

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETO COM A ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE CHUMBO PARA USO COMO CONCRETO PESADO

Caroline Araujo Garcia – carolinearaujogarcia@gmail.com

Giovanna Abrarpour – gioabrapour@gmail.com

Sophia Amaral Galozzi Bigongiari – s.bigongiari@hotmail.com

Thomas Junior Vila Wertheim – thojrvila@gmail.com

Prof^a. Dr^a. Roberta Nunes Attili Franzin (Orientador) – roberta.franzin@mackenzie.br

RESUMO

Diante da intensa exploração dos recursos naturais e geração de resíduos, por vários setores industriais, torna-se importante a busca por práticas mais sustentáveis para a construção civil. Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas de um traço de concreto produzido com a adição de escória de chumbo, resíduo decorrente do processo de reciclagem de baterias chumbo-ácido, a fim de verificar sua viabilidade de uso como concreto pesado. Inicialmente foram avaliadas a composição química da escória, bem como sua granulometria e massa unitária. Os resultados obtidos indicaram a substituição do agregado miúdo (areia) pela escória, no concreto. Foram produzidos quatro traços utilizando cimento Portland V-ARI, por não conter adições em sua composição: um traço convencional de concreto (traço de controle), um traço convencional de concreto supostamente pesado para fins de comparação e dois traços de concreto com a substituição de 30% e 50% da areia pela escória de chumbo. Para todos os traços foram determinadas as massas específicas e resistência à compressão para as idades 7, 14 e 28 dias. Para os corpos de prova na idade de 28 dias foram realizados também ensaios de absorção de água. Os traços com a escória de chumbo não atingiram a resistência mínima de 20 MPa, definida em norma. Os resultados obtidos mostraram que a incorporação da escória de chumbo no concreto não conferiu a ele as características necessárias para uso como concreto pesado de acordo com as normas, mas não excluem a possibilidade de uso desse concreto para outras finalidades.

Palavras Chave: Concreto. Concreto Pesado. Escória de Chumbo. Sustentabilidade

MECHANICAL BEHAVIOR OF CONCRETE WITH THE ADDITION OF LEAD SLAG FOR USE AS HEAVY CONCRETE

ABSTRACT

Given the intense exploitation of natural resources and waste generation by various industrial sectors, it is important to seek more sustainable practices for civil construction. This work aimed to evaluate

the physical and mechanical properties of a concrete trace produced with the addition of lead slag, residue resulting from the recycling process of lead-acid batteries, in order to verify its viability of use as heavy concrete. Initially, the chemical composition of the slag was evaluated, as well as its granulometry and unit mass. The results indicated the substitution of the kid aggregate (sand) by the slag in the concrete. Four traces were produced using Portland V-ARI cement, because it did not contain additions in its composition: a conventional trace of concrete (control trace), a conventional trace of supposedly heavy concrete for comparison purposes and two traces of concrete with the replacement of 30% and 50% of the sand by lead slag. For all traits, specific masses and compressive strength were determined for ages 7, 14 and 28 days. For the specimens at the age of 28 days, water absorption tests were also performed. The traces with lead slag did not reach the minimum resistance of 20 MPa, defined as standard. The results showed that the incorporation of lead slag in concrete did not give it the characteristics necessary for use as heavy concrete according to the standards but does not exclude the possibility of using this concrete for other purposes.

Key words: Concrete. Heavy Concrete. Lead Slag. Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil apesar de ser extremamente importante para o desenvolvimento econômico e social do país, gera um relevante impacto ambiental, desde a extração de matéria prima à elevada produção de resíduos, e geração de poluentes. Com o intuito de desenvolver e reaproveitar tais resíduos e outros, oriundos de outras fontes, a construção sustentável visa buscar resultados de modo a reduzir o impacto ambiental sem perder qualidade na obra.

O desenvolvimento sustentável, além de prevenir problemas ambientais, ajuda, também, na otimização de processos, no uso mais eficiente de matérias-primas e energia. E embora isso tenda a elevar a produtividade econômica, grande parte das empresas do setor ainda ignoram os benefícios gerados pela preservação ambiental e a possível diminuição de recursos (HOOPER; JENKINS, 1995 *apud* GOMES, 2006).

A fim de contribuir para a prática de sustentabilidade no país, em 2010 foi oficializada a Lei 12.305/2010 que define a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), que estabelece objetivos, instrumentos e diretrizes para a gestão de resíduos sólidos, define as responsabilidades dos geradores, do poder público e dos consumidores, bem como os instrumentos econômicos aplicáveis e incentivo à indústria de reciclagem.

Além da construção civil, outro setor gerador de elevada quantidade de resíduos é a indústria metalúrgica, responsável por um descarte excessivo de resíduos e, até mesmo, por uma destinação inadequada deles.

No contexto de geração de resíduos perigosos, destaca-se o mercado de baterias chumbo-ácido, com quantidade expressiva de resíduos à base de metais pesados, mais especificamente o chumbo, que se não reciclados ou adequadamente descartados, podem provocar sérios danos ambientais e, conseqüentemente, à saúde dos animais e do homem. Com o objetivo de recolher e reciclar mais de 16 milhões de baterias em até quatro anos, o que representa aproximadamente 155 mil toneladas de chumbo, o Ministério do Meio Ambiente (MMA), em 2020, implementou o sistema de logística reversa de baterias automotivas, iniciativa ligada ao programa Lixão Zero da PNRS, que estabelece que fornecedores, fabricantes, distribuidores e comerciantes que trabalham com esse material criem pontos de coleta e façam a devida gestão até pontos de reciclagem (BRASIL, 2019). Mas, apesar de haver a reciclagem das baterias, ainda há o resíduo decorrente dessa reciclagem, que é a escória de chumbo.

Assim, com o intuito de se buscar materiais mais sustentáveis para construção civil e alternativas que possam fomentar o uso de resíduos sólidos no setor, este trabalho visa analisar as propriedades físicas e mecânicas de concreto produzido com adição de escória de chumbo e verificar se esse concreto atende as características de concreto pesado.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O concreto é o material construtivo mais consumido no mundo, sendo seu principal insumo o cimento. Podendo ser usado de formas diversas, de acordo com a finalidade, possui uma variabilidade de aplicações, sendo uma delas o concreto pesado.

Este tipo de concreto é usado em lajes localizadas abaixo do nível da água do lençol freático, na construção de bases, lastros, barragens, pontes e, também, empregado em paredes de contenção de radiação em usinas nucleares e laboratórios médicos que utilizam radiação.

Justamente por possuir uma massa específica maior do que a do concreto convencional, que varia entre 2 000 e 2 800 kg/m³, o concreto pesado apresenta massa específica superior a 2 800 kg/m³, de acordo com a ABNT NBR 8953 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), podendo alcançar até 50% a mais de massa que os concretos convencionais. Em decorrência desse fato existe a tendência de ocorrer a segregação entre os componentes deste tipo de concreto, afetando assim a trabalhabilidade da mistura.

O procedimento de seu preparo é o mesmo do convencional: primeiro se adiciona os agregados graúdos com a areia, e, em seguida, a água e o cimento, seguindo o traço definido. O ganho de massa, responsável pelo aumento na massa específica, ocorre devido ao acréscimo de agregados naturais mais densos, que podem substituir o agregado miúdo ou graúdo. Os agregados mais densos frequentemente usados são a hematita, a barita e a magnetita, mas também podem ser usados a dolo-

mita, a limonita, limalhas de ferro e até mesmo esferas de aço (CIMENTO MAUÁ, 2018).

Considerando as necessidades de se buscar materiais mais sustentáveis para a construção civil e de se encontrar um fim para resíduos da indústria metalúrgica, de forma geral, vários trabalhos de pesquisa têm sido realizados com a adição desses resíduos industriais em concreto. Neste cenário, surge a possibilidade de uso da escória de chumbo, resíduo da indústria de reciclagem de baterias.

O chumbo é muito utilizado em baterias, munição, revestimento de cabos elétricos, na fabricação de pigmentos de tinta, na produção de ligas metálicas para fins diversos (soldas e fusíveis, por exemplo), além de ser usado na construção civil e em anteparos de proteção contra radiação, dentre outras possibilidades.

Sendo um metal tóxico, denso, maleável, considerado um mau condutor de eletricidade e que adquire coloração acinzentada quando exposto ao ar. Possui uma alta resistência à corrosão, baixo ponto de fusão, grande opacidade aos raios X e gama, reação eletroquímica com ácido sulfúrico e estabilidade química no ar, solo e água (PAOLIELLO; CHASIN, 2001 *apud* GOMES, 2006).

Pode-se adquirir o chumbo “puro” de duas formas distintas: o chumbo primário, obtido a partir de minérios como galena (PbS), cerusita (PbCO₃) e anglesita (PbSO₄), encontrados na sua forma natural, e o chumbo secundário, obtido através do processo de reciclagem de baterias chumbo-ácido (EPA, 1998 *apud* KREUSCH, 2005).

Geralmente as baterias possuem uma vida útil de dois anos. Ultrapassado esse prazo existe a possibilidade de serem recicladas, e todos seus componentes (materiais metálicos, líquidos e plásticos) podem ser destinados ao processo de reciclagem. O Fluxograma 1 ilustra o processo de reciclagem das baterias, sendo possível observar que a escória de chumbo é obtida na etapa de fundição, sendo considerado o único resíduo que não pode ser reaproveitado para a produção de novas baterias e, que, se descartado de forma incorreta, pode ser prejudicial à saúde e ao meio ambiente.

Constituída normalmente por óxidos, silicatos e ferro, a escória de chumbo é considerada um metal gerado em fase fundida que ao ser resfriado se solidifica, criando propriedades características. Por possuir uma alta concentração de aditivos e ferros, a reação química de oxirredução que ocorre faz com que a produção final do material atinja altas temperaturas.

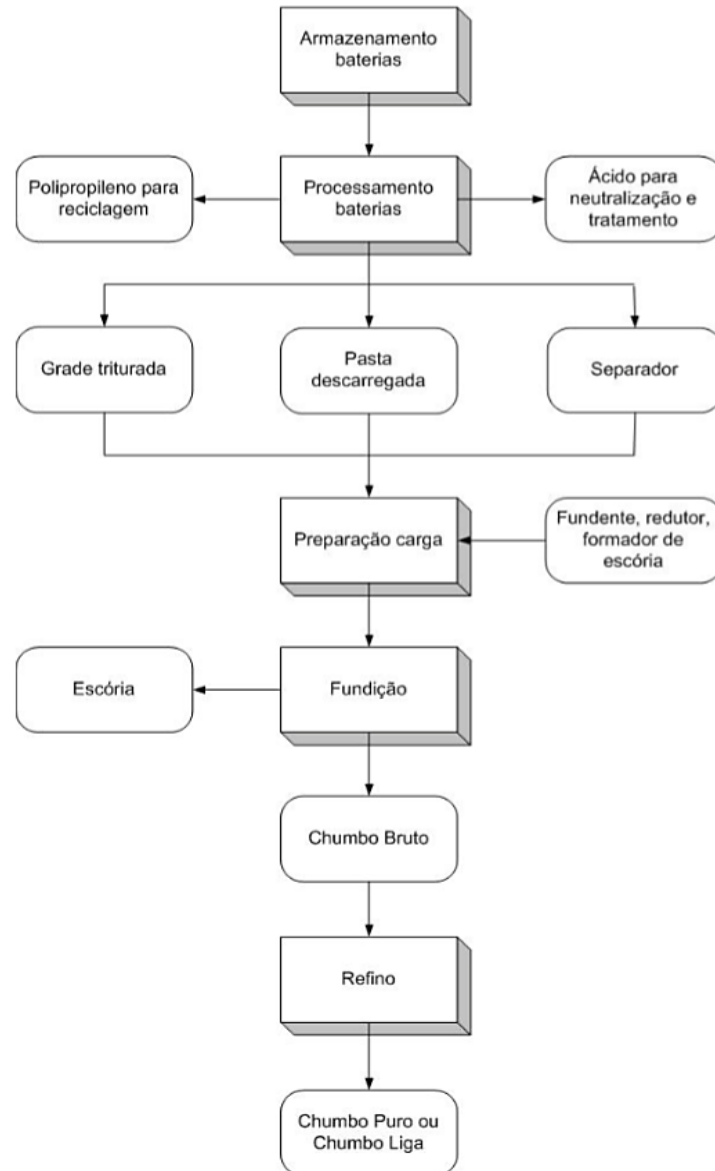
Segundo Gomes (2006), deve-se considerar três principais adições para a formação dessa escória:

- a) elementos redutores: resquícios do carbono sólido adicionado para diminuição carbotérmica, gerada no interior dos fornos de fundição/refino de chumbo, em forma de PbSO₄, PbO₂, PbO e Pb metálico;
- b) elementos receptores: ferro utilizado como receptor de impurezas, coletor do enxofre e formador de sulfeto de ferro (FeS), material que compõe maior parte dos resíduos de escó-

ria de chumbo;

- c) elementos fundentes: matéria mais comumente utilizada como fundente, carbonato de sódio (Na_2CO_3), nas quais tem como sua função reduzir o ponto de fusão e a viscosidade da escória.

Fluxograma 1 – Processo de produção de chumbo secundário a partir da reciclagem de resíduos de bateria



Fonte: Gomes (2006)

Poucas pesquisas têm sido realizadas a respeito da utilização da escória de chumbo em materiais de construção.

Como destacado no trabalho feito por Franck *et al.* (2019) para a melhoria do solo em compostos de solo-cimento para pavimentação, foram definidos 2 traços com a utilização da escória (2,5% e 5%). Elas foram adicionadas, separadamente, a uma mistura com 15% do Cimento Portland V-ARI (CP V-ARI) (Alta Resistência Inicial), água e a escória como troca do agregado graúdo para o primeiro traço e o miúdo para o segundo.

Na fase de experimentação do trabalho, foram moldados 3 corpos de prova para cada um dos ensaios de resistência à compressão realizados ao 7, 28 e 60 dias de cura, juntamente com 4 diferentes temperaturas na hora do rompimento (24°C, 35°C, 45°C e 60°C), totalizando 72 corpos de prova.

O melhor resultado (10,33 MPa) encontrado foi o de 60 dias de moldagem, com o concreto que possuía 5% de escória de chumbo e temperatura de 60°C. Comparado ao corpo de prova rompido no 7º dia, com o mesmo traço e temperatura, e resistência à compressão igual a 5,9 MPa, checkou-se (aprovou-se) a possibilidade do uso da escória para este fim.

Silva (2007) utilizou escória de chumbo, proveniente da reciclagem de baterias para a produção de argamassas. Neste estudo foram produzidos traços de argamassas com substituição de 5%, 10%, 20% e 30% da areia e do cimento, pela escória. Foram feitos ensaios de resistência à compressão para corpos de prova nas idades 4 e 28 dias e os resultados obtidos mostraram melhores resultados para os traços com a substituição da areia, comparados aos da substituição do cimento. Foi possível observar um melhor desempenho para a substituição de 20% de areia pelo agregado reciclado, com resistência média de 38,63 MPa, resultado 21% maior do que para o material de referência.

Em virtude de não haver muitos estudos relacionados ao uso de escória de chumbo em concreto, assim como em outros materiais de construção, há a necessidade de se ampliar as pesquisas no tema e, esse trabalho, visa contribuir com resultados que possam validar o uso da escória como um agregado reciclado na construção civil e motivar outros estudos.

3 METODOLOGIA

A escória utilizada neste trabalho é resultado de um teste de redirecionamento de descartes desenvolvido pelo departamento de Química e Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da empresa Tamarana Tecnologia Ambiental, produtora de chumbo secundário, e localizada na cidade de Tamarana, Paraná.

Essa escória, procedente dos fornos de alta temperatura, diferentemente do processo convencional, é lançada em uma grande quantidade de água fria e, devido ao choque térmico, se torna frágil, possibilitando maior facilidade na sua manipulação e transporte. Para o material obtido, já na forma granular, foram feitos ensaios de granulometria e massa unitária de acordo com as normas ABNT NBR NM 248:2003 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003) e ABNT NBR 16972 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021), respectivamente.

Além do material, a empresa forneceu os resultados da análise de fluorescência de raios X de 20 amostras do mesmo lote da escória doada, para fins de verificação de sua composição química. A

partir dos resultados dos ensaios descritos foi efetuado um estudo dos traços de concreto usados neste trabalho.

Fez-se um estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas para quatro traços de concreto denominados de 1 a 4. Sendo o traço 1 um traço convencional de concreto, também denominado traço de controle, o traço 2 um traço de concreto pesado, utilizando dolomita como agregado graúdo, e os traços 3 e 4 de concreto convencional com substituição da areia por 30% e 50% por escória de chumbo, respectivamente.

Para todos os traços foi utilizado o cimento Portland V-ARI (CP V-ARI) e um traço usual de concreto como base (1:1:3:0,55). Justifica-se a escolha do CP V-ARI pelo fato desse cimento não apresentar adições na sua composição, permitindo uma melhor análise do comportamento da escória no concreto. A Tabela 1 mostra a relação e quantidade dos materiais usados em cada traço.

Tabela 1 – Relações de materiais dos traços de 1 a 4

Tipo de Concreto	Traço	Cimento (kg)	Agregado miúdo (kg)	Agregado graúdo (kg)	Água (L)
Traço 1 (Concreto convencional)	1:1:3:0,55	5,0	areia: 5,0	brita 1: 15,0	2,5
Traço 2 (Concreto pesado)	1:1:3:0,55	5,0	areia: 5,0	dolomita: 15,0	2,5
Traço 3 (Concreto com 30% EC*)	1:1:3:0,55	5,0	areia: 3,5; EC: 1,5	brita 1: 15,0	2,5
Traço 4 (Concreto com 50% EC*)	1:1:3:0,55	5,0	areia: 2,5; EC: 2,5	brita 1: 15,0	2,5

*EC: escória de chumbo

Fonte: Os autores (2021)

Para o traço 2 (concreto pesado), utilizou-se dolomita no lugar da brita 1, escolhida por suas características físicas e mecânicas similares às da magnetita, mais usualmente utilizada na produção do concreto pesado, e por maior facilidade na aquisição.

Vale ressaltar que neste trabalho não foi feito o uso de incorporadores de ar, plastificantes ou redutores de água, superplastificantes, modificadores de pega, modificador de viscosidade e entre outros, normalmente utilizados para um melhor desempenho e performance do concreto.

Para a avaliação da trabalhabilidade do concreto, que é uma propriedade do material analisada no seu estado fresco, foram realizados ensaios de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, também conhecido como *slump test*, segundo a norma ABNT NBR 16889 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020).

Para a análise das propriedades físicas e mecânicas do concreto no seu estado endurecido, foram moldados 24 corpos de prova (CPs), sendo 2 CPs para cada idade, somando 6 CPs para cada traço, de dimensões 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

Após moldagem, de acordo com a norma ABNT NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), os moldes preenchidos com o concreto foram colocados em uma superfície horizontal rígida, livre de vibrações e, durante as primeiras 24h, foram devidamente cobertos com material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar a perda de água do

concreto. Após, foram desmoldados e mantidos imersos em uma solução saturada de hidróxido de cálcio a uma temperatura de aproximadamente $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$, seguindo os padrões estabelecidos na norma, até a realização dos ensaios de resistência à compressão em cada idade.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados para os CPs nas idades de 7, 14 e 28 dias de acordo com a norma ABNT NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018) e o ensaio de absorção de água foi feito apenas para os CPs de 28 dias, com base na norma ABNT NBR 9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009).

Para a realização do ensaio mecânico de compressão axial é necessário que os corpos de prova sejam submetidos a um processo de retificação, a fim de evitar erros de medição em virtude do não nivelamento das bases dos CPs, o que pode ocasionar rompimentos antecipados. Foi utilizada a retificadora da marca COTENCO, modelo I3064 (Fotografia 1).

Fotografia 1 - Retificadora de corpos de prova da marca COTENCO



Fonte: Os autores (2021)

Com o objetivo de remover, por meios mecânicos, uma camada fina de matéria do topo e da base de um CP, o respectivo processo, deve ser feito de uma forma a garantir a integridade estrutural das camadas adjacentes à camada removida, e proporcione uma superfície lisa e livre de ondulações. Dentro desse processo a falha não pode ser superior a 0,05 mm, segundo a norma ABNT NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). Após o processo, as dimensões dos CPs foram medidas com o auxílio de um paquímetro analógico de bico longo 500 mm, de resolução 0,05 mm, modelo 534-102, da marca MITUTOYO, e suas massas foram medidas com uma Balança Digital MARTE, modelo AD 5002 mac 5010g min 0,5g, erro de 0,1g e desvio de 0,01g.

Os corpos de prova foram submetidos a esforços compressivos com velocidade de carregamento de 0,300 a 0,800 ($\pm 0,001$) MPa/s de acordo com a norma ABNT NBR 6156 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1983), em uma prensa hidráulica marca AMSLER com capacidade máxima de 60 toneladas, de número de série 223/496, acionamento manual e capacidade mínima de 1000 kN (Fotografia 2).

Fotografia 2 - Prensa hidráulica de capacidade máxima de 60 toneladas marca AMSLER



Fonte: Os autores (2021)

Posicionados, então, no equipamento de ruptura de maneira a estarem alinhados entre as duas placas metálicas, uma superior e outra inferior, aplicou-se uma força resultante transferida de eixo a eixo de forma contínua e progressiva. A tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$), considerada para os rompimentos é dada pela Equação 1:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F}{S} \quad (1)$$

em que:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = tensão de ruptura à compressão (MPa);

F = carga total de ruptura (kN);

S = área de aplicação da carga (m²).

Quanto ao ensaio de absorção de água, foi seguido o que determina a norma ABNT NBR 9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Após a retirada dos CPs na idade de 28 dias da solução, o excesso de água foi eliminado com o auxílio de um pano e foram medidas as massas saturadas (m_{sat}). Na sequência, os CPs foram mantidos em uma estufa da marca SOLAB, modelo SL-102, capacidade de 1000 L e temperatura máxima de 200 °C, com circulação e renovação de ar, por 24 horas (mínimo requerido pela norma) em temperatura acima de (105 ± 5) °C, para as medidas das massas secas (m_s). O teor de absorção de água é determinado pela Equação 2.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

em que:

A = teor de absorção de água (%);

m_{sat} = massa da amostra saturada em água;

m_s = massa da amostra seca em estufa.

Cabe ressaltar que em função da pandemia de COVID-19, os ensaios de lixiviação e solubilização, inicialmente previstos, não puderam ser realizados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises feitas para a escória de chumbo, assim como para a avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova de concreto sem e com a adição da escória são apresentados a seguir.

Na Tabela 2 encontram-se os resultados da análise da escória pelo ensaio de fluorescência de raios X que, como já destacado, foi realizado na empresa Tamarana Tecnologia Ambiental.

Tabela 2 – Resultados do ensaio de fluorescência de raio X para a escória de chumbo

Concentração de Elementos (%)									
Fe	Si	S	Ca	Sb	Al	Mg	Na	Pb	*outros
43,78	15,15	14,96	5,85	3,86	3,50	2,58	1,87	1,51	3,21

*elementos com valores percentuais menores que 1,5%: Ba, Cl, Cr, Cu, Se, Sn, Sr, Ti, K, Mn, Ni, P, Zn, Mo, Co, Zr, Br, As, In

Fonte: elaborado a partir das análises de Tamarana Tecnologia Ambiental (2020)

Os resultados representam os valores médios daqueles obtidos para 20 amostras do lote de escória doado. Todas as amostras apresentaram os mesmos elementos químicos, com alguma variação percentual da quantidade, em função da parte do lote em que a amostra foi coletada. Como pode ser observado, a escória de chumbo é predominantemente composta por ferro (Fe) e o teor de chumbo é bastante reduzido, resultado do processo de reciclagem das baterias chumbo-ácido.

O ferro, em particular, é um metal maleável, tenaz e de propriedades ferromagnéticas, mas susceptível ao processo de oxidação, o que pode gerar fissuras e formação de poros no concreto, devido ao efeito expansivo do processo. Quanto ao chumbo, é um material denso, resistente à corrosão, mas que quando exposto em sua forma pura pode ser tóxico à saúde. Se presente no traço de concreto, mas de forma que não sofra processo de lixiviação, a mistura pode vir a ser utilizada.

O ensaio granulométrico da escória possibilitou a definição do agregado a ser substituído no traço de concreto. Os resultados da análise granulométrica encontram-se na Tabela 3 e indicaram a substituição do agregado miúdo pela escória, na composição dos traços 3 e 4, conforme discussão abaixo.

Tabela 3 - Resultados do Ensaio de Granulometria da Escória de Chumbo

Nº	Peneira (Mesh)	Abertura (mm)	Massa retida (g)	Massa retida acumulada (g)
1	4	4,750	3,085	2,980
2	8	2,360	86,920	89,900
3	16	1,180	228,220	318,120
4	30	0,600	113,675	431,795
5	50	0,300	30,595	462,390
6	100	0,150	14,575	476,965
7	Fundo	---	38,395	515,360

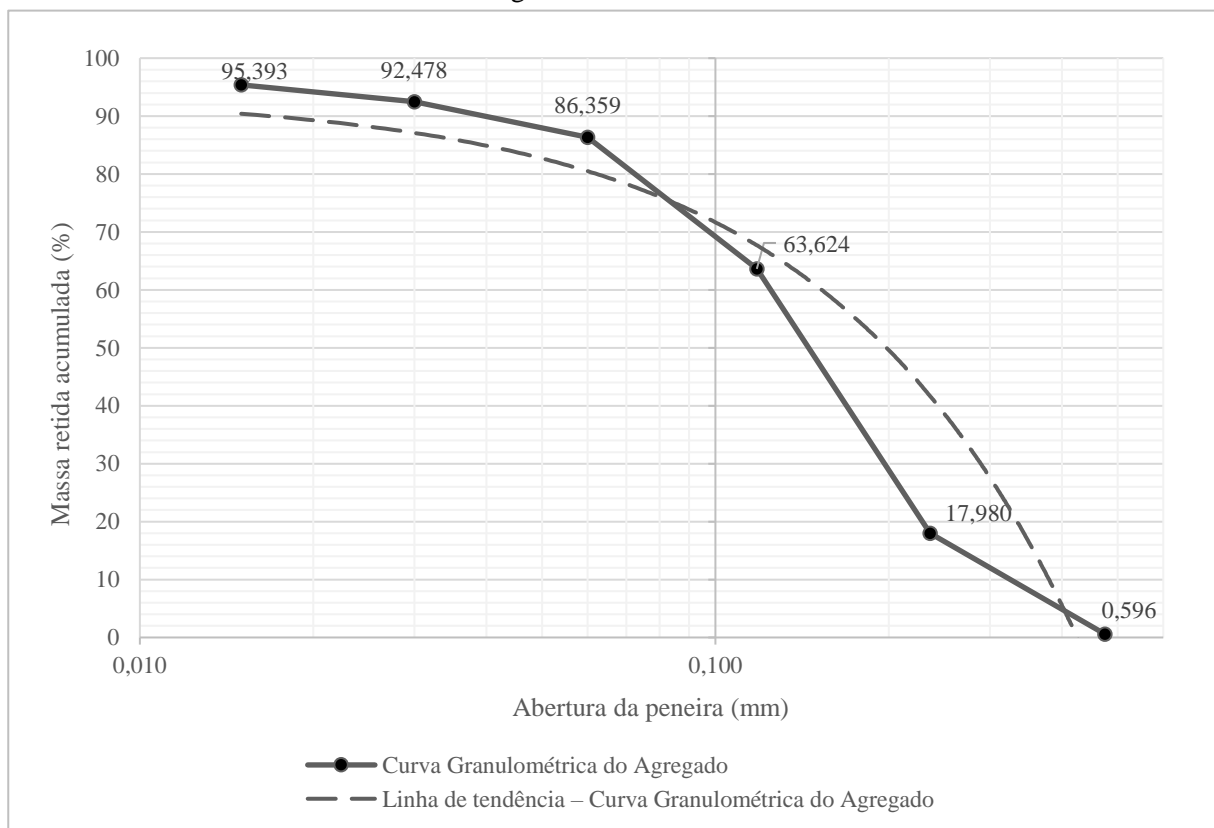
Fonte: Os autores (2021)

A massa de escória depositada nas peneiras foi de 500g, sendo possível observar, pelos

resultados da massa retida apresentada na tabela, que houve um pequeno aumento de massa. Esse aumento pode ser explicado pelo possível acúmulo de sedimentos de outros experimentos no conjunto das peneiras em partes de difícil acesso para limpeza. Vale ressaltar, no entanto, que o aumento é pouco significativo.

Com o objetivo de se avaliar, de forma mais precisa, a distribuição das partículas constituintes da escória em classes de tamanho pelas suas dimensões e confirmar a substituição da areia pela escória nos traços de concreto, foi feito um gráfico em escala logarítmica (Gráfico 1) que relaciona a porcentagem de massa retida nas peneiras em função do diâmetro do grão.

Gráfico 1 - Análise granulométrica da escória de chumbo



Fonte: Os autores (2021)

Analisando a curva granulométrica da escória, foi possível determinar o seu Módulo de Finura (*MF*) e sua dimensão máxima característica (*DMC*), parâmetros utilizados para determinação da composição granulométrica de agregados para concreto. O *MF* corresponde a soma das porcentagens retidas acumuladas (em massa) de um agregado nas peneiras série normal, dividida por 100. A *DMC* corresponde à abertura nominal, em mm, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. A partir dos valores indicados no gráfico 1 e na Tabela 3 foram determinados $MF = 3,564$ e $DMC = 4,750$ mm.

Sabe-se que quanto mais contínua a granulometria do material, mais as partículas tendem a

ter o mesmo tamanho. Pelos resultados apresentados é possível observar que a escória não possui uma variedade grande de tamanhos de grãos, já que aproximadamente 45% ficaram retidos na peneira de abertura 1,180 mm. Assim, em função do tamanho da maioria dos grãos da escória ser da mesma ordem de grandeza dos grãos da areia média (0,2 mm a 0,6 mm), optou-se por substituir a mesma pela escória nos traços de concreto, nos teores de 30% e 50%. Tais percentuais de substituição foram embasados em trabalhos realizados com outro tipo de escória, como a de alto forno, devido à falta de pesquisas relacionadas à escória de chumbo e em seus possíveis usos.

Outro ensaio realizado foi o de consistência do concreto para os traços de 1 a 4 por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone e cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados da consistência do concreto (*slump test*)

Traço de concreto	<i>Slump</i> (± 0,1 cm)
Traço 1 (Concreto convencional)	6,5
Traço 2 (Concreto pesado)	6,0
Traço 3 (Concreto com 30% EC*)	4,5
Traço 4 (Concreto com 50% EC*)	6,5

*EC: escória de chumbo

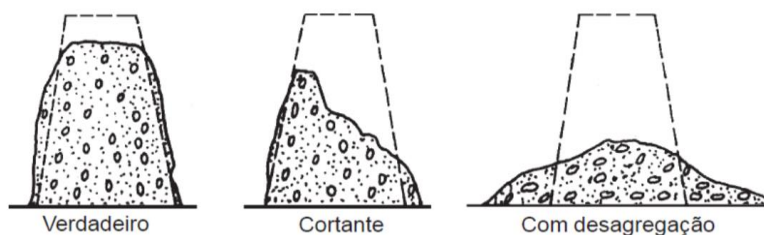
Fonte: Os autores (2021)

Tendo o ensaio de consistência do concreto o objetivo de determinar a trabalhabilidade do concreto, define-se os traços 1, 2 e 4 como mais fluidos por possuírem resultados mais altos de *slump*, detentores de uma quantidade maior de água, na comparação com o traço 3. Isso pode ter ocorrido por um possível erro na realização do abatimento do concreto para o ensaio deste traço, uma vez que o traço com 50% de EC obteve um resultado de *slump* igual ao do concreto convencional.

A norma ABNT NBR 8953 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) classifica o concreto em função de sua massa específica, resistência à compressão e consistência. Embora o valor do *slump* dependa da aplicação do concreto, os resultados obtidos para todos os traços estão bem acima do valor mínimo (10 mm) de classificação definido na respectiva norma. Com base na tabela de consistências oferecida pela mesma, os traços 1, 2 e 4 são classificados para aplicação em alguns tipos de pavimentos e elementos de fundação (classe S50). Já o traço 3, pode ser definido como concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado (classe S10).

Conforme as três formas de abatimento definidas como verdadeiro, cortante e com degradação (Figura 1), é possível observar que todos os concretos estudados tiveram um abate uniforme, ou seja, verdadeiro, de acordo com o guia de engenharia atualizado em junho de 2020.

Figura 1 - Tipos de abatimento de concreto



Fonte: Guia da Engenharia (2020)

De acordo com Araújo *et al.* (2016), o tipo de CP produzido, bem como as suas respectivas dimensões, podem influenciar diretamente nas resistências finais. Dessa forma, após moldagem, cura e retificação dos CPs, foram medidas as alturas médias e calculados seus volumes e as respectivas relações altura/diâmetro, com os resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Dimensões e volumes médios dos corpos de prova

Traço de Concreto	Altura média ($\pm 0,005$ cm)	Volume médio (± 2 cm ³)	h/d (adimensional)
Traço 1 (Concreto convencional)	19,570	1 537	1,957
Traço 2 (Concreto pesado)	19,580	1 538	1,958
Traço 3 (Concreto com 30% EC*)	19,620	1 541	1,962
Traço 4 (Concreto com 50% EC*)	19,600	1 539	1,960

Obs: Todos os CPs possuem diâmetro = 10,00 cm e área da base = 78,54 cm²

*EC: escória de chumbo

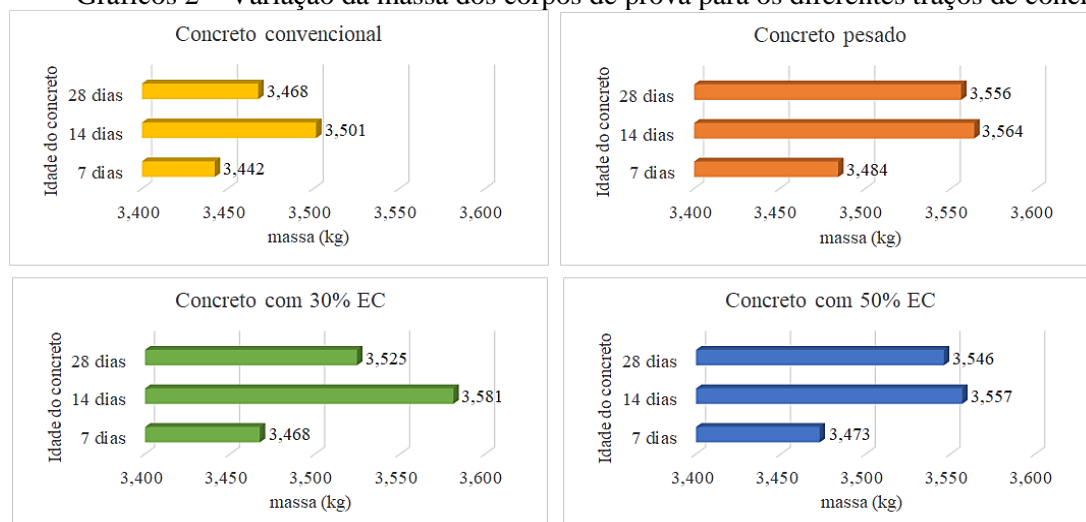
Fonte: Os autores (2021)

Como todo ensaio, alguns defeitos podem aparecer ocasionados por alguma variação ou erro na moldagem e/ou outros processos que antecedem o ensaio de ruptura. Um exemplo é a retificação dos CPs, que pode vir a provocar alteração das suas dimensões e, conseqüentemente, no volume. Segundo a norma ABNT NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016), é ideal que os moldes dos CPs cilíndricos possuam altura igual ao dobro do seu diâmetro, considerando um erro de 1% para medidas diametrais e 2% para medidas de altura. Como é possível observar na Tabela 5, todos os valores seguem os padrões estabelecidos por norma.

A relação h/d, de acordo com a norma ABNT NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), deve ser maior do que 1,94, caso contrário, é necessário efetuar uma correção no cálculo da resistência média à compressão dos corpos de prova. Observando os respectivos valores na Tabela 5, é possível verificar que todos foram superiores ao valor 1,94, como especificado na norma.

Outro parâmetro importante relacionado aos CPs são suas respectivas massas de acordo com o seu tempo de cura (7, 14 ou 28 dias). Com base nos resultados apresentados a seguir no Gráficos 2, é possível verificar que para todos os traços houve um aumento de massa gradual, como esperado na moldagem, diretamente relacionado ao aumento das suas massas específicas em função da alteração dos seus agregados.

Gráficos 2 – Variação da massa dos corpos de prova para os diferentes traços de concreto



Fonte: Os autores (2021)

A massa unitária dos agregados presentes na mistura também pode impactar os valores de resistência do concreto. A Tabela 6 mostra as massas unitárias dos agregados utilizados nos traços de 1 a 4. Para os agregados naturais areia e brita, os valores mostrados na tabela foram extraídos da literatura, conforme indicado, para a dolomita a faixa de valores foi informada pelo fornecedor e, no caso da escória, a massa unitária foi determinada experimentalmente neste trabalho.

Tabela 6 - Massa unitária dos agregados

Tipo de agregado	Massa unitária (g/cm ³)
Areia média natural ¹	1,45
Escória de chumbo	3,85
Brita 1 convencional ¹	1,48
Dolomita ²	1,40 – 1,90

¹ ABNT NBR 16972 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021)

² Característica informada pelo fornecedor

Fonte: Os autores (2021)

Além disso, foi possível definir a massa específica seca do concreto endurecido na idade de 28 dias para cada traço de acordo com a norma ABNT 9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), bem como a massa específica molhada, apenas dividindo a massa dos respectivos concretos em seu estado fresco pelo seu próprio volume, determinados experimentalmente. Os resultados encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Massa específica do concreto

Traço de concreto	Massa específica seca (kg/m ³)	Massa específica molhada (kg/m ³)
Traço 1 (Concreto convencional)	2 257	2 595
Traço 2 (Concreto pesado)	2 312	2 845
Traço 3 (Concreto com 30% EC*)	2 288	2 630
Traço 4 (Concreto com 50% EC*)	2 304	2 657

*EC: escória de chumbo

Fonte: Os autores (2021)

Com os respectivos resultados, conclui-se que o traço 1 atende a massa específica padrão de acordo com o seu tipo de concreto. Já para os outros três traços, era esperado que as massas específicas no estado endurecido atingissem um valor mínimo para o concreto pesado. O traço 2, produzido com a dolomita no lugar da brita 1, e que supostamente deveria ser um concreto pesado, para fins de comparação, também não atingiu o valor mínimo de 2 800 kg/m³, apesar da respectiva massa específica ter sido maior que a do traço 1. Isso pode ser explicado pelo fato da dolomita e brita 1 utilizadas nos traços apresentarem massas unitárias da mesma ordem de grandeza, como pode ser observado na Tabela 6. Com base nos resultados da massa específica é possível afirmar também, que os concretos com 30% e 50% de escória de chumbo (traços 3 e 4) não podem ser considerados como um concreto pesado, e sim como um concreto convencional. Embora a massa unitária da escória de chumbo seja bem maior que a da areia (Tabela 6), o concreto produzido com a escória não atingiu a massa específica esperada para um concreto pesado.

Utilizando a quantidade dos agregados e as respectivas massas específicas do concreto, foi possível calcular o consumo de cimento em cada traço, para 1 metro cúbico de concreto, de acordo com o trabalho feito por Castro (2016). Os resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Consumo de cimento para os traços de 1 a 4

Tipo de Concreto	Consumo de cimento (kg/m³)
Traço 1 (Concreto convencional)	398,62
Traço 2 (Concreto pesado)	398,67
Traço 3 (Concreto com 30% EC*)	398,69
Traço 4 (Concreto com 50% EC*)	398,74

*EC: escória de chumbo

Fonte: Os autores (2021)

Como é possível verificar, o consumo de cimento foi alto para todos os traços de concreto produzidos. Considerando a necessidade de se buscar materiais mais sustentáveis, seria interessante se fazer um estudo de traço que tenha um menor consumo de cimento.

Para os corpos de prova de 28 dias de idade foram feitos também os ensaios de absorção de água, conforme a norma ABNT NBR 9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), e cujos resultados estão apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de absorção de água

Traço de concreto	Massa seca (± 0,01 g)	Massa úmida (± 0,01 g)	Absorção (%)
Traço 1 (Concreto convencional)	3,47	3,67	5,51
Traço 2 (Concreto pesado)	3,56	3,67	3,10
Traço 3 (Concreto com 30% EC*)	3,52	3,66	3,70
Traço 4 (Concreto com 50% EC*)	3,55	3,68	3,64

*EC: escória de chumbo

Fonte: Os autores (2021)

Com relação à absorção de água verifica-se que os concretos dos traços 2, 3 e 4 apresentaram

resultados menores do que aquele obtido para o concreto do traço 1. Para os traços 1 e 2 há diferença do agregado graúdo na composição do concreto, o que pode ter impactado na absorção, uma vez que o traço e os demais componentes da mistura foram os mesmos. Com relação aos resultados dos traços 3 e 4, a variação dos valores em relação ao traço 1 deve-se à adição da escória, que ao apresentar uma granulometria mais contínua que a areia, pode ter alterado no empacotamento dos grãos da mistura. Além disso, a escória é composta majoritariamente por metais, e apresenta uma superfície lisa, ocasionando uma menor capacidade de absorção em relação a areia que, normalmente, tende a reter uma grande quantidade de água. Nessa linha de raciocínio, a diminuição da absorção de água com o aumento do teor de escória mostra-se coerente.

Os traços 2, 3 e 4 apresentam valores de absorção abaixo do máximo de 4,2% estabelecido por Helene (1983) para um concreto ser durável.

Os resultados da resistência média à compressão do concreto para os corpos de prova nas idades de 7, 14 e 28 dias para todos os traços e medidas conforme a norma ABNT NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), estão apresentados na Tabela 10. Na tabela também estão apresentados os resultados dos cálculos do coeficiente de variação (CVe) dentro do ensaio para os corpos de prova na idade 28 dias, de acordo com a referida norma.

Tabela 10 - Resistência média à compressão

Traço de concreto	Resistência à compressão (MPa)			CVe (%)
	7 dias	14 dias	28 dias	28 dias
Traço 1 (Concreto convencional)	21,7 ± 0,4	22,9 ± 0,2	30,6 ± 1,9	6,1
Traço 2 (Concreto pesado)	21,0 ± 0,1	25,9 ± 0,3	30,3 ± 0,9	3,1
Traço 3 (Concreto com 30% EC*)	15,4 ± 0,4	19,3 ± 0,1	21,2 ± 1,2	5,9
Traço 4 (Concreto com 50% EC*)	13,0 ± 0,5	16,7 ± 0,2	17,8 ± 0,3	1,8

*EC: escória de chumbo

Fonte: Os autores (2021)

O coeficiente de variação é um índice utilizado para verificar a regularidade do concreto produzido e é calculado pela razão entre o desvio-padrão e o valor médio da resistência à compressão. Baixos valores de CVe decorrem de baixos desvios-padrões, que por sua vez, indicam regularidade na produção do produto. Na tabela 10 é possível observar o desvio-padrão para as resistências médias obtidas para os corpos de prova em todas as idades e o coeficiente de variação para os CPs de 28 dias.

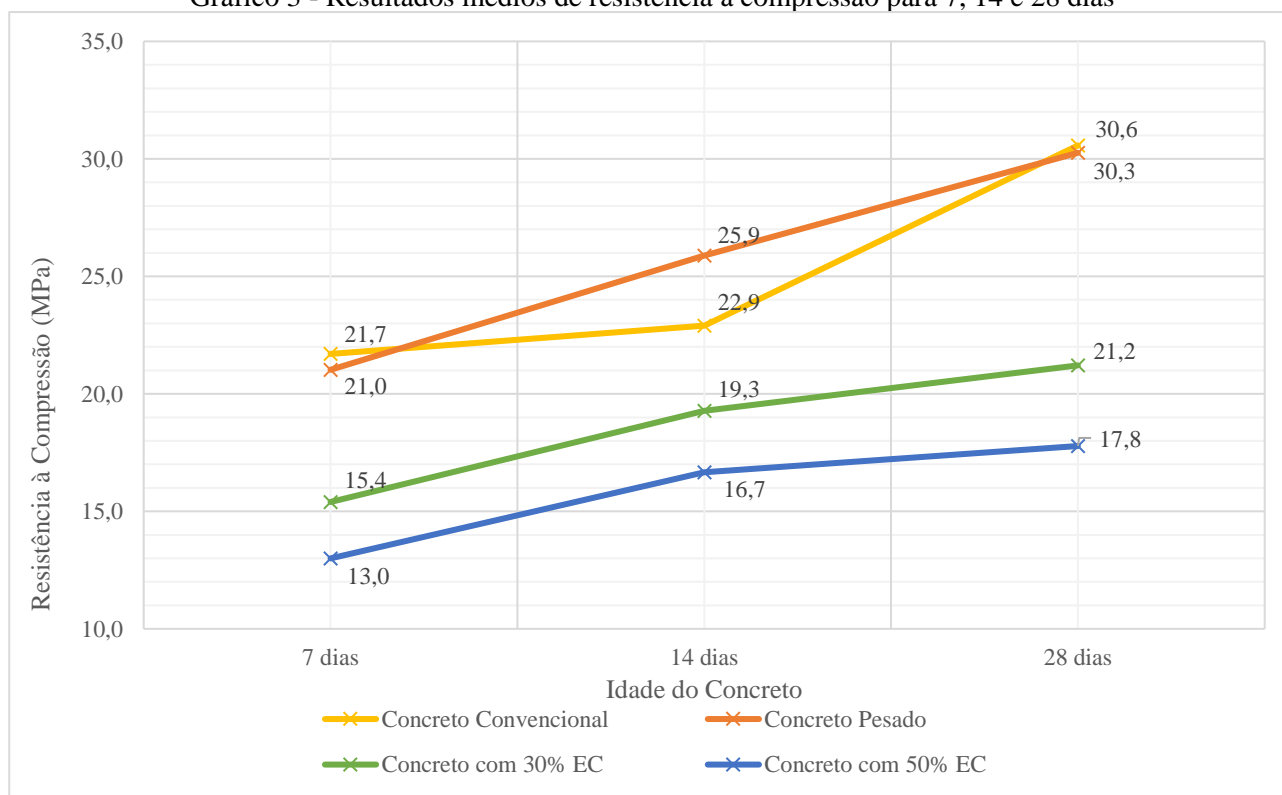
A fim de ser considerado para fins estruturais (classe de resistência do grupo I) de acordo com a norma ABNT NBR 8953 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), a resistência mínima dos corpos de prova para cada traço deveria ser de 20 MPa aos 28 dias. Como pode ser observado, para os traços 1 e 2 os valores obtidos foram superiores a esse valor, mesmo dentro das faixas definidas pelas incertezas. Para o traço 3, o valor de resistência à compressão mostrou-se ligeiramente superior ao mínimo para uso estrutural, de acordo com a norma, porém o desvio padrão é elevado, não assegurando a aplicação desse concreto para esse fim, assim como para

o concreto do traço 4. Uma possível explicação poderia estar relacionada com as propriedades físicas da escória e/ou por falhas na mistura do concreto, uma vez que a mistura não foi executada em betoneira, e na moldagem dos corpos de prova.

Assim, por não atenderem as resistências mínimas, é possível concluir que os concretos dos traços 3 e 4, para os quais esperava-se resistência superior às obtidas para os traços 1 e 2, não podem ser caracterizados como concreto pesado.

Vale ressaltar que o concreto denominado previamente como pesado (traço 2) mostrou aos 7 dias, de forma inesperada, resistência menor do que a do concreto convencional, no entanto, assim como para todos os traços, a resistência aumentou nas idades superiores. O comportamento das resistências para todos os traços pode ser mais bem visualizado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Resultados médios de resistência à compressão para 7, 14 e 28 dias



Fonte: Os autores (2021)

Para os CPs de concreto convencional (traço 1), bem como o de concreto supostamente pesado (traço 2), os agregados permaneceram mais coesos, diferentemente dos concretos com adição de escória de chumbo, que apresentaram característica pulverulenta, por possível dificuldade de homogeneização da mistura. Foi observado também que com o aumento do teor da EC, o material tornou-se mais frágil. Mais especificamente falando, os CPs com 50% de escória aparentaram ser menos coesos do que os CPs de 30%, o que implica dizer que eles apresentaram uma quantidade maior de poros. Isso permite que o concreto tenha uma propensão maior de absorver água, possivelmente afetando sua resistência.

A Fotografia 3 mostra os CPs de idade 28 dias após rompimento no ensaio de resistência à compressão.

Fotografia 3 - CPs dos traços 3 e 4 após rompimento aos 28 dias



Fonte: Os autores (2021)

Sabe-se que a porosidade do material e sua resistência à compressão estão relacionadas com a absorção de água do material no estado endurecido. Segundo pesquisa realizada por Medeiros-Junior *et al.* (2019), a absorção de água e resistência à compressão do concreto com diferentes teores de substituição de algum componente da composição por material reciclado, como pozalanas, por exemplo, são inversamente proporcionais. O que na prática significa que, quanto menor a percentagem de absorção de água, maior tende ser sua resistência.

No estudo em questão, no entanto, isso não se verificou, uma vez que as taxas de absorção de água para os CPs de 30% e 50% apresentaram valores menores do que para o traço de controle, e resistências médias à compressão também menores, como é possível verificar pelos resultados apresentados nas Tabelas 9 e 10, respectivamente.

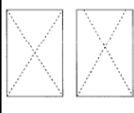
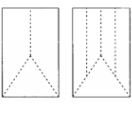



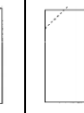

A escória de chumbo faz com que o concreto absorva menos água, por conta de sua composição metálica e de sua superfície sólida lisa, o que também dificulta sua adesão aos demais componentes da mistura de concreto, além da possibilidade de piorar o empacotamento dos grãos, provocando maior porosidade e, conseqüentemente, fragilidade ao concreto no seu estado endurecido. Para o traço de controle, que não possui a escória como agregado miúdo, a areia (elemento que foi substituído pela escória) possui uma superfície mais porosa e que tende a reter mais umidade, aumentando a absorção de água, mas com melhor aderência aos componentes da mistura, provocando uma maior resistência à compressão. A diferença obtida para a absorção de água entre o traço de controle (traço 1- concreto convencional) e o traço 2 está relacionada à mudança do agregado graúdo na composição. Com relação à resistência, nestes casos, observou-se como esperado, que a resistência aumentou ao mesmo tempo em que a absorção de água diminuiu.

Diante dos resultados aqui apresentados, conclui-se que a escória de chumbo da forma e nos teores utilizados neste trabalho, não se apresentou como uma boa alternativa de agregado reciclado

para concretos estruturais e que necessitam de alta resistência.

As formas de ruptura obtida por corpos de prova cilíndricos (Figura 2), podem estar relacionadas a defeitos na hora da moldagem ou escolha da relação água/cimento, conforme a norma ABNT NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), e que poderiam comprometer a resistência do material do corpo de prova.

Figura 2 - Formas de ruptura para corpos de prova cilíndricos.

A	B	C	D	E	F	G
						
Cônica e cônica afastada 25mm do capeamento	Cônica e bipartida e cônica com mais de uma partição	Colunar com formação de cones	Cônica e cisalhada	Cisalhada	Fraturas no topo e ou na base, abaixo do capeamento	Fraturas próximas ao topo ou na base

Fonte: Aragão (2016)

Avaliando os corpos de prova rompidos neste trabalho em todas as idades, foi possível observar que houve ruptura de forma cisalhada, conforme pode ser visualizado na Fotografia 3, para os corpos de prova na idade de 28 dias.

A ruptura cisalhada é um dos tipos de ruptura mais confiáveis. O cisalhamento ocorre sempre em planos inclinados em relação a direção da força aplicada, por isso a linha de fratura atravessa a diagonal do CP. Esse tipo de ruptura pode ser considerado normal e aceitável, o que minimiza problemas de moldagem. Ainda, de acordo com a norma ABNT NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), se todos os CPs se romperam de forma cônica/cisalhada, isso indica que foram retificados corretamente, descartando também erros de medidas das resistências devido à problemas de geometria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento físico e mecânico de traços de concreto com a substituição de parte da areia por escória de chumbo, a fim de verificar sua viabilidade de uso como concreto pesado. Assim, foram analisadas as características físicas e químicas da escória e a resistência à compressão e a absorção de água de corpos de prova de concreto de formato cilíndrico, com e sem a adição da escória.

Foram definidos quatro traços de concreto diferentes, sendo eles: concreto convencional, concreto supostamente pesado, concreto com a substituição de 30% da areia pela escória de chumbo e concreto com a substituição de 50% de areia pela escória de chumbo.

Quanto à caracterização da escória de chumbo, observou-se que sua composição é

majoritariamente composta por ferro, com pequeno teor de Pb, e que sua massa unitária é superior à dos agregados naturais (areia e brita 1), o que contribuiu para um aumento na massa específica do concreto, em relação ao traço convencional, mas não o suficiente para caracterizar o concreto produzido com a escória como concreto pesado.

Os resultados de resistência à compressão apresentados, também mostraram que o concreto com a escória não atingiu a resistência exigida para o concreto pesado, mas foi possível observar um melhor desempenho no concreto com a substituição de 30% da areia por escória de chumbo, comparado ao com a substituição de 50% da areia pela EC. Observa-se que o excesso de partículas finas de superfície lisa, especialmente para o teor de substituição de 50%, foi prejudicial a resistência do concreto.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão não indicam o uso da escória de chumbo como agregado reciclado para a produção de concreto pesado, mas os resultados mostram que este concreto poderia ser utilizado para fins não estruturais ou em aplicações onde resistências menores sejam requeridas, como calçadas e fabricação de blocos de concreto Classe B (resistência requerida de 4 a 8 MPa) e Classe C (resistência requerida de 3 a 4 MPa), por exemplo.

É possível que o uso da escória na substituição dos agregados graúdos mostrasse resultados melhores.

De qualquer forma, para a validação do uso da EC em concreto é fundamental a realização de ensaios de lixiviação e solubilização para verificar se o chumbo presente na escória, mesmo em pequena quantidade, não seria transportado por meio líquido para a superfície do concreto, podendo provocar contaminações.

Assim, para melhorar o entendimento do comportamento do concreto produzido com a escória de chumbo recomenda-se para trabalhos futuros:

- a) realizar ensaio de lixiviação e solubilização no concreto produzido com a escória;
- b) fazer um estudo de traço com menor consumo de cimento para a incorporação da escória;
- c) substituir parte do agregado graúdo por escória de chumbo no traço de concreto para a realização dos ensaios físicos e mecânicos.

Recomenda-se, também, avaliar se o concreto produzido com a escória de chumbo apresenta melhor opacidade à radiação eletromagnética que o concreto convencional, o que apontaria para outra aplicação deste tipo de concreto, ainda que não estrutural, caso suas características físicas e mecânicas sejam satisfatórias.

REFERÊNCIAS

ARAGÃO, Moniz de. **Materiais de construção II - Tecnologia da Argamassa e do Concreto**. Disponível em: <http://www.ime.eb.br/~moniz/matconst2/conc11.pdf>. Acesso: 6 junho 2021.

ARAÚJO, Suélio da Silva; GUIMARÃES, Gilson Natal; GEYER, André Luiz Bortolacci. **Influência do tipo de concreto, da dimensão do corpo de prova e do tipo de**. 2016. 22 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, pelos grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

BRASIL. Decreto-lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Lex**: coletânea de legislação: edição federal, São Paulo, v. 7, 1943. Suplemento. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Brasil avança na reciclagem de baterias de chumbo ácido**. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/brasil-avanca-na-reciclagem-de-baterias-de-chumbo-acido>. Acesso em: 28 maio 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lixão Zero**. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero>. Acesso em: 20 julho 2021.

CASTRO, Moema. **Dosagem Experimental do Concreto - Método ABCP/ACI**. 2016. Instituto de Ciências Exatas e de Tecnologias e Materiais de Construção - Universidade Paulista (UNIP), São Paulo, 2016.

CIMENTO MAUÁ. **Empresa de Fabricação de cimento**. Disponível em: <https://cimentomaua.com.br/o-que-e-concreto-pesado-veja-suas-caracteristicas-e-aplicacoes/>.

FRANCK, Regina Rafaela; ZAMPIERI, Lucas Quiocca; NIENOV, Fabiano Alexandre; LUVIZÃO, Gislaine. **Utilização do Resíduo de Alto Forno (Escória de Chumbo) Em melhoramento de Misturas de Solo-Cimento-Resíduo**. Joaçaba: Unoesc & Ciência - Acet, 2019.

GOMES, Gabriel Meneghetti Faé. **Redução do Impacto Ambiental da Escória de Obtenção de Chumbo por Via Secundária**. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

HELENE, P. R. L., “**La Agressividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón**”, Hormigón, AATH. n. 10, pp. 25-35, ago. 1983.

KREUSCH, Marcio Alexandre. **Avaliação com Propostas de Melhoria do Processo Industrial de Reciclagem do Chumbo e Indicação de Aplicabilidade para a Escória Gerada**. 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo Alves de; MUNHOZ, Guilherme da Silva; MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de. **Correlações entre absorção de água, resistividade elétrica e resistência à compressão de concreto com diferentes teores de pozolana**. Revista ALCONPAT, v. 9, n. 2, p. 152 - 166, 30 abr. 2019. Disponível em: <https://revistaalconpat.org/index.php/RA/article/view/335>.

SILVA, Cynthia Thamires da. **Baterias de chumbo ácido**. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/baterias-de-chumbo-acido/>. Acesso em: 12 nov. 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a empresa Tamarana Tecnologia Ambiental pelo fornecimento da escória de chumbo, em especial a Betânia de Oliveira Santin e ao Carlos Eduardo de Campos.

Aos técnicos dos laboratórios da Universidade Presbiteriana Mackenzie, em especial ao Renato Gluber Candido Prates e José Adão Alves.

Ao Wanderson Junior da Costa, que auxiliou nos procedimentos de dosagem do concreto e moldagem dos CPs.