



26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

AValiação de Misturas Asfálticas Densas com uso de Escória de Bateria de Chumbo-Ácido

*Nayara Juliana Jargemboski Piazero Benkendorff¹; Breno Salgado Barra¹ Natan Assis
Monteiro¹ Rafael Cristyan Fronza¹*

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. A caracterização da escória foi realizada a partir de análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de Raios- X (DRX), e espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX). Ainda, análises de lixiviação e pH foram realizadas, com o intuito de investigar a capacidade da escória de chumbo-ácido em causar impacto ao meio ambiente. A incorporação da escória de bateria de chumbo-ácido nas misturas asfálticas compreendeu a substituição de frações 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 e abrangeram os aspectos relacionados 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. Os resultados obtidos indicam que a incorporação da escória de chumbo-ácido estudada quando comparada às formulações de referência, apresentam menor habilidade de compactação, aporte de maiores teores de ligante 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.

PALAVRAS-CHAVE: Escória de chumbo-ácido; metodologia francesa; misturas asfálticas densas.

ABSTRACT

The main objective of this work is to evaluate dense asphalt mixtures of the Béton Bitumineux Semi-Grenus (BBSG) type, with the incorporation of lead-acid battery slag, in order to verify the technical feasibility of this industrial waste. The slag was characterized using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and X-ray fluorescence spectrometry (XRF). Furthermore, leaching and pH analyzes were carried out, with the aim of investigating the ability of lead-acid slag to cause an impact on the environment. The incorporation of lead-acid battery slag into asphalt mixtures included the replacement of fractions related to the project granulometric curve, with two percentage variations being tested (7.0% and 15.0%), which were compared to the formulations of reference, previously studied and composed entirely of crushed granular gneiss rock mass. The bituminous binder was classified in the 30/45 penetration range, in its pure form. The evaluations of the formulations considered the scope of the French methodology and covered aspects related to the ability to compact in the rotary shear compaction press (PCG), resistance to the harmful action of water in the Duriez test at 18 °C and to permanent deformation at 60 °C. The results obtained indicate that the incorporation of the lead-acid slag studied, when compared to the reference formulations, has a lower compaction ability and provides higher levels of binder in the dosages. On the other hand, aspects such as good resistance to the harmful action of water and results in resistance to permanent deformation compatible with the normative classes of BBSG type formulations.

KEY WORDS: Lead-acid slag; French methodology; dense asphalt mixtures.

¹ Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e-mail: nayara.jargemboski@gmail.com; breno.barra@ufsc.br; natan.mon2@gmail.com ; rafael.c.fronza@gmail.com



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, a 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).

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).

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.

Nesse contexto, 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.

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE ESCÓRIA DE BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO

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 constituída basicamente de ferro e com concentrações menores de enxofre, sódio e chumbo (SILVA e TEIXEIRA, 2020).

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).

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.

Observando-se a Tabela 1, 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 1. Balanço nacional da produção secundária de minério refinado de chumbo (ANM, 2020).

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

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

As frações granulares desta pesquisa foram oriundas de britagem de maciço rochoso gnáissico, coletadas em jazida localizada na região metropolitana de Joinville/SC. Os ensaios de caracterização foram executados conforme as normas vigentes no Brasil (Tabela 2)

Tabela 2. Caracterização das frações granulares (Adaptado de PERSIKE, 2023).

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 ³	-	DNIT-ME 413/2021
Massa específica real	2,812 g/cm ³	-	DNIT-ME 413/2021

A escória de bateria de chumbo-ácido foi fornecida pela empresa Baterias Pioneiro, situada na cidade de Treze Tílias/SC. As análises química, física e mineralógica das amostras de escória de chumbo-ácido foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Micropartículas (LACAMI), localizado em Criciúma/SC.

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 (Figura 1).

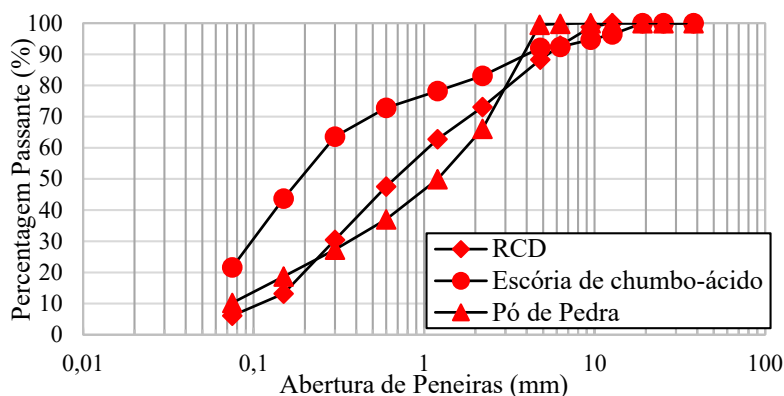


Figura 1. Distribuição granulométrica do pó de pedra, RCD e escória de chumbo-ácido (Adaptado de PERSIKE, 2023).

A composição química por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX), foi realizada após o teste de perda ao fogo (PF), seguindo a Norma ASTM D7348-07 (2007), a fim de se eliminar os materiais orgânicos e água de constituição presentes no material, conforme resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Distribuição percentual dos óxidos componentes da escória de chumbo-ácido (JARGEMBOSKI, 2024) comparada à do pó de pedra (CLARA, 2020).

Fíleres (%Massa)	Elementos														
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	PbO	SO ₃	MnO	ZrO ₂	V ₂ O ₅	SrO	ZnO	Cr ₂ O ₃	Na ₂ O
Escória de chumbo-ácido	3,149	40,424	-	9,224	-	0,398	3,088	34,511	0,380	0,028	-	0,033	1,057	0,179	-
Pó de pedra	53,602	14,505	10,928	8,080	3,26	2,576	0,013	0,435	0,033	0,111	0,103	-	0,062	0,049	0,639

Quanto à escória de chumbo-ácido, verifica-se que o óxido Férrico (Fe₂O₃) 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). Os demais elementos identificados em menor escala na Tabela 3, 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 Fe₂O₃, SO₃, 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. Quanto ao pó de pedra, tem-se que a concentração de SiO₂ é da ordem de 50,00 %. Nestes termos, o teor de SiO₂ 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.

No que diz respeito à análise morfológica das partículas de escória de chumbo-ácido foi aplicada à



técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (Figura 2).

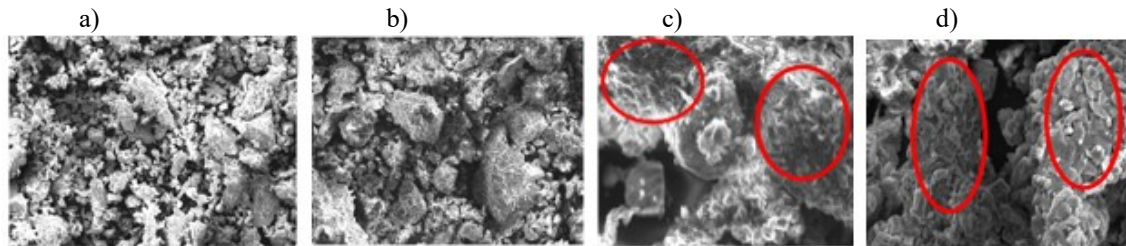


Figura 2. Análise das amostras de escória de chumbo-ácido com ampliação de: (a) 500x, (b) 1000x, (c) 3000x e (d) 3000x (JARGEMBOSKI, 2024).

Quanto à escamosidade e porosidade mencionadas, tem-se que estão relacionadas diretamente ao processo de reciclagem da escória de chumbo-ácido, 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 (ZHAO et al., 2022; ANDRADE e BERNADEZ, 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).

A composição mineralógica das amostras de escória de chumbo-ácido foi determinada por difratometria de Raios-X (DRX), e a identificação das fases (Figura 3), procedida pela comparação dos resultados obtidos em relação aos difratogramas contidos no banco de dados *Crystallography Open Database* do LACAMI.

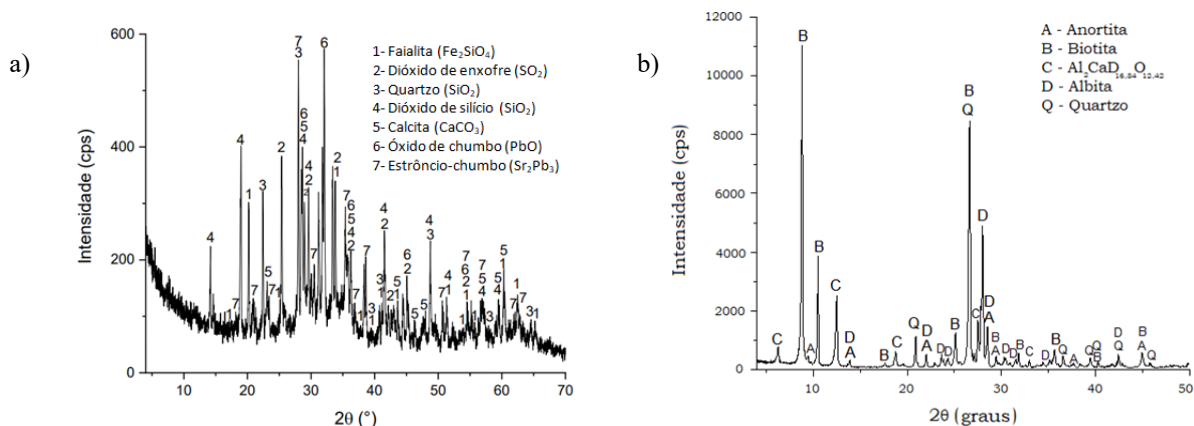


Figura 3. Difratoograma da (a) escória de chumbo-ácido (JARGEMBOSKI, 2024) e do (b) pó de pedra, (BARRA et al. 2021).

Comparando a difratometria da escória de chumbo-ácido (Figura 3a) com a do pó e pedra (Figura 3b), é notável a presença elevada de picos sucessivos das 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.



no primeiro, enquanto o segundo indica picos referentes às presenças dos minerais anortita, biotita, albíta e quartzo, corroborando as análises de FRX.

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). O pH dos resíduos de escória de chumbo-ácido foi determinado de acordo com o descrito no item 4.2.1.2 da norma ABNT NBR 10004 (2004).

O ligante betuminoso utilizado foi o 30/45 classificado por penetração, em sua forma pura, proveniente de refinaria localizada em Paulínia/SP. As características técnicas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros de caracterização do ligante betuminoso 30/45 (REPLAN, 2018).

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

Pela Tabela 4 é possível constatar que o índice de suscetibilidade térmica (IP) possui um valor muito próximo ao limite mínimo normativo, indicando forte termosusceptibilidade a elevadas temperaturas. Os dados de viscosidade fornecidos pela refinaria, a partir do método Saybolt-Furol (DNER-ME 004, 1994), indicaram a temperatura adequada para usinagem do ligante em 155 °C, enquanto a de compactação da mistura asfáltica em 145 °C o 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).

Métodos

Ensaio Laboratoriais

Para a execução dos ensaios laboratoriais, aplicaram-se os níveis avaliativos sequenciais e eliminatórios 1 e 2 da metodologia francesa (MANUEL LPC, 2007), compreendendo os parâmetros de: (nível 1) habilidade de compactação com a Prensa de Compactação por cisalhamento Giratório (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019) e resistência à ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18 °C (AFNOR NF EN 12697-12, 2018), e; (nível 2) deformação permanente a 60 °C (AFNOR NF



EN 12697-22, 2020). Foram consideradas para cada teor de ligante as quantidades de 3, 12 e 2 corpos de prova, respectivamente.

A Tabela 5 apresenta os limites normativos para cada classe de misturas do tipo BBSG (1, 2 e 3), em que a 3 é a mais nobre, enquanto a Figura 4 ilustra a sequência de testes executados durante a campanha experimental.

Tabela 5. Limites normativos considerados nos ensaios (PERSIKE, 2023).

Ensaio	Norma	Classe da Mistura BBSG	Limites Normativos
PCG	AFNOR NF EN 12697-31 (2019)	1, 2 e 3	$\%V_{\min} \geq 4,0\%$ e $\%V_{\max} \leq 9,0\%$ a 80 giros
Duriez	AFNOR NF EN 12697-12 (2018)	1, 2 e 3	$r/R \geq 0,70$
Deformação Permanente a 60 °C	AFNOR NF EN 12697-22 (2020)	1	$7,5\% < \% \leq 10,0\%$, após 30.000 ciclos
		2	$5,0\% < \% \leq 7,50\%$, após 30.000 ciclos
		3	$\% \leq 5,0\%$, após 30.000 ciclos

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Habilidade de Compactação na PCG

Os resultados obtidos nos ensaios de habilidade de compactação com o uso da PCG são apresentados na Figura 5, indicando o cenário geral da evolução do volume de vazios (%V) no transcurso dos giros executados pela PCG, com aplicação de esforços de compressão axiais e cisalhantes sobre as amostras.

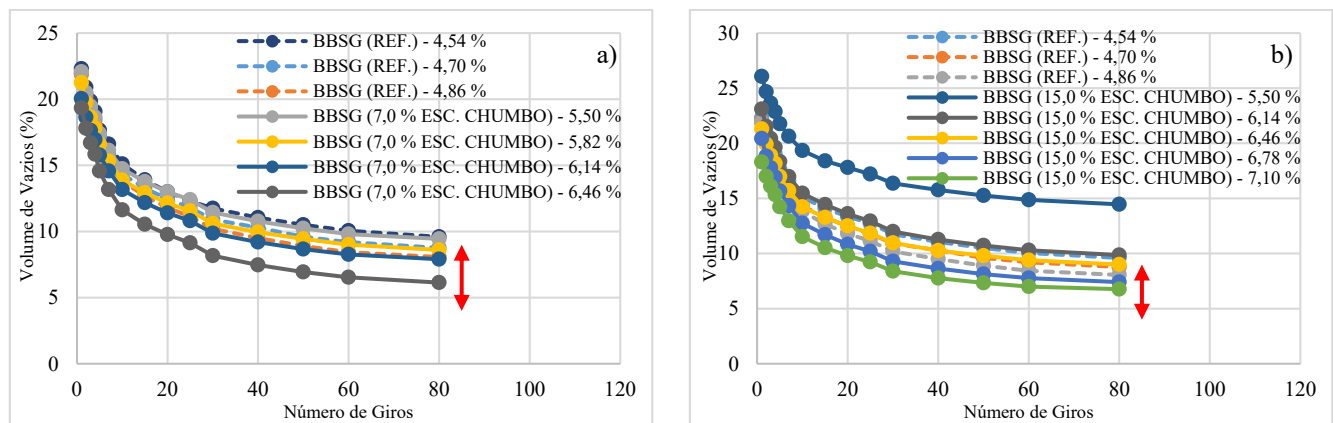


Figura 4. Habilidade de compactação das misturas: a) referência e com 7,0 % de escória de chumbo-ácido; b) referência e com 15,0 % de escória de chumbo-ácido JARGEMBOSKI, 2024).

É possível observar em todos os cenários comparativos com a mistura asfáltica de referência, que as incorporações de escória de chumbo-ácido necessitaram de maiores aportes de ligante betuminoso nas dosagens, implicando em menores volumes de vazios para os mesmos 80 giros estabelecidos normativamente.

Esta tendência confirma a condição mencionada quanto à análise da textura das partículas de escória de chumbo-ácido e pó de pedra, em que o primeiro possui 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, 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. Logo, isto acarreta em menor área ocupada por de unidade de peso a ser preenchida, dificultando o envolvimento pelo ligante betuminoso, devido ter maior potencial de absorção intragranular, demandando teores de ligante superiores para que alcance o mesmo êxito de trabalhabilidade das misturas de referência.

Resistência à ação deletéria da água

Para a realização do ensaio de Duriez a 18 °C, procedeu-se os testes apenas com as formulações aprovadas no ensaio da PCG. A Figura 5 ilustra os resultados obtidos.

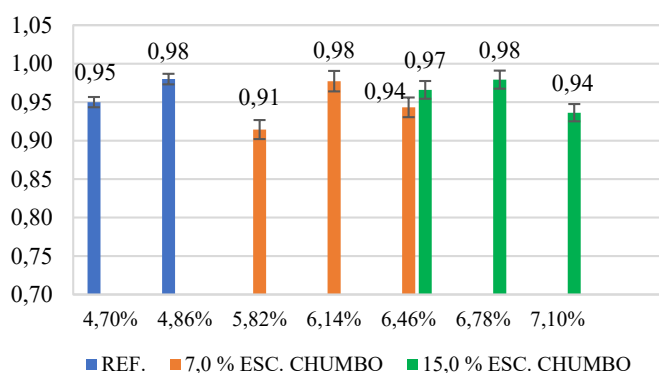


Figura 5. Relação r/R obtidas no ensaio de Duriez (JARGEMBOSKI, 2024).

Conforme discorrido no tópico sobre a caracterização dos materiais com base nas análises de FRX, 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. 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.

Deformação Permanente

Para esta etapa de avaliação, foram testadas as formulações aprovadas no conjunto dos ensaios de PCG e Duriez a 18 °C, sendo os resultados ilustrados na Figura 6.

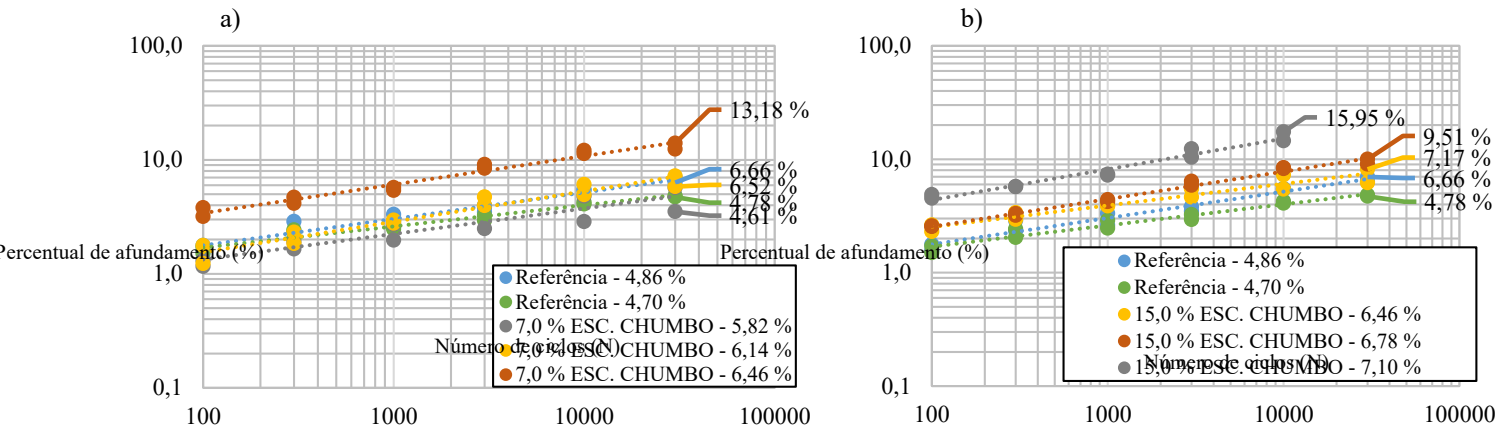


Figura 6. Evolução do afundamento na trilha de rodas das misturas: a) referência e com 7,0 % de escória de chumbo-ácido; b) referência e com 15,0 % de escória de chumbo-ácido (JARGEMBOSKI, 2024).

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 características distintas neste aspecto em cada placa testada, acarretando uma variabilidade nos resultados obtidos do mesmo par de placas testado. 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. 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.

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. A dosagem com 7,10 % foi reprovada pelos mesmos motivos discurridos para a formulação com 6,46 % de teor de ligante betuminoso referente aos 7,0 % de incorporação da escória de chumbo-ácido.

Ensaio de lixiviação e análise de pH

A partir dos resultados obtidos compreendeu a lixiviação de metais pesados contidos nas amostras de escória de chumbo-ácido, principalmente o Chumbo (Pb), 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.

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), causando penetração no solo e resultando assim em contaminação do meio ambiente.

Quanto ao resultado da análise 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 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, devi do ter apresentado os menores valores. Estes fatores ratificam os comentários já discutidos sobre os prejuízos à sanidade das partículas granulares rochosas e à diminuição da vida útil das misturas asfálticas.

CONCLUSÕES

A partir da campanha experimental realizada, verificou-se que a partir das características da escória de chumbo-ácido estudada, 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. Diminuindo a resistência aos esforços de compressão axial e de cisalhamento aplicados nos testes de habilidade de compactação, culminando com uma forte redução do teor de vazios, e maiores afundamentos na trilha de roda.

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, neste contexto 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). 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.

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, indicaram pouca viabilidade técnica em sua utilização, em razão da trabalhabilidade mais dificultosa nos procedimentos de usinagem, menor habilidade de compactação e maior dispêndio econômico de produção devido ao consumo de ligante betuminoso mais elevado demandado nas dosagens.



Recomenda-se também a continuidade desta pesquisa, porém, com a investigação de técnicas capazes de encapsular adequadamente o material, evitando a lixiviação, em consonância à utilização de ligantes betuminosos mais consistentes e modificados. 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

- AFNOR NF EN 12697-12 (2018), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- AFNOR NF EN 12697-22 (2020), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 22: Essai d'orniérage. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- AFNOR NF EN 12697-31 (2019), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 31: Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- 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.
- ANM (2020), Agência Nacional de Mineração. *Anuário Mineral Brasileiro 2020: Principais Substâncias Metálicas*. Brasília.
- 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.
- BARDINI, V. S. S.; KLINSKY, L. M. G.; JÚNIOR, J.L. F.; ROQUE, R. (2012). Influência do filer mineral no comportamento reológico de mástiques asfálticos. *Transportes*, 20 (3), 19-26. <https://doi.org/10.4237/transportes.v20i4.603>
- 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).
- 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>.
- 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>.
- 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> Acesso em: 22 de outubro 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.

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>.

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.

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.

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.

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.

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.

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, última consulta em fevereiro de 2023.

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.

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

WAN, X.; TASKINEN, P.; SHI, J.; JOKILAAKSO, A. (2021), A Potential Industrial Waste–Waste Co-Treatment Process of Utilizing Waste SO₂ 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>.

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>.

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>.