



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
Câmpus Apucarana e Londrina



DAVI GRAIZE TRINDADE

**FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR ESCÓRIA DE FORNOS DE
FUNDIÇÃO DE CHUMBO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

APUCARANA – PARANÁ

2020

DAVI GRAIZE TRINDADE

**FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR ESCÓRIA DE FORNOS DE
FUNDIÇÃO DE CHUMBO**

**PRODUCTION OF CONCRETE BLOCKS WITH PARTIAL
REPLACEMENT OF SAND BY LEAD SLAG**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de concentração: Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Murilo Pereira Moisés

APUCARANA – PARANÁ

2020



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Londrina



DAVI GRAIZE TRINDADE

FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR ESCÓRIA DE FORNOS DE FUNDIÇÃO DE CHUMBO

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 27 de Novembro de 2020

Prof Murilo Pereira Moises, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Juliana Guerra Sgorlon, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Silvia Luciana Favaro Rosa, Doutorado - Universidade Estadual de Maringá (Uem)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 01/12/2020.

AGRADECIMENTO

Toda honra e glória seja dada a Deus! A Ele dedico minha vida e meus agradecimentos, pois tem sido bondoso e misericordioso me dando essa vitória, saúde, uma família muito abençoada e força pra superar os obstáculos.

Agradeço meus pais Almir e Zeina primeiramente pelo amor, pelas constantes orações, paciência e apoio desde meu primeiro dia de vida. Se não fosse o exemplo, educação e carinho não estaria aqui agora. Vocês são os melhores pais do mundo!

Ao meu eterno melhor amigo e irmão Daniel, pelos muitos anos de amizade, companheirismo, conselho e paciência. Com quem dividi muitas aventuras e experiências, e muitas ainda por vir...

À minha amada esposa Virginia por ser a escolhida de Deus para estar sempre ao meu lado fazendo meus dias melhores e me apoiando em todos ideais, você me faz feliz.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador Prof. Dr. Murilo Moisés por ter acreditado no potencial da pesquisa e apostado em mim. Deus escolhe perfeitamente as pessoas que coloca em minha vida e dou graças por ter te conhecido.

Obrigado à laboratorista Ana Maria pelo tempo, disponibilidade e ideias para a pesquisa.

Um obrigado especial para o Alexandre Amado e a empresa Blocos e Cia de Apucarana, pela disponibilidade em ajudar a desenvolver a tecnologia e trazê-la para o mercado.

Não poderia deixar de agradecer também o Prof. Dr. Alessandro Bail pelo fomento à participação das empresas nas pesquisas acadêmicas.

À toda equipe da UTFPR por disponibilizar os laboratórios, e que por serem excelentes profissionais, conseguem gerir com êxito toda a estrutura da universidade propiciando este ambiente agradável para pesquisa.

RESUMO

Tecnologias limpas a custo competitivo têm feito que empresas revejam suas políticas priorizando essas soluções. Este trabalho tem por objetivo explorar alternativas para reaproveitamento de resíduos de indústrias de fundição de chumbo, para aplicação na produção de blocos de concreto, como uma alternativa sustentável para reaproveitamento deste tipo de resíduo. Os compostos existentes nestes materiais fazem com que seja possível utilizar este resíduo industrial na fabricação de blocos de concreto como matéria-prima tecnológica opcional para compor parcialmente a composição de agregados. Este trabalho apresenta uma saída economicamente viável e ambientalmente segura para este resíduo, que atualmente tem sido armazenado pelas indústrias para posterior descarte em aterros, devido ao alto custo de tratamento e por falta de tecnologias alternativas para reciclagem. A solução proposta incorporou a escória de fornos de fundição de empresas recicladoras de chumbo, resíduo proveniente da reciclagem do chumbo de baterias de automóveis. Pesquisas indicam que a escória de chumbo é composta primariamente por ferro, ocasionando melhorias físicas e químicas em blocos de concretos, além de propiciar ganhos econômicos ao setor de reciclagem de chumbo e companhias de produção de blocos pré-moldados. Através do reaproveitamento da escória de fornos de fundição é possível reduzir a emissão de poluição, ganhando o meio ambiente com práticas produtivas mais limpas e as indústrias com modelos de negócios mais sustentáveis. Os resultados mostraram que as misturas em blocos com 20% de escória, tem resistência a compressão simples superior ao bloco convencional, afirmando-se como método tecnicamente viável. Os resultados das análises físico-químicas permitiram avaliar como seguro o uso deste resíduo em misturas cimentícias.

Palavras-chave: Escória de fornos de fundição de chumbo, Blocos pré-moldados, Reaproveitamento de resíduos industriais.

ABSTRACT

Clean technologies at a competitive cost have caused companies to review their policies prioritizing these solutions. This work aims to explore alternatives for reuse of waste from lead smelting industries, composed of high iron content and its granulometry makes it used to increase the strength of concrete blocks and create a sustainable alternative for final disposal environmentally of this type of waste. The existing compounds in these materials make it possible to use this industrial residue in the manufacture of concrete blocks as an optional technological raw material to partially compose the composition of aggregates. This work seeks an economically viable and environmentally safe outlet for this waste, which currently has been stored by industries for later disposal in landfills, due to the high cost of treatment and the lack of alternative technologies for recycling. The proposed solution intends to incorporate the slag from smelting furnaces of lead recycling companies, residue from the recycling of lead from car batteries. Research indicates that lead slag is composed primarily of iron, leading to physical and chemical improvements in concrete blocks, in addition to providing economic gains to the lead recycling sector and precast block production companies. Through the reuse of slag from foundry furnaces it is possible to reduce the emission of pollution, gaining the environment with cleaner practices and industries with more sustainable business models. Up to the present moment, the results have shown that block mixtures with 20% slag, have resistance to simple compression superior to the conventional block, asserting itself as a technically viable method. The results of the physical chemical analyze allowed to evaluate how safe the use of this residue in cement mixtures.

Keywords: Slag from lead smelting furnaces, precast blocks, reuse of industrial waste.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celsius
μm	Micrômetro
A/C	Relação Água/Cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al₂O₃	Óxido de Alumínio
ARI	Alta Resistencia Inicial
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATG	Análise Termogravimétrica
BFFS	Escória de Ferro Níquel de Alto-forno
BFS	Escória de Alto-forno alcalino
CaO	Óxido de Cálcio
Cl	Cloro
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
Cm	Centímetros
CP	Cimento Portland
Fe₂O₃	Óxido de Ferro
FRX	Fluorescência de raios X
g	Gramas
GGBS	Escória Granulada de Alto-forno
h	Hora
Kg	Quilograma
kN	Kilonewton
K₂O	Óxido de Potássio
L	Litro
LS	Escória de Concha
m	Metro
MCS	Materiais Cimentícios Suplementares
MEV	Microscopia eletrônica de varreduta
MgO	Óxido de magnésio

MIN	Mínimo
mm	Milímetro
Mn₂O₃	Óxido de Manganês
Mpa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul
NO	Óxido Nitroso
PPGEA	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
PR	Paraná
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SiO₂	Óxido de Silício
SO₃	O'xido Sulfúrico
ton	Tonelada
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE FIGURAS E GRÁFICOS

Figura 1. Armazenamento da escória alcalina	27
Figura 2. Aspecto da escória em pó	28
Figura 3. Blocos produzidos com escória de fornos de chumbo.....	39
Figura 4. Curva granulométrica do agregado miúdo.....	42
Figura 5. Distribuição granulométrica da escória	44
Figura 6. Resultado dos testes de resistência à compressão.....	47

LISTA DE TABELAS / QUADROS

Tabela 1. Composição do cimento Portland CPV-ARI.....	29
Tabela 2. Características do cimento CPV_ARI	29
Tabela 3. Classificação do agregado de acordo com as frações granulométricas ...	30
Tabela 4. Combinações de traços utilizados nas misturas	36
Tabela 5. Caracterização do agregado miúdo.....	42
Tabela 6. Características da escória.....	43
Tabela 7. Classificação granulométrica da escória segundo NBR 6502:1995.....	44
Tabela 8. Resultados do FRX, AAS e ICP	45
Tabela 9. Resultados dos ensaios de rompimento	46
Quadro 1. Resultados do extrato lixiviado e solubilizado.....	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO	16
4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	27
4.1 MATERIAIS.....	27
4.1.1 COLETA DA ESCÓRIA E CARACTERÍSTICAS DA RECICLADORA.....	27
4.1.2 CIMENTO.....	29
4.1.3 AGREGADO MIÚDO	30
4.1.4 COLETA DE ÁGUA.....	30
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	30
4.2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO AGREGADO MIÚDO.....	30
4.2.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	31
4.2.3 MASSA ESPECÍFICA	31
4.2.4 TEOR DE UMIDADE	32
4.2.5 MATÉRIA ORGÂNICA E CARBONO ORGÂNICO	32
4.2.6 PERDA AO FOGO	33
4.2.7 ANÁLISE QUÍMICA POR ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)	34
4.2.8 – ANÁLISES QUÍMICAS POR ABSORÇÃO ATÔMICA (AAS)	34
4.2.9 – ANÁLISES QUÍMICAS POR ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ATÔMICA POR PLASMA (ICP OES)	35
4.3 DEFINIÇÃO DO TRAÇO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	36
4.4 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DOS MATERIAIS UTILIZADOS	38
4.5 ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIDADE	38
4.5.1 QUANTIFICAÇÃO DA MASSA DA ESCÓRIA EM ÁGUA DESTILADA	38
4.5.2 DETERMINAÇÃO DA SOLUÇÃO DE EXTRAÇÃO PARA LIXIVIAÇÃO	40
4.5.3 PROCEDIMENTOS PARA OBTENÇÃO DO EXTRATO LIXIVIADO.....	40
4.5.4 PROCEDIMENTOS PARA OBTENÇÃO DO EXTRATO SOLUBILIZADO	41
4.5.5 ESCOLHA DOS PARÂMETROS ANALÍTICOS DO EXTRATO LIXIVIADO E SOLUBILIZADO	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 AGREGADO MIÚDO	42

5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA ESCÓRIA	43
5.2.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA.....	44
5.2.2 – ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX), ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ATÔMICA POR PLASMA (ICP OES) E ABSORCAO ATÔMICA (AAS)	45
5.2.3 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES	46
5.2.4 ANÁLISE DO EXTRATO LIXIVIADO E SOLUBILIZADO.....	48
6 CONCLUSÃO	50
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

A reciclagem de chumbo a partir de fornos de fundição é um processo que gera uma quantidade elevada de resíduos sólidos e efluentes industriais, que necessitam de tratamento antes da sua disposição final. A normativa CONAMA 430 regulamenta os parâmetros de lançamento de chumbo e outros metais, baseado em sua periculosidade (CONAMA, 2011). Os compostos causadores da degradação da qualidade do solo e água causam grande preocupação do ponto de vista ambiental devido a sua capacidade de interferir nas diferentes cadeias alimentares e propriedade nutricionais no meio (Rodrigues, 2010).

O monitoramento da qualidade das águas tem sido alvo de muitos estudos objetivando a conservação ambiental, visto seu importante papel na natureza. No Brasil, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente através da lei nº 6.938/81, nessa lei foi criado o Conselho Nacional do Meio Ambiente que é um órgão consultivo e deliberativo do sistema nacional de meio ambiente (Ministério do Meio Ambiente, 2018). Atualmente estes órgãos desenvolvem e atualizam resoluções, como a CONAMA 430 (2011), que determina a concentração máxima permitida de substâncias químicas nocivas à saúde humana ou ao meio ambiente no efluente para lançamento, tais como: metais, derivados de petróleo, organoclorados e outros.

Diversas substâncias que compõe essa lista estão presentes na escória de fornos de fundição e outros resíduos industriais, mas o principal subproduto da indústria de reciclagem de chumbo secundário, que até o momento não possui tecnologia para tratamento em funcionamento no país, é a escoria que é formada durante a etapa de fundição e refino do chumbo. Esta borra possui elevada concentração de ferro e outros metais, tendo pequeno valor econômico e grande disponibilidade, entretanto pode ser matéria-prima como fonte de ferro a partir de processos envolvendo pré-tratamento e moagem.

A grande quantidade de ferro presente na escória das recicladoras de chumbo pode ser explicada pelo fato de ser utilizada limalha de ferro como sequestrante de impurezas no processo de refino do chumbo. Devido à falta de tecnologias ambientais viáveis, estas indústrias têm que recorrer ao armazenamento e descarte da escória,

algumas vezes sem a devida cautela quanto aos sistemas de proteção ambiental, podendo acarretar a migração dos compostos presentes neste subproduto para o solo e lençol freático. A política nacional de resíduos sólidos enfatiza a necessidade de priorizar métodos de reciclagem, reaproveitamento e reuso quando disponíveis antes do descarte.

De acordo com a *American Society for Testing and Materials* ASTM C618 (2012), os materiais que geram efeito pozolana, são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que têm pouca ou nenhuma atividade cimentícia, contudo, se possuírem granulometria fina e na presença de umidade, são capazes de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentícias. Assim, na tentativa de compensar a questão da poluição, existem estudos que avaliam o emprego de resíduos industriais como fonte de componentes do cimento, substituindo parcialmente o uso do cimento virgem (MOURA, A. A., 2018).

As vantagens de realizar a substituição dos agregados miúdos por escória são diversas, como na diminuição do valor investido pelas fabricantes de artefatos de concreto para aquisição de matéria-prima ao mesmo tempo em que diminui o custo de gerenciamento de escória de chumbo, visto que atualmente são enviadas para aterros industriais, oferecendo ao mercado uma tecnologia alternativa para o gerenciamento deste tipo de resíduo, reduzindo assim os impactos ambientais causados pelo mau gerenciamento desta escória de chumbo, disponibilizando um processo de produção simples, eficaz e com viabilidade econômica para a fabricação de blocos de concreto ambientalmente amigável.

Este trabalho apresenta para a indústria recicladora de chumbo secundário uma solução para o atual problema com resíduos de processo, a fim de se ter uma alternativa viável e ambientalmente segura para o tratamento destes materiais e ao mesmo tempo produzir um material para substituir os agregados. Ênfase foi dada ao emprego de técnicas de tratamento que preserve as características naturais do produto final e que seja de baixo custo, ganhando assim as indústrias com opções para minimização dos custos para disposição final de seus resíduos, ganha a sociedade com mais empregos e modelos mais sustentáveis de negócios, e por último, mas não menos importante, o meio ambiente com soluções que visa a conservação dos recursos

naturais. Pretende-se ainda explorar a patente gerada por este projeto e posterior venda da solução de destinação para as indústrias recicladoras de chumbo.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é a fabricação de blocos de concreto com substituição parcial do agregado miúdo por escória gerada no processo de reciclagem de chumbo secundário. Ademais, alguns objetivos específicos podem ser destacados, como:

- Caracterização do resíduo por meio de análise granulométrica e conhecer sua composição química por meio das técnicas de fluorescência de raios X, espectrometria de emissão óptica com plasma e espectrometria de absorção atômica;
- Fabricação de blocos de concreto em escala real substituindo parcialmente a areia por escória de chumbo;
- Caracterização do bloco de concreto quanto a sua resistência após a incorporação do resíduo;
- Execução de ensaios de solubilidade e lixiviação conforme NBR ABNT 10.004, 10.005 e 10.006 de pedaços de blocos fabricados com resíduo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

No artigo de Marion, et. al., (2005), "*Study of the leaching behavior of paving concretes: quantification of heavy metal content in leachates issued from tank test using demineralized water*", publicado no *Journal of Cement and Concrete Research*", os autores estudaram o comportamento de lixiviação de concretos produzidos com cimento de escória de alto forno de ferro. Tal teste foi realizado de acordo com a norma NEN 7345/1995, em que blocos de concreto com 1000 cm³ foram submersos em tanques de água desmineralizada (numa proporção líquido/sólido de 1/6) e mantidos por 64 dias em condição estática na temperatura de 20° C). Em intervalos de tempos

(6h, 1, 3, 7, 14, 36 e 64 dias), o líquido lixiviado foi analisado por espectroscopia de massa por plasma acoplado indutivamente – ICP-MS, para quantificar os metais pesados como Pb, Cu, Cr, Ni, Mn e dentre outros. Com base nos resultados obtidos pelos autores nesse estudo foi possível verificar que com a utilização da escória de alto forno, a quantidade de metais lixiviada foi inferior a 1% do teor total de metais pesados do concreto, sendo muito inferior até se comparado com os parâmetros fornecidos pela *European Directive 98/83/EC* que define a qualidade da água para consumo humano. Dessa forma os autores concluíram que o material além de não poluir o meio ambiente ainda pode ser uma alternativa financeiramente viável.

Leuven, K. U. (2019) apresenta a empresa AEB Amsterdã que possui uma planta waste-to-energy (WtE) plant (produção de energia a partir de bagaço), no qual consome anualmente 1,3 milhões de toneladas métricas e acaba gerando em decorrência da combustão dos resíduos, 340.000 toneladas de cinzas. Devido à elevada quantidade de cinzas geradas, o presente estudo avaliou a utilização dessas cinzas para substituir o agregado de cascalho de concreto. Dessa forma, peças de pavimento intertravado de concreto (*pavers*), que posteriormente foram carbonatados, passaram por testes de difusão (CMA/2/II/A) e a concentração de metais pesados avaliados por ICP-OES. Os resultados obtidos no presente artigo evidenciam que a difusão de metais pesados de *pavers* carbonatados e não carbonatados não apresentaram uma elevada concentração de metais pesados, variando de 0,05 mg/m² para Cádmiio e 1,5 mg/m² para chumbo.

A dissertação de mestrado da *Escola de Engenharia de São Carlos (Cesar, 2008)* “*Desenvolvimento de blocos confeccionados com escória proveniente da reciclagem do aço*”, estudou a utilização do resíduo de ferro para a fabricação de blocos intertravados em construções civis. Sendo assim, a pesquisa apresentou que este material utilizado, que se é conhecido como escória de aciaria gerada pela empresa Belgo – Mineiro de Piracicaba, se tem um baixo custo e ainda é considerado um modelo sustentável. No experimento foram realizados testes de lixiviação, solubilidade, umidade, inflamabilidade e dentre alguns outros testes, de acordo com as normas NBR 10004, NBR 10005, NBR 10006, NBR 10007 e NBR 12988. Desta maneira, destacou-se os resultados de lixiviação e solubilidade, onde o primeiro, de acordo com a NBR 10005, não apresentou parâmetros com concentração acima do limite permitido, assim

como a de solubilidade, que de acordo com a NBR 10004/2004, também apresentou resultados adequados.

No estudo do uso da escória siderúrgica de alto forno e estéril de mineração como alternativa de revestimento primário em estradas não pavimentadas (Medeiros, 2019), é abordada a questão do reuso de resíduos industriais, escória e estéril, da siderurgia e metalurgia para a utilização na pavimentação. Neste experimento a norma utilizada foi a DNIT nº 141/2010, devido esta ser a norma de âmbito federal para o revestimento primário da pavimentação, desta maneira, o resíduo estéril argiloso foi adquirido de uma mineração em Bela Vista de Minas - MG e a escória de alto forno de uma usina siderúrgica em João Monlevade - MG. Desta forma, esta pesquisa foi dividida em três etapas, a primeira consiste em uma análise laboratorial dos dois resíduos e o quanto viável é sua utilização para o processo de revestimento primário, já a segunda etapa se confirmou a viabilidade da utilização deste material em escala teste e por fim, a terceira etapa consiste na análise comparativa qualitativa do local com o revestimento aplicado, em relação a estradas não pavimentadas com características parecidas de tráfego e revestimento natural.

No trabalho realizado por Andrade, M. B. (2011) foi estudada a *caracterização das escórias provenientes da reciclagem de baterias de chumbo-ácido* através de processo pirometalúrgico, que é a principal fonte de chumbo metálico do Brasil. Observa-se que mesmo tendo um cunho de reciclagem, este processo ainda apresenta resíduos com potencial poluidor ao meio ambiente, como a escória, que pode ser gerada pelo processo de produção. Essa escória foi classificada como um resíduo classe I, ou seja, é um resíduo perigoso, classificado pela norma NBR 10004. Desta maneira, o procedimento experimental consiste em três etapas, a primeira etapa foi feita a caracterização química da escória por meio da fluorescência de raio X, com objetivo de determinar a composição química das amostras, já na segunda etapa, a caracterização mineralógica, ou seja, a identificação das fases cristalinas da escória por meio da difração de raio X, e por fim, na terceira etapa, a avaliação de potencial de mobilização de metais pesados através do método de Tessier. Como resultado da etapa I, se obteve 7 elementos mais representativos (Fe, Si, Al, S, Zn, Pb e Ca) e corresponde a 97% da massa total da escória, já na etapa II, se obteve algumas diferenças nas escórias superior, central e inferior, desta maneira, na escória inferior e

central se obteve um pico maior da Fayalita (forma predominante do ferro), na escória superior se tem um pico maior de sulfeto de chumbo e sulfeto de ferro, por fim, na etapa III fora apresentado e constatado o risco ambiental decorrente do mal gerenciamento deste resíduo, devido a contaminação ambiental causada pelos elementos químicos supracitados.

No artigo, *“Use of ladle furnace slag containing heavy metals as a binding material in civil engineering*, publicado no jornal *Science of the Total Environment*, (XI e YU, 2020), o seguinte artigo apresenta que a escória de fornos de concha (LS, escória de concha), com produção em Cingapura, se tornou algo de cunho ambiental devido ao fato de que contém metais pesados provenientes da produção do aço, sendo assim, o uso deste material é de grande importância como material de ligação na área da engenharia civil. Desta maneira tentou-se obter a ativação da LS com NaOH, Na₂SO₄ e Na₂SiO₃ para depois misturar com escória granulada de alto-forno (GGBS), mas com proporções diferentes, sendo assim, as misturas de LS com os compostos e as de LS – GGBS foram curadas em diferentes tempos para posteriormente serem feitos testes de resistência. Sendo assim, os resultados destes testes após 28 dias demonstram que o LS – GGBS obteve uma maior resistência (15,6 Mpa) do que a mistura de LS (<2 Mpa). Outro teste também mostra que o LS – GGBS obteve um bom resultado na questão de liberação de metais pesados, ou seja, nos primeiros 14 dias se teve uma baixa liberação de Pb e após 56 dias não foi mais detectada nenhum tipo de metal pesado, indicando que pode ser usado como material de ligação na engenharia civil.

Çoruh S. (2013) realizou testes em plantas de produção de zinco localizadas em Kayseri-Turquia, que produz zinco a partir do minério primário contendo carbono de zinco. Nestes testes foram realizados ensaios de lixiviação de zinco através da investigação pelo método de regressão com variáveis dummy e o resultado dos diferentes métodos de lixiviação mostram que a adição de cinzas voláteis e escória de alto-forno reduzem o teor de metais pesados no efluente, e que o uso das cinzas voláteis gera um melhor desempenho. Além disso, o estudo aponta que com o aumento de temperatura, diminui a quantidade de zinco lixiviado, ou seja, o teste foi aplicado para se saber a quantidade de Zn, Pb e Mn liberado no extrato lixiviado de zinco.

De acordo com Wang, D. (2018), a escória de ferroníquel é um resíduo industrial que está presente na produção de liga de ferroníquel, mas a sua maior produção que

acontece na China, corresponde a 48% da produção mundial. Desta maneira, a escória de ferroníquel de alto-forno (BFFS) é um tipo de escória que contém metais pesados e apresenta uma quantidade moderada de cálcio, sendo assim, o mecanismo da reação, as propriedades de lixiviação e o comportamento dos produtos da lixiviação foram investigados. Como resultado, a principal fase cristalina dos produtos é a stratlingite e a composição química encontrada é basicamente Ca/Si 0,64-1,65 e Al/Si 0,57-1,44. A reação química do BFFS depende muito da alcalinidade e do silício, além disso, a resistência a compressão da argamassa BFFS com a ativação da álcalis é semelhante a de escória de alto-forno alcalino (BFS). E por fim, no tratamento para a ativação da álcalis pode diminuir na lixiviação a quantidade de Mn, Cr (VI) e Cr (III), convertendo os BFFS de tóxicos para não tóxicos.

As escórias estudadas por Bláhová, L., et al. (2018), escória de explosão de caldeira (BFS Basic) e escória siderúrgica (SMS Basic), foram adquiridas pela empresa ArcelorMittal, localizada na República Tcheca. O material foi moído para ser utilizado no experimento. Primeiramente, se realizou o teste de lixiviação, das escórias modelo, sendo utilizado água desmineralizada, com um tempo de 24 e 48 h, sendo assim, os últimos materiais modificados foram preparados por lixiviação com uma solução de 0,001 M de HCl por 2 h. Por conseguinte, foi realizado o teste de caracterização através da espectroscopia de fluorescência de raios X (XRF), difração de raio X (XRD), espectrometria da região do infravermelho (IR) e a medida da área específica. Como resultado dos testes, as escórias não obtiveram alterações químicas, mas somente leves alterações de cristalinidade e composição mineral.

Gomes, G., et. al. (2005), observou que as impurezas existentes na matéria-prima, adjunto com outros materiais adicionados para se ter as reações essenciais do processo, se forma uma escória proveniente dos fornos da fundição do chumbo, sendo um resíduo com grande basicidade, com uma grande quantidade de ferro presente e em quantidade menor de enxofre, sódio e chumbo. Desta maneira as fabricas possuem uma grande geração deste resíduo e conseqüentemente tem-se um alto custo com descarte, devido ao fato deste resíduo de ser poluente ao meio ambiente. Desta forma foram feitos alguns testes para se determinar todos os tipos de materiais presentes na escoria. Os testes foram realizados na seguinte ordem, primeiramente, foram caracterizadas as escórias, que são provenientes de três cargas de fornos rotativos

para se recuperar o chumbo, por conseguinte, foi feita uma simulação do processo, para ser feita uma análise das possíveis deficiências, para que com isso houvesse novas propostas para o seu uso. Por fim, como resultado, na caracterização de diferentes escórias, se observou que ainda houve uma diminuição incompleta de chumbo no forno rotativo, sendo assim, a caracterização demonstra que há possibilidade de se utilizar, sendo classificado como não perigoso, mas se algumas variações forem minimizadas.

Em um artigo publicado por Parissi, F. (2016), os autores relatam sobre a grande importância da utilização de matérias-primas e combustíveis alternativos na produção de cimento, porém apresenta a problemática quanto às substâncias perigosas, como metais pesados e cloretos, entretanto através do desenvolvimento de cimento com escória, que é um cimento que contém cerca de 65 a 70% de escória granulada de alto-forno, observou-se que este apresenta duas vantagens, a primeira é um baixo consumo de energia na sua produção e a segunda é uma alta durabilidade, isso é devido a grande impermeabilidade, quando comparado com o cimento Portland. Desta maneira, a utilização do processo de lixiviação de metais pesados do concreto pode ser reduzida se o cimento de escória for utilizado.

Marques, J. F. (2003) utilizou o material de uma empresa que recicla chumbo a partir das baterias chumbo-ácido usadas. Esta empresa guarda seus rejeitos a céu aberto com cerca de 10 m de altura. Esses rejeitos apresentam Fe e Pb metálicos, essencialmente sob a forma de S^{2-} , com teores de Zn e Cu. Desta maneira, no estudo realizado foi feito um processo simulando a lixiviação natural através do extrator tipo sohxlet com H_2O e H_2O/CO_2 , para se saber o comportamento dos íons metálicos da escória, e através deste teste foi possível identificar que o chumbo está muito mais presente que a de zinco e cobre. Também foram realizados outros testes do material, um deles foi a extração sequencial pelo método de TESSIER, este método consistiu em analisar a distribuição dos metais Pb, Zn e Cu, mas este teste não foi eficaz e com isso se utilizou um novo método chamado de RJ (extração com água), sendo assim, os testes apresentaram que a extração se mostrou superior, indicando uma coleta quantitativa das soluções intersticiais com mais agilidade e representatividade. Desta maneira, dos cátions que foram estudados o chumbo foi o que teve uma maior

concentração e devido a isto apresenta características nocivas ao homem e ao meio ambiente.

No artigo publicado por Koplík, J. et. al. (2016), os materiais ativados por álcalis (AAMs) foram estudados para se identificar a fixação e a imobilização de metais pesados, sendo assim, foram utilizados duas matérias-primas para as matrizes ativadas por álcalis, a primeira são as cinzas volantes de alta temperatura e a segunda a escória de alto forno (BFS). Foram utilizados dois metais pesados (Mn e Ni), sendo colocados em quantidades distintas, para se descobrir a influência de dosagem de metais pesados em propriedades mecânicas das matrizes e da lixiviação. O teste de lixiviação, foi medido utilizando a norma ČSN EN 12457-4, que consistia na medida como a concentração de metais pesados nos lixiviados, sendo a água desmineralizada usada como agente de lixiviação. Também foi utilizado o teste de espectrometria de emissão óptica/plasma acoplado indutivamente (ICP/OES). Os testes de lixiviação mostram que ambas as matrizes podem imobilizar o Mn e Ni nas dosagens de 0,1-2,5%, mas se forem mais altos podem causar deterioração das matrizes e aumentam a lixiviação. Foi observado que após a ativação dos álcalis, os metais pesados foram transformados em metais insolúveis.

Em 2005 Yu, Q. preparou peças de argamassa com dimensões de 40x40x160 mm, usando areia Toyoura, produzida na Yamaguchi-ken no Japão, cinzas volantes M, água pura com resistência elétrica acima de 18 MΩ, cimento Portland comum e um pH de 6,8. Desta maneira, se buscou explorar o efeito de proporção de mistura, do pH de iodo, da carbonização e dentre outros, para a lixiviação de metais pesados e Cr (VI) nas argamassas de cimento com cinzas volantes e cinzas volantes solidificadas com cimento. Logo após foram feitos testes de lixiviação e metais pesados com diferentes técnicas, a primeira é o teste de lixiviação de tanque, sendo colocado três prismas de 40x40x160 mm por 28 dias, após este tempo o lixiviado foi removido e substituído a cada 3 dias nos primeiros 21 dias, a cada 7 dias no próximos 14 dias e depois a cada 14 dias, posteriormente, a cada 100 dias, o lixiviado era renovado a cada 28 dias. O segundo teste é o de extração de agitado, que consiste nas amostras de argamassa de cimento trituradas e utilizadas cinzas volantes solidificadas com o tamanho anterior. O terceiro teste foi a análise de metais pesados em lixiviado, sendo assim, os lixiviados anteriores foram filtrados para se remover partículas maiores utilizando um filtro de 45

µm. Por fim, como resultado, de acordo com as normas chinesas e japonesas, as concentrações de Zn, Cu, Mn e Cd ficaram abaixo do limite de concentração para água.

Oravec, J. (2016) analisou amostras de concreto que contém mistura de escória de alto forno, como maneira de substituir o cimento Portland com proporções de 65%, 75%, 85% e 95%, e também uma amostra modelo contendo somente cimento Portland. O teste de disponibilidade foi utilizado para se analisar a lixiviação máxima de Cr, com as amostras de cimento finamente moídas. Como resultado as amostras que contiveram 65% e 75% de Cr (VI) apresentaram 4,59 e 1,70 vezes maior do que as amostras de Cr (VI) que não contém escória. Já as amostras de 85% e 95% apresentou cerca de 26% e 41% menor que as amostras que não contém escória. Por fim foi possível observar que quanto maior o teor de aditivo a base de escória, menor a lixiviação de Cr (VI).

Chen, J. (2013) investigou a utilização de agregados de concreto reciclado (RCA) para serem utilizados em construções. Para que isso acontecesse foram feitos alguns testes para se verificar a presença de metais pesados, sendo assim, foram usadas sete amostras de RCA, sendo dos seguintes lugares: California, Texas, Minnesota, dentre outros. As amostras foram testadas para lixiviação características no laboratório, onde também foram usados três RCAs como curso base. Lisímetros foram colocados sob um curso base e as amostras de lixiviado foram coletadas para que pudesse se medir o pH periodicamente e também para se saber qual a liberação de metais pesados. Desta modo, de acordo com os dados obtidos foi observado que o lixiviado com alta alcalinidade apresentou um pico de pH que foi para 12,9. O MnROAD (Minnesota Road Research) apresentou um pH estável entre 6,6 a 8,0 e os testes de coluna mostram um alto lixiviado alcalino (10,8 a 12,5) de todos os materiais de RCA e nenhuma diminuição de pH durante todo o período de teste. Como o Cr, Pb, As e Se excedeu os MCLs (maximum contaminant levels), tanto no campo e em laboratório, o autor ressaltou que é importante ter atenção, pois apesar de melhoram o lixiviado, aumentou a alcalinidade do ambiente.

Um estudo publicado por Ettler e Johan. (2014), apresentam duas tecnologias metalúrgicas de produção de escória, sendo a escória primária do processo de minério de Pb e a escória secundária da reciclagem de baterias de automóveis. As amostras foram submetidas a lixiviação de 12 anos numa proporção L/S de razão 10 e com isso

os dados de lixiviação foram comparados com os resultados já atingidos anteriormente de uma lixiviação de ≤ 1 anos. Sendo assim, essas escórias foram produzidas em fornos de eixo e queimadas com minério de Pb torrado ou sucata de Pb, aditivo de sucata, aditivo de calcário ou fonte de sílica. A carga foi fundida a uma temperatura de $1.300\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo essa escória derretida colocada em painéis em forma de cone e sendo resfriadas, trituradas e dispensadas em lixões. Deste modo, foram realizados testes de lixiviação, de acordo com a norma europeia EN 12457, 2002. Esses testes foram realizados com uma fração granulada mais grossa com cerca de 2-5 mm, para que seja possível se simular a reatividade de partículas maiores nos lixões. As amostras de lixiviado de escória de 12 anos foram pulverizadas e submetidas a análise de difração de raios X em pó, já os lixiviados de escória ≤ 1 anos foram submetidos a análise eletroforese capilar, emissão óptica de plasma acopladas indutivamente por espectrometria, dentre outros. Por fim, é importante ressaltar que em relação a lixiviação contendo contaminantes (Pb, Zn, Cu, As e Sb) a escória secundária apresentou bons resultados se mostrando estável a longo prazo e consequentemente podendo ser usada para construções.

Com objetivo de avaliar a viabilidade de introdução do processo estudado no mercado, é importante avaliar os processos já protegidos nos escritórios de patentes localizados ao redor do mundo. Assim, serão apresentados alguns documentos patentários que descrevem o emprego de escória gerada no processo de reciclagem de chumbo secundário na construção civil, sempre dando destaque as principais diferenças entre o processo já protegido e o presente estudo. É digno de nota que as tecnologias protegidas nos documentos citados são distintas ao processo e produto apresentados neste estudo, pois este se trata do uso de escória gerada durante o processo de reciclagem de chumbo secundário, especificamente inserindo-o no setor de fabricação de materiais de construção como blocos de concreto, em substituição do agregado miúdo, como a areia. O presente trabalho apresenta uma formulação para fabricação de blocos de concreto em que uma parte da areia é substituída por escória de chumbo secundário, sem a necessidade de adição de cal ou gesso. Assim, atribuindo vantagem econômica, ambiental e operacional ao processo.

O documento BR 10 2016 004341 7 A2 refere-se a um processo de extração de sulfato ferroso hidratado da escória ferrosa gerada no processamento pirometalúrgico de chumbo secundário. A PI 0615489-1 B1 trata de uma tecnologia o processamento de produtos químicos que contenham chumbo e zinco, tendo como objetivo a reciclagem do chumbo e zinco por meio de um processo térmico. A PI 0004475-0 A2 refere-se ao aproveitamento de químicos contendo ferro, zinco e chumbo gerados preferencialmente em pós de aciaria, usando escória alcalina.

O documento BR 10 2019 022724 9 B1 trata sobre um processo de fabricação de agregado artificial a partir de resíduos gerados em barragens de minério. Neste processo, o resíduo arenoso de minério de ferro é misturado a um aglomerante, formando um agregado artificial esferoidal capaz de substituir o agregado natural, usado na fabricação de concreto. A presente dissertação de mestrado tem objetivo geral diferente do trabalho supracitado, pois não se trata da fabricação de agregado artificial, eliminando assim a necessidade de adicionar um agente aglomerante, isso é feito com a substituição de uma parte a areia usada no concreto por escória gerada no processo de reciclagem de chumbo secundário, diminuindo o custo gerado com areia e ainda, disponibilizando ao setor produtivo uma tecnologia alternativa para o gerenciamento de resíduos sólidos contendo ferro e chumbo.

A patente CN1295177C "*Method for processing building material using lead mine waste slag*" trata da produção de materiais de construção usando escória de chumbo, sendo que é usando cal e gesso na composição do concreto.

Além disso, a CN110482973A "*Concrete based on industrial waste as raw material and preparation method thereof*" relata sobre a fabricação de concreto usando resíduo industrial, como as cinzas de carvão. O presente estudo difere da patente CN110482973A, pois trata do uso de escória gerada no processo de reciclagem de chumbo secundário como substituinte à areia no processo de fabricação de blocos de concreto, agregando valor ao resíduo sólido industrial e contribuindo com o gerenciamento eficaz escória de chumbo.

PI 0006466-1A2 apresenta um processo para aproveitamento de metais a partir de rejeitos siderúrgicos descartados, como a escória. O processo é baseado na instalação de indústrias recicladoras próximas aos depósitos de escória, sendo que o processo de recuperação dos metais do resíduo se dá a partir da fusão da escória e o

seu posterior resfriamento súbito. A PI 0805558-0A2 revela uma tecnologia para a fabricação de bloco de concreto para uso no setor de construção civil usando pó de jeans como matéria-prima principal. A PI 0203986-9 A2 trata sobre um processo para a produção de artefatos de concreto usando resíduos de borracha e pneumáticos inutilizados. Vale a pena destacar que o presente estudo difere de todas as tecnologias acima destacadas, pois se trata de um processo de fabricação de blocos de concreto usando escória de chumbo como substituinte da areia, deste modo, oferecendo ao setor de fabricação de materiais de construção uma alternativa para diminuir os custos com matéria-prima e ainda, contribuir com o controle da poluição ambiental.

Os documentos CN107056163A "*Method for preparing concrete with alumina industrial waste*", CN107129201A "Concrete containing industrial and agricultural solid waste" e KR20140123789A "Concrete block manufacturing method using the shellfish by-products, and an industrial-waste of iron works", apresentam tecnologias distintas da disposta neste invento. Embora considerem o uso de resíduos na composição do concreto, os documentos supracitados não protegem o uso de escória de chumbo como substituinte à areia, como apresentado nesta dissertação de mestrado. O uso de escória de chumbo oferece vantagens econômicas e ambientais para o setor de construção civil e para as indústrias de reciclagem de chumbo.

É importante realçar que existem outras patentes depositadas e concedidas relacionadas ao uso de escória de chumbo, entretanto, nenhuma delas contempla o uso da escória como substituinte de areia no processo de fabricação de blocos de concreto, resultado alcançado por meio do traço usado, que possibilita um processo de fabricação simples, eficiente, e com viabilidade econômica e ambiental. Isso evidencia o diferencial inovativo e a relevância deste projeto de pesquisa.

4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Coleta da escória e características da recicladora

A recicladora de chumbo fornecedora da escória do presente estudo possui produção anual de 54.000 toneladas de chumbo reciclado refinado, gerando aproximadamente 2.800 toneladas de escoria de alto-forno anualmente. As amostras de escória utilizadas no projeto foram fornecidas pela empresa e coletadas diretamente do galpão de armazenamento temporário da escória, conforme mostrado na figura 1. Não foi necessário realizar a moagem da escória uma vez que ela é alto desagregante em condições de temperatura e umidade ideal.



Figura 1: Armazenamento de escória alcalina

A escória utilizada no projeto é caracterizada como escória alcalina. Este tipo de escória é conhecido pelo seu potencial de se tornar pó se armazenada em condições adequadas de umidade. Este fator é importante uma vez que a escória ácida precisaria ser moída antes de poder ser utilizada para substituição de agregados no concreto, aumentando potencialmente os custos envolvidos na produção dos blocos.

A escoria foi coletada manualmente de uma pilha de escória antes de serem transferidas para as caçambas de destinação final. Devido à temperatura a metodologia de coleta foi amostragem composta realizada nas áreas das bordas onde era possível ter acesso a escória em baixas temperaturas. A escória é transferida para caçambas de

resíduos a cada dois dias, então estima-se que a amostra coletada para este trabalho possuía até no máximo 48 horas de exposição ao ambiente. Para o procedimento de coleta foram utilizados equipamentos de proteção individual, pois o material é perigoso e tóxico. Após coletada a escória foi acondicionada em tambores metálicos de 200 L e transportada por caminhão até a unidade da empresa Antares. Posteriormente a escória foi levada para o laboratório e submetida aos ensaios. O aspecto da escória é mostrado na figura 2.

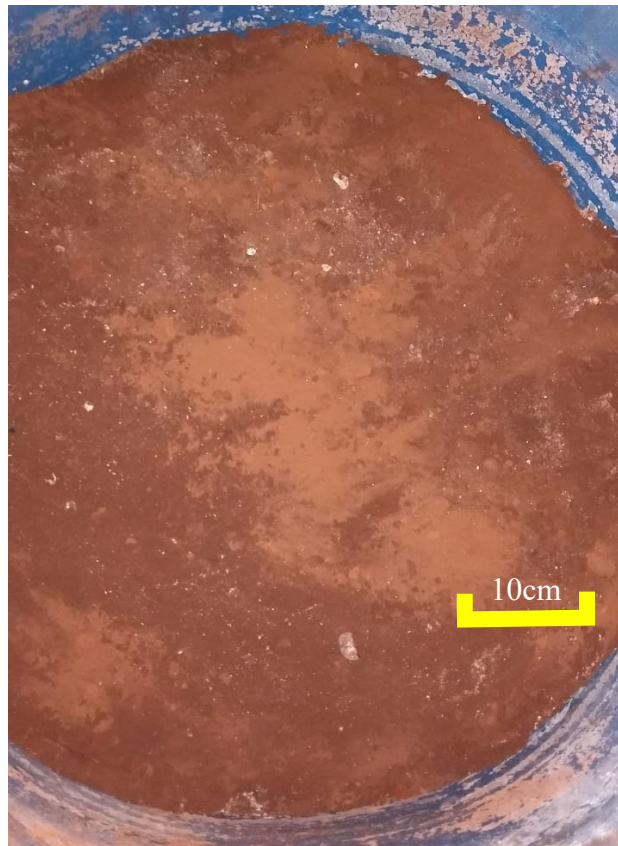


Figura 2: Aspecto da escória em pó

4.1.2 Cimento

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial, CPV-ARI da marca Cauê, sem adições, exceto o gesso, para melhor explorar os efeitos da adição de escória nas misturas cimentícias. A Tabela 1 mostra a composição do cimento utilizado.

Tabela 1 – Composição do cimento Portland CPV-ARI.

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% massa)		Norma Brasileira
Alta resistência Inicial	CPV-ARI	Clínquer + Gesso	Material Carbonático	-
		100-95	0-5	NBR 5733

Fonte: ABCP (2002)

O cimento empregado possui características específicas, diferenciando-o de outros tipos de cimento. A Tabela 2 mostra as propriedades do aglomerante. O cimento foi adquirido no varejo e armazenado em condições adequadas.

Tabela 2 – Características do cimento CPV-ARI.

Itens de controle	Unidade	Dados do Fabricante	NBR 573
Início de pega	Min	231	≥ 60
Fim de pega	Min	296	≤ 600
Resistência compressão 24 h	MPa	22	≥ 14
Resistência compressão 3 dias	MPa	36	≥ 24
Resistência compressão 7 dias	MPa	45	≥ 34
Blaine	cm ² /g	4.743	≥ 3000

Fonte: InterCement, 2017

4.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural quartzosa, comprada de um areal da região, por uma empresa fabricante de artefatos de concreto localizada em Apucarana-PR. Após a entrega da areia, a empresa armazena a mesma em baias cobertas antes de serem carregadas para os silos para a produção dos pré-moldados.

4.1.4 Coleta de água

Toda a água utilizada para a confecção dos corpos de prova nesse trabalho é proveniente da companhia de abastecimento hídrico da cidade de Apucarana-PR, SANEPAR.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.2.1 Caracterização físico-química do agregado miúdo

A areia utilizada para a confecção dos corpos de prova foi caracterizada de acordo com os ensaios descritos nas seguintes normas:

- ABNT NBR NM 45 - Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios;
- ABNT NBR NM 52 - Agregado miúdo – Determinação da massa específica e da massa específica aparente;
- ABNT NBR NM 248 - Agregados – Determinação da composição granulométrica.

A Tabela 3 apresenta a classificação do agregado.

Tabela 3 – Classificação do agregado de acordo com as frações granulométricas.

Material retido entre as peneiras	Denominação
2,4 mm e 1,2 mm	Areia Grossa
1,2 mm e 0,6 mm	Média grossa
0,6 mm e 0,3 mm	Média fina
0,3 mm e 0,15 mm	Fina

Fonte: NBR 7211:2005.

4.2.2 Caracterização do resíduo

4.2.2.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica da escória foi realizada de acordo com a ABNT NBR 7181:1988, —Solo - Análise granulométrica, por meio de sedimentação e peneiramento

4.2.2.2 Massa específica

O ensaio de massa específica da escória foi realizado conforme ABNT NBR 16605:2017, — Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Os resultados foram obtidos por meio da Equação 1.

$$p = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Onde:

M: Massa do material (g)

V: Volume deslocado pela massa do material (cm³)

Os itens utilizados para o ensaio foram: frasco volumétrico Le Chatelier, balança, funil de gargalo longo e querosene.

4.2.2.3 Teor de umidade

Para determinar o teor de umidade da escória foi utilizado a ABNT NBR NM 24:2002, — Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade, e os seguintes procedimentos foram empregados:

- Pesou-se, aproximadamente, 1 g de amostra *in natura* em um cadinho previamente tarado, em seguida, colocou-se o cadinho com a amostra na estufa à temperatura de 105 ± 5 °C por, no mínimo, 30 min. Resfriou-se à temperatura ambiente no dessecador e, ao final, pesou-se o conjunto.

O teor de umidade foi obtido pela Equação 2.

$$U = \frac{M1 - M2}{M1} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

M1: massa da amostra úmida (g) M2: massa da amostra seca (g)

Sendo que a média dos resultados variou em mais do que 0,20 %, como determinada a norma.

Para a determinação do teor de umidade utilizou-se estufa com capacidade para manter a temperatura constante em 105 ± 5 °C. O dessecador foi utilizado para o resfriamento da amostra sem absorção de umidade.

4.2.2.4 Matéria orgânica e carbono orgânico

Para a determinação do teor de matéria orgânica e carbono orgânico realiza-se o ensaio conforme a ABNT NBR 13600:1996, —Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C seguindo o procedimento:

- Transferiu-se, aproximadamente, 50 g da amostra *in natura* para um cadinho previamente tarado e, em seguida, secou-se em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C durante 24 h. Então, resfriou-se à temperatura ambiente no dessecador, tratou-se na mufla por 12 h com temperatura

controlada de 440 ± 5 °C. Após resfriamento em cadinho, pesou-se o conjunto.

O resultado do cálculo realizado conforme a Equação 3 corresponde ao teor de matéria orgânica. A determinação do teor de carbono é obtida pela Equação 4.

$$MO = 1 - \frac{B}{A} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

A: massa da amostra seca em estufa (g);

B: massa da amostra queimada em mufla (g).

$$C(\%) = \frac{MO(\%)}{1,8} \quad (4)$$

Onde:

C: carbono orgânico (%);

MO: matéria orgânica total (%).

4.2.2.5 Perda ao fogo

O ensaio de perda ao fogo foi realizado de acordo com a ABNT NM 18:2012 — Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo, importante para se conhecer a quantidade de matéria orgânica no meio, que estabelece os seguintes procedimentos, após a amostra seca:

- Transferiu-se $1 \pm 0,001$ g de amostra seca para um cadinho previamente tarado, em seguida calcinou-se em forno tipo mufla à temperatura de 950 ± 50 °C com tempo mínimo de 50 min. Resfriou-se à temperatura ambiente no dessecador e, ao final, pesou-se o conjunto.

A perda ao fogo pode ser medida por meio da Equação 5, sendo que a média não deve variar mais que 0,23 %.

(Equação 5)

$$PF = \left(\frac{M1 - M2}{M} \right) \cdot 100$$

Onde:

M1: a soma da tara do cadinho com a massa da amostra ensaiada (g);

M2: a soma da tara do cadinho com a massa da amostra após a calcinação (g);

M: massa da amostra utilizada no ensaio (g).

4.2.2.6 Análise química por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX)

Através de uma parceria de pesquisa entre a empresa Antares, especialista em reciclagem de resíduos industriais perigosos e o instituto SENAI de Ponta Grossa/PR fez-se possível à realização dos testes de FRX, absorção atômica e ICP OES.

O Laboratório SENAI utilizou três diferentes técnicas analíticas para determinação da composição química das escórias de modo que o resultado obtido seja o mais preciso possível.

Esta técnica vem sendo utilizada principalmente para amostras sólidas, permitindo a determinação simultânea ou sequencial da concentração de vários elementos, sem a necessidade de destruição da amostra, ou seja, de modo instrumental, sem nenhum pré-tratamento químico.

O Laboratório SENAI de Ponta Grossa/PR utilizou-se de espectrômetro de fluorescência de raios X Epsilon 3XLE marca PANalytical com tubo de Rh, utilizando fluxo de gás hélio, para análise química das escórias. As condições do aparelho foram regulares.

A análise foi realizada em duplicata e os resultados foram calculados sobre a média dos resultados individuais.

4.2.2.7 – Análises químicas por absorção atômica (AAS)

Espectrometria de absorção atômica, também chamada de espectrofotometria de absorção atômica, é o método de análise usado para determinar qualitativamente e

quantitativamente a presença de metais. O método consiste em determinar a presença e quantidade de um determinado metal em uma solução qualquer (embora possam ser usadas amostras sólidas), usando como princípio a absorção de radiação ultravioleta por parte dos elétrons. Os elétrons ao sofrerem um salto quântico depois de devidamente excitados por uma fonte de energia, que pode ser a chama de um gás e um comburente, como o acetileno a 3.000 graus Celsius, no caso da espectrometria de absorção atômica de chama, devolvem a energia recebida para o meio, voltando assim para a sua camada orbital de origem. Como comburente pode ser usado o ar- acetileno ou o óxido nitroso (N_2O).

A energia devolvida na forma de um fóton de luz, por sua vez, absorve a radiação ultravioleta emitida pela fonte específica (cátodo ôco) do elemento químico em questão. Dessa forma, elétrons que estão contidos na solução, e que sofrem também um salto quântico e que não pertencem ao mesmo elemento que constitui o cátodo ôco que está sendo usado no momento, não serão capazes de causar uma interferência, isso porque eles absorverão apenas radiação com comprimento de onda referente ao elemento químico do qual fazem parte.

As condições do aparelho foram regulares.

A análise foi realizada em duplicata e os resultados foram calculados sobre a média dos resultados individuais.

4.2.2.8 – Análises químicas por espectrometria de emissão atômica por plasma (ICP OES)

Dentre as técnicas de análises espectrométricas destaca-se a Espectrometria Óptica de Emissão Atômica por Plasma. Esta tecnologia permite análises simultâneas de vários elementos em poucos segundos com ótimos limites de quantificação. Permite ainda a análise de elementos semi-metálicos como o Boro e não metálicos como o Fósforo e Enxofre, aumentando a flexibilidade das análises. O ICP-OES é usado para analisar vários elementos simultaneamente e para níveis tão baixos quanto 1-10 partes por bilhão ou ppb.

O ICP funciona usando um plasma de argônio dentro do qual a amostra de líquido atomizado é injetada. A amostra ioniza no plasma e os íons emitem luzes de diferentes extensões que são, em seguida, medidas. Curvas de calibração são lineares mesmo com ampla variação de concentrações. Requer amostras líquidas para análise, necessitam de dissolução em meio ácido: à cerca de 0,5g de amostra é adicionada solução composta por 3HF:1HNO₃.

4.3 DEFINIÇÃO DO TRAÇO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Nessa etapa do estudo experimental a escória foi testada em misturas cimentícias. Uma mistura denominada referência foi produzida sem adição de escória. A partir dessa mistura, foram produzidos blocos em substituição parcial do agregado miúdo. Todos os corpos de prova foram produzidos na proporção de 1:3 em massa (1 parte de cimento e 3 de areia) com fator água cimento (A/C) de 0,52 (0,52 kg de água para cada 1 kg de cimento), seguindo a mesma proporção do traço para as demais misturas.

Vale destacar que a relação de água por corpos de prova permaneceu constante em prol da plasticidade no estado fresco. Portanto, a relação água e cimento mais substituições manteve-se constante em relação à quantidade de cimento puro e cimento com adições. Nas combinações contendo escória, o agregado foi substituído parcialmente pelo resíduo em diferentes proporções, incluindo o uso de uma referência.

A tabela abaixo representa as combinações realizadas neste estudo.

Tabela 4 – Combinações de traços utilizados nas misturas.

Traço						
Material utilizado (kg)						
Traço	Combinação	Cimento	Escória	Areia	Pó de Pedra	Pedrisco
1	Referência	31	-	136	450	185
2	Escória 10%	31	13,6	122,4	361	185
3	Escória 20%	31	27,2	108,8	361	185

A confecção dos corpos de prova foi realizada em escala real de produção em uma empresa fabricante de artefatos de concreto localizada na cidade de Apucarana-

PR, utilizando-se uma betoneira de capacidade para 771 Kg, a forma da inserção dos materiais foi mantida como a ABNT NBR 5738:2015 — Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova, recomenda. Foram confeccionados corpos de prova no formato de blocos de concreto com 2 furos nas dimensões de 14 x 19 x 39 cm para avaliar a resistência à compressão simples. Foram elaborados no total 48 corpos de prova da seguinte forma:

- 12 corpos de prova de referência, para rompimento com 16 dias;
- 12 corpos de prova com 10% de escória, para rompimento com 14 dias;
- 12 corpos de prova com 20% de escória, para rompimento com 14 dias;
- 6 corpos de prova com 10% de escória, para rompimento com 61 dias;
- 6 corpos de prova com 20% de escória, para rompimento com 61 dias.

Os tempos para rompimento foram determinados em função de atender a resistência mínima exigida aos 28 dias, entretanto como a resistência aos 14 dias já superaram o mínimo, o prazo para a segunda análise foi definido a maior. Durante este período os blocos foram armazenados de maneira adequada.

Os corpos de prova que foram confeccionados para a realização do teste de resistência à compressão simples, foram desmoldados depois de aproximadamente 24 h e colocados para cura submersos em água saturada em hidróxido de cálcio, conforme especificações da ABNT NBR 5738:2015, até o dia do rompimento.



Figura 3. Blocos de concreto com utilização de escória de fornos de chumbo

4.4 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Para realização dos testes de resistência a compressão foi contratado a empresa Tec Engenharia de Londrina/PR para realizar a ruptura diretamente dos blocos produzidos na empresa com 10 e 20% de escória, tal como a referência sem adição de escória. Antes da ruptura, os corpos de prova foram capeados com enxofre fundido de forma a garantir a planicidade e o paralelismo entre o topo e a base.

Para a realização do ensaio de compressão simples dos corpos de prova foi utilizada prensa hidráulica da marca EDUTEC modelo Hidráulica Analógica Waw-1000D, aferida em 28/02/2020, com capacidade de rompimento de até 1000 kN. A respeito da metodologia foi utilizada a ABNT NBR 7184 Determinação da Resistência à Compressão e ABNT NBR 8215 – Prisma de Blocos Vazados de Concreto Simples para Alvenaria Estrutural Preparo e Ensaio à Compressão.

4.5 ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIDADE

4.5.1 Quantificação da massa da escória em água destilada

Os testes de lixiviação e solubilidade dos blocos foram realizados a fim de garantir a segurança ambiental do projeto. Considerando a utilização de resíduos classe I na manufatura dos blocos, em um cenário onde a construção utilizando estes blocos com escória necessite ser demolida, o resíduo desta demolição não poderá causar poluição ambiental, então objetivou-se testar os blocos quanto a possibilidade de lixiviar e/ou solubilizar compostos poluentes para o meio.

Para realização do teste de lixiviação foi utilizada a norma NBR 10.005 – Procedimentos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos e comparado os resultados analíticos obtidos deste lixiviado com a NBR 10.004 – Resíduos sólidos – classificação a fim de saber se a classificação do resíduo gerados pela disposição final dos blocos.

Para a realização do teste de solubilidade foi utilizada a norma NBR 10.006 – Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de sólidos e compara os resultados obtidos com a NBR 10.004 como na etapa anterior.

Para tal procedimento foram utilizados papel filtro, Incubadora agitadora (shaker), estufa de secagem e esterilização, agitador rotativo para não voláteis e pHmetro (HANNA pH 21 pH/mV meter). Além disso, foi utilizada uma peneira com abertura de 63 mm/ μ m.

O procedimento experimental adotado para quantificar a massa de escória dissolvida em água foi realizado de acordo com a NBR 10.005. Para isso, foram pesadas amostras de 5 gramas de escória e adicionadas em 25 mL de água destilada em frasco de vidro com tampa. As amostras foram mantidas em temperatura ambiente a 25°C com agitação de 150 rpm em uma incubadora Shaker com agitação orbital e aquecimento modelo SL – 222 Solab. Após intervalos de tempos desejados (30, 60, 120 e 240) minutos, as amostras foram retiradas da incubadora shaker e filtradas em papel filtro. O sobrenadante obtido do processo de filtração foi acondicionado em frascos falcon de 50 mL para posteriormente ser avaliada a quantidade de ferro e chumbo, por absorção atômica. Já o material sólido retido no papel filtro foi levado para estufa a 60°C por 48 horas. Após a completa secagem do material sólido, as amostras foram pesadas em balança analítica. Os experimentos foram realizados em triplicatas.

Para identificar as massas dissolvidas e suas respectivas porcentagens, foram utilizadas as seguintes fórmulas:

$$M_d = M_i - M_f \quad (\text{Equação 6})$$

$$\% = \frac{M_d}{M_i} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

M_d : massa dissolvida;

M_i : massa inicial de escória;

M_f : massa final de escória desconsiderando o papel filtro;

Ao final foram realizados cálculos para se saber a média total de porcentagem de cada tempo, conforme a seguinte fórmula:

$$Média (\%) = \frac{A1 (t_n) + A2 (t_n) + A3 (t_n)}{3} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

A1 (t_n): amostra 1 com tempo n;

A2 (t_n): amostra 2 com tempo n;

A3 (t_n): amostra 3 com tempo n.

4.5.2 Determinação da solução de extração para lixiviação

O procedimento experimental adotado para especificar a quantidade de resíduos tóxicos foi realizado de acordo com a NBR 10.004 (2004) e NBR 10.005 (2004). Desta maneira, as amostras foram inicialmente passadas em uma peneira com abertura de 63 mm/ μ m para se retirar pequenos fragmentos, posteriormente, foram pesados 5 gramas do resíduo sem macerar, para se iniciar a determinação da solução de extração.

Logo após o resíduo foi transferido para um béquer de 600 mL com 96,5 mL de água destilada, cobrindo-se com o vidro relógio e colocar em agitação por 5 min à 580 rpm em agitador magnético à temperatura ambiente.

Após este período cada amostra teve seu pH medido. Ao se analisar os resultados obtidos se adicionaria alguma das duas soluções de extração, desta forma, como os três testes deram um pH>5, foi adicionado 3,5 mL de HCl 1 mol/L no mesmo béquer e cobrindo com um vidro relógio, sendo colocado novamente no agitador magnético com a mesma agitação à uma temperatura de 50 °C por 10 min. Após este processo foi novamente, medido o pH da solução e todos os três testes dando o mesmo resultado, pH<5.

4.5.3 Procedimentos para obtenção do extrato lixiviado

Posteriormente, foi iniciado o procedimento de lixiviação. Neste processo a amostra também foi passada em uma peneira de 63 mm/ μ m, mas nesta etapa foram pesados 100 gramas do resíduo, sem macerar, sendo colocado no frasco do agitador rotativo para não voláteis, juntamente com a solução de extração que neste caso foi 5,7 mL de HOAc e 64,3 mL de NaOH 1,0 mol/L em um balão de 1L e completado com água

destilada. Este procedimento se repetiu duas vezes para cada frasco do agitador rotativo, ou seja, para cada 100 gramas do resíduo, sendo necessário um volume total de 2L da solução.

Este processo foi realizado em duplicatas para os resíduos que continham 20% de escória e os de referência e 10% de escória somente um frasco cada. Após este processo todos os frascos foram vedados com fita crepe para que não ocorresse vazamentos e estes ficaram no agitador rotativo para não voláteis por 21h e 30 min em agitação constante de 30 rpm à temperatura ambiente.

Ao final do procedimento as amostras foram submetidas ao laboratório Labsam de Maringa/PR para análise de concentração de Chumbo.

4.5.4 Procedimentos para obtenção do extrato solubilizado

Os procedimentos de solubilidade foram realizados de acordo com a NBR 10.006:2004, onde inicialmente em um béquer de 250 mL, foi pesado em balança analítica cerca de 250 gramas de resíduo triturado em um macerador de porcelana, para que a amostra obtivesse um tamanho padrão (aproximadamente 1 cm). Após a maceração inicial, o material foi peneirado em peneira com abertura de 63 mm/ μ m para retirar pequenos resíduos, e posteriormente este resíduo foi colocado em um béquer de 1000 mL, com água destilada, a mistura foi agitada com um bastão de vidro, durante 5 minutos, este procedimento se repetiu em duplicatas.

Após este processo, o béquer foi coberto com filme de PVC e deixado em repouso por 7 dias à temperatura ambiente de 25 °C. Após o repouso, esta solução foi filtrada e obtendo, como especificado, um extrato solubilizado, sendo assim, se mediu-se o pH de cada frasco.

Ao final do procedimento as amostras foram transferidas para um frasco de 100 mL e enviadas ao laboratório Labsam de Maringa/PR para análise de concentração de Cloretos, Fluoretos, Sulfato, Alumínio, Arsênio, Chumbo, Ferro total, Selênio, Sódio e Cianeto total.

4.5.5 Escolha dos parâmetros analíticos do extrato lixiviado e solubilizado

Os parâmetros para análise química da lixiviação e solubilidade foram escolhidos levando em conta que a empresa cedente da escória, que realiza análise frequentes nesta escória, compartilhou o resultado analítico da escória e os parâmetros que classificam este resíduo como Classe I, logo se considerou que uma vez que os outros parâmetros estão de acordo com a NBR 10.0004 na escória *in natura*, então não haveria necessidade de se analisar novamente uma vez que os blocos foram produzidos com uma quantidade menor (10 e 20%) deste resíduo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para cada ensaio serão apresentados a seguir de forma individualizada para caracterização e propriedades dos materiais estudados.

5.1 AGREGADO MIÚDO

A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo em termos de massa específica, módulo de finura, massa unitária no estado solto e diâmetro máximo característico. A Figura 4 representa a curva de distribuição granulométrica.

Tabela 5 – Caracterização do agregado miúdo.

Características	Unidade	Valores
Massa específica	g/cm ³	2,64
Módulo de finura	-	1,81
Massa unitária no estado solto	g/cm ³	1,56
Diâmetro máximo característico	mm	1,20

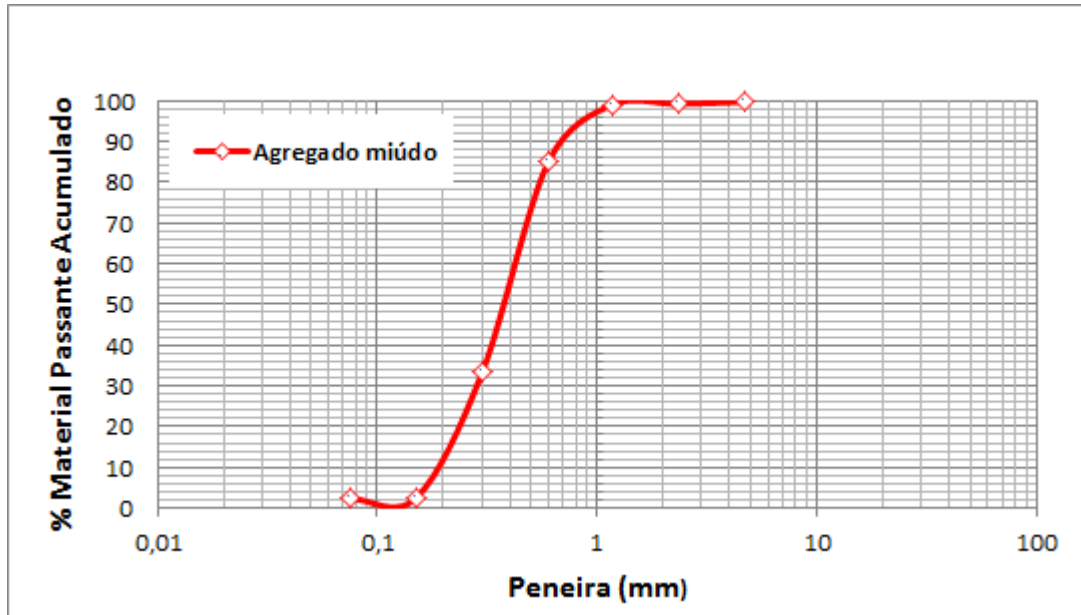


Figura 4 - Curva granulométrica do agregado miúdo.

De acordo com a curva de distribuição granulométrica pode-se classificar a areia utilizada como areia média fina, com o grau de uniformidade igual a 2,33 com uniformidade nos grãos. O modulo de finura e diâmetro máximo característico foi obtido nas características informadas pelo fornecedor.

5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA ESCÓRIA

A escória foi primeiramente caracterizada quanto ao teor de umidade, massa específica, teor de matéria orgânica, teor de carbono orgânico e perda ao fogo. Os resultados referentes a esses ensaios podem ser observados na Tabela 6, apresentada a seguir.

Tabela 6 – Características da escória

Resíduo	Característica	Unidade	Valor
	Massa Específica	g/cm ³	3,08
	Teor de Umidade	%	1,09
Escória	Matéria Orgânica	%	0,02

Carbono Orgânico	%	0,05
Perda ao Fogo	%	0,39

Observou-se que a massa específica obtida para a escória apresentou valor superior àquele encontrado para a areia causando um pequeno aumento no peso dos blocos, mas nenhuma interferência no geral.

Em relação ao teor de umidade, matéria orgânica, carbono orgânico e perda ao fogo observou-se resultados baixos uma vez que o material analisado é feito a partir de materiais inorgânicos.

5.2.1 Análise granulométrica da escória

A escória foi moída e peneirada para controle da granulometria. A Figura 5 mostra a curva granulométrica do ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação. A porcentagem de material retido e acumulado em cada peneira.

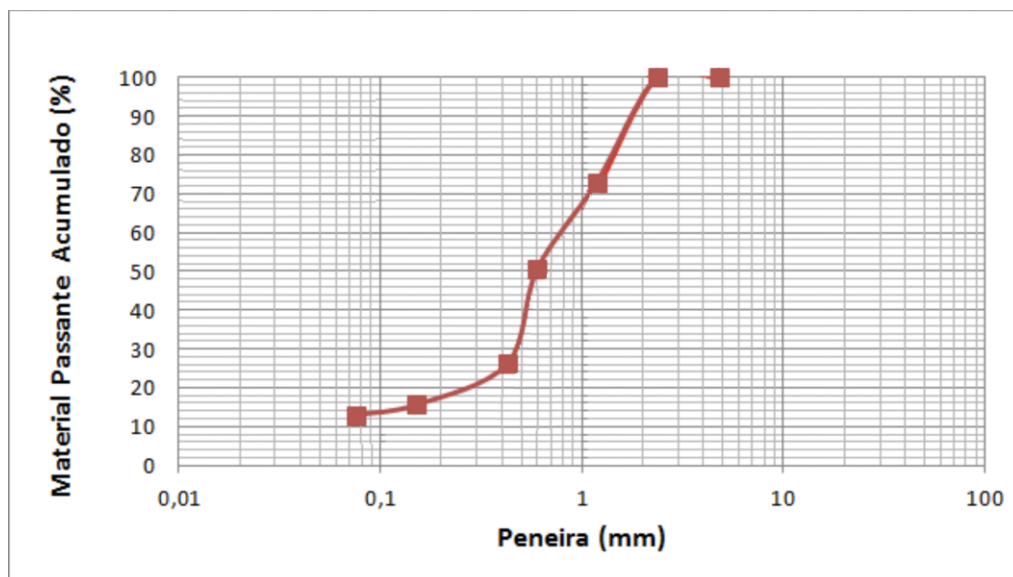


Figura 5 – Distribuição granulométrica da escória

5.2.2 – Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX), espectrometria de emissão atômica por plasma (ICP OES) e Absorção atômica (AAS)

A amostra foi submetida a análises no Laboratório de Tecnologia Mineral do SENAI. A tabela 8 apresentada a seguir mostra os resultados da caracterização química realizada nas escórias de chumbo ainda em seu estado bruto, coletadas *in loco* na empresa recicladora de chumbo secundário durante a primeira fase de amostragem. A amostra de escória foi submetida a análises para caracterização.

Tabela 7 – Resultados FRX, AAS e ICP

Análises	Ag	Al	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Co	Cr
Método unidade	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C
Limite detecção	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM
	3	100	3	3	20	100	3	8	3
Resultados	5	4650	1081	<3	<20	11374	11	31	5915
Análises	Cu	Fe	Ga	K	La	Li	Mg	Mn	Mo
Método unidade	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C
Limite detecção	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM
	3	100	10	100	20	3	100	100	3
Resultados	1031	>150000	<10	950	<20	5	52854	2801	54
Análises	Na	Ni	P	Pb	Sc	Se	Sn	Sr	Th
Método unidade	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C
Limite detecção	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM
	100	3	100	8	5	20	20	3	20
Resultados	46986	137	807	>10000	<5	<20	7672	78	<20
Análises	Ti	Tl	U	V	W	Y	Zn	Zr	Fe
Método unidade	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	ICP41C	AAS41B
Limite detecção	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	%
	100	20	20	8	20	3	3	3	0,01
Resultados	1390	<20	<20	95	28	<3	638	57	35,85
Análises	Al2O3	CaO	Co	Cr2O3	Cu	Fe2O3	K2O	MgO	MnO
Método unidade	XRF83B	XRF83B	XRF83B	XRF83B	XRF83B	XRF83B	XRF83B	XRF83B	XRF83B
Limite detecção	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	0,1	0,01	0,005	0,01	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01
Resultados	1,86	1,91	<0,005	3,33	0,13	51,1	0,11	8,65	0,55
Análises	Ni	P2O5	Pb	S	SiO2	TiO2	Zn		
Método unidade	XRF83B	XRF83B	XRF83B	XRF83B	XRF83B	XRF83B	XRF83B		
Limite detecção	%	%	%	%	%	%	%		
	0,008	0,01	0,01	0,05	0,1	0,01	0,01		
Resultados	0,02	0,17	1,07	4,97	7,45	0,3	0,07		

Quando analisamos o parâmetro (Fe) verificamos que o elemento é o que possui maior concentração na amostra de escória. De acordo com os resultados obtidos, a

amostra apresentou uma concentração de 35,85%. Para o elemento (Pb) a concentração encontrada foi de 10,7%.

Observa-se também uma concentração alta de Manganês, Cálcio e Sódio, devido ao processo de reciclagem da escória onde são utilizados materiais como barrilha por exemplo.

5.2.3 Resistência à compressão simples

Os traços foram selecionados de acordo com a Tabela 4. Um corpo de prova chamado referência foi preparado sem a utilização da escória, e foi utilizado como parâmetro para os demais corpos de prova.

A tabela 9 apresentada a seguir mostra os valores obtidos nos ensaios de rompimento.

Tabela 8 – Ensaio de resistência dos blocos

ID	Ref.	10% escória	10% escória	20% escória	20% escória
	16 dias (MPa)	14 dias (MPa)	61 dias (MPa)	14 dias (MPa)	61 dias (MPa)
1	3,23	8,03	6,43	7,27	5,23
2	4,97	7,19	6,61	6,33	5,30
3	4,84	8,16	6,63	7,33	5,24
4	4,15	6,86	6,53	6,90	5,18
5	5,58	7,11	6,64	6,42	5,49
6	4,42	6,78	6,63	7,69	5,12
Média	4,53	7,36	6,58	6,99	5,26

A Figura 6 apresenta os resultados médios de resistência à compressão das misturas de concreto com escória.

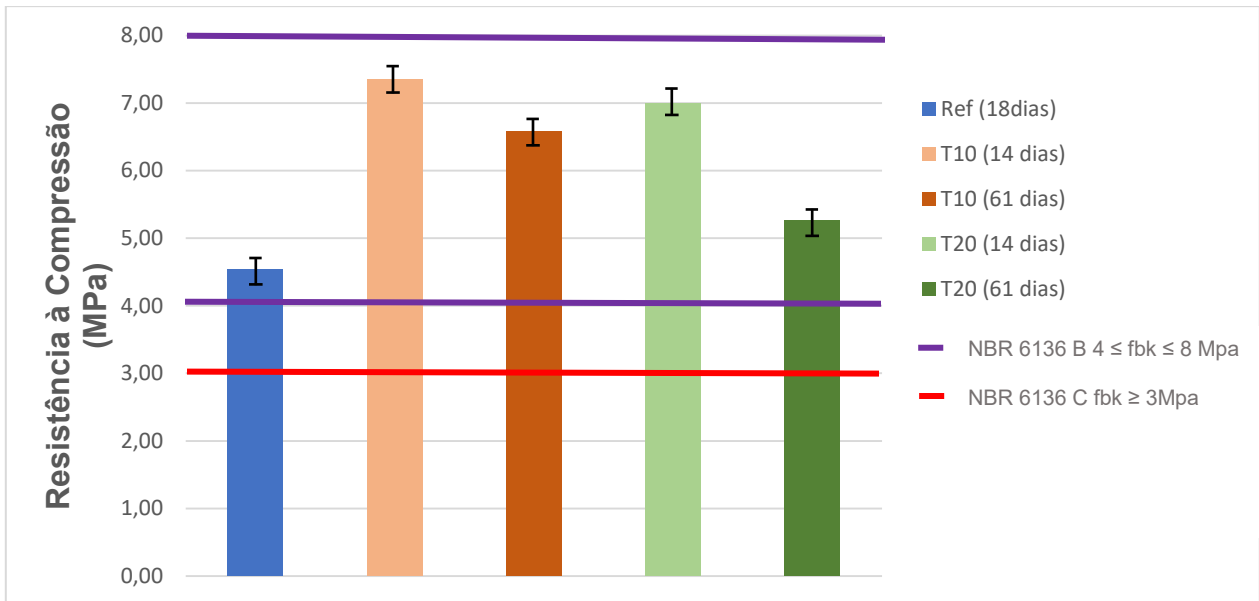


Figura 6 – Resultado dos testes de resistência à compressão

Como pode ser visto no gráfico 1 dentre os traços utilizados, todos os testes apresentaram resistência à compressão superior ao traço de referência.

A redução de resistência nos blocos T20 com 61 dias pode ser explicado devido ao armazenamento indevido a qual o bloco foi submetido após os ensaios de 14 dias que pode ter causado uma retração hídrica do artefato.

A adição da escória influenciou positivamente o comportamento das misturas cimentícias monitoradas a partir dos ensaios de resistência a compressão. Como pode ser observado com 14 dias o bloco de concreto com escória já havia alcançado a sua resistência final mínima de acordo com a norma NBR 6136:2016 – Blocos de concreto vazados para alvenaria – requisitos, que estipula que blocos de concreto sem função estrutural (classe C) deve possuir resistência mínima de 3 MPa. Aos 14 dias os blocos com 10% de escória atingiram uma resistência média de 7,36 MPa, ou seja, mais que duas vezes o necessário. Considerando que o bloco de referência obteve resistência de 4,53 MPa, houve um aumento de resistência de 62% com 14 dias. Aos 61 dias a resistência estabilizou em 6,58 MPa, sugerindo assim um aumento da resistência em relação ao bloco de referência de 45%. Com relação aos blocos com 20% de escória, também foi observado um aumento na resistência do mesmo, que com 14 dias foi de 6,99 MPa, ou seja, 54% mais resistente que a referência, e 16% mais resistente aos 61 dias.

5.2.4 Análise do extrato lixiviado e solubilizado

A partir da observação do Quadro 1 é possível notar que a adição de escoria não causou interferência para o extrato da lixiviação para o parâmetro chumbo na produção dos blocos com 10 e 20% de escoria.

Quadro 1 – Resultados do extrato lixiviado e solubilizado

Lixiviação						
Amostra	Parâmetro	Resultado	Unidade	NBR 10.004	Unid.	Conclusão
Bloco de referência	Chumbo	< 1,00	mg/L	1	mg/L	Adequado
Bloco 10%	Chumbo	< 1,00				Adequado
Bloco 20%	Chumbo	< 1,00				Adequado
Solubilidade						
Amostra	Parâmetro	Resultado	Unidade	NBR 10.004	Unid.	Conclusão
Bloco de referência	Cloretos	< 5,00	mg/L	250	mg/L	Adequado
Bloco 10%		< 5,00				Adequado
Bloco 20%		< 5,00				Adequado
Bloco de referência	Fluoretos	60	mg/L	1,5	Mg/L	Ref. Inadequada
Bloco 10%		94				
Bloco 20%		79,5				
Bloco de referência	Sulfato	44	mg/L	250	mg/L	Adequado
Bloco 10%		32				Adequado
Bloco 20%		24				Adequado
Bloco de referência	Alumínio	3,9	mg/L	0,2	mg/L	Ref. Inadequada
Bloco 10%		0,35				
Bloco 20%		1				
Bloco de referência	Arsênio	< 0,01	mg/L	0,01	mg/L	Adequado
Bloco 10%		< 0,01				Adequado
Bloco 20%		< 0,01				Adequado
Bloco de referência	Chumbo	< 0,005	mg/L	0,01	mg/L	Adequado

Bloco 10%		< 0,005				Adequado
Bloco 20%		< 0,005				Adequado
Bloco de referência		< 0,20				Adequado
Bloco 10%	Ferro Total	< 0,20	mg/L	0,3	mg/L	Adequado
Bloco 20%		< 0,20				Adequado
Bloco de referência		0,02				Ref. Inadequada
Bloco 10%	0,03	mg/L	0,01	mg/L		
Bloco 20%	0,02					
Bloco de referência	Sódio	13,8				Adequado
Bloco 10%		56,2	mg/L	200	mg/L	Adequado
Bloco 20%		174				Adequado
Bloco de referência	Cianeto Total	< 0,01				Adequado
Bloco 10%		< 0,01	mg/L	0,07	mg/L	Adequado
Bloco 20%		< 0,01				Adequado

É possível afirmar também que a adição de escória não causou interferência para o extrato do solubilizado para os parâmetros cloretos, sulfatos, arsênio, chumbo, ferro total, sódio e cianeto total.

Para o parâmetro fluoretos pode-se afirmar que a escória não é o fator de aumento deste parâmetro uma vez que nos blocos com 10% para os blocos com 20% de escoria observou-se um aumento nas análises dos blocos com 10%, mas uma diminuição quando se adicionou mais 10% de escoria para produção do bloco com 20% de escoria. Para o alumínio a referência consta inadequada por si, entretanto com o acréscimo de escoria observou-se uma tendência a diminuição para este parâmetro. E por último para o selênio pode-se afirmar preliminarmente que a escória também não é o fator de aumento deste parâmetro uma vez que de 10% para 20% de escoria observou-se um aumento no primeiro momento, mas uma diminuição quando se adicionou mais 10% de escoria para produção do bloco com 20% de escoria.

6 CONCLUSÃO

Através da interpretação dos resultados constantes na presente pesquisa, observa-se que a partir de agora as empresas de reciclagem de chumbo secundário podem contar com uma tecnologia viável segura para reciclagem de suas escórias de alto forno com baixo custo e segurança ambiental.

Com base nos resultados obtidos sobre a substituição parcial de agregado por diferentes quantidades de escória em misturas cimentícias para confecção de blocos de concreto, pode-se concluir que as características granulométricas da escória são muito parecidas com a areia fina natural quartzosa devido a alta quantidade de material retido na faixa 0,6-2 mm.

As técnicas analíticas foram de fundamental importância na avaliação do desempenho dos materiais avaliados. Por meio da análise química determinou-se a composição química das amostras do extrato lixiviado e solubilizado, sendo que ambas, não tiveram interferência na qualificação dos resíduos oriundos da adição da escória.

Para a lixiviação o único parâmetro amostrado foi o chumbo que não sofreu alteração após a mistura com a escória. A análise do extrato da referência apresentou o mesmo valor dos extratos dos blocos com 10 e 20% de escória, atestando a segurança ambiental do projeto.

Para os testes de solubilização pode-se observar que os parâmetros cloretos, arsênio, chumbo, ferro total e cianeto total não sofreram nenhuma interferência com a adição da escória, uma vez que os valores do extrato da referência e dos blocos com escória tiveram resultados idênticos. Para o parâmetro sulfato, é possível observar uma redução linear com a adição da escória, entretanto para o sódio houve um aumento linear de sua concentração no extrato dos blocos com 10 e 20% de escória, o que pode ser explicado pelo fato de ser empregado barrilha (carbonato de sódio) em processos que possuem escória alcalina.

O extrato de referência, que foi obtido dos blocos sem escória, apresentou 60 mg/L de fluoretos, sendo o valor máximo permitido 1,5mg/L, e para o extrato do bloco com 10% de escória 94 mg/L e para o bloco com 20% de escória 79,5 mg/L. Uma vez que a concentração foi aumentou com 10% de escória e abaixou com 20% de escória,

não se pode afirmar que a escória por si só é causadora do aumento da concentração neste parâmetro.

Para a análise de alumínio, a referência obteve 3,9 mg/L e o valor máximo permitido é de 0,2 mg/L, ou seja, bem superior. Entretanto com a adição de 10% de escória este valor abaixou para 0,35 mg/L, e com adição de 20% de escória este valor continuou abaixo que a referencia no patamar de 1 mg/L. Não se pode afirmar que a utilização da escória causa interferência no parâmetro alumínio uma vez que o resultado não se mostrou linear, entretanto observa-se que a adição de chumbo não será o fator preponderante para causar a desclassificação deste resíduo.

O parâmetro selênio para a referencia apresentou 0,02 mg/L e o valor máximo permitido é de 0,01 mg/L. Com a adição de 10% de escoria este parâmetro se mostrou ligeiramente superior com 0,03 mg/L, mas com adição de 20% de escória continuou como na referencia, ou seja, 0,02 mg/L. Diante deste fato pode-se afirmar que a escória não causou interferência.

Os outros parâmetros não foram analisados pois na análise de massa bruta da escória, apresentada pela empresa recicladora de chumbo, tais parâmetros já não superavam o limite da NBR 10.0004.

Pode-se concluir então que em relação às exigências estabelecidas pela ABNT NBR 10.004 a adição de escória por si só não mudou a classificação do resíduo, de acordo com os resultados mostrados acima. O resíduo é classificado como classe II B – não perigosos e inerte.

Pode-se concluir assim que a adição da escória de fornos de fundição de chumbo além de ser segura ambientalmente, ainda representa um aumento na resistência dos blocos que poderiam ser utilizados não somente como blocos sem função estrutural, mas também podendo ser empregado com funções estruturais classe B, gerando assim uma alternativa tecnológica para disposição deste tipo de resíduo para o mercado industrial com segurança, sendo recomendado 20% de substituição a fim de utilizar maior quantidade de resíduo diminuindo assim a quantidade de matérias despejadas inadequadamente no meio ambiente.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). C 618-12a - Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete., 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM Standard Test - Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance - ASTM C403/C403M - 08, 2008.

Aranha, W. M.. CARACTERIZAÇÃO DE BATERIA RECARREGÁVEL DE LÍTIO DE VEÍCULOS HÍBRIDOS VISANDO SUA RECICLAGEM. Projeto de graduação submetido ao corpo docente do curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica da Universidade federal do Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Guia básico de utilização do cimento Portland. 7. Ed. São Paulo, p.28, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NM 18:2012, - Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 23 - Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro - RJ, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 24 – Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro - RJ, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 45:2006 - Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 52:2009 - Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 76 - Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro - RJ, 1998a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 248:2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6.502 – Rochas e Solos, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13.600:1996, - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5752:2014, - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7215:1997 – ensaio de abatimento, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5.751:2015, - Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5739:2007, — Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7215:1997, — Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6136:2016, — Blocos de concreto vazados para alvenaria - requisitos, 2016.

ALIABDO, A. A.; ELMOATY, A.; ABOSHAMA, A. Y. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, v 124, p.866-877, 2016.

Bláhová, L.; Navrátilová, Z.; Mucha, M.; Navrátilová, E.; Neděla, V.. INFLUENCE OF THE SLAGS TREATMENT ON THE HEAVY METALS BINDING. *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 15, 2018.

Bitencourt, C. S; Teider, B. H; Gallo, J. B; Pandolfelli, V. C.. A GEOPOLIMERIZAÇÃO COMO TÉCNICA PARA A APLICAÇÃO DO RESÍDUO DA BAUXITA. Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de S. Carlos, 2012.

Cesar, A. C. G.. DESENVOLVIMENTO DE BLOCOS CONFECCIONADOS COM ESCÓRIA PROVENIENTE DA RECICLAGEM DO AÇO. 2008. 189p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.

Chen, J.; Tinjum, J.; Edil, T.. LEACHING OF ALKALINE SUBSTANCES AND HEAVY METALS FROM RECYCLED CONCRETE AGGREGATE USED AS UNBOUND BASE COURSE. *Transportation Research Record*, 2013.

CORINALDESI, V.; GNAPPI, G.; MORICONI, G.; MONTENERO, A.; Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. *Waste Management*, v. 25, p. 197-201, 2005.

Coruh, S.; Elevli, S.; Ergun, O. N.; Demir, G.. ASSESSMENT OF LEACHING CHARACTERISTICS OF HEAVY METALS FROM INDUSTRIAL LEACH WASTE. *International Journal of Mineral Processing*, vol. 123, 2013.

CQA Química, loja de materiais e artigos para laboratórios, acessível em: <http://www.cqaquimica.com.br>, acessado em julho de 2019.

De Andrade, M. B.. CARACTERIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS PROVENIENTES DA RECICLAGEM DE BATERIAS DE CUMBO – ÁCIDO. 2011. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Química Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2011.

De Medeiros, K. P. M.. ESTUDO DO USO DA ESCÓRIA SIDERÚRGICA DE ALTO FORNO E ESTÉRIL DE MINERAÇÃO COMO ALTERNATIVA DE REVESTIMENTO PRIMÁRIO EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS. 2019. Dissertação (Mestrado) - Programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

Didática SP, loja de materiais e artigos para laboratórios, acessível em: <http://www.didaticasp.com.br>, acessado em julho de 2019.

Ettler, V.; Johan, Z.. 12 YEARS OF LEACHING OF CONTAMINANTS FROM Pb SMELTER SLAGS: GEOCHEMICAL/ MINERALOGICAL CONTROLS AND SLAG RECYCLING POTENTIAL. Applied Geochemistry, 2014.

Gomes, G. M. F.; Marques, L.; Mendes, T. F.; Wada, K.. CARACTERIZAÇÃO E MINIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO DA ESCÓRIA PROVENIENTE DA RECICLAGEM DE BATERIAS ÁCIDO – CHUMBO. Seminário do Programa de Pós – Graduação em Engenharia Química, 2005.

Hemstad, P.; Machner, A.; De Weerd, K.. THE EFFECT OF ARTIFICIAL LEACHING WITH HCl ON CHLORIDE BINDING IN ORDINARY PORTLAND CEMENT PASTE. Cement and Concrete Research, 2020.

IDIR, R.; CYR, M.; HAMOU, A. T.; Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. Cement & Concrete Composites, v. 33, p. 19-29, 2011.

Koplík, J.; Smolková, M.; Tkacz, J.. THE LEACHABILITY OF HEAVY METALS FROM ALKALI – ACTIVATED FLY ASH AND BLAST FURNACE SLAG MATRICES. *Materials Science Forum*, 2016.

Marion, A. M.; De Lanève, M.; De Grauw, A.. STUDY OF THE LEACHING BEHAVIOR OF PAVING CONCRETES: QUANTIFICATION OF HEAVY METAL CONTENT IN LEACHATES ISSUED FROM TANK TEST USING DEMINERALIZED WATER. *Journal of Cement and Concrete Research*, 2005.

Marques, J. F.. COMPORTAMENTO DE ÍONS Pb, Zn e Cu EM ÁREA IMPACTADA POR ESCÓRIA, PRODUTO DA RECICLAGEM DE BATERIAS CHUMBO – ÁCIDO. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociência, 2003.

METHA, P. K. Rice husk ash – A unique supplementary cementing material. In V.M. Malhotra (ed.), Advances in concretes technology, 2a ed. Ottawa: Canmet, 1992, pp 407-411.

MOURA, A. A.; Argamassa com substituição do cimento por resíduos industriais. Dissertação apresentada ao PPGEA da UTFPR para obtenção do título de M.Sc em engenharia ambiental no ano de 2018.

Nath, S.. FLY ASH AND ZINC SLAG BLENDED GEOPOLYMER: IMMOBILIZATION OF HAZARDOUS MATERIALS AND DEVELOPMENT OF PAVING BLOCKS. *Journal of Hazardous materials*, vol. 387, 2020.

Netherlands Standards NEN 7345 - LEACHING CHARACTERISTICS OF SOLID EARTHY AND STONY BUILDING AND WASTE MATERIALS - LEACHING TESTS - Determination of the leaching of inorganic components from buildings and monolithic waste materials with the diffusion test, 1995

NNI, NEN 7345. DETERMINATION OF LEACHING FROM MONOLITHIC CONSTRUCTION MATERIALS AND WASTE MATERIALS BY MCANS OF A DIFFUSION TEST. NNI, Amsterdam, 1995.

Oravec, J.; Eštoková, A.. DETERMINATION THE AVAILABILITY OF CHROMIUM FROM POWDERED CEMENT COMPOSITES CONTAINING BLAST FURNACE SLAG. Solid State Phenomena, 2016.

Parissi, F.; Frigione, G.. SLAG CEMENT: AN ECONOMIC DURABILITY. THEME TWO: HYDRATION OF PORTLAND CEMENT, 2016.

SILVA, F. M.; LACERDA, S.B.; JONES JUNIOR, J.; Química Nova, 2005, p. 103.

SOLOCAP - Solocap Geotecnologia Rodoviária, acessível em <http://www.solocap.com.br>, acessado em 2019.

Universidade Federal de Jataí, acessível através do link: <http://www.jataifisica.com.br>, acessado em julho de 2019.

Van Caneghem, J.; De Wijs, J.; Sala, J.. LEACHING OF HEAVY METALS FROM CONCRETE PAVERS CONTAINING WASTE-TO-ENERGY BOTTOM ASH AS AN AGGREGATE. KU Leuven , TC Materials Technology – Campus Group T, 3000 Leuven, Belgium, 2019.

Xu, B.; Yi, Y.. USE OF LADLE FURNACE SLAG CONTAINING HEAVY METALS AS A BINDING MATERIAL IN CIVIL ENGINEERING. Journal Science of the Total Environment, vol. 705, 2020.

Wang, D.; Wang, Q.; Zhuang, S.; Yang, J.. EVALUATION OF ALKALI – ACTIVATED BLAST FURNACE FERRONICKEL SLAG AS A CEMENTITIOUS MATERIAL: REACTION MECHANISM, ENGINEERING PROPERTIES AND LEACHING BEHAVIORS. Construction and Building Materials, vol. 188, 2018.

Yu, Q.; Nagataki, S.; Lin, J.; Saeki, T.; Hisada, M.. THE LEACHABILITY OF HEAVY METALS IN HARDENED FLY ASH CEMENT AND CEMENT – SOLIDIFIED FLY ASH. Cement and Concrete Research, 2005.