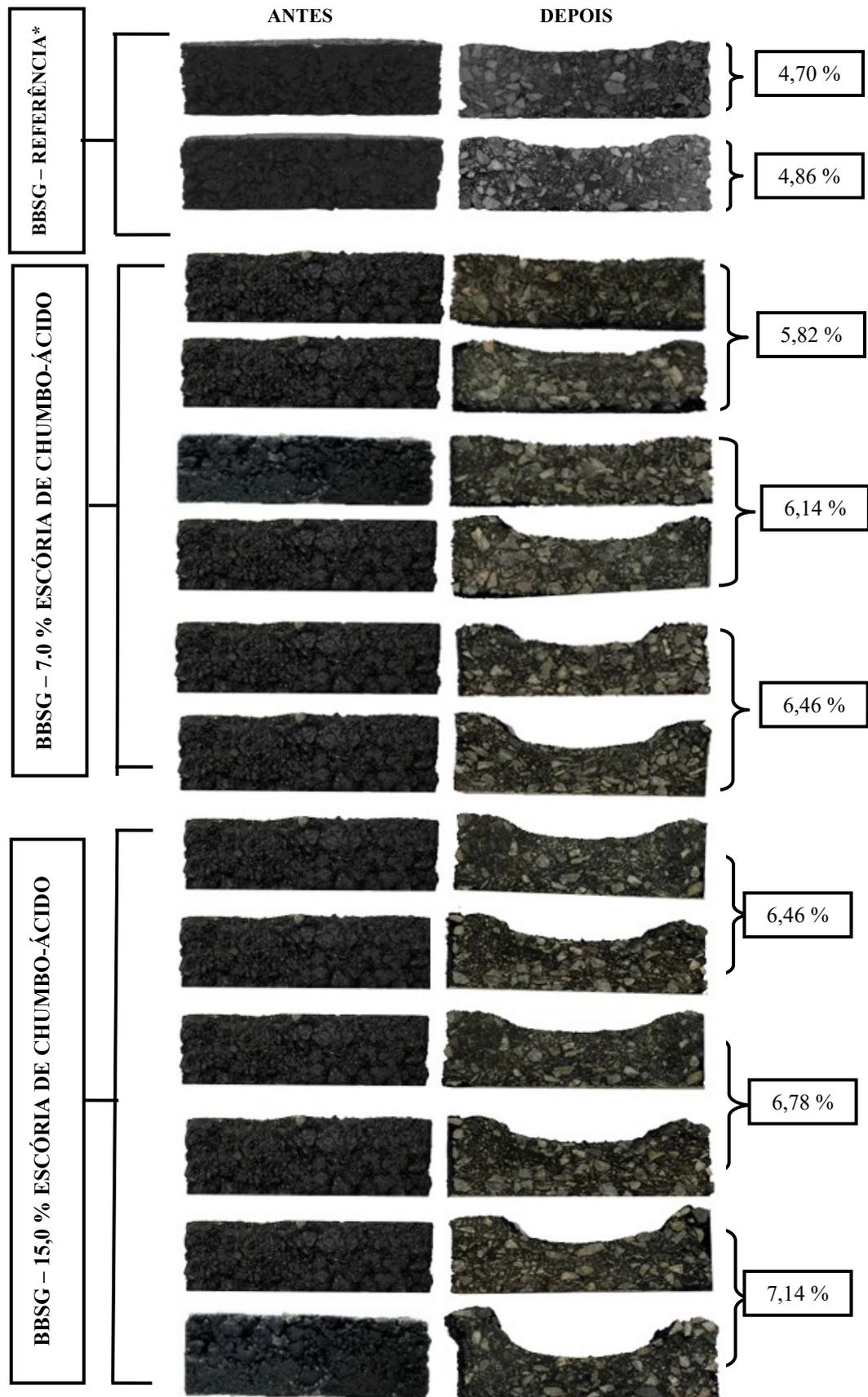
cisalhantes aplicados durante os ciclos dinâmicos impostos durante os testes, tal como ocorre nos ensaios de habilidade de compactação.

Para as misturas asfálticas com 15,0 % de escória de chumbo-ácido, tem-se que a dosagem com 6,46 % de ligante betuminoso enquadrou-se na classe 2, e com 6,78 % na classe 1, a menos nobre das formulações BBSG, pois alcançaram afundamentos médios na trilha de roda em 7,17 % e 9,51 %, respectivamente. Para a primeira, valem as mesmas considerações já descritas em relação à variação da porosidade pertinente à escória de chumbo-ácido.

A dosagem com 7,10 % foi reprovada pelos mesmos motivos discorridos para a formulação com 6,46 % de teor de ligante betuminoso referente aos 7,0 % de incorporação da escória de chumbo-ácido. Entretanto, em condição mais crítica, devido ao aporte de maior quantidade de escória de chumbo-ácido e de ligante betuminoso, fazendo com que os afundamentos atingissem o limite máximo tolerável de 15,0 % da espessura das placas, necessitando interromper o ensaio após 10.000 ciclos.

A Figura 6.10 permite verificar visualmente a evolução do afundamento na trilha de roda das formulações com a incorporação da escória de chumbo-ácido, comparativamente às misturas de referência.

Figura 6.10 - Seção transversal das placas antes e depois dos ensaios de deformação permanente.



Fonte: Autora e \*Persike (2023).

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando os resultados da campanha experimental, bem como as discussões técnicas realizadas, conclui-se que foram alcançados integralmente os objetivos definidos para esta pesquisa.

Quanto à habilidade de compactação na PCG, tem-se que pelo fato da escória de chumbo-ácido apresentar superfície específica e porosidade que pode chegar a nove e quase quatro vezes maiores que a do pó de pedra, respectivamente, 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 elevado percentual de elementos eletropositivos constante na composição mineralógica da escória de chumbo-ácido (> 90,0 %), com destaque para o Ferro (Fe) (40,4 %), contribui para a formação de um dipolo propiciador de boa interação elétrica entre os compostos das misturas asfálticas, tendo sido observado este mesmo efeito contributivo independente do percentual de incorporação nas formulações.

Neste contexto, tem-se que o dipolo gerado viabiliza a estabilidade tanto das interações com os granulares gnáissicos britados quanto com o ligante betuminoso, compostos caracteristicamente eletronegativos, influenciando na obtenção de boa resistência à ação deletéria da água, bem como aos esforços de compressão simples na determinação das relações  $r/R$ .

Em contrapartida, verificou-se uma elevada taxa de lixiviação dos metais pesados contidos na escória de chumbo-ácido, sobretudo o Chumbo (Pb) e o Zinco (Zn), em que o primeiro alcançou marca 200 vezes maior que o limite máximo permitido pelos parâmetros normativos. Além disso, o pH obtido do extrato lixiviado abaixo de 7,0 para todos os percentuais incorporados nas formulações, ratificou a característica fortemente ácida e corrosiva deste material, indicando ser um potencial gerador de impacto e dano ao meio ambiente, caso não seja encapsulado de forma efetiva.

Ainda, foi percebido que o contato da escória de chumbo-ácido com a água e o oxigênio ao ar livre, lixiviada ou não, desencadeou a ocorrência do fenômeno de carbonatação

nas amostras testadas, sob a forma de uma névoa esbranquiçada. Logo, são condições que contribuem de forma decisiva para a degradação estrutural das misturas asfálticas, principalmente no que diz respeito à resistência à sanidade dos granulares, devido trata-se de um fenômeno com característica expansiva e pela formação de sais corrosivos.

As características de elevada superfície específica e porosidade mencionadas a respeito da escória de chumbo-ácido estudada, implicam de forma conjunta na diminuição da resistência aos esforços mecânicos de compressão aplicado e de cisalhamento gerado durante os ensaios de deformação permanente, potencializando o fenômeno da fluência do ligante betuminoso nas formulações, em razão do aumento do efeito lubrificante nas interfaces de contato entre os granulares, acarretando variação dos resultados obtidos para um mesmo par de amostras e suscetibilidade aos afundamentos nas trilhas de roda.

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 elevada suscetibilidade térmica. Neste âmbito, tem-se que caso as formulações tivessem sido concebidas com matrizes betuminosas não modificadas de elevada consistência ou, modificadas por polímero ou borracha, poderiam ter auxiliado na obtenção de melhores resultados às misturas asfálticas incorporadas com a escória de chumbo-ácido.

Dado o exposto, conclui-se que a utilização da escória de chumbo-ácido estudada apresentou maiores dificuldades operacionais nos aspectos de manipulação, insalubridade e conservação de equipamentos, quando comparada ao pó de pedra, devido à característica ácida e corrosiva de sua composição, exigindo dos envolvidos nos procedimentos muita atenção e cuidado, além de proteção reforçada durante o uso. Logo, em termos práticos, verifica-se que estes aspectos podem constituir em dificuldades para aceitação da indústria em utilizar o insumo em larga escala.

Quanto à concepção de misturas asfálticas densas do tipo BBSG, os resultados obtidos com a incorporação da escória de chumbo-ácido quando comparados aos resultados das formulações de referência, considerando o contexto da campanha experimental realizada, indicaram pouca viabilidade técnica em sua utilização, em razão da trabalhabilidade mais difícil nos procedimentos de usinagem, menor habilidade de compactação, ocorrência de carbonatação, forte risco de contaminação do meio ambiente por lixiviação de metais pesados, e maior dispêndio econômico de produção devido ao consumo de ligante betuminoso mais elevado demandado nas dosagens.

Todavia, aspectos como a boa resistência à ação deletéria da água e, a obtenção de resultados de resistência à deformação permanente enquadrados nas classes 1, 2 e 3 das misturas asfálticas do tipo BBSG, apontam para a possibilidade de se utilizar a incorporação escória de chumbo-ácido nas formulações, desde que sejam continuados os estudos na direção de investigar técnicas capazes de encapsular adequadamente o material, evitando a carbonatação e lixiviação, em consonância à utilização de ligantes betuminosos mais consistentes e modificados.

Também como sugestão para trabalhos futuros, tem-se ainda a possibilidade de investigar a incorporação de escória de chumbo-ácido no preparo de misturas asfálticas a frio (PMF), a fim de reduzir a emissão de poluentes na produção das formulações, avaliando também o desempenho sob as perspectivas mecânica e econômica.

Sugere-se também realizar uma análise da aplicação da escória de chumbo-ácido em outras camadas betuminosas (ligação, base e sub-base, por exemplo), com o intuito de proteger este material do ataque intempérico direto, verificando se esta condição propicia melhor resposta aos fenômenos de carbonatação e lixiviação de metais pesados, contribuindo para eliminar ou mitigar os riscos de contaminação ambiental.

## REFERÊNCIAS

ABINEE (2019), Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. Reciclagem do Chumbo e Plástico, 2019. Disponível em: < <http://www.abinee.org.br/programas/pro07c.htm>>. Acesso em 21/mai/2023.

ABMM (2021), Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Estudo Prospectivo do ABMM Setor Siderúrgico. Brasília.

ABNT NBR 10004 (2004) Resíduos sólidos – Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ.

ABNT NBR 10005 (2004) Procedimentos para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ.

ABNT NBR 7207 (2014) Terminologia e classificação de pavimentação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ.

ABRABAT (2018), Associação Brasileira de Baterias Automotivas e Industriais. Acordo setorial.2018.Disponível em:[http://consultaspublicas.mma.gov.br/consultaspublicas/uploads/2018/08/PropostaABRABAT-Acordo-Setorial-RevisaoMMA\\_Versao\\_revisada\\_Setor\\_Baterias\\_MMA2018\\_p%20C3%B3s\\_Conjur.pdf](http://consultaspublicas.mma.gov.br/consultaspublicas/uploads/2018/08/PropostaABRABAT-Acordo-Setorial-RevisaoMMA_Versao_revisada_Setor_Baterias_MMA2018_p%20C3%B3s_Conjur.pdf). Acesso em 11 de junho de 2023.

ABRABAT (2020), Associação Brasileira de Baterias Automotivas e Industriais. Você sabia que os componentes das baterias de chumbo-ácido são os materiais mais reciclados no mundo?. 2020. Disponível em: - <https://www.abrabat.com.br/voce-sabiaque-oscomponentes-das-baterias-de-chumbo-acido-sao-os-materiais-mais-reciclados-nomundo/>. Acesso em 30 de maio de 2023.

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

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

AFNOR NF EN 13043 (2003) - Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation. Association Française de Normalisation. Paris, France.

AIDARA, M. L. C. (2016). Le Module Complexe et l'Impact du Granulat sur la Prédiction du Module Dynamique des Enrobés Bitumineux.: Application aux Dimensionnements Rationnel et Mécanistique-Empirique. Ecole Doctorale Développement Durable et Société (ED2DS). Université de Thiès, 265 p. Sénégal.

ALI, B. (2016). Modèle numérique pour comportement mécanique des chaussées : application à l'analyse de l'orniérage. 2016, 113 p. Tese (Doutorado). École Polytechnique Universitaire de Lille. Lille.

ALVES, A. T. (2022). Pilhas e Baterias. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/sisica/pilhasebaterias-1.htm>. Acesso em: set de 2023.

ANDRADE LIMA, L.R.P. DE; BERNARDEZ, L.A. (2011), Characterization of the Lead Smelter Slag in Santo Amaro, Bahia, Brazil. Journal of Hazardous Materials, Vol. 189, Issue 3, pp. 692-699, ISSN 0304-3894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.02.091>.

ANDRADE, M. B.; COSTA, W.; ANDRADE, A. V. C. (2014), Caracterização e Estudo da Lixiviação de Metais de Escórias Provenientes da Reciclagem de Baterias de Chumbo-Ácido. Holos, vol. 5, ISSN 1807-1600, pp. 361-371. DOI: [10.15628/holos.2014.2042](https://doi.org/10.15628/holos.2014.2042).

ANDRADE, V.D. (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 Engenharias e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Joinville, SC, Brasil, p. 167.

ANDRADE, V. D.; BARRA, B.; BERNUCCI, L.; MOMM, L.; GUERRERO PEREZ, Y. A.; HASTENPFLUG, D.; NIERWINSKI, H. P.; HEIDEMANN, M. (2020). Impacto da formulação de composições granulométricas nas propriedades mecânicas e funcionais de misturas asfálticas densas. Revista Matéria, vol. 25, e-12905. Rio de Janeiro.

ANM (2020), Agência Nacional de Mineração. Anuário Mineral Brasileiro 2020: Principais Substâncias Metálicas. Brasília.

ARULRAJAH, A.; YAGHOUBI, E.; IMTEAZ, M.; HORPIBULSUK, S. (2017). Recycled waste foundry sand as a sustainable subgrade fill and pipe-bedding construction material: engineering and environmental evaluation. Sustainable Cities and Society, 28, 343-349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2016.10.009>

ASTM D7348-07 (2007), Standard Test Methods for Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues. American Association for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.

BALLANTYNE, A.D.; HALLET, J.P.; RILEY, D.J.; SHAH, N.; PAYNE, D.J. (2018). Lead acid battery recycling for the twenty-first century. R. Soc. Open Sci. 5 (5), 171368. <https://doi.org/10.1098/rsos.171368>.

BARDINI, V. S. S.; KLINSKY, L. M. G.; JÚNIOR, J.L. F.; ROQUE, R. (2012). Influência do filler mineral no comportamento reológico de mástiques asfálticos. Transportes, 20 (3), 19-26. <https://doi.org/10.4237/transportes.v20i4.603>

BARNA, R.; MOSZKOWICZ, P.; GERVAIS, C. (2004), Leaching Assessment of Road Materials Containing Primary Lead and Zinc Slags. Waste Management, Vol. 24, Issue 9, pp. 945-955, ISSN 0956-053X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.07.014>.

BARRA, B.; MOMM, L.; GUERRERO, Y.; MIKOWSKI, A.; CLARA, E.; NGUYEN, M-L; HUGHES, G. B. (2021), Evaluation of Technical Feasibility of Reusing Coal Ash in Dense Asphalt Mixes by Assessing Mechanical Performance. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, Vol. 93, Suppl. 4, e20201662, Printed ISSN 0001-3765, Online ISSN 1678-2690 DOI: 10.1590/0001-3765202120201662.

BARRA, B. S. et al. (2010). Diretrizes para a formulação e avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas. *Revista Pavimentação*, Ano V, Associação Brasileira de Pavimentação (ABPV), v. 17, p. 38-58.

BARRA, B. S.; MOMM, L.; BROSSEAUD, Y.; HORNYCH, P. (2010). Diretrizes para a Formulação e Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas. *Revista Pavimentação*, v. 17, p. 38-58.

BARRA, B.S. (2009). Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 329 p. Florianópolis, SC.

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

BASEL CONVENTION. (2003). Technical Guidelines for the Environmentally Sound Management of Waste Lead-ácid Batteries. Basel Convention series/SBC nO.2003/9.

BASTOS, J. B. dos S.; SOARES, J. B.; NASCIMENTO, L. A; H. (2017). Critérios para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas em laboratório a partir do desempenho em campo. *Transportes*, [s.l.], v. 25, n. 2, p.29-40, 31 ago. <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v25i2.1284>.

BATERIAS ROUTE. (2011). Vista Tridimensional. Disponível em: <https://s3.sa-east-1.amazonaws.com/static.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v9n3a06.pdf>. Acesso em 29 de maio de 2023.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, G.L.M; CERATTI, P.J.A; SOARES, J.B. (2022). Pavimentação asfáltica: Formação Básica para engenheiros. 2. ed. 3. Reimpressão. Rio de Janeiro: PETROBRAS: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos (ABEDA).

BEZERRA, M. L. M. (2021). Modelo Arima para Previsão de Geração de Chumbo Secundário a partir de Baterias de Motocicletas no Brasil. Dissertação (Mestrado). Caruaru.

BOSSO, S.T.; ENZWEILER, J. (2008), Ensaios para Determinar a (Bio) Disponibilidade de Chumbo em Solos Contaminados: Revisão. Química Nova, vol.31, nº 2, pp. 394-400.

BRASIL, Resolução CONAMA nº 401, de 04 de novembro de 2008. Diário Oficial da União, Brasília, 5 nov. 2008.

BURGESS, W.A. (1995), Recognition of Health Hazards in Industry: A Review of Materials and Processes. 2<sup>nd</sup> Ed., New York: John Wiley & Sons, 537p.

CABRAL NETO, J. C.; SILVA, M. M.; SANTOS, S. M. (2016). A time series model for estimating the generation of lead acid battery scrap. Clean Techn Environ Policy, v. 18, n. 6, p. 1931–1943.

CARDONA, D. A. R. (2016). Characterisation of thermomechanical properties of bituminous mixtures used for railway infrastructures. These de doctorat. École Nationale des Travaux Publics de l'Etat. Université de Lyon, 252 p. França.

CARNEIRO, R. L.; MOLINA, J. H. A.; ANTONIASSI, B.; MAGDALENA, A. G.; PINTO, E. M. (2017), Aspectos essenciais das Baterias Chumbo-Ácido e Princípios Físico-Químicos e Termodinâmicos do seu Funcionamento. Revista Virtual de Química, vol. 9 (3), ISSN 1984-6835, pp. 889-911. DOI: 10.21577/1984-6835.20170057.

CASTAÑEDA, E. (2004), Contribution de Methodes Non Destructives al'Evaluation de l'Effet de l'Eau sur les Enrobés Bitumineux. Thèse de Doctorat. Université de Nantes, 116 p. França.

CASTELO BRANCO, V. T. F, et al. (2006). Caracterização de Forma, Angularidade e Textura de Agregado de Brita Granítica e Escórias de Aciaria Usando o Aggregate Imaging System (AIMS). XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Brasília.

CBC - Companhia Brasileira de Chumbo. (2021). Disponível em: <https://www.cbc.com.br/en/about-us/>. Ultimo acesso em 20 de abril de 2023.

CEMPRE (2020), Compromisso Empresarial para Reciclagem. Disponível em: <https://cempre.org.br/>. Acesso em 11 de junho de 2023.

CHACÓN-SANHUEZA, A. E.; FONTANETTI, A. R. (2006), Novos Processos de Reciclagem de Chumbo. Revista Matéria, vol. 11, nº 2, pp.146-154.

CHEN, D. T.; ROY, A.; LI, Y. Q.; BOGUSH, A.; AU, W. Y.; STEGEMANN, J. A. (2023), Speciation of toxic pollutants in Pb/Zn smelter slags by X-ray Absorption Spectroscopy in the context of the literature. Journal of Hazardous Materials, 132373, ISSN 0304-3894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132373>.

CIMBETON. (2019). Voiries et aménagements urbains en béton: conception et dimensionnement: Collection Technique Cimbéton, Paris, France, 125 p. Tomo 1.

CLARA, E. (2020). Avaliação de misturas asfálticas densas com a incorporação de cinza de carvão mineral. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharias e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 164 p. Joinville, SC.

CLUBE DA QUÍMICA. (2018). Bateria de Chumbo. Disponível em: <http://clubedaquimica.com/index.php/2018/02/02/bateria-de-chumbo/>. Acessado em 29 de maio de 2023.

CNT (2018), Confederação Nacional do Transporte. Boletim Estatístico – CNT – JULHO 2018. Brasília, 2018. Disponível em: < <http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/BOLETIM%20ESTAT%C3%8DSTICO/BOLETIM%20ESTAT%C3%8DSTICO%202018/Boletim%20Estat%C3%8Dstico%20-%2007%20-%202018.pdf>>. Acesso em: 20 de junho de 2023.

CONFOR. (2022). Incineração do lixo municipal e hospitalar. Disponível em: <https://confor.com.br/incineracao-do-lixo-municipal-e-hospitalar/>. Acesso em 20 de ago de 2023.

CORTÉ, J-F; BENEDETTO. (2004). Hervé di. Matériaux routiers bitumineux 1: description et propriétés des constituants. Paris: Lavoisier, 234 p.

CSPOWER, (2009). Baterias de Chumbo-Ácido São Recicláveis?. Disponível em: <http://pt.cspowerbattery.com/industry-155457>. Acesso em 10 set. 2020.

COSTA, I.; MASSARAD, G.; AGARWAL, A. (2010). Waste management policies for industrial symbiosis development: case studies in European countries. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 18, n. 8, p. 815-822.

COYA, B; MARANÓN, E.; SASTRE, B. (2000). Ecotoxicity assessment of slag generated in the process of recycling lead from waste batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, v.29, n.4, p.291-300. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(00\)00054-9](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(00)00054-9).

CROSSIM, E. (2015). The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute. *Journal of Cleaner Production*. Volume 95, 15 May, Pages 101-108.

CURTIS, C. W; LYTTON, R. L; BRANNAN, C. J. (1992). Influence of aggregate chemistry on the Adsorption and Desorption of asphalt. 1992. 9 p. Auburn University, Alabama. Disponível em: < <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1362/1362-001.pdf>>. Acesso em: 21 de junho de 2023.

DA SILVA, W.R; DA SILVA, F.B.V; ARAUJO, P.R.M; DO NASCIMENTO, C.W.A. (2017). Assessing human health risks and strategies for phytoremediation in soils contaminated with As, Cd, Pb, and Zn by slag disposal. *Ecotoxicology and Environmental Safety*,v.144,p.291-300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.068>.

DE LA ROCHE, C. (1996). *Module de Rigidité et Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux*. 217 p. Tese (Doutorado) – École Central de Paris. Paris. 1996.

DING, Y; ZHANG, X; WU, B; LIU, B; ZHANG, S. (2021). Highly porous ceramics production using slags from smelting of spent automotive catalysts. *Resources, Conservation and Recyclin*. v.166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105373>.

DINIZ, F. B. (2009). Disponível em: Acumuladores Moura: Desenvolvimento Tecnológico e Meio Ambiente. <[www.desenvolvimento.gov.br](http://www.desenvolvimento.gov.br)> Acessado em: 11 de julho de 2023.

DNPM (2020), Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/publicacoes/sinopse/sinopse-2020-1/sinopse-mineral-2020>. Acesso em: 07 de maio 2023.

DNIT-ES 413/21 (2021), Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Ro. Rio de Janeiro (RJ).

DNIT-ES 031/2006 (2026), Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico -Especificação de serviços. Departamento Nacional de Estradas de Ro. Rio de Janeiro (RJ).

DNIT (2006), Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos — 2ª Edição, 2006.

EBIN, B., ISIK, M.I. (2016). *Pyrometallurgical Processes for the Recovery of Metals from WEEE, WEEE Recycling*. Elsevier, pp. 107–137. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803363-0.00005-5>.

FERNANDES, J. D., DANTAS, E. R. B., BARBOSA, J. N., & BARBOSA, E. A. (2011). Estudo de impactos ambientais em solos: o caso da reciclagem de baterias automotivas usadas, tipo chumbo-ácido. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 7, p. 231-255. Taubaté-SP.

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. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, Ouro Preto, p. 85-96, nov. Disponível em:<http://www.anpet.org.br/xxixanpet/anais/documents/AC1063.pdf>. Acesso em: 21 de junho de 2023.

GARCHE, J. (2009), *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*. Elsevier Science, ISBN 978-0-444-52745-5.

GARCIA, C. A; ABRARPOUR, G.B; WERTHEIM, G.A.S; VILLA, J. T. (2021). Comportamento Mecânico de Concreto com a Adição de Escória de Chumbo para Uso como Concreto Pesado. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Civil, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo.

GARDETE, D. C. (2006). Comparação de Ensaios Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente. Dissertação de Mestrado submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 186 p. Coimbra, Portugal.

GHASEMKHANI, A. PIRCHERAGHI, G. SHOJAEI, M. (2023). An innovative polymer composite prepared through the recycling of spent lead-acid battery separators. *Sustainable Materials and Technologies*, vol 38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00753>.

GOMES, G. M. F. (2006). Redução do Impacto Ambiental da Escória de Obtenção de Chumbo por Via Secundária. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GOMES, L. H.; HECK, N. C. (2018). Reciclagem de Baterias Chumbo-Ácido: Uma Análise Termodinâmica, p. 766-774. In: 49º Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos, São Paulo. ISSN: 2594-5300 DOI 10.5151/1982-9345-31959.

GRIGGIO, R. C.; LUVIZÃO, G. (2021). Avaliação das características químicas, volumétricas e mecânicas, quando incorporado escória de chumbo proveniente da reciclagem de baterias. *Conhecimento em Construção*, 8, 61-78. Disponível em <https://periodicos.unoesc.edu.br/conheconstr/article/view/27218>. Última consulta em 15 de fevereiro de 2023.

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

GUERRERO PÉREZ, Y. A. (2009). Estudo da Aplicabilidade do Ultra-som na Avaliação das propriedades do concreto asfáltico. 182 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis.

GUPTA, V. MAÇÃ; M. LI; W. CHEN, Z. (2024). Direct recycling industrialization of Li-ion batteries: The pre-processing barricade. *Next Energy*, Vol 2. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.nxener.2023.100091>.

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

HECK, J-V. (2001). Modélisation des Déformations Réversibles et Permanentes des Enrobés Bitumineux - Application a l'Ornièrage des Chaussées. 228 p. Tese (Doutorado) -Curso de Engenharia Mecânica, Térmica e Civil - Université de Nantes. Nantes, França.

HESP, S. A.; KAZARIAN, S. G.; AIREY, G. D. (2015). The influence of temperature on bitumen-aggregate adhesion: A time-resolved infrared spectroscopic study. *Journal of Materials Science*, 50(4), 1839-1849.

IBER (2021), Instituto Brasileiro de Energia Reciclável. Raio-x do setor de baterias chumbo-ácido: confira o desempenho do mercado em 2021. Disponível em: <https://iberbrasil.org.br/blog/2022/06/21/raio-x-do-setor-de-baterias-chumbo-acido-confira-o-desempenho-do-mercado-em-2021/>. Acesso em 11 de junho de 2023.

IBGE (2022). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo 2022 Panorama. Disponível em: [https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?utm\\_source=ibge&utm\\_medium=home&utm\\_campaign=portal](https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?utm_source=ibge&utm_medium=home&utm_campaign=portal) Acesso em: 22 de outubro de 2023.

IBRAM (2023), Instituto Brasileiro de Mineração. Registro do crescimento da receita líquida no terceiro trimestre 2023. Instituto Brasileiro de Mineração. Disponível em <https://ibram.org.br/noticia/nexa-registra-receita-liquida-de-us%EF%BC%84-627-milhoes-no-2t2023/>, última consulta em janeiro de 2024.

ICZ (2022), Instituto de Chumbo e Zinco. Reciclagem e importação chumbo-ácido institutos de metais não ferrosos. Disponível em: <http://www.icz.org.br>, última consulta em janeiro de 2022.

ILA (2021), International Lead Association. Lead Batteries. Disponível em: <https://ila-lead.org/lead-batteries>. Acesso em: 07 de maio de 2023.

ILZSG (2020), Lead and Zinc Study Group. An Analysis of Used Lead Acid Battery (ULAB) Trade and Related Regulations in North America. Disponível em: <http://www.ilzsg.org/ilzsgframe.htm>. Acesso em: 28 de maio de 2023.

ISHAI, I.; CRAUS, J. (1977). Effect the Filler on the Aggregate-Bitumen Adhesion Properties in Bituminous Mixtures, in proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologies. Volume 46. San Antonio, Texas (USA), pp. 228-258.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. (2011). Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios de sustentabilidade. Estudos Avançados, São Paulo, v. 25, n. 71, p. 135-158.

JI, R.; LIU, T-J.; KANG, L-L.; WANG, Y-T.; LI, J-G.; WANG, F.P.; YU, Q.; WANG, X-M.; LIU, H.; GUO, H-W.; XU, W-L.; ZENG, Y-N.; FANG, Z. (2022), A review of metallurgical slag for efficient wastewater treatment: Pretreatment, performance and mechanism. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 380, Part 2, 135076, ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135076>.

JOST, M. (2001). *Technical Guidelines for the Environmentally Sound Management of Lead-acid Battery Wastes*.

JONES, P. R.; SMITH, M. J. (2020). Sustainable use of steel slag: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104664.

KAKPO, C. T. (2017). *Caractérisation d'un enrobé bitumineux haute performance incorporant du verre recyclé et son impact sur les performances de cet enrobe. Mémoire de maîtrise. École de Technologie Supérieure. Université du Québec, 274 p. Canadá.*

KANNEBOINA, Y. Y.; JOTHI SARAVANAN, T.; SYED AHMED KABEER, K. I.; BISHT, K. (2023), Valorization of lead and zinc slags for the production of construction materials - A review for future research direction. *Construction and Building Materials*, Vol. 367, 130314, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130314>.

KHALED E. HASSANA; MOHAMED I.E. ATTIAB; MURRAY REIDEC; MOHAMMED B. S. AL-KUWARID. (2021). Performance of steel slag aggregate in asphalt mixtures in a hot desert climate. *Case Studies in Construction Materials*, Vol 14, pp 1-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00534>.

KINLOCH, A. J. (1990). *Adhesion and adhesives*. Ed. Chapman, and Hall, University of London, 440 p. London, UK.

KREUSCH. M. A. (2005). *Avaliação com propostas de melhoria do processo industrial de reciclagem do chumbo e indicação de aplicabilidade para a escória gerada. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Engenharia Química, PR.*

KUMAR, A.; HOLUSZKO, M.; ESPINOSA, D.C.R. (2017). E-waste: an overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resour. Conserv. Recycl.*, v. 122, p. 32-42.

LAMBERT, M. (2018). Comportement mécanique évolutif des enrobés bitumineux à l'émulsion: étude expérimentale et modélisation. Thèse de Doctorat. Génie civil. Université de Limoges, 272 p. França.

LAMOTHE, S. (2014). Endommagement d'un enrobé bitumineux partiellement saturé en eau ou en saumure soumis à des sollicitations cycliques de gel-dégel et mécaniques. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat. Université de Lyon, 470 p. França.

LEITE, L.F.M.; MENEZES, S.M.C. (2003), Efeito da composição química dos ligantes na resistência ao descolamento de misturas asfálticas. In: *Anais do 17º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET)*, CD-ROM, Rio de Janeiro, RJ.

LANER, D.; CREST, M.; SCHARFF, H.; MORRIS, J. W. F.; BARLAZ, M. A. (2012). A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills. *Waste Management*, [S. l.], v. 32, p. 498-512.

LEANDRO, R. P., SAVASINI, K. V., BERNUCCI, L. L. B.; CASTELO BRANCO, V. T. F. (2021), Influência das propriedades de forma da fração graúda do agregado no controle da deformação permanente de misturas asfálticas densas. *TRANSPORTES*, 29(2), 2395. DOI: <https://doi.org/10.14295/transportes.v29i2.2395>.

LESUEUR, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, Elsevier BV. v. 145, p. 42-82.

LEE, J. W.; TAN, W. N. (2019). Global Corporate Citizenship: Cross-cultural Comparison of Best Practices in the Global Automotive Industry. *The Journal of Asian Finance, Economics and Business*, v. 6, n. 1, p. 261–271.

LI, H; KALEEM, M. B; LIU, Z; WU, Y. LIU, W; HUANG.Z. (2023). IoB: Internet-of-Batteries for Electric Vehicles—Architectures, Opportunities, and Challenges. *Green Energy and Intelligent Transportation*, p. 100128, vol 2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geits.2023.100128>.

LI, M., YANG, J., LIANG, S., HOU, H., WANG, J., HU, G., LI, Z., HU, J., XIAO, K., LIU, B. (2021). Ammonia chloride assisted air-chlorination recovery of tin from pyrometallurgical slag of spent lead-acid battery. *Resour. Conserv. Recycl.* 170, 105611. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105611>.

LIU, W; DU, R.; ZHAO, Z.; ZHANG, R.; WAN, Y.; LI, H. (2023), Development of Lead Smelting Slag-Based Ecological Mine Backfill Material: Performance Control and Heavy Metals Solidification. *Construction and Building Materials*, Vol. 367, 130310, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130310>.

LIU, X; AMIRKHANIAN, S. N. (2012). Fundamental study of aggregate–bitumen interaction using surface free energy measurement. *Construction and Building Materials*, 28(1), 211-219.

LOUREIRO, P.M.B. (2023). ANÁLISE DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA DE ESCÓRIA DE SIDERURGIA. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Gestão de Energia na Indústria e Edifícios. Instituto Politécnico de Setubal.

LYTTON, R. L. (2004). Adhesive Fracture in Asphalt Concrete Mixtures. Capítulo de Livro Editado por J. Youtcheff, Submetido para Publicação.

MACHADO, I. P. (2002), Avaliação Ambiental do Processo de Reciclagem de Chumbo. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Campinas (UNICAMP), 116 p.

MANTUANO, D. P.; ESPINOSA, D. C. R.; WOLFF, E.; MANSUR, M. B.; SCHWABE, W. (2011). Pilhas e baterias portáteis: legislação, processos de reciclagem e perspectivas. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 21, p. 1-13.

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 - LCPC. Paris, França.

MERCK MILLIPORE. (2023). Equipamentos utilizados no ensaio de lixiviação. Disponível em: [https://www.merckmillipore.com/BR/pt/product/Hazardous-Waste-Filtration-System-142mm,MM\\_NF-YT30142HW](https://www.merckmillipore.com/BR/pt/product/Hazardous-Waste-Filtration-System-142mm,MM_NF-YT30142HW). Acesso em 02 de dezembro de 2023.

MESHARAMA, S. DHARMADHIKARI, S; THAKUR, R. S; SONI, A. B; THAKUR, C. (2023). Fixed-bed adsorption of lead from battery recycling unit wastewater-optimization using Box-Behnken method. *Journal of Hazardous Materials Advances*, vol 10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100297>.

MEUNIER, M. (2012). Prédiction de l'orniérage lié aux déformations permanentes des enrobés bitumineux. Thèse de Doctorat. École de Technologie Supérieure. Université du Québec, 349 p. Canadá.

MIHAILA, L.; UNGURESAN, M.; RADA, M.; POPA, A.; MACAVEI, S.; VERMESAN, H.; RADA, S. (2020). Perspectives in the Recycling of High Sulphatized Electrodes from Lead Acid Batteries. *Analytical Letters*, p. 1414-1422.

MMA (2023), Ministério do Meio Ambiente. Brasil vai reciclar 155 mil toneladas de chumbo até 2023. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em <https://www.gov.br/pt-br/noticias/meio-ambiente-e-clima/2020/02/brasil-vai-reciclar-155-mil-toneladas-de-chumbo-ate2023#:~:text=O%20Minist%C3%A9rio%20do%20Meio%20Ambiente,baterias%20automotivas%20de%20chumbo%20%C3%A1cido>. Última consulta em janeiro de 2024.

MMA (2022), Ministério do Meio Ambiente. Brasil avança na reciclagem de baterias de chumbo-ácido. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/reciclagem-de-baterias-automotivas-atende-43-da-frota-brasileira>, última consulta em janeiro de 2024.

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 (EPUSP) da Universidade de São Paulo (USP), 259 p. São Paulo, SP.

MOSELEY, P.; GARCHE, J.; PARKER, C.D.; RAND, D. A. J. (2004). Valve-Regulated Lead-Acid Batteries. Amsterdam: Elsevier Inc, p. 1-491.

MOUAZEN, M. (2011). Évolution des propriétés rhéologiques des enrobés bitume, vers une loi vieillissement/viscosité. 196 p. Tese (Doutorado), École Nationale Supérieure des Mines des Paris. Paris.

NETO, C. P. J. (2016). Estimativa da geração de sucata de bateria de chumbo-ácido como ferramenta de gestão de resíduos eletroeletrônicos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental-UFPE, Caruaru – PE.

NG, A. K. Y. (2013). Contribuição ao estudo da deformação permanente de misturas asfálticas densas à luz de ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica. 2013. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transporte, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (USP). São Carlos.

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

OLARD, F. (2003). Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures: relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé. Thèse de Doctorat. Ecole doctorale des sciences pour l'ingénieur de lyon: (MEGA). Institut national des sciences appliquées de lyon, 228 p. França.

OLARD, F.; DI BENEDETTO, H.; DONY, A.; VANISCOTE, J. C. (2005), Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics. Materials and structures. Ed 38, pg 121–12. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02480584>.

OLIVEIRA, A. L. N. (2016). Logística Reversa de Pós-consumo e Sustentabilidade: Um Estudo de Caso na Empresa de Acumuladores Moura S/A da Cidade de Belo Jardim PE.

OLIVEIRA, P. R. (2020). Talinum paniculatum cultivado em latossolo vermelho contaminado com chumbo. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Ambiental Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano. Rio Verde - GO, 36 f.

ONAT, N. C; KUCUKVAR, M. (2022). A systematic review on sustainability assessment of electric vehicles: Knowledge gaps and future perspectives. Environmental Impact Assessment Review vol.97. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106867>.

ONISEI, S.; PONTIKES, Y.; VAN GERVEN, T.; ANGELOPOULOS, G. N.; VELEA, T.; PREDICA, V.; MOLDOVAN, P. (2012). Synthesis of inorganic polymers using fly ash and primary lead slag. Journal of Hazardous Materials, Vols. 205–206, pp. 101-110, ISSN 0304-3894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.039>.

PANTAROTO, H. L. (2008). Uma Análise da Utilização do Chumbo na Produção de Baterias e Suas Implicações Ambientais. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), 168 p.

PAOLIELLO, M.M.B.; CHASIN, A.A.M. (2001). Ecotoxicologia do Chumbo e seus Compostos. CRA, Salvador, 144p.

PASANDÍN, A.R.; PÉREZ, I. (2015). The influence of the mineral filler on the adhesion between aggregates and bitumen. International Journal of Adhesion & Adhesives, vol 58, pp 53-58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.01.005>.

PAVLOV, D. (2017). Lead-Acid Batteries: Science and Technology. 2<sup>o</sup> ed. Amsterdam: Elsevier Science, p. 1-270.

PEREIRA, A. G., SPINOLA, J. R., MONTEIRO, A. K. C., LACERDA, B. M., GUSMAO, F. S. GUSMAO. & FROTA, C. A. (2019). Mechanical behavior of asphaltic mixtures produced with spray graphite in high energy mill. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 9, 18-26. 10.9790/9622- 0911031826.

PEREIRA, P., JESUS, D., & MINHOTO, M. (2022). Análise do comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis. *Revista de Pavimentação*, 18(2), 134-147.

PERRET, J. (2003). Déformation des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic. 237 p. Tese (Doutorado), Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausana.

PERSIKE, T. (2023). Avaliação da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas densas com incorporação de resíduos de construção e demolição. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville.

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.

PIONEIRO ECOMETAIS (2023). Acervo particular da empresa. Última consulta em 13 de junho de 2023.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. (2001). Resposta da cana-de-açúcar à aplicação da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, n.1, p.201-209.

QUINTERO, C. F. Q. (2011). Estudo de misturas asfálticas com ligantes de consistência elevada: formulação e comportamento mecânico. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 229 p. Florianópolis, SC.

RAFAELI, L.A.I. CARELLI, J.M. FOIATO.M. (2023). Estudo da Incorporação do Resíduo Escória de Chumbo para Fabricação de Blocos para Pavimento Intertravado. *Conhecimento e Construção*, vol. 10, p.125-144.

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

RIVIÈRE, N. (1996). Comportment en fatigue des enrobés bitumineux. Tese (Doutorado) Universidade de Bordeaux. Bordeaux.

ROBERTS, H. (2020). Evolution of Global Secondary Lead Production. In: *PbZn 2020: 9th International Symposium on Lead and Zinc Processing*. The Minerals, Metals & Materials Series. p. 1-986, Springer, Cham.

RUETSCHI, P. (2004). Aging mechanisms and service life of lead–acid batteries. *J. Power Sources*, v.127, p.33–44.

SABERIAN, M. LI, J. SETUNGE, S. (2019). Evaluation of permanent deformation of a new pavement base and subbase containing unbound granular materials, crumb rubber and crushed glass. *Journal of Cleaner Production*. Volume 230, 1 September. Pages 38-45. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.100>

SALOMONE, R.; MONDELLO, F.; LANUZZA, F.; MICALI, F. (2005). *Environmental Management* Vol.35, No. 2, pp. 206-219.

SANTANA, H. (1992). *Manual de Pré-Misturados a Frio*. Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP) -1ª Edição. Rio de Janeiro (RJ).

SANTIN, B. de O. (2012), Estudo de Reações Sólido/Líquido e Sólido/Gás em Altas Temperaturas – O Caso das Reações do PbSO<sub>4</sub> e do PbO no Processo Pirometalúrgico de Reciclagem de Pb a partir de Baterias de Chumbo-Ácido. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química (PPGQ) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), 112 p.

SAUTEREY, R. et al. (2001). Les enrobés bitumineux. Paris: Revue générale des routes et l'aménagement. RGRA, v.1, 229p.

SHELL. (2003). The Shell Bitumen Handbook. 5. ed. London: Thomas Telford.

SHI, M.; YUAN, J.; DONG, L.; ZHANG, D.; LI, A.; ZHANG, J. (2020). Combining physicochemical model with the equivalent circuit model for performance prediction and optimization of leadacid batteries. *Electrochimica Acta* v. 353, p. 136-167.

SILVA, B. C. E.; TEIXEIRA, J. A. de A. B. (2020). Chumbo. Disponível em: [https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3981](https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3981), última consulta em fevereiro de 2023.

SINIR (2021), Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos. Logística reversa de baterias chumbo-ácido. 2021. Disponível em: <https://sinir.gov.br/perfis/logistica-reversa/logistica-reversa/baterias-de-chumbo-acido/>. Acesso em: 15 de junho de 2023.

SIROMA, R. S. (2018). Avaliação da deformação permanente em misturas asfálticas densas formuladas com areia descartada de fundição (ADF). Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 196 p., Joinville, SC.

SOBRAL, L. G. S. et al. (2012). Metalurgia do chumbo: processos de produção e refino. In: Projeto Santo Amaro - BA, aglutinando ideias, construindo soluções: diagnósticos. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. Cap.12, p.150-173.

SOHM, J. (2011). Prédiction des déformations permanentes des matériaux bitumineux. 332 p. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil - Ecole Centrale de Nantes (ECN). Nantes.

SPECHT, L. P.; GRANICH, A.; PASCH, E.; BOEIRA, F. (2012). Estudo laboratorial de misturas asfálticas com adição de diferentes teores e tipos de cal. *Revista Estradas*, 17, 66-72.

SUN, Y.; HU, S.; ZHANG, P.; ELMAADAWY, K.; KE, Y.; LI, J.; LI, M.; HU, J.; LIU, B.; YANG, J.; LIANG, S.; XIAO, K.; HOU, H. (2020), Microwave enhanced solidification/stabilization of lead slag with fly ash based geopolymer. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 272, 122957, ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122957>.

TAKACOVA, Z. ORAC, D. KLIMBO, J. MISKUFOVA, A. (2023). Current Trends in Spent Portable Lithium Battery Recycling. *Materials*. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16124264>

TAPSOBA, N. (2012). Comportement des enrobés bitumineux à base de matériaux recyclés et / ou fabriqués à température réduite. Thèse de Doctorat MEGA en Génie Civil. ENTPE - Université de Lyon, 266 p. França.

TIAN, X., WU, Y., HOU, P., LIANG, S., QU, S., XU, M., ZUO, T. (2017). Environmental impact and economic assessment of secondary lead production: comparison of main spent lead-acid battery recycling processes in China. *J. Clean. Prod.* 144, 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.171>.

TORRES, A. P., PEREIRA, I. N. A., SPINOLA, J. R., PEREIRA, A. G. & FROTA, C. A. Torres. (2019). Four-point bending mechanical behavior of aged asphalt mixtures containing charcoal. *International Journal for Innovation Education and Research*, 7, 460-472. [10.31686/ijer.Vol7.Iss10.1794](https://doi.org/10.31686/ijer.Vol7.Iss10.1794)

TORRES, J. S.C; J; AGREGO, T. (2019) J. Uso de escória secundária de fundição de chumbo em tijolos cerâmicos”, *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, Vol. 29(1). pp. 7-18 <https://doi.org/10.18359/rcin.3495>

USGS (2021), United States Geological Survey . Mineral Commodity Summaries January 2021. Disponível em: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>. Acesso em: 27 maio 2023.

VARSHNEY, K.; VARSHINEY, P. K.; GAUTAM, K.; TANWAR, M. (2020). Current trends and future perspectives in the recycling of spent lead acid batteries in India. *Materials Today: Proceedings*, v. 26, p. 592–602.

VENZON, J. S.; CHICATTO, J. A.; VEGINI, A. A., TAVARES, L. B. B. (2018). Resíduos sólidos industriais e seu potencial para a produção de compósitos – uma revisão de literatura. Disponível em: <http://www.revistaeta.org/artigo.php?idartigo=3024>. Acesso em 23 de setembro de 2018.

VERSTRAETEN, J. (1994). Résistance à l'Orniérage et Résistance à la Fissuration des Couches Bitumineuses, Centre de Recherches Routieres, Bruxelas.

WAN, X.; TASKINEN, P.; SHI, J.; JOKILAAKSO, A. (2021), A Potential Industrial Waste–Waste Co-Treatment Process of Utilizing Waste SO<sub>2</sub> Gas and Residue Heat to Recover Co, Ni, and Cu from Copper Smelting Slag. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 414, 125541, ISSN 0304-3894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125541>.

WANG, M. M; TAN, Q; YU, J; XIA, D; ZHANG, W; ZHANG, C. C; ZHANG, Z; WAN, J. X; LIU, K. LIG, J. (2023). Pollution-free recycling of lead and sulfur from spent lead-acid batteries through an easy vacuum roasting route. *Green Energy and Resources*, vol 01. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2022.100002>

WANG, M., TAN, Q., CHIANG, J.F., LI, J. (2017). Recovery of rare and precious metals from urban mines—a review. *Front. Environ. Sci. Eng.* 11 (5), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11783-017-0963-1>.

WANG, Y.; CHONG, D.; WEN, Y. (2017). Quality verification of polymer-modified asphalt binder used in hot-mix asphalt pavement construction. *Construction and Building Materials*, Vol.150,pp.157-166,ISSN0950-0618.DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.196>.

WIKIMEDIA COMMONS. (2010). Galena. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Galena-den07-09b.jpg>. Acesso em 02 de dezembro de 2023.

WHITE, T.; HADDOCK, J.; HAND, A.; FANG, H. (2002). Contribution of pavement structural layers to rutting of hot mix asphalt pavements. NCHRP Rep. 468, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington.

WORRELL, E.; REUTER, M.A. (2014). Handbook of Recycling. 1<sup>o</sup> ed. Amsterdam: Elsevier Inc.

XAVIER, L. H.; LINS, F. A. F.(2018). MINERAÇÃO URBANA DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS: Uma nova fronteira a explorar no Brasil . Brasil Mineral, v. 1, n.379, p. 22–26.

YAN, K XU, H. & YOU, L. Yan. (2015). Rheological properties of asphalts modified by waste tire rubber and reclaimed low density polyethylene. Construction and Building Materials, 83, 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.092>.

YANG, D.; LIU, J.; WANG, Q; YUAN, X.; ZHU, X.; LI, L.; ZHANG, W.; HU, Y.; SUN, X.; KUMAR, R. V.; YANG, J. (2014), A Novel Ultrafine Lead Oxide Prepared from Spent Lead Pastes for Application as Cathode of Lead Acid Battery. Journal of Power Sources, Vol. 257, pp. 27-36, ISSN 0378-7753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.091>.

YIN, N., SIRVRY, Y., GUYOT, F., LENS, P.N.L, HULLEBUSCH, V.D.E.(2026). Evaluation on chemical stability of lead blast furnace (LBF) and imperial smelting furnace (ISF) slags. Journal of Environmental Management, v.180, p.310-323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.052>.

ZENG, X; OGUNSEITAN, O.A; NAKAMURA, S; SUH, S; KRAL, U; LI, J; GENG, Y. (2022). Reshaping global policies for circular economy. Circular Economy VOL 1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cec.2022.100003>

ZHANG, J., HUANG, B., WANG, H., & CHEN, M. (2016). Effects of chemical properties of aggregates on bitumen–aggregate adhesion. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(10), 04016122.

ZHANG, J., XIAO, F., LIU, S., & HUNG, B. (2015). Effect of Aggregate Surface Texture on Bond Strength between Aggregates and Asphalt Binder. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(1), 04015149.

ZHANG, L.; XU, Z. (2016). A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment. J. Clean. Prod, v. 127, p.19-36.

ZHANG, P.; LIU, G. (2018). Data-Driven Recovery Potential Analysis and Modeling for Batteries Recovery Operations in Electric Bicycle Industry. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, v. 2018, p. 1-19.

ZHANG, P.; MUHAMMAD, F.; YU, L.; XIA, M.; LIN, H.; HUANG, X.; JIAO, B.; SHIAU, Y.; LI, D. (2020), Self-cementation solidification of heavy metals in lead-zinc smelting slag through alkali-activated materials. *Construction and Building Materials*, Vol. 249, 118756, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118756>.

ZHAO, Z.; LIU, W.; JIANG, Y.; WAN, Y.; DU, R.; LI, H. (2022), Solidification of Heavy Metals in Lead Smelting Slag and Development of Cementitious Materials. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 359, 132134, ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132134>.