



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

MARIA BÁRBARA LIMA DE CARVALHO CAÚLA

DETECÇÃO DE METAIS EM CAMADAS DE PAVIMENTOS CONTENDO
AGREGADOS SIDERÚRGICOS

FORTALEZA

2025

MARIA BÁRBARA LIMA DE CARVALHO CAÚLA

DETECÇÃO DE METAIS EM CAMADAS DE PAVIMENTOS CONTENDO
AGREGADOS SIDERÚRGICOS

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Acadêmico em Tecnologia e Gestão Ambiental do Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestra em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos.

Coorientador: Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos

FORTALEZA

2025

MARIA BÁRBARA LIMA DE CARVALHO CAÚLA

DETECÇÃO DE METAIS EM CAMADAS DE PAVIMENTOS CONTENDO
AGREGADOS SIDERÚRGICOS

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Acadêmico em Tecnologia e Gestão Ambiental do Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestra em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C111d Caúla, Maria Bárbara Lima de Carvalho.
Detecção de metais em camadas de pavimentos contendo agregados siderúrgicos / Maria Bárbara Lima de Carvalho Caúla. - 2025.
107 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2025.
Orientação: Profª. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos.
Coorientação: Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos.
1. Baosteel Slag Short Flow. 2. Dry Pit. 3. Lixiviação. 4. Pavimento. 5. Metais . I. Título.
CDD 628
-



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Processo: 23256.006551/2025-47

Interessado: Coordenadoria do Curso de Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental
(PGTGA) - Campus Fortaleza

MARIA BÁRBARA LIMA DE CARVALHO CAÚLA

DETECÇÃO DE METAIS EM SUBCAMADAS DE PAVIMENTOS CONTENDO AGREGADOS SIDERÚRGICOS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) *Campus* de Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Mestra em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Aprovada em: 30/05/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
JUCELINE BATISTA DOS SANTOS BASTOS
Data: 02/06/2025 09:57:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. **Juceline Batista dos Santos Bastos** (orientadora)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Profa. Dra. **Vivian Silveira dos Santos Bardini**
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Documento assinado digitalmente
VIVIAN SILVEIRA DOS SANTOS BARDINI
Data: 02/06/2025 13:26:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. **Ronaldo Ferreira do Nascimento**
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Documento assinado digitalmente
RONALDO FERREIRA DO NASCIMENTO
Data: 04/06/2025 12:05:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. **Iuri Sidney Bessa**
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Documento assinado digitalmente
IURI SIDNEY BESSA
Data: 02/06/2025 11:44:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTOS

Sou grata a Deus por me dar forças todos os dias para alcançar meus objetivos e proteger minha família e amigos que sem eles não sei o que seria de mim.

A minha mãe que foi guerreira por tudo que já passou e mesmo assim conseguiu brilhantemente criar a mim e a minha irmã. A senhora é a responsável pelas minhas vitórias.

Ao meu pai por estar sempre ao meu lado.

Ao meu esposo, Isaac Caúla, por me ouvir e ser realmente meu companheiro de vida.

Aos laboratoristas, que sem eles esta pesquisa não era possível: Assis, Ricardo, Sabóia e Tobias.

Às minhas amigas, que o PGTGA me deu, Eulália e Livia. Obrigada pelos ensinamentos, conversas e por fazerem parte da minha vida.

Ao Cícero e Michael por me apoiarem de diversas maneiras nessa missão que foi esse mestrado.

Ao Professor Ronaldo Nascimento pela paciência e poder me transmitir seus conhecimentos.

A minha orientadora, Professora Juceline Bastos, por me confiar essa pesquisa, por acreditar que eu conseguiria e nunca soltar a minha mão. A senhora realmente foi um pilar nessa pesquisa. A senhora é uma profissional gigante!

Ao Professor Gemmelle Santos que me inspirou como profissional e me motivou, mesmo sem querer, a ingressar no PGTGA, me inspirando com sua trajetória profissional.

Ao Professor Rinaldo que foi realmente meu mestre e hoje considero meu amigo. O senhor não imagina a força, a garra, que me dá toda vez que pergunta se eu estou precisando de algo. Nunca esquecerei a paciência que teve de me receber em sua sala, tirar todas as minhas dúvidas e me transmitir diversos conhecimentos. Hoje sou uma Administradora Plus (risos)!

A ArcelorMittal pela doação do agregado siderúrgico e pelo apoio financeiro para realização dos ensaios ambientais através do projeto de pesquisa.

A Universidade Federal do Ceará pelo acesso ao Laboratório de Mecânica de Pavimentos, Laboratório de Química e Reologia de Ligantes Asfálticos e ao Laboratório de Análise de Traços.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Fortaleza, que está faz parte da minha vida desde 2012, por me dá acesso ao Laboratório de Tecnologia Química, ao Laboratório de Tecnologia Química e ao Laboratório de Asfalto.

A FUNCAP pelo apoio financeiro através da bolsa de mestrado a mim concedida.

RESUMO

A crescente preocupação com os impactos ambientais negativos associados à extração de recursos naturais e ao descarte inadequado de resíduos sólidos tem impulsionado a adoção de práticas sustentáveis, entre as quais se destaca a reciclagem. Nesse contexto, a incorporação de agregados siderúrgicos (AS), como o Baosteel Slag Short Flow (BSSF) e o Dry Pit, em camadas de pavimento representa uma alternativa promissora para a redução da demanda por agregados naturais, promovendo uma destinação ambientalmente adequada para esses resíduos industriais. No entanto, a composição química desses materiais suscita preocupações quanto à possível liberação de compostos potencialmente tóxicos. Este estudo teve como objetivo principal avaliar a mobilidade de metais lixiviáveis presentes nos agregados siderúrgicos BSSF e Dry Pit quando aplicados em camadas de pavimentos. Foram comparados os ensaios de lixiviação em batelada e em coluna, visando analisar a liberação de metais a partir desses materiais. Os ensaios de batelada foram realizados com BSSF, solo natural (SN), mistura de 50% BSSF e 50% SN (M_{BSSF}), e misturas contendo Dry Pit com diferentes granulometrias (M_{DryPit}). Já os ensaios em coluna contemplaram amostras de base/sub-base com M_{DryPit} , base com M_{BSSF} , sub-base com M_{BSSF_i} , e combinações de base e sub-base com M_{BSSF_m} e M_{BSSF_i} , compactadas sob energia modificada e intermediária, respectivamente. Os resultados demonstraram que os metais As (arsênio), Cd (cádmio), Cr total (cromo total), Pb (chumbo), Cu (cobre), Hg (mercúrio) e Ag (prata) não foram detectados nos extratos lixiviados, independentemente do método de ensaio ou das condições de pressão e tempo aplicadas. Adicionalmente, as misturas com BSSF e SN não ultrapassaram os limites de dureza total para potabilidade da água nos ensaios em coluna. Observou-se que a aplicação de energia intermediária de compactação à mistura M_{BSSF} foi eficaz na imobilização de metais, assegurando conformidade com os padrões de qualidade da água e ausência de toxicidade metálica. De forma geral, os agregados siderúrgicos avaliados apresentaram comportamento ambientalmente seguro, indicando seu potencial de uso em aplicações de pavimentação sem riscos significativos de contaminação por metais.

Palavras-chave: *Baosteel Slag Short Flow*. Dry Pit. Lixiviação. Pavimento. Metais.

ABSTRACT

The growing concern regarding the negative environmental impacts associated with the extraction of natural resources and the improper disposal of solid waste has driven the adoption of sustainable practices, among which recycling stands out. In this context, the incorporation of steelmaking aggregates (SA), such as Baosteel Slag Short Flow (BSSF) and Dry Pit, into pavement layers represents a promising alternative to reduce the demand for natural aggregates, while also providing an environmentally appropriate destination for these industrial residues. However, the chemical composition of these materials raises concerns about the potential release of toxic compounds. The primary objective of this study was to assess the mobility of leachable metals present in the BSSF and Dry Pit steel aggregates when used in pavement layers. Batch and column leaching tests were conducted to evaluate metal release from these materials. The batch tests were performed using BSSF, natural soil (NS), a 50% BSSF and 50% NS mixture (M_{BSSF}), and mixtures containing Dry Pit with various particle size distributions (M_{DryPit}). The column tests involved base/subbase samples with M_{DryPit} , base with M_{BSSF} , subbase with M_{BSSF_i} , and base-subbase combinations with M_{BSSF_m} and M_{BSSF_i} , compacted under modified and intermediate energy levels, respectively. The results indicated that the metals As (arsenic), Cd (cadmium), total Cr (chromium), Pb (lead), Cu (copper), Hg (mercury), and Ag (silver) were not detected in the leachate, regardless of the testing method or the applied pressure and duration conditions. Additionally, the mixtures of BSSF and NS did not exceed the total hardness limits for potable water in the column tests. It was observed that the application of intermediate compaction energy to the M_{BSSF} mixture was effective in immobilizing metals, ensuring compliance with water quality standards and the absence of metal-related toxicity. Overall, the evaluated steel aggregates exhibited environmentally safe behavior, indicating their potential for use in pavement applications without significant risk of metal contamination.

Keywords: Baosteel Slag Short Flow. Dry Pit. Leaching. Pavement. Metals.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	— Processo de produção do agregado siderúrgico Dry Pit.....	17
Figura 2	— Composição química do agregado siderúrgico Dry Pit (%) reportado na literatura.....	19
Figura 3	— Composição química do agregado siderúrgico Dry Pit (%).....	20
Figura 4	— Processo de produção do agregado siderúrgico BSSF.....	23
Figura 5	— Composição química do agregado siderúrgico BSSF de acordo com a literatura.....	25
Figura 6	— Parâmetros químicos analisados de acordo com a literatura.....	28
Figura 7	— Parâmetros químicos analisados de acordo com a literatura.....	36
Figura 8	— Usos do agregado siderúrgico BSSF.....	37
Figura 9	— Corpos de prova com BSSF e solo natural.....	40
Figura 10	— Camadas de pavimento.....	41
Figura 11	— Corpo de prova com BSSF.....	42
Figura 12	— Caracterização e classificação de resíduos sólidos.....	49
Figura 13	— Procedimento do ensaio de lixiviação em batelada.....	50
Figura 14	— Aparelho de coluna.....	51
Figura 15	— Aparelho de lixiviação em coluna com uso de permeâmetro: a) Estrutura do aparelho, b) Ensaio de lixiviação em coluna em execução.....	54
Figura 16	— Estrutura do aparelho do aparelho de lixiviação em coluna normatizado pela ASTM D 4874.....	55
Figura 17	— Curva granulométrica da M_{DryPit} e M_{BSSF}	59
Figura 18	— Curvas de compactação e saturação das misturas estudadas.....	60
Figura 19	— Curvas de compactação das M_{BSSFm} e M_{BSSFi}	62

Figura 20 — Classificação ambiental do agregado siderúrgico BSSF após ensaios de solubilização e lixiviação.....	65
Figura 21 — Dureza total dos extratos lixiviados M_{BSSFm} - D 4874 com uso do permeâmetro.....	69
Figura 22 — Parâmetros químicos dos extratos lixiviados com uso de aparelho de coluna com coluna simulando base com $M_{BSSFm} - 7 \text{ bar (mg/L)}$	71
Figura 23 — Parâmetros químicos dos extratos lixiviados com uso de aparelho de coluna com coluna simulando base com $M_{BSSFm} \text{ (mg/L)}$	73
Figura 24 — Parâmetros químicos dos extratos lixiviados com uso de aparelho de coluna com coluna simulando sub-base com M_{BSSFi}	75
Figura 25 — Parâmetros químicos dos extratos lixiviados com uso de aparelho de coluna com coluna simulando base e sub-base com M_{BSSFm} e M_{BSSFi}	77
Figura 26 — Classificação ambiental do agregado siderúrgico Dry Pit após ensaios de solubilização e lixiviação.....	79
Figura 27 — Parâmetros químicos dos extratos lixiviados com uso de aparelho de coluna com coluna com $MDryPit - 7 \text{ bar (mg/L)}$	82
Figura 28 — Parâmetros químicos dos extratos lixiviados com uso de aparelho de coluna com coluna simulando base/ sub-base com $M_{DryPitm}$	84
Figura 29 — Parâmetros químicos dos extratos lixiviados com uso de aparelho de coluna com coluna simulando base e sub-base com $M_{DryPitm}$	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	— Composição química do agregado siderúrgico Dry Pit reportado na literatura.....	18
Tabela 2	— Composição química do agregado siderúrgico BSSF de acordo com a literatura.....	24
Tabela 3	— Valores máximos permitidos dos parâmetros químicos.....	29
Tabela 4	— Características física das misturas.....	58
Tabela 5	— Dados de óxidos presentes nos materiais obtidos por FRX (% em massa).....	63
Tabela 6	— Composição química Sínter e Coque.....	64
Tabela 7	— Parâmetros químicos dos extratos lixiviados conforme NBR 10005.....	67
Tabela 8	— Parâmetros químicos dos extratos lixiviados conforme NBR 10005.....	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Pesquisas conduzidas com o uso do BSSF.....	31
Quadro 2 — Pesquisas conduzidas com o uso do Dry Pit.....	38
Quadro 3 — Ensaios realizados por amostra.....	43
Quadro 4 — Normas de referência para a realização dos ensaios e análise dos resultados.....	44
Quadro 5 — Diferenças entre os ensaios de lixiviação NBR 10005 e ASTM D 4874.....	56

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALECE	Assembleia Legislativa do Estado do Ceará
AL	Escória Granulada de Alto-Forno
AS	Agregado Siderúrgico
AS0	Agregado Siderúrgico Dry Pit 0
AS1	Agregado Siderúrgico Dry Pit 1
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
BOF	Escória de forno básico de oxigênio
BTR	Revista de Pesquisa Técnica da Baosteel
BSSF	Escória de Fluxo Curto da Baosteel
CE	Condutividade Elétrica
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
CSU	Universidade Cheng Shiu
EDTA	Ácido Etilenodiaminotetracético
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
ECP1	Extrato Lixiviado 1 do Ensaio de Lixiviação em Coluna no Permeâmetro
ECP2	Extrato Lixiviado 2 do Ensaio de Lixiviação em Coluna no Permeâmetro
ECP3	Extrato Lixiviado 3 do Ensaio de Lixiviação em Coluna no Permeâmetro
ECP4	Extrato Lixiviado 4 do Ensaio de Lixiviação em Coluna no Permeâmetro

ECP5	Extrato Lixiviado 5 do Ensaio de Lixiviação em Coluna no Permeâmetro
ECP6	Extrato Lixiviado 6 do Ensaio de Lixiviação em Coluna no Permeâmetro
FCU	Universidade Feng Chia
FRX	Fluorescência de Raios X
GNU	Universidade Nacional de Gyeongsang
IAB	Instituto Aço Brasil
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
KYUAS	Universidade de Ciências Aplicadas Kao Yuan
LD	Escória Linz Donawitz
LMS	Laboratório de Mecânica dos Solos
M _{BSSF}	Mistura com BSSF e SN
M _{BSSF_i}	Mistura com BSSF e SN compactada sob energia intermediária
M _{BSSF_m}	Mistura com BSSF e SN compactada sob energia modificada
M _{DryPit}	Mistura com Dry Pit
M _{DryPit_m}	Mistura com Dry Pit compactada sob energia modificada
MEAS _{máx}	Massa Específica Aparente Seca Máxima
NBR	Norma Brasileira
NCU	Universidade Nacional Central
NKUAS	Universidade Nacional de Ciências Aplicadas de Kaohsiung
NQU	Universidade Nacional de Quemoy
ONU	Organização das Nações Unidas
PVC	Policloreto de vinila

SN	Solo Natural
UB	Universidade de Bremen
UIUC	Universidade de Illinois em Urbana-Champaign
QI	Quociente de Inteligência
TK	Editora Thomé-Kozmiensky
TMEDRI	Instituto de Design e Pesquisa de Engenharia Municipal de Tianjin
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
VMP	Valores Máximos Permitidos
V _v	Volume de Vazios
V _t	Volume Total
WHO	Organização Mundial da Saúde
WUST	Universidade de Ciência e Tecnologia de Wuhan

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
ε	Índice de Vazios

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos Específicos	16
3 REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1 Aspectos ambientais e riscos com associados a reciclagem do Dry Pit em camadas de pavimento	17
3.2 Aspectos ambientais e riscos associados à reciclagem do BSSF em camadas de pavimento	21
3.3 Parâmetros químicos analisados em agregados de siderúrgicos	26
3.4 Aplicação de agregados siderúrgicos	31
3.4.1 Agregado siderúrgico BSSF	31
3.4.2 Agregado siderúrgico Dry Pit	38
4 MATERIAL E MÉTODOS	40
4.1 Materiais Utilizados	40
4.1.1 Materiais para camadas de pavimento	40
4.2 Métodos Empregados	42
4.2.1 Caracterização física e mecânica das misturas	45
4.2.2 Ensaio de caracterização química	47
4.2.2.1 Comparação entre os métodos NBR 10005 e ASTM D 4874	56
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1 Caracterização dos materiais	58
5.1.1 Caracterização física dos materiais	58
5.1.2 Caracterização mecânica dos materiais	60
5.1.3 Caracterização química dos materiais	62
5.2 Estudo de lixiviação em regime de batelada e avaliação ambiental	65
5.2.1 Estudo de lixiviação em regime de batelada e caracterização e avaliação ambiental do agregado siderúrgico BSSF	65
5.2.2 Estudo de lixiviação em regime de coluna ao longo do tempo e sob diferentes pressões e avaliação ambiental da M_{BSSF}	68
5.2.3 Estudo de lixiviação em regime de batelada e caracterização e avaliação ambiental do agregado siderúrgico Dry Pit	79
5.2.4 Estudo de lixiviação em regime de coluna ao longo do tempo e sob diferentes pressões e avaliação ambiental do M_{DryPit}	81

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
6.1 Principais conclusões	88
<i>6.1.1 Caracterização do ponto de vista físico, mecânico e químico dos agregados Dry Pit, BSSF e solo natural e camadas de base e sub-base de pavimento</i>	88
<i>6.1.2 Investigar a lixiviação de metais e outros componentes químicos em camadas de base, sub-base nos ensaios em batelada, conforme NBR 10005</i>	88
<i>6.1.3 Investigar a lixiviação de metais e outros componentes químicos em camadas de base, sub-base e base e sub-base nos ensaios em coluna ao longo do tempo e sob diferentes pressões, conforme ASTM D 4874</i>	89
<i>6.1.4 Caracterizar e classificar os agregados siderúrgicos e camadas de base e sub-base por meio de ensaios de lixiviação</i>	89
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	90
REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

Em 2023, a produção mundial de aço atingiu quase 2 bilhões de toneladas, com o Brasil contribuindo com aproximadamente 32 milhões de toneladas, consolidando-se como o 9º país maior produtor de aço mundial (Instituto Aço Brasil, 2024). O aumento na produção de aço gera uma grande quantidade de escória de aciaria, um resíduo sólido cuja gestão eficaz é importante devido à presença de metais em sua composição. Da mesma forma, a escória Dry Pit, resíduo da produção do ferro-gusa em alto-forno, também é gerada em grandes quantidades.

Os resíduos siderúrgicos representam um desafio ambiental, pois sua disposição inadequada em aterros sanitários pode reduzir a vida útil desses locais, e quando depositados em lixões ou áreas de armazenamento, podem causar contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas (Assembleia Legislativa do Estado do Ceará, 2022), sendo necessárias alternativas de destinação.

Estudos químicos e ambientais são essenciais para atribuir valor a esses materiais e conhecer e prevenir os possíveis riscos de contaminação do solo e águas subterrâneas por compostos químicos. Assim, ensaios de lixiviação em batelada – estado disperso – (ABNT, 2010b) e em coluna – estado compactado – são necessários para avaliar os possíveis compostos tóxicos presentes nesses resíduos, inclusive em condições similares a em campo, como no método com amostra compactada (ASTM, 2017). Esse ensaio, baseado na norma ASTM D 4874, envolve a realização de lixiviação com amostras compactadas dispostas em colunas de vidro ou aço inox, com dimensões normatizadas (ASTM, 2017).

Nesse contexto, a reciclagem dessas escórias como agregado siderúrgico (AS) em camadas de pavimentos rodoviários pode contribuir para a melhoria das condições de rolamento e estruturais dos pavimentos e a redução do uso de agregados naturais (Brasil, 2006). Essas camadas são sucessivas e sobrepostas compreendendo camadas de revestimento, base e sub-base (BRASIL, 2006).

O resíduo *Baosteel Slag Short Flow* (BSSF) proveniente do processo de estabilização de elementos químicos expansivos, como o óxido de cálcio (CaO), da escória de aciaria gerada em conversores a oxigênio, escória Linz Donawitz (LD) ou de forno básico de oxigênio (BOF) (Skaf *et al.*, 2021), aplicada na produção de concreto asfáltico poroso (Kusumawardani, 2014), de concreto asfáltico denso (Pramesthi, 2015), de concreto de cimento Portland convencional (Cartaxo, 2022), na remoção de fósforo (P) em *wetlands* (Zhou *et al.*, 2022), na produção de material de baixa resistência (Wang *et al.*, 2023) e de argamassa (Amâncio *et al.*, 2021a).

O uso de Dry Pit como agregado miúdo também tem sido explorado em pavimentos de

concreto (Nicula *et al.*, 2021a, 2021b) e em argamassas de cimento. Além disso, estudos demonstraram a eficácia desse material na remoção de metais como Cu (cobre), Ni (níquel) e Zn (zinco) de águas residuais industriais (Dimitrova, 1996) e soluções aquosas (Dimitrova; Mehanjiev, 2000). Em águas pluviais industriais, Soumik (2018) investigou a remoção de Cd (cádmio), Fe (ferro), Mn (manganês) e Zn também usando esse resíduo.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010) incentiva a redução e reciclagem de resíduos sólidos. A aplicação de agregados siderúrgicos não apenas evita o envio desses resíduos a aterros sanitários, mas também reduz a exploração de recursos naturais e fornece insumos para o setor da construção civil (ALECE, 2022).

Apesar das aplicações existentes, há preocupações sobre a potencial de contaminação ambiental devido à lixiviação de compostos químicos presentes nos agregados siderúrgicos, como CaO, dióxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido férrico (Fe₂O₃), óxido de magnésio (MgO), óxido de manganês (MnO) e enxofre (S) (Dimitrova, 1996; Souza, 2016; Chaves, 2017; Soumik, 2018; Campos; Rafael; Cabral, 2018; ArcelorMittal Monvelade, 2021). No entanto, o encapsulamento de contaminantes pode ser uma estratégia para evitar a transferência desses compostos para o meio ambiente.

O encapsulamento de contaminantes pode ser uma estratégia para conter esses compostos químicos em pavimentos, concreto, ou outros produtos que utilizem resíduos. Esse processo combina estabilização química/física com solidificação, de modo que o material perigoso fique encapsulado na escória, formando um material sólido que impede o contato do resíduo com os líquidos lixiviantes, evitando a transferência de contaminantes (Perez, 2017).

Diversos estudos têm explorado o encapsulamento de substâncias perigosas para produção de materiais diversos. Chen e Wei (2015) investigaram um aglutinante de argamassa em Matriz Asfáltica Pétreia (*Stone Matrix Asphalt*, em inglês) em que foram utilizadas escórias. Materiais álcali-ativados foram produzidas a partir de escórias de aciaria (Nunes; Borges, 2021); cal em cinzas volantes de termelétrica (Barros, 2015), cal e cimento em solo contaminado com cloreto de zinco (Perez, 2017) e cimento Portland em solo contaminado por derivados de petróleo (Cavalcante, 2013).

Portanto, visando detectar os metais presentes em camadas de pavimentos com *Baosteel Slag Short Flow* e Dry Pit, esta pesquisa avalia o potencial de lixiviação de possíveis contaminantes presentes nestes agregados siderúrgicos através de ensaio de lixiviação em batelada e em coluna.

Assim, este estudo busca determinar as concentrações de potenciais contaminantes em pavimentos contendo BSSF e Dry Pit, detectar compostos químicos perigosos e analisar os

aspectos ambientais da reciclagem desses materiais em camadas de pavimento. Esta pesquisa integra projetos desenvolvidos em parceria entre o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) e a Universidade Federal do Ceará (UFC), com financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ). Em tempo, o estudo da viabilidade ambiental do uso dos agregados siderúrgicos em camadas de pavimentos abordado nesta dissertação contribuiu para dois projetos: “Caracterização do comportamento mecânico e do ciclo de vida de materiais asfálticos e outros compósitos produzidos com fileres sustentáveis” e “Desenvolvimento de produtos inovadores e sustentáveis para a infraestrutura”.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a lixiviação de metais e outros componentes químicos em camadas de pavimentos com agregados siderúrgicos BSSF e Dry Pit.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterização do ponto de vista físico, mecânico e químico dos agregados Dry Pit, BSSF e solo natural e camadas de base e sub-base de pavimento;
- Investigar a lixiviação de metais (As , Cd, Cr, Pb, Cu, Hg e Ag) e outros componentes químicos em camadas de base, sub-base nos ensaios em batelada, conforme NBR 10005;
- Investigar a lixiviação de metais (supracitados) e outros componentes químicos em camadas de base, sub-base e base e sub-base nos ensaios em coluna ao longo do tempo e sob diferentes pressões, conforme ASTM D 4874;
- Caracterizar e classificar os agregados siderúrgicos e camadas de base e sub-base por meio de ensaios de lixiviação.

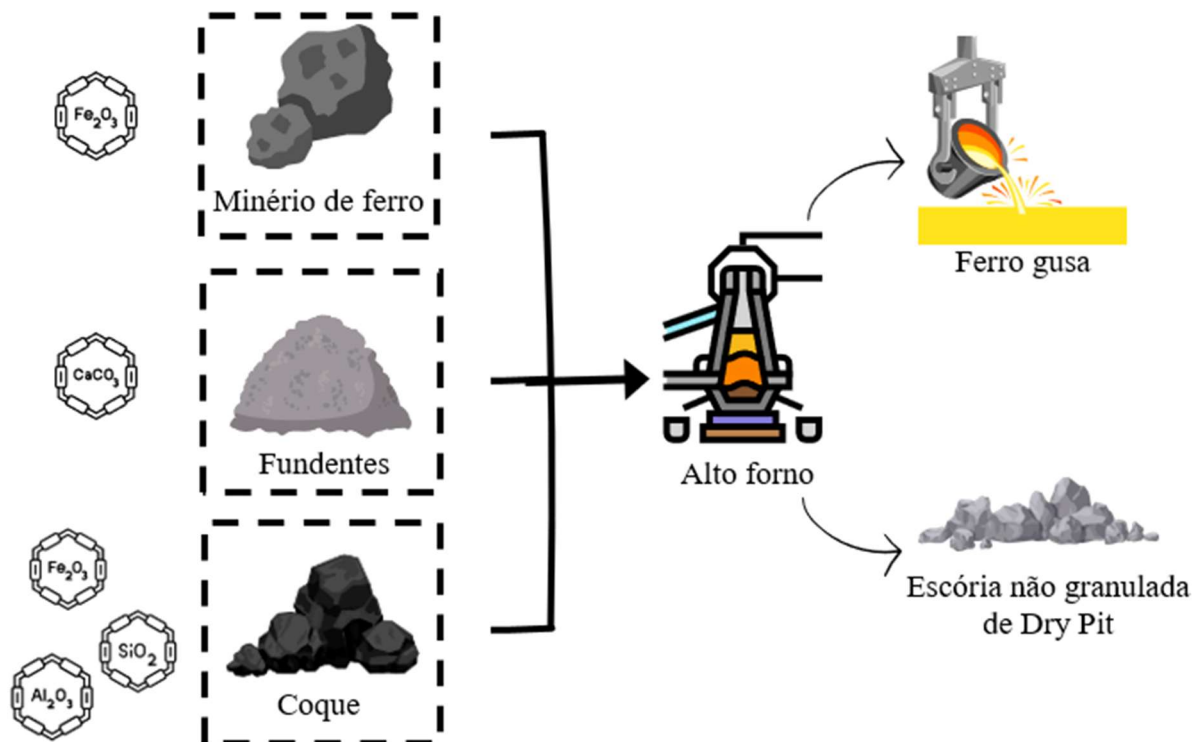
3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Aspectos ambientais e riscos com associados a reciclagem do Dry Pit em camadas de pavimento

O Dry Pit é um resíduo sólido gerado durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas. Na literatura, esse material é referido como escória de alto forno não granulada (Dimitrova, 1996; Dimitrova e Mehanjiev, 2000; Dias *et al.*, 2020; Cartaxo, 2022) ou escória de alto forno (Kusumawardani e Lin, 2014). Nesta dissertação, o termo Dry Pit é o utilizado para designar esse tipo de AS.

Esse resíduo sólido tem origem na produção de ferro-gusa em altos fornos, processo que utiliza principalmente minério de ferro, fundentes e carvão mineral como insumos (Figura 1). No estado líquido, a escória apresenta densidade inferior à do ferro-gusa, o que possibilita a separação de ambos. Posteriormente, a escória passa por um processo de resfriamento por exposição ao ar (Arcelormittal Monlevade, 2021; Meride e Ayenew, 2016).

Figura 1 — Processo de produção do agregado siderúrgico Dry Pit



Fonte: Adaptado de ArcelorMittal Monvelade (2021).

A composição química do Dry Pit consiste predominantemente em CaO e SiO₂. A presença desses e de outros compostos químicos está diretamente relacionada aos insumos utilizados durante o processo de produção de ferro-gusa (Arcelormittal Monlevade, 2021).

A Tabela 1 apresenta as composições químicas do Dry Pit reportadas na literatura (Figura 2). Os dados referem-se exclusivamente à escória de alto forno não granulada, conhecida como Dry Pit, não incluindo a escória de alto forno granulada, outro resíduo sólido gerado durante a produção de ferro-gusa em alto forno.

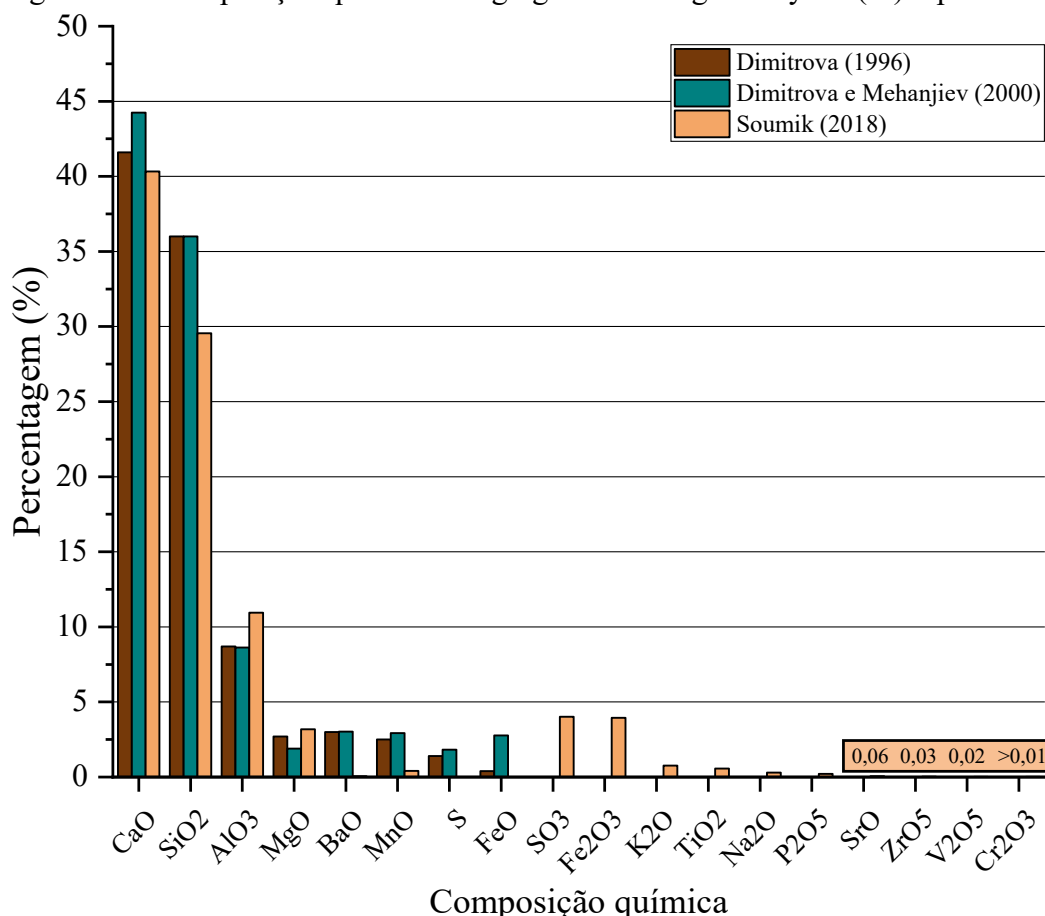
Tabela 1 — Composição química do agregado siderúrgico Dry Pit reportado na literatura

Composição química	Dimitrova (1996)	Dimitrova e Mehanjiev (2000)	Soumik (2018)
Al₂O₃ (%)	8,70	8,63	10,95
SiO₂ (%)	36,00	36,00	29,55
CaO (%)	41,60	44,25	40,33
MnO (%)	2,50	2,93	0,41
FeO (%)	0,40	2,77	-
Fe₂O₃ (%)	-	-	3,95
MgO (%)	2,70	1,90	3,18
S (%)	1,40	1,83	-
SO₃ (%)	-	-	4,02
Na₂O (%)	-	-	0,30
K₂O (%)	-	-	0,77
P₂O₅ (%)	-	-	0,21
BaO (%)	3,00	3,03	0,05
Cr₂O₃ (%)	-	-	< 0,01
SrO (%)	-	-	0,06
TiO₂ (%)	-	-	0,57
V₂O₅ (%)	-	-	0,02
ZrO₅ (%)	-	-	0,03

Fonte: elaborada pela autora (2025).

Nota: (-) significa não analisado.

Figura 2 — Composição química do agregado siderúrgico Dry Pit (%) reportado na literatura



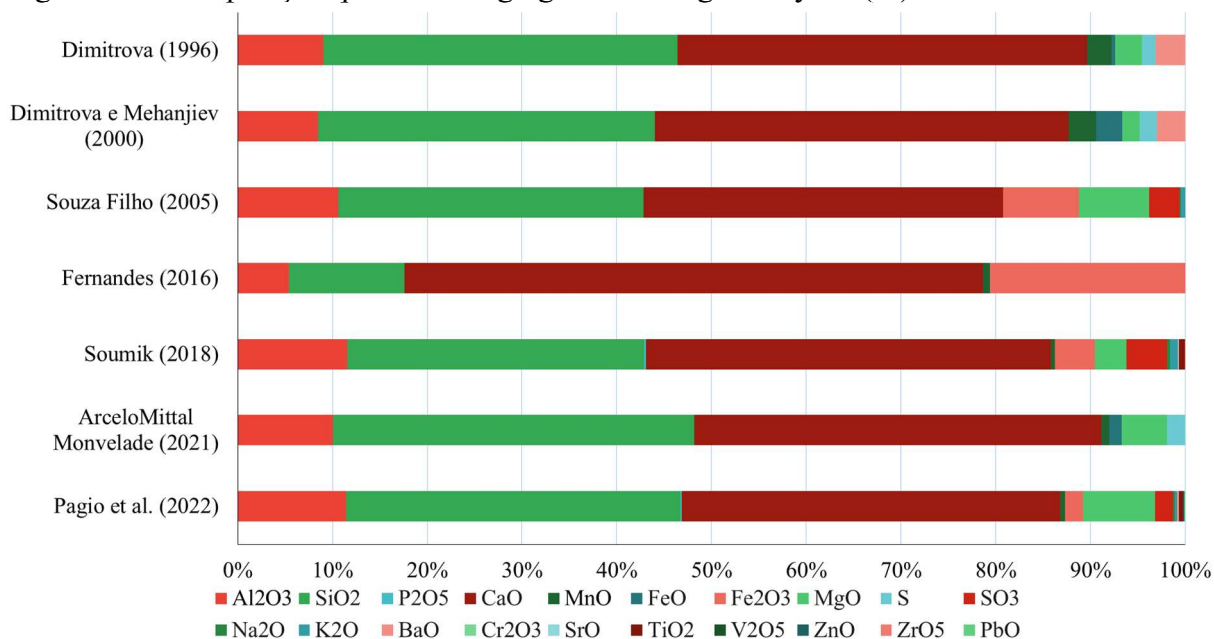
Fonte: elaborada pela autora (2025).

Dimitrova (1996), por meio de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), utilizando o modelo ARL-72000 S, identificou que os principais constituintes do Dry Pit são CaO (41,60%) e SiO₂ (36,00%) (Tabela 1). Essa predominância foi confirmada em estudo posterior do mesmo autor, que relatou valores semelhantes para esses óxidos - CaO (44,25%) e SiO₂ (36,00%) (Dimitrova e Mehanjiev, 2000). Esses resultados sugerem certa estabilidade na composição química do resíduo ao longo do tempo e entre diferentes lotes analisados.

Entretanto, Souza Filho (2005), conforme apresentado na Figura 3, observou uma composição que, embora mantenha a dominância de SiO₂ (30,25%) e CaO (35,6%), evidencia uma redução desses componentes em relação aos estudos de Dimitrova. Tal desvio pode estar relacionado a variações nos insumos utilizados na produção de ferro-gusa, como o tipo de minério de ferro e os fundentes empregados. Por outro lado, Fernandes (2016) apresenta uma perspectiva distinta das anteriores. Em sua análise, o autor relatou teores mais elevados de Fe₂O₃ (20,63%) e CaO (61,04%) (Figura 3), indicando uma composição química diferenciada. Essa discrepância levanta questionamentos quanto à uniformidade do Dry Pit, sugerindo que fatores

operacionais, técnicas de resfriamento e fontes de matérias-primas podem influenciar sua composição química. As divergências entre os autores destacam que, embora o Dry Pit seja frequentemente caracterizado pela predominância de CaO e SiO₂, sua composição pode apresentar variações, o que reforça a necessidade de estudos adicionais para melhor compreender os fatores que condicionam essa variabilidade.

Figura 3 — Composição química do agregado siderúrgico Dry Pit (%)



Fonte: elaborada pela autora (2025).

A concentração de íons metálicos no Dry Pit tem sido objeto de diversas análises. Dimitrova (1996) identificou concentrações de Ca (19,10 mg/L), Si (6,59 mg/L), Mg (0,55 mg/L), Al (0,68 mg/L), Fe (0,25 mg/L), Mg (0,48 mg/L), Ba (1,58 mg/L) e S (2,36 mg/L) no lixiviado do resíduo produzido na usina metalúrgica de Kremikovtsi, na Bulgária. Embora o estudo tenha sido conduzido há cerca de três décadas, os resultados apresentam semelhanças com dados mais recentes da ArcelorMittal Monlevade (2021), no Brasil, sugerindo consistência nas características químicas do Dry Pit, independentemente da localização geográfica ou do contexto industrial.

Conforme a norma brasileira NBR 10004 (ABNT, 2004a), a classificação dos resíduos sólidos como perigosos ou não perigosos, e inertes ou não inertes, depende de ensaios ambientais que avaliam seu potencial de contaminação. Ensaio de lixiviação e solubilização têm sido aplicados para esse propósito no caso do Dry Pit.

Lorenzoni (2005 *apud* Souza Filho, 2005) avaliou a toxicidade do Dry Pit com base na NBR 10005 (2005b), reportando concentrações de F⁻ (fluoreto, 1,8 mg/L), As (0,003 mg/L), Ba

(0,989 mg/L), Cd (0,0021 mg/L), Cr total (0,007 mg/L), Pb (0,0006 mg/L), Hg (0,0008 mg/L), Ag (0,004 mg/L) e Se (0,0052 mg/L). Todos os valores estavam abaixo dos valores permitidos máximos (VMP) estabelecidos pela referida norma (ABNT, 2004a). Além disso, a análise de pH apresentou uma média de 8,98, caracterizando o resíduo como não corrosivo. Contudo, estudos mais recentes, como o de Pagio *et al.* (2022), identificaram valores de pH mais elevados (12,5), classificando o Dry Pit como corrosivo.

No que se refere à solubilidade, Lorenzoni (2005 *apud* Souza Filho, 2005) relatou concentrações de Al (0,368 mg/L), As (não detectado), Ba (0,152 mg/L), Cd (0,0011 mg/L), Pb (0,0009 mg/L), Cu (0,008 mg/L), Cr total (0,0116 mg/L), Fe (0,06 mg/L), Mn (0,02 mg/L), Hg (0,0004 mg/L), Ag (0,0086 mg/L), Se (0,0010 mg/L), Na (17,15 mg/L), Zn (0,008 mg/L), Cl⁻ (cloreto, 72,24 mg/L), F⁻ (0,88 mg/L) e SO₄²⁻ (sulfato, 1099,9 mg/L). Alumínio e sulfato excederam o VMP, classificando o Dry Pit como resíduo sólido não perigoso, porém não inerte. Por outro lado, Pagio *et al.* (2022), embora também tenham identificado a superação do VMP para Se, observaram concentrações mais baixas para a maioria dos demais parâmetros, refletindo variações nos métodos de processamento industrial.

Ambos os estudos, de Lorenzoni (2005) e de Pagio *et al.* (2022), optaram por não analisar todos os parâmetros listados nos anexos da NBR 10004 (ABNT, 2004a), sem apresentar justificativa clara para a seleção dos compostos avaliados. Essa limitação evidencia a necessidade de maior padronização nos estudos sobre resíduos como o Dry Pit, considerando sua variabilidade composicional e potencial impacto ambiental.

Tais análises ressaltam que a caracterização química e ambiental do Dry Pit é essencial para subsidiar decisões quanto ao seu uso como agregado, prevenindo riscos de contaminação ambiental. Portanto, estudos futuros devem adotar uma abordagem mais abrangente e sistemática, de modo a garantir a viabilidade sustentável desse coproduto na construção civil.

3.2 Aspectos ambientais e riscos associados à reciclagem do BSSF em camadas de pavimento

A indústria siderúrgica exerce um papel significativo na economia global, contribuindo com um volume expressivo na produção de aço. Em 2023, a produção mundial de aço atingiu 1,89 bilhão de toneladas, sendo o Brasil responsável por aproximadamente 32 milhões de toneladas (IAB, 2024; World Steel Association, 2024). Esses números ilustram não apenas a escala de produção, mas também a complexidade dos processos envolvidos.

As empresas associadas ao IAB (2024) classificam a produção de aço bruto, com base no processo de fabricação do aço, em três tipos principais de fornos: Forno Linz-Donawitz a Oxigênio Básico (LD)/Oxigênio Básico (BOF), Elétrico e Forno de Otimização de Energia.

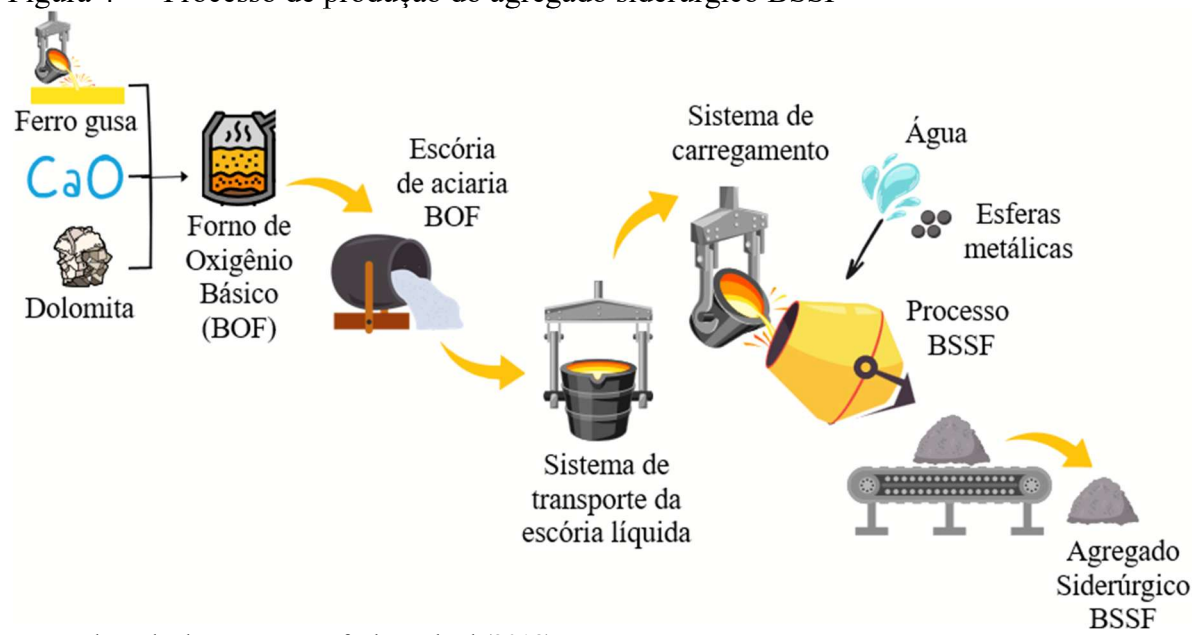
O agregado BSSF, resultante do processamento da escória LD/BOF, possui características específicas que merecem destaque. Durante o processo LD/BOF, o ferro-gusa é oxidado por insuflação de oxigênio, resultando na formação da escória BOF, a qual é separada do aço líquido com base nas diferenças de densidade. O processo BSSF, desenvolvido pela Baosteel Metal Company, visa minimizar a expansão volumétrica do material, causada principalmente pela presença de óxido de cálcio, que reage em contato com a água (Figura 4).

Diversos autores ressaltam a eficiência do processo BSSF. Chaves (2017), Campos, Rafael e Cabral (2018) e Benitez *et al.* (2022) enfatizam que o tratamento envolve a introdução da escória líquida em um tambor rotativo com esferas de aço e injeção de água, seguida por separação magnética. Este método reduz o teor de óxido de cálcio, diminui a expansão volumétrica e produz um agregado com forma esférica e granulometria mais fina. No entanto, alguns autores sugerem que a composição química do BSSF, especialmente os teores de óxidos como CaO e FeO, podem variar dependendo dos insumos utilizados na produção de aço, refletindo as especificidades de cada planta siderúrgica.

Ao se comparar as composições químicas descritas na literatura, observa-se variabilidade que ressalta a importância da padronização e controle no processo de produção. Essa heterogeneidade, ainda que compreensível devido às diferenças regionais e tecnológicas, representa um desafio para o uso consistente do BSSF como material alternativo em aplicações como pavimentação ou concreto.

Dessa forma, o processo BSSF se destaca como uma inovação tecnológica com relevante potencial ambiental e econômico, mas que também levanta questões sobre a uniformidade e a viabilidade técnica que merecem investigação contínua, tanto em âmbito acadêmico quanto industrial. Para contextualizar esses aspectos, a Tabela 2 apresenta as composições químicas do BSSF relatadas para diferentes estudos relacionados à literatura.

Figura 4 — Processo de produção do agregado siderúrgico BSSF



Fonte: adaptado de Campos, Rafael e Cabral (2018).

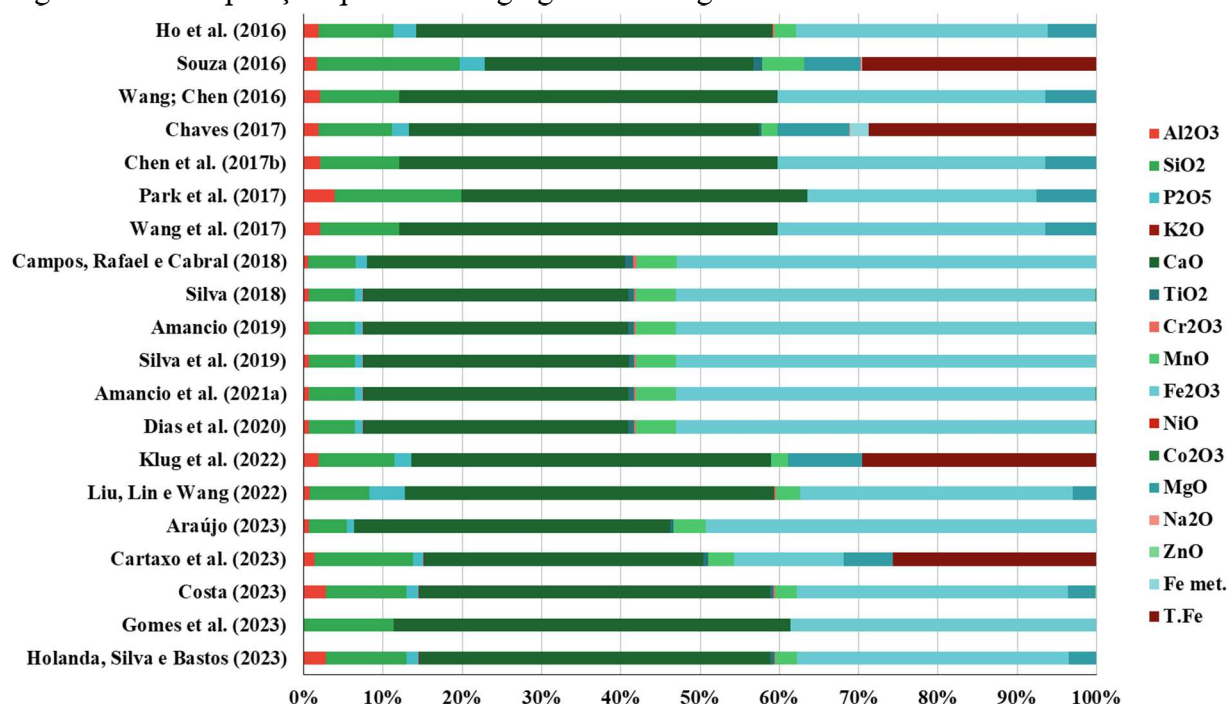
Tabela 2 — Composição química do agregado siderúrgico BSSF de acordo com a literatura

Parâmetro	Ho <i>et al.</i> (2016)	Souza (2016)	Wang e Chen (2016)	Chaves (2017)	Campos, Rafael e Cabral (2018)	Silva <i>et al.</i> (2019)	Amancio <i>et al.</i> (2021a)	Dias <i>et al.</i> (2020)	Liu, Lin e Wang (2022)	Araújo (2023)	Cartaxo <i>et al.</i> (2023)	Costa (2023)	Gomes <i>et al.</i> (2023)
Al ₂ O ₃ (%)	1,77	1,48	1,77	1,75	0,50	0,63	0,63	0,63	0,70	0,70	1,40	2,79	-
SiO ₂ (%)	8,76	16,40	8,76	8,86	6,00	5,84	5,84	5,84	7,60	4,78	13,20	10,32	10,00
P ₂ O ₅ (%)	2,63	2,87	-	1,98	1,50	1,01	1,01	1,01	4,40	0,96	1,40	1,49	-
K ₂ O (%)	-	0,003	*	-	-	0,04	0,04	0,003	*	-	-	0,04	-
CaO (%)	41,67	30,72	41,67	42,14	32,50	33,46	33,46	30,72	46,70	42,14	32,50	33,46	44,00
TiO ₂ (%)	-	1,09	-	0,26	1,00	0,63	0,63	0,63	-	1,09	-	0,26	-
Cr ₂ O ₃ (%)	0,21	-	-	-	0,50	0,21	0,21	0,21	0,20	-	-	0,20	-
MnO (%)	2,63	4,77	-	1,95	5,00	5,09	5,09	5,09	3,00	4,13	3,50	2,76	-
Fe ₂ O ₃ (%)	29,52	-	29,52	-	53,00	52,98	52,98	52,98	34,40	50,14	14,60	34,60	34,00
Co ₂ O ₃ (%)	-	-	-	-	-	-	0,12	0,12	-	-	-	-	-
MgO (%)	5,67	6,49	5,67	8,68	-	0,12	-	-	3,00	-	6,60	3,45	-
Na ₂ O (%)	-	0,15	-	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZnO (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,15	-
Fe (%)	-	-	-	2,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe total (%)	-	26,80	-	27,42	-	-	-	-	-	-	27,20	-	-
f-CaO (%)	1,84	-	1,84	-	-	-	-	-	-	-	1,80	-	-

Fonte: elaborada pela autora (2025). (*) significa não detectado. (-) significa não analisado. Gomes *et al.* [36] não especifica 12% da composição. Costa [28] determinou 0.01% Cl.

Diversos estudos investigaram a composição química do BSSF, destacando predominantemente a presença de CaO e Fe, ou especificamente Fe_2O_3 , conforme observado por Ho *et al.* (2016) Souza (2016), Wang e Chen (2016), Chaves (2017), Campos, Rafael e Cabral (2018), Amancio (2019), Silva *et al.* (2019), Dias *et al.* (2020), Amancio *et al.* (2021a) e Gomes *et al.* (2023) (Figura 5). No entanto, Park *et al.* (2014) relataram uma composição distinta, com maiores concentrações de Cr e Mg em relação aos demais componentes, discrepância atribuída ao método de produção do aço, uma vez que a usina analisada se localiza na Coreia do Sul, enquanto os demais estudos utilizaram BSSF proveniente da ArcelorMittal Pecém (Amancio *et al.*, 2020; Lima, 2022).

Figura 5 — Composição química do agregado siderúrgico BSSF de acordo com a literatura



Fonte: elaborada pela autora (2025).

Notas: Gomes *et al.* (2023) não especifica 12% da composição química.
Costa (2023) também obteve 0.01% Cl.

Embora o Cr seja identificado em algumas análises, a presença de outros metais tóxicos, como o Cd, é raramente detectada. Por exemplo, Park *et al.* (2016b) não observaram a presença de Cd em amostras de BSSF, mas identificaram concentrações de Cu (0,054 mg/L) e Zn (0,026 mg/L). De modo semelhante, Souza (2016), Wang e Chen (2016) e Chaves (2017) não detectaram Cr em suas respectivas análises. Tal inconsistência sugere que as concentrações de

metais podem variar de forma significativa em função da origem e dos processos de fabricação do BSSF.

As técnicas analíticas empregadas também desempenham um papel crucial na caracterização química do material. A maioria dos estudos recorreu à FRX para a identificação dos constituintes químicos do BSSF (Amancio *et al.* 2019; Amancio *et al.*, 2021a; Amancio *et al.*, 2021b; Benitez *et al.*, 2022; Chaves, 2017; Chen *et al.*, 2017a; Lima, 2022). Por outro lado, Wang e Chen (2016) e Wang *et al.* (2017) também aplicaram o Procedimento de Lixiviação Característica de Toxicidade, conforme método da EPA. Já Liu, Lin e Wang (2022) utilizaram Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia (EDS) e identificaram elementos como C, O, Mg, Al, Si, Ca, Mn e Fe, sem, contudo, detectar a presença de Cr.

Outro aspecto crítico refere-se à avaliação ambiental do material. Estudos conduzidos por Cartaxo (2022) e Costa (2023) indicam que, embora o BSSF atenda aos limites de lixiviação estabelecidos para diversos constituintes, os testes de solubilização frequentemente revelam concentrações que excedem o VMP para metais como Al, Ba, Fe e Hg. Esses resultados caracterizam o BSSF como um resíduo sólido não inerte, o que pode restringir sua utilização em aplicações na construção civil, como concreto e pavimentação.

Adicionalmente, a variabilidade observada entre os resultados de diferentes estudos, como as discrepâncias nas concentrações de metais detectadas por Park *et al.* (2014) e Costa (2023), evidencia a necessidade de maior padronização nos métodos de caracterização e ensaio. Embora a Portaria nº 52 de 2021 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2021a), bem como normas internacionais, forneçam diretrizes para a classificação de resíduos, há uma lacuna na compreensão dos efeitos a longo prazo do uso de BSSF em diferentes contextos ambientais e geográficos.

Dessa forma, embora avanços relevantes tenham sido alcançados na compreensão da composição química e dos impactos ambientais do BSSF, persistem lacunas significativas, especialmente no que tange à influência de diferentes processos de fabricação e às interações químicas prolongadas no ambiente. Tais questões devem ser objeto de investigações futuras, a fim de assegurar a segurança e a sustentabilidade do uso do BSSF em múltiplas aplicações.

3.3 Parâmetros químicos analisados em agregados de siderúrgicos

A influência da composição química do Dry Pit e do BSSF, bem como de produtos desenvolvidos com esses agregados, no meio ambiente tem sido extensamente investigada

em estudos recentes. Com base nas diretrizes da NBR 10004 (ABNT, 2004a), Cartaxo (2022) e Costa (2023) concluíram que as misturas de concreto e pavimento com BSSF, respectivamente, não lixiviar os parâmetros químicos tóxicos listados na norma acima do VMP. Da mesma forma, Lorenzoni (2005, *apud* Souza Filho, 2005) e Pagio *et al.* (2022) caracterizaram o Dry Pit como um resíduo não perigoso e não inerte, semelhante ao BSSF.

Em misturas de concreto com diferentes teores de BSSF (0%, 20%, 40%, 60% e 80% em volume), não foram detectados elementos como Ag, As, Cd, Pb, Se e Hg nos ensaios de lixiviação (2022). Costa (2023) também não detectou As no extrato lixiviado do BSSF, nem Cd, Pb ou Se na mistura de pavimento contendo 50% de BSSF.

Em relação ao Ba, elemento regulamentado com VMP de 70 mg/L para extrato lixiviado (ABNT, 2004a), os valores encontrados foram significativamente inferiores a esse limite. No concreto com 60% de BSSF, que apresentou a maior concentração de Ba entre as misturas analisadas (0,218 mg/L), a concentração foi 321 vezes menor que o VMP (Cartaxo, 2022). Costa (2023) identificou uma concentração de Ba no BSSF (6,6 mg/L) aproximadamente 11 vezes menor que o limite regulamentado, enquanto na mistura de pavimento, essa concentração foi 9 vezes menor (7,74 mg/L). Da mesma forma, o Dry Pit analisada por Lorenzoni (2005, *apud* Souza Filho, 2005) e Pagio *et al.* (2022) apresentaram concentrações de Ba de 0,989 mg/L e 1,99 mg/L, respectivamente, ambas bem abaixo do VMP.

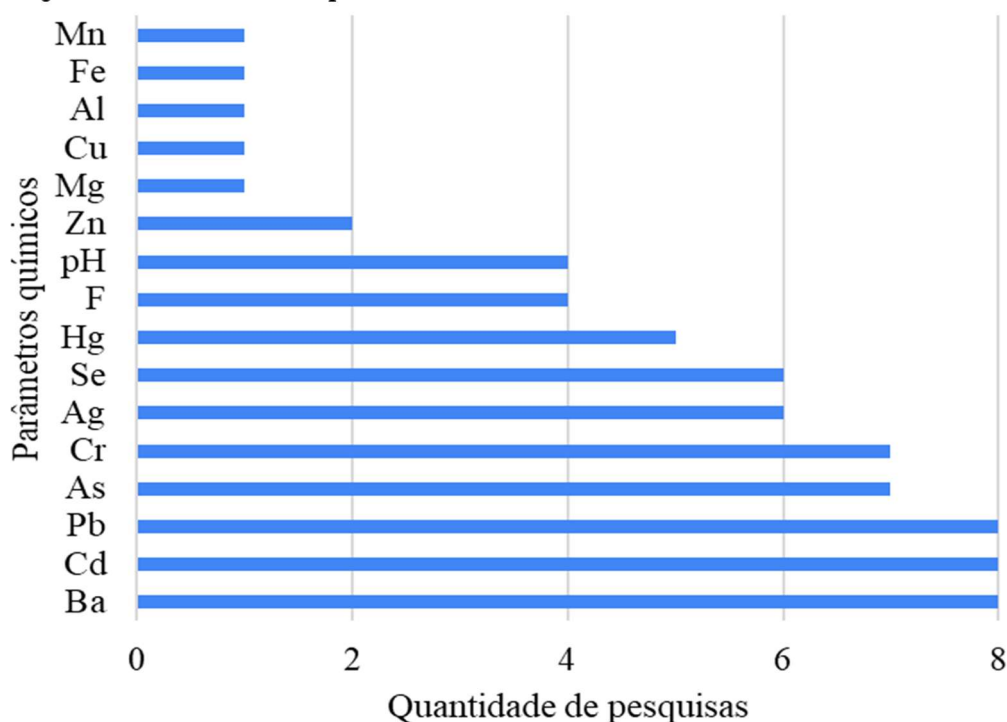
O Cr total também apresentou concentrações muito abaixo do limite permitido. No concreto com BSSF o valor identificado foi 833 vezes menor que o VMP (5,0 mg/L). Embora tenha havido um aumento na mistura com solo (0,004 mg/L), o valor permaneceu bem abaixo do limite. No concreto com BSSF, a maior concentração de Cr total identificada foi de 0,05 mg/L, 100 vezes menor que o VMP (Cartaxo, 2022). Costa (2023) também relatou baixas concentrações de Cr total no extrato lixiviado do BSSF.

Em relação ao Dry Pit, Lorenzoni (2005) *apud* Souza Filho (2005) encontrou uma concentração total de Cr de 0,007 mg/L, enquanto Pagio *et al.* (2022) identificaram 0,024 mg/L, ambos os valores bem abaixo do VMP. No entanto, a análise da Figura 6 destaca a relevância dada à detecção de Cr em ensaios ambientais, visto que 7 de 8 estudos realizaram essa avaliação.

Apesar dos resultados positivos em relação à segurança ambiental do BSSF e do Dry Pit em termos de lixiviação de metais tóxicos, algumas lacunas permanecem. Em particular, a variabilidade nos métodos analíticos e nos materiais estudados limita a generalização dos resultados. Além disso, há uma escassez de estudos que avaliem o impacto a longo prazo desses

materiais sob diversas condições ambientais, bem como a interação entre seus componentes químicos e o meio ambiente. A padronização dos ensaios e a expansão do escopo das análises são passos importantes para consolidar o uso seguro e sustentável desses agregados em diversas aplicações.

Figura 6 — Parâmetros químicos analisados de acordo com a literatura



Fonte: elaborada pela autora (2025).

O parâmetro químico detectado no extrato lixiviado de BSSF que apresentou maior proximidade com o VMP foi o Pb, com concentração de 0,27 mg/L, seguido pelo Cd, com 0,07 mg/L (Costa, 2023). Esses valores, apresentados na Tabela 3, são comparados aos limites de concentração aceitáveis estabelecidos por seis diferentes normas regulatórias.

Embora o Cd não tenha sido detectado na mistura de pavimento analisada, é importante destacar que esse elemento apresenta o menor VMP entre os parâmetros químicos avaliados (0,5 mg/L). Esse limite extremamente restritivo reflete o alto nível de toxicidade do Cd, o que requer atenção especial em estudos futuros que visem avaliar a segurança ambiental de materiais contendo BSSF.

Apesar das concentrações de Pb e Cd no extrato lixiviado de BSSF estarem abaixo dos limites regulatórios, a proximidade com o VMP reforça a necessidade de monitoramento contínuo e rigoroso desses elementos em aplicações práticas. Além disso, existem lacunas

quanto à influência de fatores ambientais, como alterações de pH, temperatura e tempo de exposição, na mobilidade e no potencial de lixiviação desses metais. Estudos adicionais que considerem essas variáveis poderiam fortalecer a compreensão do comportamento químico do BSSF e garantir seu uso seguro em larga escala.

Tabela 3 — Valores máximos permitidos dos parâmetros químicos

Normas	Dureza total (temporária) (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr total (mg/L)	Fe total (mg/L)	Pb (mg/L)	pH	CE (μS/cm)
NBR 10004^a	-	0,50	5,00	-	1,00	2 a 12,5	-
EPA^a	-	1,00	5,00		5,00	-	-
CONAMA 420^b	-	0,005	0,05	2,45	0,01	-	-
Norma holandesa^c	-	0,0004	0,001	-	0,015	-	-
EPA^d	-	0,005	0,10	-	0,015	-	-
CONAMA 357	-	-	-	-	-	6 a 9	-
Diretiva europeia	-	-	-	-	-	-	2500,00
Portaria nº 888	300,00	-	-	-	-	-	-

Fonte: elaborada pela autora (2025).

Notas: ^aConcentração máxima de metais (mg/L) para características de toxicidade em anexo F; ^bValores orientadores para águas subterrâneas; ^c Valores alvo para águas rasas; ^d Regulamentos nacionais de água potável primária.

A EPA destaca as consequências para a saúde da exposição prolongada a metais tóxicos na água potável acima dos limites estabelecidos. A exposição ao cádmio (Cd) em concentrações superiores a 0,005 mg/L pode causar danos renais, enquanto o contato com o cromo total (Cr) em concentrações acima de 0,1 mg/L pode levar ao desenvolvimento de dermatite alérgica (EPA, 2009).

Para o chumbo (Pb), a EPA adota uma política de tolerância zero (0 mg/L na água potável). Essa diretriz reflete a ausência de qualquer nível seguro de exposição ao chumbo para humanos. Em crianças, mesmo traços podem causar consequências graves, como alterações comportamentais, dificuldades de aprendizagem, redução do quociente de inteligência (QI), hiperatividade, atrasos no desenvolvimento físico, problemas auditivos e anemia. Em casos mais graves, a exposição pode levar a convulsões, coma e até mesmo à morte (EPA, 2024).

Em relação ao CaO, sua presença é predominante na composição química do BSSF, conforme demonstrado em análises de FRX, com concentrações de 44% (Chaves, 2017) e 45% (Costa, 2023).

A concentração de cálcio (Ca), isoladamente ou em conjunto com magnésio (Mg), afeta diretamente a saúde humana. Aproximadamente 95% do cálcio no corpo humano é encontrado nos ossos e dentes, enquanto o magnésio é distribuído nos ossos, músculos e tecidos, destacando a importância desses elementos (Costa, 2023). A ingestão combinada de Ca e Mg está associada à redução da mortalidade por doenças cardiovasculares, embora a concentração ideal desses elementos ainda seja desconhecida (Rylander, 2014).

A água potável é uma fonte significativa de Ca e Mg para o organismo. A Organização Mundial da Saúde (OMS) não estabelece limites para esses elementos na água, considerando que os valores dependem de diversos fatores, incluindo as condições de saúde dos consumidores. No entanto, a ingestão excessiva de Ca e Mg pode ser prejudicial a indivíduos com doenças renais e, especificamente no caso do Mg, causar diarreia (World Health Organization, 2009).

A soma das concentrações de Ca e Mg gera a dureza temporária da água, que pode interferir na formação de espuma de sabão, causar incrustações em tubulações e estar associada a problemas de saúde relacionados a esses elementos (WHO, 2009). No Brasil, a Portaria GM/MS nº 888 estabelece um limite de 300 mg/L para dureza total na água destinada ao consumo humano (Brasil, 2021b).

Segundo Kozisek (2020), diferentes países recomendam limites máximos para dureza total temporária em CaCO_3 , como Chipre (150 mg/L), Polônia (500 mg/L) e Portugal (500 mg/L). Em Portugal, o Decreto-Lei nº 306/2007 estabelece limites desejáveis de 500 mg/L para dureza total e 100 mg/L e 50 mg/L para Ca e Mg, respectivamente (Portugal, 2007).

Os metais e ânions também afetam a condutividade elétrica (CE) da água, sendo diretamente proporcionais. A CE mede a capacidade de uma amostra de conduzir corrente

elétrica, relacionada ao processo iônico (Meride e Ayenew, 2016). A Diretiva da União Europeia 2020/2184 estabelece o limite de 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para a condutividade elétrica da água potável a 20°C (União Europeia, 2020).

3.4 Aplicação de agregados siderúrgicos

3.4.1 Agregado siderúrgico BSSF

Nos estudos apresentados no Quadro 1, aplicações BSSF são desenvolvidas em algum produto ou processo.

Quadro 1 — Pesquisas conduzidas com o uso do BSSF

(continua)

Referências	Uso	Instituição	País
Kusumawardani (2014)	Agregado graúdo (AG) em concreto asfáltico poroso	<i>National Central University</i> (NCU)	Taiwan
Kusumawardani, Lin (2014)	AG em concreto asfáltico poroso	NCU	Taiwan
Mudersbach e Motz (2014)	Recuperação de metais	<i>TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky</i> (TK)	Alemanha
Park <i>et al.</i> (2014)	Adsorvente para remoção de fósforo em águas residuais	<i>Institute of Agriculture and Life Science</i> (IALS)	Coreia do Sul
Oujing (2015)	Jateamento abrasivo	<i>Baosteel Technical Research</i> (BTR)	China
Pramesthi (2015)	AG em concreto asfáltico de grau denso (DGAC)	NCU	Taiwan
Ho <i>et al.</i> (2016)	Agregado fino (AF) em argamassa composta	<i>Kao Yuan University of Applied Sciences</i> (KYUAS)	Taiwan

Quadro 1 — Pesquisas conduzidas com o uso do BSSF

(continua)

Referências	Uso	Instituição	País
Park <i>et al.</i> (2016a)	Remoção de fósforo (P) e obtenção de pH quase neutro em <i>wetlands</i> construídas	<i>Institute of Agriculture and Life Science</i>	Coreia do Sul
Park <i>et al.</i> (2016b)	Adsorção de metais tóxicos de águas residuais	<i>Gyeongsang National University (GNU)</i>	Coreia do Sul
Souza (2016)	Obtenção de óxido de ferro	UFC	Brasil
Wang e Chen (2016)	AF em materiais controlados de baixa resistência (CLSM)	<i>National Kaohsiung University of Applied Sciences (NKUAS)</i>	Taiwan
Xiang <i>et al.</i> (2016)	Agregado em material cimentício isento de cimento para uso em pavimentação	<i>Wuhan University of Science and Technology (WUST)</i>	China
Baune e Thöming (2017)	Agregado em tijolos de cimento Portland	<i>University of Bremen (UB)</i>	Alemanha
Chaves (2017)	Obtenção de CaO e Fe	UFC	Brasil
Chen <i>et al.</i> (2017a)	AG em DGAC	NCU	Taiwan
Chen <i>et al.</i> (2017b)	AF em argamassa composta	<i>National Quemoy University (NQU)</i>	Taiwan
Park <i>et al.</i> (2017)	Adsorvente para remoção de fosfato (PO_4^{3-})	<i>Institute of Agriculture and Life Science</i>	Coreia do Sul
Wang <i>et al.</i> (2017)	AF em argamassa composta	<i>Cheng Shiu University (CSU)</i>	Taiwan
Campos, Rafael e Cabral (2018)	AF em argamassa de revestimento simples	UFC	Brasil

Quadro 1 — Pesquisas conduzidas com o uso do BSSF

(continua)

Referências	Uso	Instituição	País
Silva (2018)	AF em argamassa de revestimento composta	UFC	Brasil
Amancio (2019)	AF em argamassa de revestimento simples e composta	UFC	Brasil
Silva <i>et al.</i> (2019)	AF em argamassa de revestimento composta	UFC	Brasil
Amancio <i>et al.</i> (2020)	AF em argamassa de revestimento simples e composta	UFC	Brasil
Dias <i>et al.</i> (2020)	Substituição parcial do cimento Portland	UFC	Brasil
Maciel, Sousa e Cabral (2020)	AG em blocos intertravados de concreto	UFC	Brasil
Amancio <i>et al.</i> (2021a)	AF em argamassa de revestimento simples e composta	UFC	Brasil
Amancio <i>et al.</i> (2021b)	AF em argamassa de revestimento simples e composta	UFC	Brasil
Benitez <i>et al.</i> (2022)	AF e AG em bloco concreto	Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)	Brasil
Cartaxo (2022)	AF e AG em concreto	UFSCar	Brasil
Lima (2022)	AF em argamassa de revestimento simples e composta	UFC	Brasil
Liu, Lin e Wang (2022)	AF em concreto asfáltico	<i>Feng Chia University</i> (FCU)	Taiwan

Quadro 1 — Pesquisas conduzidas com o uso do BSSF

(continua)

Referências	Uso	Instituição	País
Klug <i>et al.</i> (2022)	Obtenção de Fe_2O_3 e CaO	UFC	Brasil
Zhou <i>et al.</i> (2022)	Remoção de fósforo em wetlands construídas	<i>University of Illinois at Urbana-Champaign</i> (UIUC)	Estados Unidos
Araújo (2023)	AF e AG em concreto álcali-ativado	UFC	Brasil
Bezerra <i>et al.</i> (2023)	AF e AG em concreto geopolimérico	UFC	Brasil
Cartaxo <i>et al.</i> (2023)	AG em concreto	UFSCar	Brasil
Costa (2023)	AG em camadas de pavimento	IFCE	Brasil
Gomes <i>et al.</i> (2023)	AG em camadas de pavimento	IFCE	Brasil
Holanda, Silva e Bastos (2023)	Filler em mistura asfáltica	IFCE	Brasil
Wang <i>et al.</i> (2023)	AF em CLSM	<i>Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd.</i> (TMEDRI)	China
Costa <i>et al.</i> (2024)	AG em camadas de pavimento	UFC	Brasil
Pimentel <i>et al.</i> (2024)	AF e AG em concreto permeável	UFC	Brasil
Silva, Freitas e Campos (2024)	AG em cimento	Universidade Estadual do Ceará	Brasil
Souza <i>et al.</i> (2024a)	Precursor em ligante álcali-ativado	UFC	Brasil

Quadro 1 — Pesquisas conduzidas com o uso do BSSF (conclusão)

Referências	Uso	Instituição	País
Souza <i>et al.</i> (2024b)	Precursor em ligante álcali-ativado	UFC	Brasil
Araújo <i>et al.</i> (2025)	AF e AG em concreto álcali-ativado	UFC	Brasil
Sousa (2025)	Insumo para cimento supersulfatado	UFC	Brasil

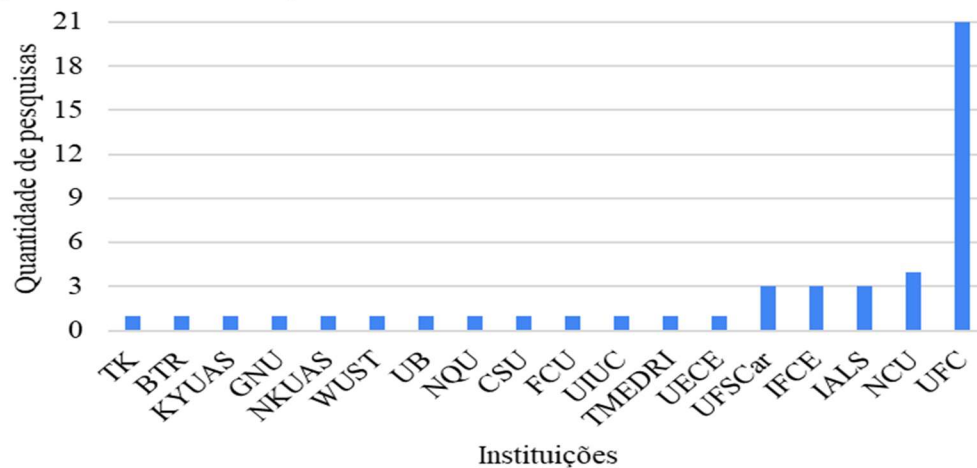
Fonte: elaborado pela autora (2025).

Poucos trabalhos listados no Quadro 1 discutem as consequências ambientais do uso de BSSF. A maioria se concentra em apresentar a viabilidade da aplicação deste coproduto em um produto ou processo (Figura 8), com alguns estudos detalhando apenas a composição química (Chaves, 2017; Campos, Rafael e Cabral, 2018; Dias *et al.* 2020; Amancio *et al.* 2021a; Araújo, 2023).

O tratamento BSSF, aplicado à escória BOF, é empregado exclusivamente na siderúrgica da ArcelorMittal Pecém (Dias *et al.* 2020), localizada no Brasil. Consequentemente, 60,4% dos estudos encontrados sobre a aplicação de agregados BSSF em produtos ou para obtenção de materiais presentes em sua composição foram realizados no Brasil. Além da presença da ArcelorMittal Pecém no país, isso também é resultado de projetos promovidos por esta siderúrgica em parceria com instituições de ensino.

Como resultado, há um interesse crescente em ampliar o conhecimento sobre BSSF. Atualmente, de acordo com os estudos encontrados e a Figura 7, a UFC publicou vinte estudos, enquanto o IFCE publicou quatro.

Figura 7 — Parâmetros químicos analisados de acordo com a literatura



Fonte: elaborada pela autora (2025).

A maioria dos estudos conduzidos na UFC aplicou BSSF como agregado miúdo em argamassas de revestimento simples e mistas. A argamassa simples consiste em cimento e agregado, enquanto na argamassa mista é adicionada cal (Campos, Rafael e Cabral, 2018; Silva, 2018; Amancio, 2019; Amancio *et al.* 2020; Amancio *et al.* 2021a; Amancio *et al.*, 2021b; Silva *et al.*, 2019; Lima, 2022).

Outras pesquisas conduzidas nesta instituição concentram-se na produção de óxidos a partir de BSSF (Figura 8). Como o BSSF é composto principalmente de óxidos, pesquisadores estão investigando métodos para obter Fe_2O_3 , FeO e CaO a partir deste material (Souza, 2016; Chaves, 2017; Klug *et al.*, 2022).

3.4.2 Agregado siderúrgico Dry Pit

No Quadro 2 abaixo, observa-se que existem poucos estudos envolvendo o uso de Dry Pit em processos que visam o aproveitamento deste coproduto. Além disso, a pesquisa limita-se a quatro países: Brasil, Bulgária, Canadá e Romênia, evidenciando a natureza incipiente deste tema.

Quadro 2 — Pesquisas conduzidas com o uso do Dry Pit

Referências	Uso	Instituição	País
Dimitrova (1996)	Remoção de Cu, Ni e Zn na purificação de soluções aquosas	Universidade de Arquitetura, Engenharia Civil e Geodésia	Bulgária
Dimitrova e Mehanjiev (2000)	Remoção de Cu, Ni e Zn na purificação de efluentes industriais	Universidade de Arquitetura, Engenharia Civil e Geodesia	Bulgária
Silva, Costa e Fialho (2018)	AF e AG em concreto não estrutural	Faculdade College	Brasil
Soumik (2018)	Remoção de Cd, Fe, Mn e Zn de efluentes industriais	Universidade Dalhousie	Canadá
Nicula, Corbu, Iliescu (2019)	AF em argamassa de cimento	Universidade Técnica de Cluj-Napoca	Romênia
Nicula <i>et al.</i> (2021a)	AF em concreto para pavimento	Universidade Técnica de Cluj-Napoca	Romênia
Nicula <i>et al.</i> (2021b)	AF em concreto para pavimento e proteção contra corrosão	Universidade Técnica de Cluj-Napoca	Romênia
Ribeiro (2022)	AF e AG em pavimento rígido	Instituto Federal do Espírito Santo	Brasil

Fonte: elaborado pela autora (2025).

É importante ressaltar que a terminologia utilizada pela ArcelorMittal Monlevade, referindo-se a Dry Pit como escória não granulada, não é consensual entre os autores. Dimitrova e Mehanjiev (2000) e Nicula, Corbu e Iliescu (2019) referem-se ao material como escória de

alto-forno não granulada, enquanto Soumik (2018) a descreve como escória de alto-forno resfriada a ar, enfatizando o método de resfriamento e distinguindo-a da escória de alto-forno granulada.

Nos oito documentos, foram identificadas duas aplicações deste material: na remoção de compostos químicos de efluentes líquidos e como AS. No Brasil, o foco está na reciclagem do agregado Dry Pit como agregado. Souza Filho (2005) aplicou o Dry Pit como agregado miúdo em tijolos prensados, obtendo viabilidade técnica com base nos resultados obtidos em ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água dos tijolos, durabilidade e resistência à escovação.

No desenvolvimento de concreto não estrutural com agregados miúdos e graúdos do Dry Pit, Silva, Costa e Fialho (2018) encontraram resistência à compressão inadequada, maior consumo de água e segregação do material. Os autores atribuíram esses resultados ao fato de a distribuição granulométrica do agregado miúdo do Dry Pit não atender aos limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo especificados na NBR 7211 (ABNT, 2005). Assim, em um novo estudo, torna-se relevante investigar a viabilidade técnica e econômica do beneficiamento do Dry Pit para a obtenção de um agregado miúdo com granulometria adequada para este tipo de concreto.

No entanto, Nicula, Corbu e Iliescu (2019), ao utilizar agregado miúdo de Dry Pit em argamassa de cimento e escória de alto forno como clínquer, observaram melhor compactação e resistência aos ciclos de gelo-degelo em comparação com argamassas feitas com materiais convencionais (cimento Portland e agregado natural).

O Quadro 2 apresenta o uso de Dry Pit para a remoção de compostos químicos de efluentes líquidos. Dimitrova (1996) analisou a remoção dos íons Cu, Ni e Zn de soluções aquosas, obtendo uma redução desses compostos. Em 2020, Dimitrova e Mehanjiev (2000) estudaram a adsorção desses mesmos íons em soluções aquosas, concluindo que a presença de fases bem cristalizadas na composição físico-química do Dry Pit influencia positivamente na absorção desses íons.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O programa experimental desta pesquisa foca nos ensaios de lixiviação em batelada e em coluna. Este último se dará por meio do aparelho de lixiviação em coluna que foi desenvolvido nesta dissertação.

4.1 Materiais Utilizados

4.1.1 *Materiais para Camadas de Pavimento*

Os materiais empregados nas camadas de pavimento com o agregado siderúrgico BSSF, solo natural (SN) e Dry Pit (Figura 9) foram compactados em permeâmetro e colunas de aço inox no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE).

Esses corpos de prova (CPs) foram analisados em ensaios que obtiveram seus extratos lixiviados a partir de ensaios de lixiviação em batelada e em coluna (Figura 9). Dessa forma, foi possível detectar a concentração de metais de camadas de base e sub-base de pavimentos contendo os agregados siderúrgicos BSSF e Dry Pit.

Figura 9 — Corpos de prova com BSSF e solo natural



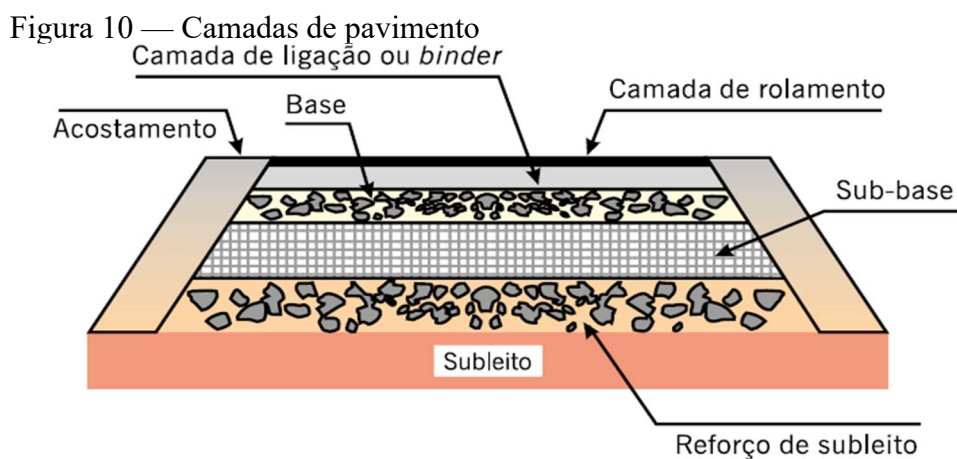
Fonte: elaborada pela autora (2024).

Os CPs com BSSF utilizados nesta pesquisa foram fabricados com solo arenoso com comportamento laterítico originado no distrito de Catuana, município de Caucaia, no estado do Ceará (Costa, 2023). O agregado empregado foi o agregado siderúrgico *Baosteel Slag Short Flow* (BSSF). O AS foi coletado dia 25 de janeiro de 2023 e analisado física, mecânica, mineralógica, química e ambientalmente (Costa, 2023).

Esse agregado e o Dry Pit foram obtidos da empresa SR Refratário LTDA, empresa parceira da indústria siderúrgica ArcelorMittal Pecém que produz esses resíduos. Essa indústria está instalada no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), localizada no distrito de Pecém, no município de São Gonçalo do Amarante, estado do Ceará (IAB, 2023).

Foi desenvolvida uma mistura contendo 50% de BSSF e 50% de SN, utilizando energia proctor modificada (M_{BSSFm}) e intermediária (M_{BSSFi}) na compactação. As camadas de base e sub-base, especificamente, podem ser compactadas nas energias de compactação proctor normal, intermediária e modificada, de acordo com o peso e altura de queda do equipamento chamado soquete, número de camadas a serem compactadas e de golpes do soquete sobre o solo a ser compactado dentro de um cilindro (ABNT, 2020).

Os pavimentos rodoviários são definidos como superestruturas assentadas sobre o subleito ou infraestrutura compostas por camadas sucessivas, dentre as quais se destacam o revestimento, a base e a sub-base (BRASIL, 2006), conforme ilustrado na Figura 10. A camada de revestimento, situada sobre a base, é projetada com o propósito de suportar os impactos decorrentes do tráfego veicular, bem como distribuir os esforços verticais para as camadas inferiores. A sub-base, por sua vez, localiza-se imediatamente sobre o subleito, desempenhando funções semelhantes às da base, com vistas à adequada transmissão das cargas e à durabilidade do pavimento (DNIT, 2010; DNIT, 2022).



Fonte: Bernucci *et al.* (2022).

Em estudo anterior, ensaios de caracterização física, mecânica e ambiental foram executados com a M_{BSSF} , constatando, viabilidade técnica e ambiental dessa mistura em camadas de pavimento (Costa, 2023).

A base e sub-base com Dry Pit foram produzidas apenas com esse AS em duas granulometrias distintas, na energia de compactação modificada. As duas granulometrias do Dry Pit que são utilizadas nesta pesquisa são denominadas de agregado siderúrgico Dry Pit 0 (AS0), que possui a maioria dos grãos com dimensões até 10 mm, e agregado siderúrgico Dry Pit 1 (AS1), com maioria dos grãos entre 10 mm e 50 mm. Dessa forma, foram desenvolvidas misturas com Dry Pit 65% de AS0 e 35% de AS1 ($M_{DryPitm}$).

4.2 Métodos Empregados

Esta pesquisa se divide, de maneira geral, em 4 etapas. Na 1ª etapa foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica da M_{BSSFm} , M_{BSSFi} e $M_{DryPitm}$ e ensaios de caracterização química e ambiental da BSSF, SN, Dry Pit e das três misturas. A 2ª etapa constituiu na construção do aparelho de coluna para a realização do ensaio de lixiviação em coluna. Na 3ª etapa foram realizados os ensaios de lixiviação em coluna M_{BSSFm} , M_{BSSFi} e $M_{DryPitm}$ com as coletas dos extratos lixiviados e suas caracterizações químicas. Na 4ª etapa foi realizada a avaliação da lixiviação de metais e outros compostos químicos das camadas de base e sub-base com BSSF e Dry Pit (Figura 11).

Figura 11 — Fluxo do programa experimental da pesquisa



Fonte: elaborada pela autora (2025).

O desenvolvimento experimental desta pesquisa objetiva mostrar os resultados alcançados com o ensaio de lixiviação em batelada e em coluna, por meio do aparelho de lixiviação em coluna desenvolvido nesta dissertação. Esses ensaios foram realizados com o BSSF, Dry Pit, SN, M_{BSSFm} , M_{BSSFi} ; $M_{DryPitm}$; coluna com base e sub-base com M_{BSSFm} e M_{BSSFi} e coluna com base e sub-base com $M_{DryPitm}$ (Quadro 3).

Quadro 3 — Ensaios realizados por amostra

Amostras	Lixiviação em coluna	Lixiviação em batelada	Solubilização (NBR 10006)
BSSF		X	
Dry Pit		X	X
Base com M_{BSSFm}	X	X	
Sub-base com M_{BSSFi}	X		
Base e sub-base com M_{BSSFm} e M_{BSSFi}	X		
Base/ sub-base com $M_{DryPitm}$	X		
Base e sub-base com $M_{DryPitm}$	X		

Fonte: elaborada pela autora (2025).

Para os ensaios de lixiviação em batelada com BSSF e M_{BSSF} se procedeu a realização da análise dos metais Ca, Cd, Cr total, Fe total, Mg e Pb. No ensaio em batelada com Dry Pit/ M_{DryPit} foram detectados os parâmetros químicos Ar, Ba, Cd, Pb, Cr total, Fl^- , Hg, Ag, Ca e Mg e no ensaio de solubilização Al, As, Ba, Cd, Pb, CN^- , Cl^- , Cu, Cr total, Fe, Fl^- , Mn, Hg, NO_3 (como nitrogênio), Ag, Se, Na, SO_4^{2-} , surfactantes aniônicos e Zn. Nos ensaios de lixiviação em coluna foram analisados os mesmos parâmetros que foram determinados no solubilizado, Ca e Mg. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Análise de Traços da Universidade

Federal do Ceará (UFC); no Laboratório de Tecnologia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará; e no Laboratório Akua Lab.

As normas que referenciam os ensaios realizados e as análises dos resultados obtidos são apresentadas no Quadro 4 abaixo.

Quadro 4 — Normas de referência para a realização dos ensaios e análise dos resultados

Caracterização	Ensaio	Norma	Material
Física	Preparação de amostra	DNER-ME 041/94	Solo e agregados
	Granulometria por peneiramento	DNER-ME 080/94	Mistura
	Permeabilidade	NBR 14545/21 e NBR 13292/95	Mistura
	Densidade real dos grãos	DNER-ME 093/94	Mistura
Mecânica	Compactação	NBR 7182/20	Mistura
Química	Ensaio de lixiviação em batelada	NBR 10005 (ABNT, 2004b)	Solo, agregados e mistura
	Ensaio de lixiviação em coluna	D 4874 (ASTM, 2017)	Mistura
	Caracterização ambiental dos resíduos sólidos	NBR 10004 (ABNT, 2004a); NBR 10005 (ABNT, 2004b); NBR 10006 (ABNT, 2004c)	Mistura e Dry Pit
	pH, condutividade elétrica, Ca e Mg	-	Solo, agregados e mistura

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

É importante ressaltar que existem outras normas, orientações, leis e decretos, inclusive em outros países e suas respectivas regiões, que classificam os resíduos sólidos, e outros, também, quanto à sua periculosidade.

O Decreto nº 875, de 19 de julho de 1993, mostra a adesão do Brasil à Convenção de Basileia sobre o Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu Depósito e, assim, aos critérios de caracterização de resíduos perigosos de acordo com as informações contidas nos anexos I e III desta determinação legal (Brasil, 1993).

A União Europeia possui como norma a Decisão 2014/955/UE (União Europeia, 2014) que em seu conteúdo há uma lista de resíduos que, entre outros, faz menção aos resíduos da indústria do aço, especificamente à escória de aciaria não processada.

Em relação aos ensaios, ensaios de caracterização foram e serão realizados com todos os materiais empregados nesta dissertação. Os ensaios com BSSF, SN e M_{BSSF} foram repetidos com o objetivo de confrontar os resultados com os da pesquisa de Costa (2023).

4.2.1 Caracterização física e mecânica das misturas

As amostras de SN, Dry Pit e BSSF, após a coleta em campo, foram transportadas para o LMS e Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC, onde foram deixadas ao ar para secagem. Após isso, foram destorroadas e passadas no repartidor de amostras para posterior preparação dos CPs e das amostras para as análises químicas (DNER, 1994a).

A caracterização física da mistura compreendeu os ensaios de granulometria por peneiramento e densidade real dos grãos. O ensaio de densidade real e permeabilidade à carga variável e constante foram realizados por serem duas características físicas que influenciam no volume de vazios (V_v) dos CPs e, conseqüentemente, a realização do ensaio de lixiviação em coluna cujo volume e periodicidade da coleta do extrato lixiviado são de acordo com esse volume.

A obtenção do V_v das misturas compactadas foi realizada conforme a Equação 1, a partir da determinação do volume total (V_t) e da porosidade (n) dos CPs que são calculados em função do índice de vazios (ε) dos CPs, de acordo com a Equação 2 (Caputo, 1988).

$$V_v = n \times V_t \quad (1)$$

Onde:

V_v = volume de vazios;
 n = porosidade do solo;
 V_t = volume total do CP.

$$n = \frac{\epsilon}{\epsilon} - 1 \quad (2)$$

Onde:

ϵ = índice de vazios;
 n = porosidade do solo.

O valor do índice de vazios é uma relação entre a densidade real (γ_g) e a massa específica aparente seca máxima (γ_s) através da Equação 3 (Caputo, 1988).

$$\epsilon = \frac{\gamma_g}{\gamma_s} - 1 \quad (3)$$

Onde:

ϵ = índice de vazios;
 γ_g = densidade real;
 γ_s = Massa específica aparente seca máxima.

Além de fornecer o coeficiente de permeabilidade (k) da mistura, o ensaio de permeabilidade permitiu a coleta do extrato lixiviado, como realizado nos trabalhos de Perez (2017) e Vasconcelos (2018). Similar à pesquisa de Vasconcelos (2018), esta pesquisa utilizou como aparelho de lixiviação em coluna um permeâmetro, onde a amostra foi compactada na energia de compactação modificada, na umidade ótima (6,77%), em cilindro pequeno e soquete grande. Foram aplicadas 5 camadas com 55 golpes cada.

O ensaio de compactação foi realizado no LMS do IFCE. Esse ensaio verifica o comportamento mecânico de misturas estudadas nesta pesquisa e visa a diminuição do V_v do solo a fim de aumentar a sua resistência, gerando mudanças em suas características físicas e mecânicas (Caputo, 1988). Com esse ensaio foi construída a curva de compactação que permitiu a identificação da umidade ótima para a produção dos CPs para o ensaio de lixiviação em coluna, além da massa específica aparente seca máxima ($MEAS_{máx}$) importante para o cálculo do V_v dos CPs.

Para a realização do CP da M_{BSSFm} foi utilizada energia de compactação modificada com a execução de 5 camadas com 55 golpes cada, segundo NBR 7182 (ABNT, 2020). Essa mesma energia de compactação será aplicada à mistura com Dry Pit 65% de AS0 e 35% de AS1 (modificada).

Os CPs da M_{BSSF_i} , como mencionado anteriormente, serão produzidos utilizando energia de compactação intermediária, com 5 camadas e 26 golpes cada (ABNT, 2020).

4.2.2 Ensaios de Caracterização Química

As caracterizações físicas, mecânicas, químicas, mineralógicas e ambientais do BSSF, do solo natural e da M_{BSSF} foram realizadas por estudo anterior (Costa, 2023). A caracterização química do BSSF e do solo abrangeu: composição química (Fluorescência de Raio, X - FRX) e classificação ambiental [NBR 10004 (ABNT, 2004a), NBR 10005 (ABNT, 2004b) e NBR 10006 (ABNT, 2004c)]. A técnica de FRX foi realizada em espectrômetro de FRX Rigaku (modelo ZSX mini II).

Nesta dissertação foram analisados os parâmetros químicos Al, As, Ba, Cd, Pb, CN^- , Cl^- , Cu, Cr total, Fe, Fe total, Zn, Ca e Mg, Fl^- Mn, Hg, NO_3^- (como nitrogênio), Ag, Se, Na, SO_4^{2-} , surfactantes aniônicos, devido aos riscos ambientais associados à suas toxicidades e solubilidades em água. A EPA cita as consequências para a saúde que podem acontecer caso ocorra uma exposição de longo prazo a esses elementos em água potável acima do limite estabelecido (EPA, 2009; EPA, 2024).

Nesta pesquisa os extratos lixiviados coletados dos ensaios de lixiviação em batelada e em coluna tiveram o pH e CE determinados. Os extratos foram mantidos em ambiente com temperatura controlada ($< 4^\circ C$) para posterior filtração e análise. Os extratos lixiviados foram filtrados através de um filtro de membrana de $0,22\mu m$. A concentração dos metais foi realizada por Espectrofotômetro de Absorção Atômica por Chama, em um Varian (modelo AA240FS), enquanto a de Ca e Mg foram determinadas pelo método titulométrico (complexometria) usando o ácido etilenodiaminotetracético (EDTA). As concentrações dos parâmetros químicos foram comparadas com diferentes normas: NBR 10004 (ABNT, 2004a), EPA (2020), CONAMA 420 (Brasil, 2009), Norma holandesa (Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, 2000) e EPA (2024). O pH foi determinado por pHmetro Orion (modelo Dual Star pH/ ISE Benchtop) e a CE por medidor multiparâmetro de bancada AKSO 86505.

Ca foi analisado devido às suas altas concentrações na composição química da BSSF. Mg foi analisado, pois juntamente com o Ca provocam dureza temporária em água em concentrações acima de 300 mg CaCO₃/L (Brasil, 2021). Ambos também foram analisados no Dry Pit e misturas com esse AS pelos mesmos motivos. Os demais parâmetros químicos foram selecionados para análise quantitativa nos extratos lixiviados dos ensaios de lixiviação em batelada e em coluna pelo fato dos anexos F e G da NBR 10004 elencar esses parâmetros químicos como tóxicos e/ou biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Todos esses parâmetros químicos foram analisados nos extratos lixiviados do SN a fim de saber a influência da composição química desse material na composição química dos extratos.

4.2.3.1 Ensaios de lixiviação em batelada

No Brasil a NBR 10005 orienta quanto a realização do ensaio para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos (ABNT, 2004b). Nesse procedimento a lixiviação consiste na transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas do resíduo sólido para a solução de extração.

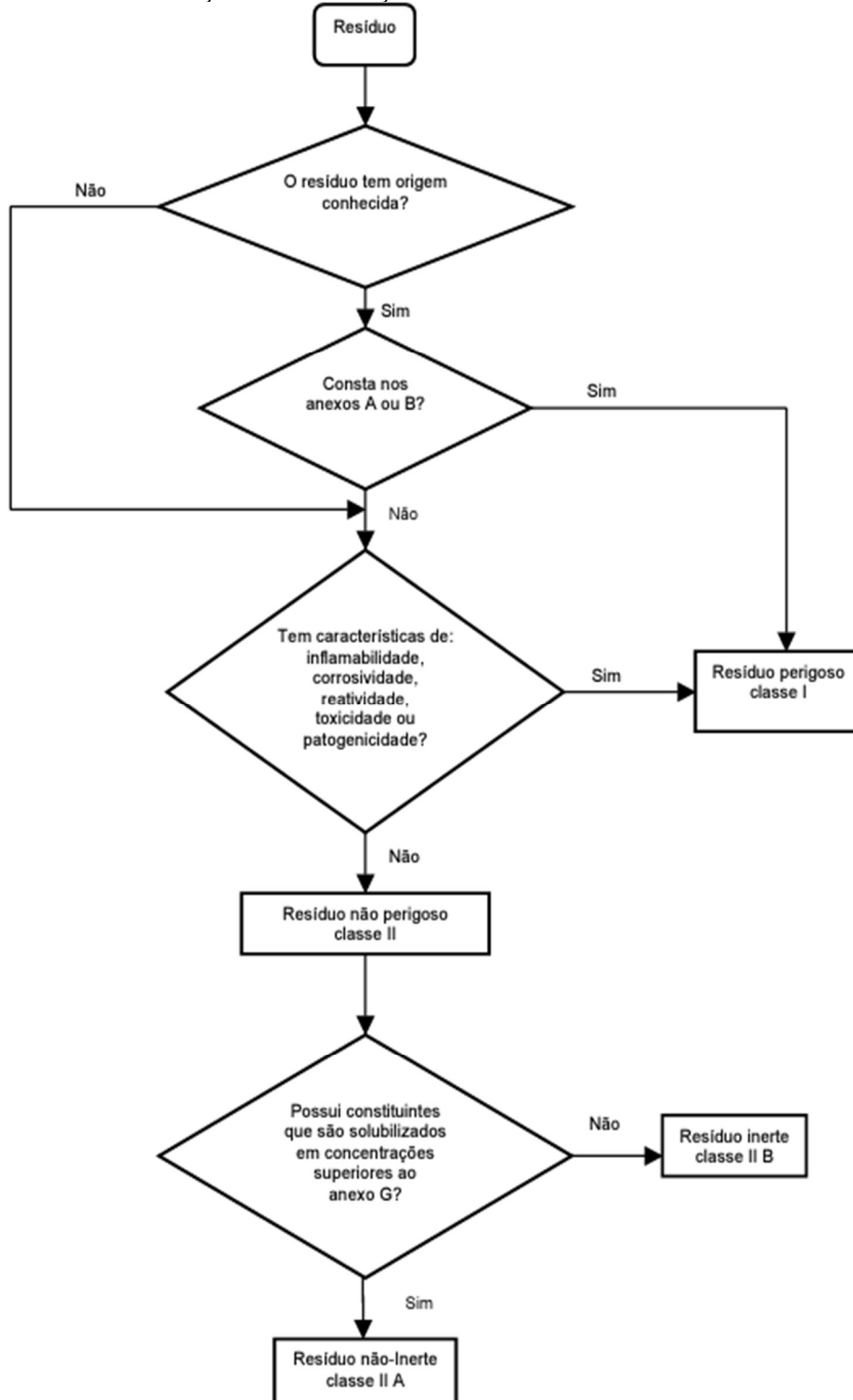
Após a determinação da concentração de componentes químicos se deve verificar se há alguma concentração acima dos VMP que estão listados no anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004a). Se todos os parâmetros estiverem abaixo dos VMP o resíduo é caracterizado como não perigoso, mas se apenas um limite for ultrapassado o resíduo será perigoso.

O ensaio de lixiviação em batelada orientado pela NBR 10005 (ABNT, 2004b) é semelhante ao Procedimento de Lixiviação por Característica de Toxicidade (EPA, 1992). As partículas da amostra a ser analisada devem estar neste ensaio no estado disperso em dimensões de até 9,5 mm, assim, determinando uma superfície de contato maior com o líquido lixiviante do que no ensaio ASTM D 4874 o qual usa amostras compactadas (ASTM, 2017).

A NBR 10005 utiliza como solução de extração, ou seja, solução lixiviante uma mistura constituída de ácido acético (CH₃COOH, HOAc) PA, hidróxido de sódio (NaOH) PA, 1,0 N e água destilada (pH ~ 4,93) ou apenas HOAc p.a. e água destilada (pH ~ 4,88). A escolha de uma dessas soluções de extração depende do pH da solução a ser analisada (ABNT, 2004b). A Figura 12 mostra as etapas dos ensaios de lixiviação em batelada realizados nesta pesquisa.

A Figura 12 abaixo mostra como é realizado essa caracterização do resíduo sólido quanto a sua periculosidade e inerticidade.

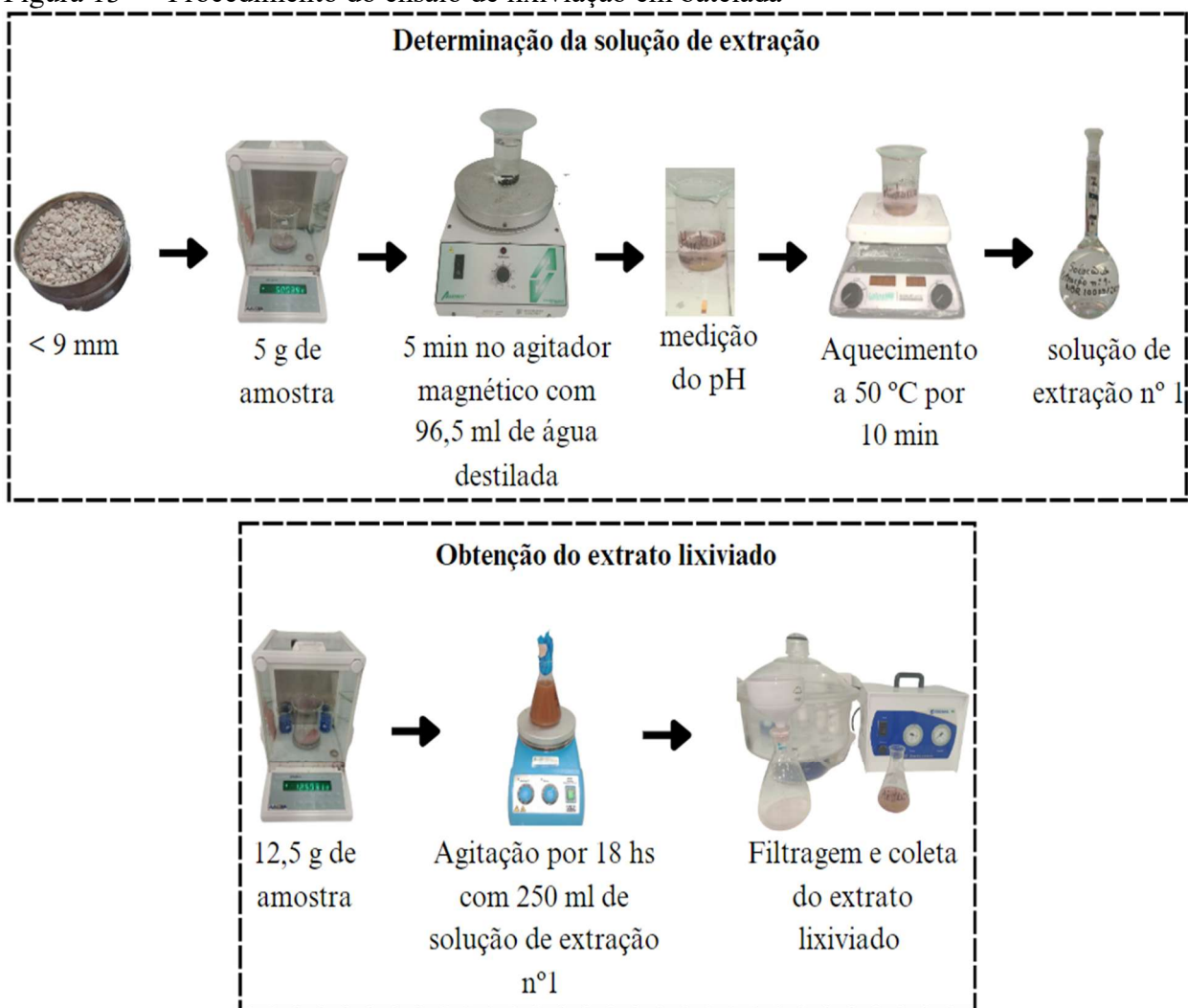
Figura 12 — Caracterização e classificação de resíduos sólidos



Fonte: NBR 10004 (ABNT, 2004a).

A solução de extração a ser usada na lixiviação, conforme mostrado na Figura 13, foi composta por 5,7 mL de CH_3COOH , 64,3 mL de NaOH 1,0 N e 930 ml de água destilada, com pH 5. Assim, se adicionou em um erlenmeyer com 12,5 g de amostra (SN, BSSF, Dry Pit e misturas) um volume dessa solução 20 vezes maior que essa massa de amostra a ser lixiviada. No fim as amostras foram agitadas em agitador rotativo a 30 rpm a 25 °C por 18 h e depois filtradas em sistema de filtração à vácuo (Figura 13).

Figura 13 — Procedimento do ensaio de lixiviação em batelada



Fonte: adaptado de NBR 10005 (2004b).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, em 2010, incluiu também como características de resíduos perigosos a carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade (Brasil, 2010).

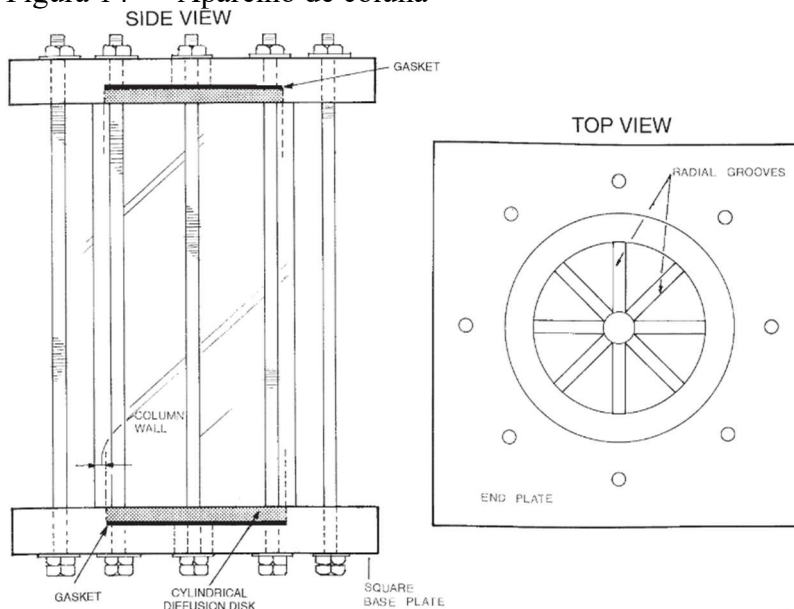
4.2.3.2 Ensaios de lixiviação em coluna

A norma da *American Society for Testing and Materials* - ASTM D 4874 fornece instruções sobre a realização do ensaio de lixiviação em coluna. O material a ser analisado é colocado em uma coluna de aço inox ou de vidro (ou qualquer material inerte) no estado compactado. O diâmetro das partículas da amostra não deve ser maior que 10 mm e as dimensões da coluna são 10 cm de diâmetro interno e 30 cm de altura (ASTM, 2017).

A coluna com a amostra e a coluna com a solução de extração possuem as mesmas dimensões. Ambas possuem tampas nas partes superior e inferior, denominadas “*end plate*” e “*base plate*”, respectivamente (ASTM, 2017).

Na coluna que armazena a amostra, na parte inferior, há uma entrada para a solução de extração e na parte superior uma saída do extrato lixiviado, além de uma entrada para uma bomba à vácuo. Na parte inferior também há um disco de distribuição de fluxo. Esse disco de aço inoxidável sinterizado possui poros de 70 μm e 8 ranhuras radiais de 5 cm de comprimento e 3 mm de largura e espessura cada (Figura 14) (ASTM, 2017).

Figura 14 — Aparelho de coluna



Fonte: ASTM D 4874 (2017).

Notas: *Side view* – vista lateral; *gasket* – vedação; *column wall* – parede da coluna; *cylindrical diffusion disk* – disco cilíndrico de difusão; *square base plate* – placa de base quadrada; *top view* – vista superior; *radial grooves* – ranhuras radiais; e *end plate* – placa final.

Na coluna que armazena a água destilada há uma entrada para uma bomba de ar comprimido para a pressurização do líquido e na parte inferior uma saída para o transporte da solução até a coluna com a amostra.

A solução de extração é a água ASTM Tipo II, similar a água deionizada. Esse líquido é armazenado em uma coluna similar à coluna na qual é colocada a amostra e é transportada por meio de uma tubulação (ASTM, 2017).

A lixiviação em coluna é ideal para pesquisas que buscam analisar a lixiviação de substâncias químicas em um material que esteja em condições similares a quando estiver em uso (Knop, 2007; Vasconcelos, 2018). Desse modo, pesquisadores optam por realizar esse método com corpos de provas (CPs).

Em relação a duração do ensaio, a norma limita em 24 ± 3 h e sugere que a coleta do extrato lixiviado seja de um a oito vezes o Vv da amostra ensaiada.

Knop (2007) realizou a coleta de apenas 1 extrato lixiviado, limitando o ensaio à obtenção de 1 Vv da amostra ou quando o ensaio completou 27 horas de duração. Na análise do uso de cinzas de carvão mineral em camadas de pavimento, Vasconcelos (2023) coletou 1 vez o extrato lixiviado, porém não especificou o volume obtido e o tempo de ensaio necessário. Ferrazo *et al.* (2023) coletou um volume compatível ao Vv do material estudado durante o período de 24 ± 3 h para cada amostra, realizando uma segunda coleta quando o volume de extrato lixiviado completou 5 vezes esse volume.

No estudo de Campello (2018) foram realizados ensaios de lixiviação em coluna. O autor não seguiu as orientações da ASTM D 4874 e coletou 4 vezes o extrato lixiviado durante um mês, não especificando o volume coletado. Liang, Peng e Luan (2012) também realizaram esse ensaio com modificações. As colunas foram desenvolvidas em policloreto de vinila (PVC) com 4 cm de diâmetro interno e 50 cm de comprimento. As amostras não foram compactadas e não foi determinado os volumes de vazios. O ensaio teve duração de 7 dias com coletas dos extratos lixiviados a cada 24 horas.

No ensaio de lixiviação em coluna executado por Gupta *et al.* (2019) os cilindros tinham 5,2 cm de diâmetro interno e 7,2 cm de comprimento. A solução de extração consistiu em água destilada e 2% de azida de sódio (NaN_3), além de NaOH diluído e ácido sulfúrico utilizados para ajuste do pH.

Na norma são sugeridas análises que podem ser executadas para se caracterizar o lixiviado obtido pH e CE. A cromatografia iônica, que permite a identificação da concentração

de cátions e ânions, foi o método utilizado por Vasconcelos (2018) para constatar se ocorre contaminação ambiental com o uso de cinzas de carvão em camadas de pavimento, a partir do lixiviado obtido por meio do ensaio de lixiviação em coluna.

Neste ensaio, Vasconcelos (2018) utilizou como coluna um permeâmetro, equipamento que auxilia na determinação de coeficiente de permeabilidade à carga variável, onde a amostra foi compactada. O fluxo do líquido lixiviante foi descendente, ao contrário do descrito na ASTM D 4874, que é ascendente.

Dayioglu e Aydilek (2019), ao realizarem o mesmo ensaio com uma amostra simulando um aterro rodoviário com preenchimento de agregado siderúrgico, objetivaram estudar a lixiviação de Al, Cu e Zn. As duas principais modificações foram que em vez de usar água deionizada como líquido lixiviante foi utilizada uma solução de NaCl (cloreto de sódio) 0,02 mol/L e foram montadas três colunas. A primeira coluna armazenava o NaCl, a segunda o agregado siderúrgico e a terceira um solo de aterro e subleito.

Observa-se que cada pesquisa adapta o ensaio de lixiviação em coluna às necessidades do estudo e de acordo com seus objetivos.

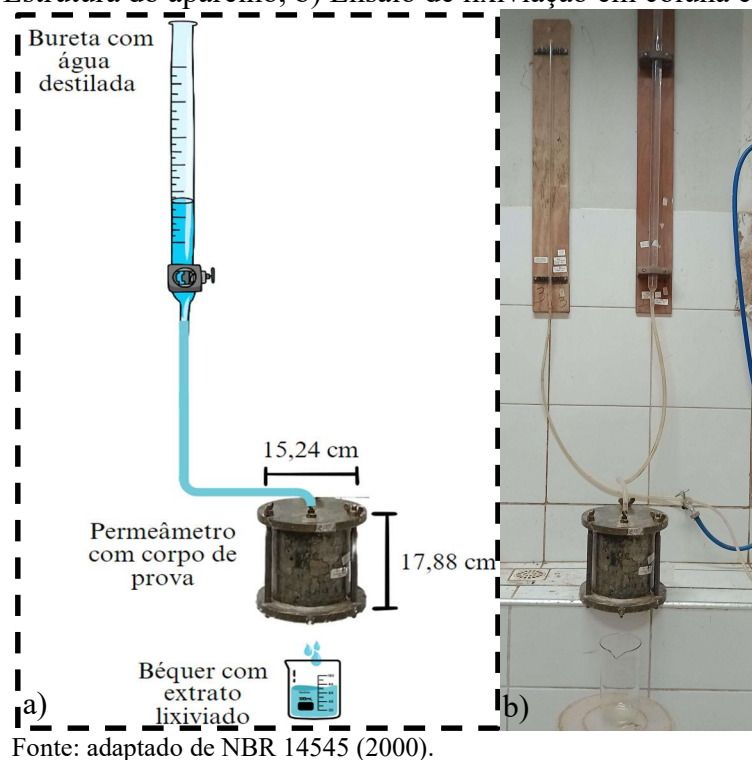
Para medir as concentrações dos íons metálicos, os autores utilizaram a técnica de espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP) (Dayioglu e Aydilek, 2019). Essa mesma técnica foi aplicada no lixiviado de um ensaio de lixiviação em coluna de um estudo que desenvolveu CPs contendo areia residual de fundição estabilizada com ligante álcali-ativado. O objetivo dessa pesquisa foi analisar apenas metais, a saber: Ag (prata), Al (alumínio), As (arsênio), Ba (bário), Cd, Cr total, Cu (cobre), Fe (ferro), Hg (mercúrio), Mn (mangans), Pb (chumbo), Se (selênio) e Zn (zinco) (Ferrazzo *et al.*, 2023).

Os ensaios de lixiviação em coluna neste estudo se basearam nas orientações descritas na norma ASTM D 4874 (ASTM, 2017). Como esse ensaio utiliza uma amostra compactada pode-se simular uma camada de pavimento em condições de campo.

Foi utilizada água destilada como solução de extração para percolar pelas amostras compactas no intuito de lixiviar o material e, assim, após, caracterização química, ser possível analisar a presença de materiais contaminantes no extrato lixiviado.

Similar à pesquisa de Vasconcelos (2023), nesta foi utilizado um permeâmetro acoplado a uma bureta em substituição ao aparelho de coluna normalizado pela norma americana. Em substituição a coluna com o líquido lixiviante uma bureta armazenou a água destilada. O permeâmetro substitui a coluna com a amostra (Figuras 15).

Figura 15 — Aparelho de lixiviação em coluna com uso de permeâmetro:
a) Estrutura do aparelho, b) Ensaio de lixiviação em coluna em execução



Fonte: adaptado de NBR 14545 (2000).

Antes dos ensaios o aparelho foi higienizado sequencialmente com sabão neutro, acetona, água da torneira e água destilada para que não ocorresse transferência de contaminantes para os CPs e solução de extração. A amostra da mistura M_{BSSFm} foi compactada na energia modificada, em 5 camadas e 55 golpes cada.

A norma ASTM D 4874 (ASTM, 2017; Knop, 2007) informa que o volume de lixiviado obtido deve ser de um a oito vezes o Vv do material analisado e que o tempo de ensaio é limitado a 24 ± 3 h. Como nesta dissertação busca-se analisar as características químicas do extrato lixiviado obtidos por meio desse ensaio no decorrer do tempo, o ensaio de lixiviação em coluna no permeâmetro foi executado entre os meses de julho a setembro de 2024, sendo coletados 8 extratos lixiviados. O primeiro volume de extratos coletado do aparelho de coluna com permeâmetro foi 580 mL e os demais 290 mL.

Essa norma também orienta que para se obter uma troca completa de volume vazio no período máximo de 27 horas é preciso ajustar a pressão ou a carga hidráulica (ASTM, 2017). No caso desse ensaio, foi utilizado a carga hidráulica.

Neste trabalho, o Vv das amostras com BSSF e SN utilizadas nos ensaios de lixiviação em coluna foram determinados e o extrato lixiviado foi coletado proporcionalmente a esse

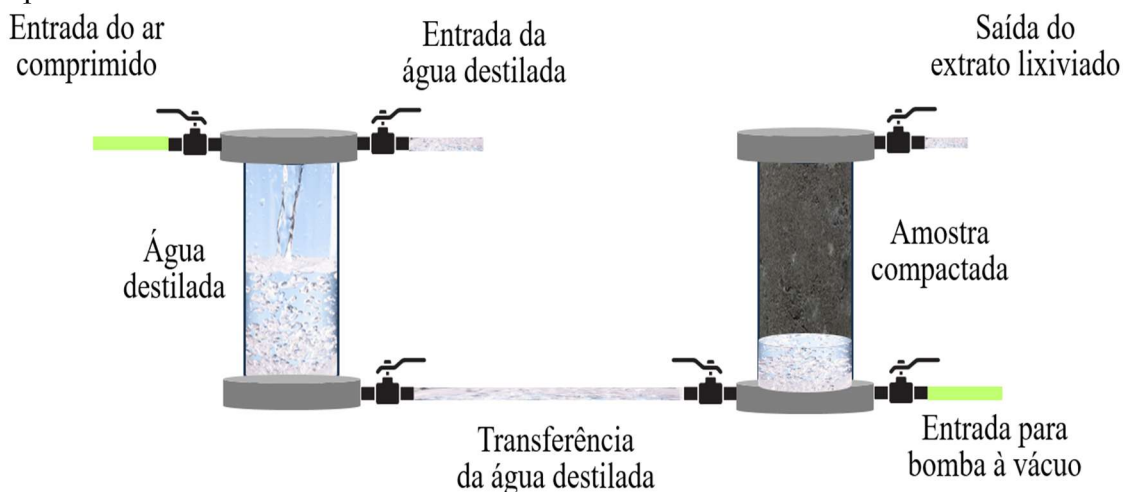
volume. Com as amostras com Dry Pit as coletas seguirão os mesmos processos, primeiramente serão calculados os volumes de vazios das amostras a serem ensaiadas e depois coletadas de acordo com esse valor, de modo que o volume seja suficiente para todas as análises químicas.

De acordo com o V_v calculado a partir dos índices físicos do CP da M_{BSSFm} (287,06 cm^3), durante o ensaio de 24 horas foi realizada a coleta do extrato lixiviado de cerca de duas vezes o V_v , 580 ml. Após a coleta, foram determinados o pH e CE e armazenados em recipientes fechados a 4°C para posterior determinação das concentrações dos metais.

Após esses ensaios, com o intuito de validar os dados obtidos por meio do permeâmetro, foi usado um aparelho de coluna de acordo com as especificações da ASTM D 4874. Foram usadas peças de aço inox com as dimensões informadas na norma (ASTM, 2017).

A coluna de aço inox na qual foram compactados os CPs com cinco camadas cada possui 30 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro interno (Figura 16). Outra coluna, com as mesmas dimensões, fabricada em acrílico armazena água destilada (solução de extração). O fluxo dessa solução é ascendente com a finalidade do líquido não percorrer caminhos preferenciais, o que ocorreria com o fluxo descendente (ASTM, 2017).

Figura 16 — Estrutura do aparelho de lixiviação em coluna normatizado pela ASTM D 4874



Fonte: Adaptado de ASTM D 4874 (2017).

Uma peça que faz parte da coluna que armazena o CP é o disco de distribuição de fluxo. Esse disco foi produzido em aço inoxidável sinterizado com poros de 70 μm . Nas tampas inferiores e superiores foram feitas 8 ranhuras radiais de 5 cm de comprimento e 3 mm de largura e espessura cada. Com essas características é possível a distribuição da solução de extração por todos os volumes de vazios do CP (ASTM, 2017).

O cilindro que armazena a solução de extração tem uma entrada para a fonte de gás comprimido a fim de pressurizar o reservatório. A pressão no aparelho, em geral, não pode ultrapassar 275,8 kPa (ASTM, 2017).

Como no ensaio a 7 bar foram analisados uma maior quantidade de parâmetros químicos foram necessários 800 mL de amostra para cada extrato coletado. Assim, foram coletados 800 mL dos extratos dos ensaios de lixiviação em coluna a 0,5, 1 e 7 bar das misturas.

O Vv da coluna com $M_{DryPitm}$ 437,10 cm³. A M_{BSSFm} possui 395,73 cm³ de Vv, a M_{BSSFi} 444,33 cm³, A coluna com base e sub-base com M_{BSSFm} e M_{BSSFi} possui o Vv de 471,76 cm³. O Vv da coluna com base e sub-base com a $M_{DryPitm}$ é 437,10 cm³. Como foram necessários 800 mL de cada extrato, o tempo de ensaio foi o preciso para coletar cada volume.

4.2.2.1 Comparação entre os métodos NBR 10005 e ASTM D 4874

Comparando os dois métodos se pode presumir que as concentrações dos parâmetros químicos obtidos serão diferentes devido às especificidades de cada ensaio, como destaca o Quadro 5 abaixo. Na NBR 10005 a solução lixiviante é constituída de ácido acético. (ABNT, 2004b), hidróxido de sódio e água deionizada, enquanto na ASTM D 4874 é usada apenas água deionizada (ASTM, 2017).

Quadro 5 — Diferenças entre os ensaios de lixiviação NBR 10005 e ASTM D 4874

	NBR 10005	ASTM D 4874
Tipo de ensaio	Ensaio em batelada	Ensaio em coluna
Estado do solo	Desagregado	Compactado
Solução de extração	Mistura de ácido acético p.a., hidróxido de sódio e água destilada	Água destilada
Volume da solução extratora	Constante	Variável
Tempo de contato da amostra com a solução extratora	18 ± 2 h	24 ± 3 h
Agitação	Uso de agitador rotativo	Não há agitação

Fonte: elaborada pela autora (2025).

Devido às diferentes soluções de extração, o meio em que ocorre a lixiviação no ensaio da NBR 10005 é ácido, enquanto a lixiviação em coluna tende a ter um meio mais alcalino (Ferrazzo *et al.*, 2023). Costa (2023) informou o pH do solo (6,32), do BSSF (10,32) e da mistura com 50% de solo e 50% de BSSF (9,44) que serão utilizados nesta pesquisa.

Essa diferença é importante para entender a quantidade de compostos químicos liberados no processo de lixiviação, pois há compostos que reagem em meios ácidos e básicos, possuindo um padrão de lixiviação anfotérico. Existem também os compostos com padrão de lixiviação catiônica, os quais são menos lixiviados em meio básico (Komonweeraket *et al.*, 2015). Compreender as características químicas dos compostos químicos presentes em uma amostra é essencial para entender o comportamento de liberação destes no meio ambiente.

O Mn, presente no BSSF, quando está em um meio em que o pH começa a subir passa a ser lixiviado cada vez menos. O contrário ocorre com Al, Cr, Cu, Fe e Zn, os quais não dependem do pH do meio para serem liberados (Komonweeraket *et al.*, 2015).

Em relação à superfície de contato da amostra, se deduz que a amostra da norma brasileira por estar no estado disperso tem maior contato com o líquido lixiviante do que da norma americana que está no estado compactado (Ferrazzo *et al.*, 2023).

Outra diferença entre os ensaios é o fato do volume da solução extratora ácida ser constante (massa de solução de extração = $20 \times$ massa da fase sólida da amostra) (ABNT, 2004b) e na ASTM D 4874 ser variável por depender da permeabilidade da amostra.

Desse modo, entende-se que a lixiviação de metais dependerá do pH do meio, da concentração do metal do material analisado, do tempo de ensaio, do tamanho das partículas, da solubilidade dos elementos químicos, de adsorção de elementos, entre outros fatores que mostram a complexidade do processo de lixiviação de compostos químicos (Liang, Peng e Luan, 2012; Komonweeraket *et al.*, 2015; Gupta *et al.*, 2019; Ferrazzo *et al.*, 2023). Esta pesquisa não esgota o assunto, mas analisa comparativamente as diferenças entre as concentrações dos metais obtidas nos dois métodos de ensaios, em diferentes pressões e no decorrer do tempo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos materiais

5.1.1 Caracterização física dos materiais

A execução de ensaios de lixiviação em coluna é influenciada pelas características físicas do material a ser ensaiado. A norma ASTM D 4874 (ASTM, 2017) orienta que o ensaio deve ser realizado no tempo máximo de 24 ± 3 h e que durante este período é preciso coletar de um a oito vezes o Vv da amostra.

Nesta pesquisa foi realizado o ensaio de compactação da M_{BSSFm} , M_{BSSFi} e M_{DryPit} a fim de obter os valores de $MEAS_{m\acute{a}x}$ e $H\acute{o}t$ (%) (Tabela 4), os quais foram utilizados para a determinação do Vv das amostras utilizadas nos ensaios de lixiviação em coluna.

Tabela 4 — Características física das misturas

Característica física	M_{BSSFm}	M_{BSSFi}		M_{DryPit}
Colunas	Permeâmetro	Aço Inox	Aço Inox	Aço Inox
γ_g - Densidade real (adimensional)		3,1125 ^a		2,640
Vt - volume total do CP (cm³)	3259,92	2355,00	2355,00	2355,00
Vv - Volume de vazios (cm³)	547,79	395,73	444,33	437,10
ϵ - índice de vazios (adimensional)		0,20	0,23	0,23
n - porosidade do solo (adimensional)		0,17	0,19	0,19

Fonte: elaborado pela autora (2025).

Nota: ^aDados de Costa (2023).

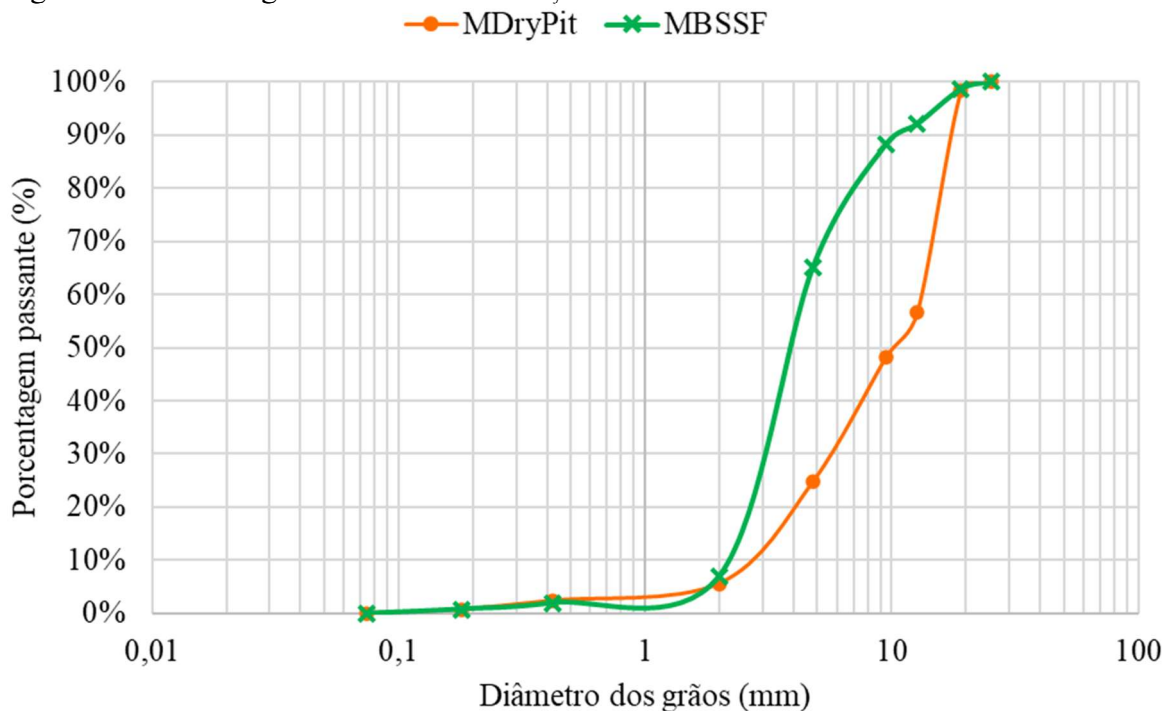
Os V_v da M_{BSSFm} compactado no permeâmetro e aparelho de lixiviação foram 547,79 cm^3 e 395,73 cm^3 , respectivamente. O valor de n foi 0,17 e o ϵ 0,20 de ambas as amostras por se tratar do mesmo material compactados na energia modificada.

Valores de n e ϵ do CP com M_{BSSF_i} são 0,19 e 0,23. A mudança nos valores, mesmo se tratando do mesmo material, é ocasionada pelo uso da energia de compactação intermediária. O CP com M_{DryPit_i} apresentou n igual a 0,19 e ϵ com o valor de 0,23.

A coluna com uma base com a M_{BSSFm} e uma sub-base com a M_{BSSF_i} , por se tratar de duas energias de compactação, possui o V_v de 471,76 cm^3 . O V_v da amostra com uma base e sub-base com a $M_{DryPitm}$ é 437,10 cm^3 (Tabela 4).

Em relação à permeabilidade à carga variável, é possível verificar que a M_{BSSFm} se trata de um material impermeável, com o valor de $7,1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, similar a uma areia muito fina, silte e argila; o que é possível deduzir pela análise da curva granulométrica da mistura (Figura 17) que mostra a existência de uma baixa porcentagem de pedregulhos - 88,25% de areia (4,8 mm - 0,075 mm) e 11,75% de pedregulho ($> 4,8 \text{ mm}$) (DNER, 1994b). A M_{DryPit} é um material mais permeável, com permeabilidade à carga constante no valor de $6,9 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, com maior porcentagem de pedregulhos, 51,74%, enquanto 48,26% é areia (DNER, 1994b).

Figura 17 — Curva granulométrica da M_{DryPit} e M_{BSSF}

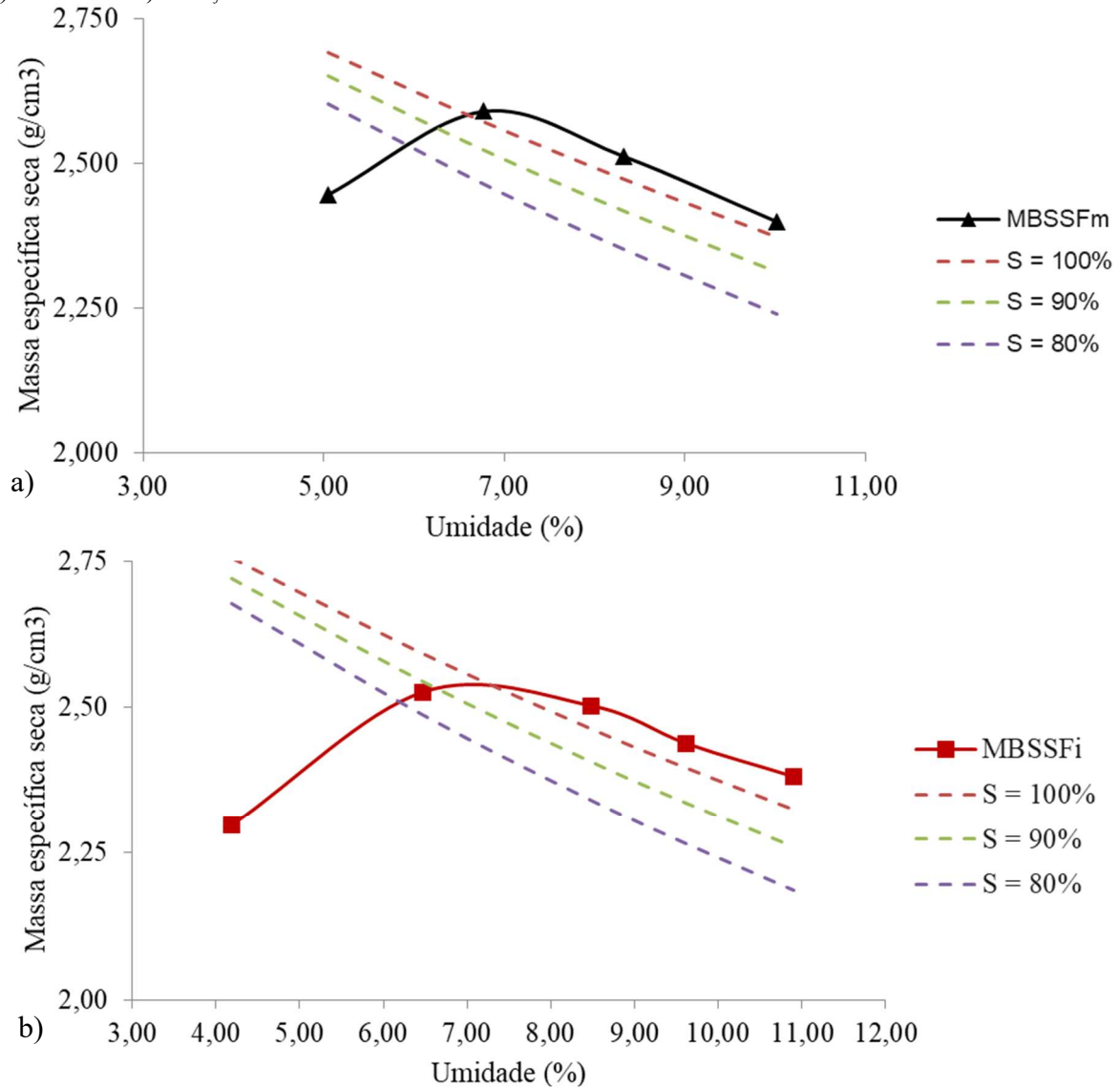


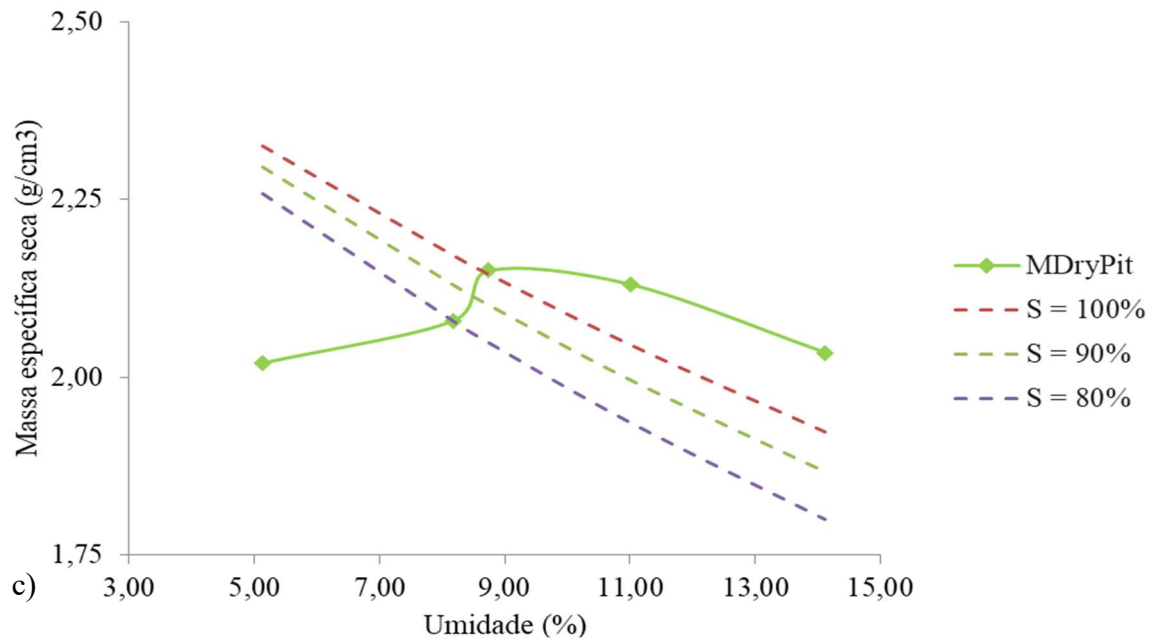
Fonte: elaborado pela autora (2025).

5.1.2 Caracterização mecânica dos materiais

As curvas de compactação das misturas M_{BSSFm} , M_{BSSFi} e $M_{DryPiti}$ são apresentadas na Figura 18. Os resultados indicam uma proximidade entre os valores de massa específica aparente seca máxima ($MEAS_{máx}$) e teor ótimo de umidade ($H_{ót}$) das misturas M_{BSSFm} ($2,589 \text{ g/cm}^3$ e $6,77\%$) e M_{BSSFi} ($2,525 \text{ g/cm}^3$ e $6,47\%$), respectivamente. Costa (2023) também observou esse comportamento semelhante ao analisar essas mesmas misturas, reforçando a consistência dos dados obtidos nesta pesquisa (Figura 18).

Figura 18 — Curvas de compactação e saturação das misturas estudadas: a) M_{BSSFm} ; b) M_{BSSFm} e c) $M_{DryPitm}$

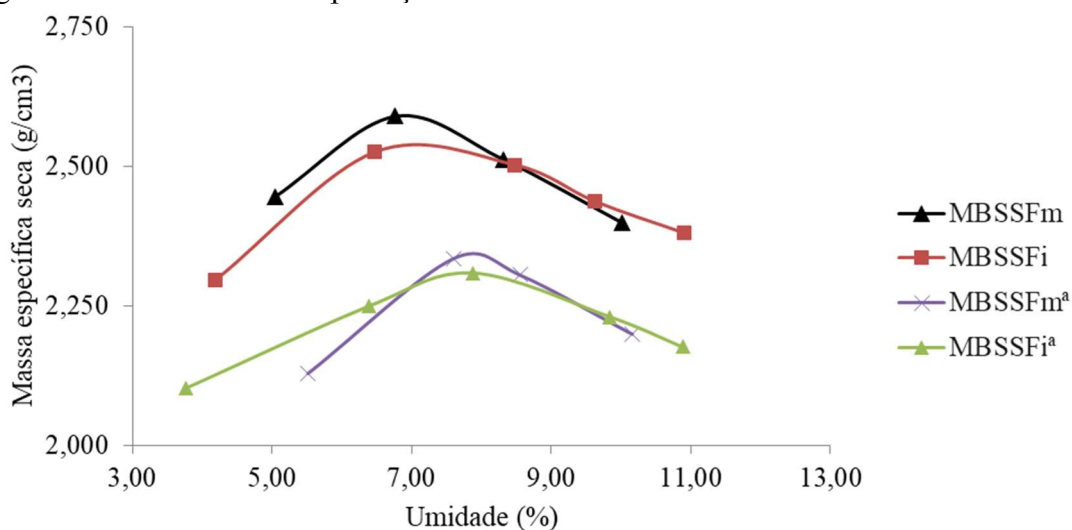




A M_{DryPiti} apresentou $MEAS_{\text{máx}}$ de $2,145 \text{ g/cm}^3$ e $H_{\text{ót}}$ de 8,74% (2024). Leitão (2025) realizou ensaio de compactação com o mesmo resíduo. Similar a esta pesquisa, a curva de saturação de 100% interceptou a curva de compactação.

A proximidade entre as curvas de compactação (Figura 19) é acompanhada por um comportamento atípico observado nos ensaios de lixiviação em coluna: enquanto o tempo médio de percolação para a M_{BSSFm} foi de aproximadamente 16 minutos, para a M_{BSSF_i} foi de 731 minutos — um aumento de cerca de 45 vezes. Esse resultado sugere que a maior energia de compactação aplicada à M_{BSSFm} pode ter provocado a quebra dos grãos, aumentando a permeabilidade do material, conforme apontado por Souza Junior (2005).

Figura 19 — Curvas de compactação das M_{BSSFm} e M_{BSSFi}



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Nota: ^aDados de Costa (2023).

Outro aspecto relevante é a proximidade das curvas de compactação em relação às respectivas curvas de saturação. A curva de saturação representa a condição em que todos os vazios estão preenchidos exclusivamente por água (saturação total). Contudo, conforme Caputo (1988), é praticamente impossível eliminar completamente o ar dos vazios de um solo. O fato de as curvas de compactação ultrapassarem a linha de saturação de 100% indica um desvio em relação ao comportamento esperado e evidencia limitações da norma NBR 7182:2020 (ABNT, 2020) quando aplicada a materiais não convencionais como os agregados siderúrgicos.

Esse comportamento pode ser explicado por três hipóteses principais: (i) subestimação da massa específica dos sólidos, comum em materiais porosos e heterogêneos como escórias, o que desloca a linha de saturação para valores inferiores; (ii) presença de ar retido ou dissolvido nos poros, que compromete a condição de saturação real; e (iii) reações químicas entre os componentes da escória e a água durante os ensaios, possivelmente gerando expansão volumétrica e aumento aparente da massa específica seca. Essas hipóteses, isoladamente ou em conjunto, justificam o comportamento anômalo observado nas curvas de compactação em relação à linha teórica de saturação total.

5.1.3 Caracterização química dos materiais

A Tabela 5 mostra que a composição química do BSSF é constituída na maior parte por CaO (44,67%), Fe_2O_3 (34,60%) e SiO_2 (10,32%). O solo natural é composto pelos minerais

quartzo (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e ortoclásio (KAlSi_3O_8), assim sua composição química é formada principalmente por SiO_2 (50,53%) e Al_2O_3 (31,31%), além do Fe_2O_3 (11,40%).

Tabela 5 — Dados de óxidos presentes nos materiais obtidos por FRX (% em massa)

Óxido	BSSF ^a	Solo Natural ^a	M _{BSSF} ^a	Dry Pit/ M _{DryPit}
SiO₂ (%)	10,32	50,53	26,00	10,33
Fe₂O₃ (%)	34,60	11,40	26,16	12,10
CaO (%)	44,67	0,45	29,29	65,86
Al₂O₃ (%)	2,79	31,31	12,77	2,38
MgO (%)	3,45	0,3	-*	-
P₂O₅ (%)	1,49	-	0,97	1,03
Cl⁻ (%)	0,01	-	-	0,11
K₂O (%)	0,11	3,73	1,37	0,76
TiO₂ (%)	0,44	1,83	1,21	1,12
Cr₂O₃ (%)	0,20	-	0,10	-
MnO (%)	2,76	0,20	1,68	1,32
Co₂O₃ (%)	-	-	-	-
SO₃ (%)	-	-	0,10	4,76
SrO (%)	-	-	-	0,12
ZnO (%)	0,15	0,05	0,20	0,09
ZrO₂ (%)	-	0,19	0,16	-

Fonte: Costa (2023).

Notas: ^aDados de Costa (2023); *- não identificado.

Na M_{BSSF} predominou a presença de CaO , 29,29%, e Fe_2O_3 , 26,16%, provenientes principalmente do BSSF e SiO_2 , 26,00% e Al_2O_3 , 12,77%, do SN. Similar ao BSSF, a proporção de CaO no Dry Pit é majoritária, 65,86 %, seguido em menor quantidade por SiO_2 , 10,33% e Fe_2O_3 , 12,10% (Tabela 5).

O Fe_2O_3 presente nos agregados siderúrgicos tem sua origem no sinter (minério de ferro) que é utilizado na produção do ferro-gusa. O coque é responsável pelo SiO_2 e o fundente (calcário) pelo CaO , conforme Tabela 6.

Tabela 6 — Composição química Sinter e Coque (% em massa)

Insumo	Sinter	Coque
SiO_2 (%)	4,89	44,5
Al_2O_3 (%)	1,40	33,99
CaO (%)	8,41	2,34
MgO (%)	1,09	1,92
T-Fe (%)	58,43	-
FeO (%)	8,76	-
Fe_2O_3 (%)	-	11,99
MnO (%)	0,27	0,00
TiO_2 (%)	0,10	1,94
Zn (%)	0,01	-
ZnO (%)	-	0,005
K_2O (%)	0,05	2,21
Na_2O (%)	0,04	0,55
P (%)	0,06	-
P_2O_5 (%)	-	0,33
T-S (%)	-	0,79

Fonte: ArcelorMittal Pecém (2024).

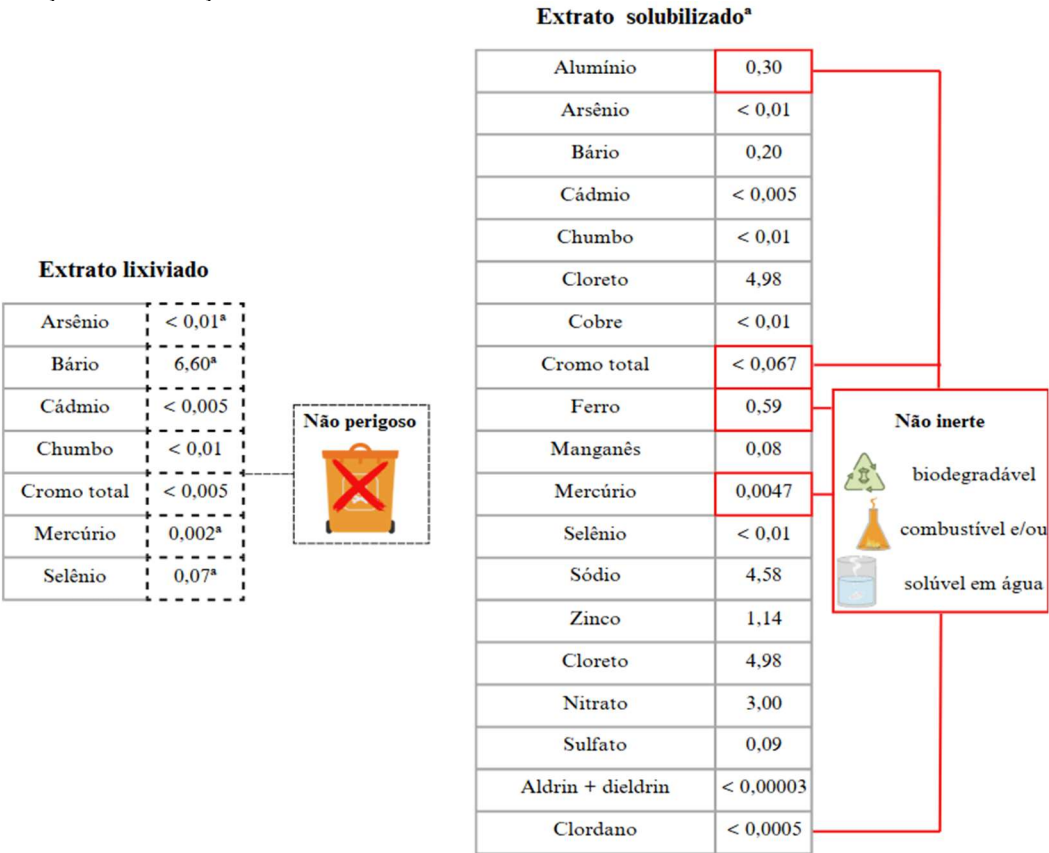
5.2 Estudo de lixiviação em regime de batelada e avaliação ambiental

5.2.1 Estudo de lixiviação em regime de batelada e caracterização e avaliação ambiental do agregado siderúrgico BSSF

A norma brasileira NBR 10004 (ABNT, 2004a) orienta quanto à classificação ambiental de resíduos sólidos quanto à sua periculosidade, por meio da composição química do extrato lixiviado (ABNT, 2004b); e quanto à inerticidade, a norma considera a composição química do extrato solubilizado (ABNT, 2004c).

A Figura 20 mostra as concentrações dos parâmetros químicos obtidos dos ensaios de lixiviação e solubilização do BSSF. As concentrações dos elementos químicos do extrato lixiviado não superaram os VMP (valores máximos permitidos) do anexo F (ABNT, 2010a), classificando o agregado como resíduo não perigoso.

Figura 20 — Classificação ambiental do agregado siderúrgico BSSF após ensaios de solubilização e lixiviação



Fonte: elaborada pela autora (2025).

Nota: ^aDados de Costa (2023).

No extrato lixiviado as concentrações de Al, Cr total, Fe e Hg identificadas ficaram acima dos VMP do anexo G (ABNT, 2010a), classificando o BSSF como resíduo não inerte.

A presença de Al, Fe e Cr total no solubilizado é esperada pela presença de Al_2O_3 , Fe_2O_3 e Cr_2O_3 na composição química do BSSF. A determinação de SO_4^{2-} pode ser justificada pela presença de SO_3 que não deve ter sido identificado no FRX devido o limite de detecção do aparelho utilizado.

A Tabela 7 apresenta as concentrações de metais dos extratos lixiviados do BSSF, SN e M_{BSSF} provenientes do ensaio em batelada. As concentrações de As, Ba, Cd, Pb, Cr total, Hg e Se da M_{BSSF} não ultrapassaram os VMP listados no anexo F da NBR 10004 (ANBT, 2010a) caracterizando-o como resíduo não perigoso (Costa, 2023). Além disso, todas as concentrações estão abaixo do limite de detecção do aparelho.

Os parâmetros químicos Cd, Cr total e Pb, cujos VMP estão listados no anexo F da NBR 10004, não foram identificados na amostra, caracterizando-se como resíduo não perigoso, confirmando os dados obtidos por Costa (2023). No ensaio de solubilização a concentração de Al, 0,3 mg/L; Cr, 0,067 mg/L; Fe, 0,59 mg/L, e Hg, 0,0047 mg/L, superaram os VMP do anexo G da NBR 10004 caracterizando-o como resíduo não inerte (Costa, 2023).

O extrato lixiviado do SN também não superou nenhum VMP do anexo F, mas no extrato solubilizado a concentração de Al, 63,48 mg/L; Ba, 1,23 mg/L; Mn, 2,24 mg/L e Hg, 0,0018 mg/L, ultrapassaram os VMP do anexo G, caracterizando o SN como resíduo não perigoso e não inerte (Costa, 2023).

Tabela 7 — Parâmetros químicos dos extratos lixiviados conforme NBR 10005

Parâmetro	BSSF	SN	MBSSF	Padrões				
				NBR 10004 Anexo F ^a	EPA ^a	CONAMA 420 ^b	Norma holandesa ^c	EPA ^d
As (mg/L)	< 0,01 ^e	< 0,01 ^e	< 0,01 ^e	1,00	5,00	0,01	0,01	5,00
Ba (mg/L)	6,60 ^e	4,83 ^e	6,20 ^e	70,00	100,00	0,70	0,05	100,00
Cd (mg/L)	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,50	1,00	0,005	0,0004	0,005
Cr total (mg/L)	< 0,005	< 0,005	< 0,005	5,00	5,00	0,05	0,001	0,10
Fe total (mg/L)	0,09	0,15	0,13	-	-	2,45	-	-
Pb (mg/L)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,00	5,00	0,01	0,015	0,015
Hg (mg/L)	0,002^e	0,002^e	0,002^e	0,10	0,20	0,001	0,00005	0,20
Se (mg/L)	0,07^e	< 0,01 ^e	0,02^e	1,00	1,00	0,01	-	1,00
pH	8,5	9,5	8,5	-	-	-	-	-

Fonte: elaborada pela autora (2025).

Notas: ^a Concentração máxima de metais para características de toxicidade; ^b Valores orientadores para águas subterrâneas; ^c Valores alvo para águas rasas; ^d Regulamentos nacionais de água potável primária; ^e Costa (2023); Valores em negrito indicam que ultrapassaram os VMP de uma ou mais normas.

Encapsular Cr total é complexo, pois este metal possui padrão de lixiviação anfotérico, ou seja, capacidade de reagir em condições ácidas ou básicas (Komonweeraket *et al.*, 2015). No entanto, segundo Liang, Peng e Luan (2012), Cr e Pb podem ser precipitados na forma de hidróxidos e carbonatos, em soluções básicas como os extratos lixiviados obtidos no ensaio em batelada, gerando a imobilização desses metais. Além disso, esses autores afirmam que o óxido de ferro pode adsorver metais tóxicos provocando a sua imobilização. No BSSF, o Cr está na forma de óxido de cromo III e representa apenas 0,20% da composição química desse material (Holanda; Silva; Bastos, 2023).

Os resultados da M_{BSSF} (Tabela 7) confirmam os dados de Cartaxo (2022), que indicam ausência de lixiviação de substâncias tóxicas acima dos VMP em concretos com BSSF. No entanto, os elementos Ba, Pb e Hg excederam os limites da CONAMA 420 e da Norma holandesa; Cd ultrapassou apenas a Norma holandesa, e Se excedeu o limite da CONAMA 420.

As concentrações de Cd, Cr total e Pb do AS estão abaixo do limite de detecção (Tabela 7). A análise de conformidade das concentrações de Cd, Cr total e Hg em relação a Norma holandesa não pode ser realizada a partir dos ensaios de lixiviação devido aos limites de detecção do Espectrofotômetro de Absorção Atômica por Chama utilizado serem maiores que os limites de concentração da resolução.

Na mistura M_{BSSF} as concentrações de metais nos extratos lixiviados foi inferior aos limites máximos de toxicidade da NBR 10004 e EPA (2024) e de qualidade de água da CONAMA 420 (exceto Cd e Cr total) e EPA (2020), assim essa mistura correspondem a materiais sem toxicidade metálica (Tabela 7).

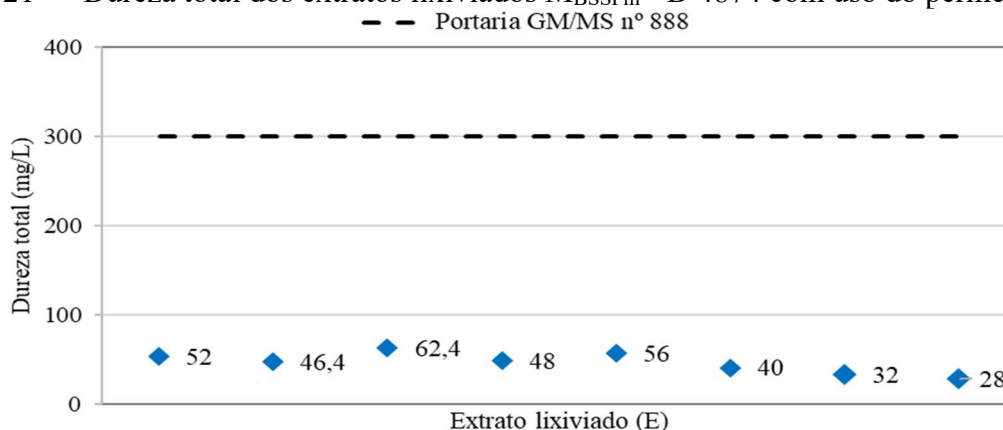
A CONAMA 357 (Brasil, 2005) também define que águas doces classe 1 devem possuir o pH entre 6 e 9. Apenas o SN não atendeu a esse limite (pH 9,5).

5.2.2 Estudo de lixiviação em regime de coluna ao longo do tempo e sob diferentes pressões e avaliação ambiental da M_{BSSF}

Os oito extratos (E) lixiviados obtidos nos ensaios de lixiviação em coluna, realizados com o uso de permeâmetro, estão apresentados na Figura 21, a qual ilustra a concentração de dureza total da mistura M_{BSSFm} . Observa-se uma variação mínima na concentração de dureza total entre o primeiro extrato (E1) e o segundo (E2). Todos os extratos analisados apresentaram concentrações de dureza total inferiores a 300 mg/L, valor que ultrapassa o limite estabelecido para água potável pela Portaria GM/MS nº 888 do Ministério da Saúde (Brasil, 2021). Dessa

forma, os extratos lixiviados não se configuram como uma fonte significativa de dureza total para a água.

Figura 21 — Dureza total dos extratos lixiviados M_{BSSFm} - D 4874 com uso do permeâmetro



Fonte: elaborada pela autora (2025).

Na mistura M_{BSSFm} não foram detectadas as presenças de Cd, Cr total, Fe total e Pb analisados nesta pesquisa. As condições alcalinas não influenciaram a lixiviação de Cr que possui padrão de lixiviação anfotérico (Komonweeraket *et al.*, 2015). Portanto, todos os extratos lixiviados atenderam aos limites de toxicidade [NBR 10004 e EPA (2024)] e de qualidade de água [CONAMA 420 e EPA (2020)].

No ensaio de lixiviação em coluna executado por Gupta *et al.* (2019), com solução de extração com pH 4, foi identificado que Cd, Cr total, Fe total e Pb tendem a lixiviar em meios ácidos. Nesta pesquisa esses parâmetros não lixiviaram no ensaio em batelada (Tabela 7) e no ensaio em coluna com uso do permeâmetro, não sendo influenciados pelo pH da solução de extração (pH 5).

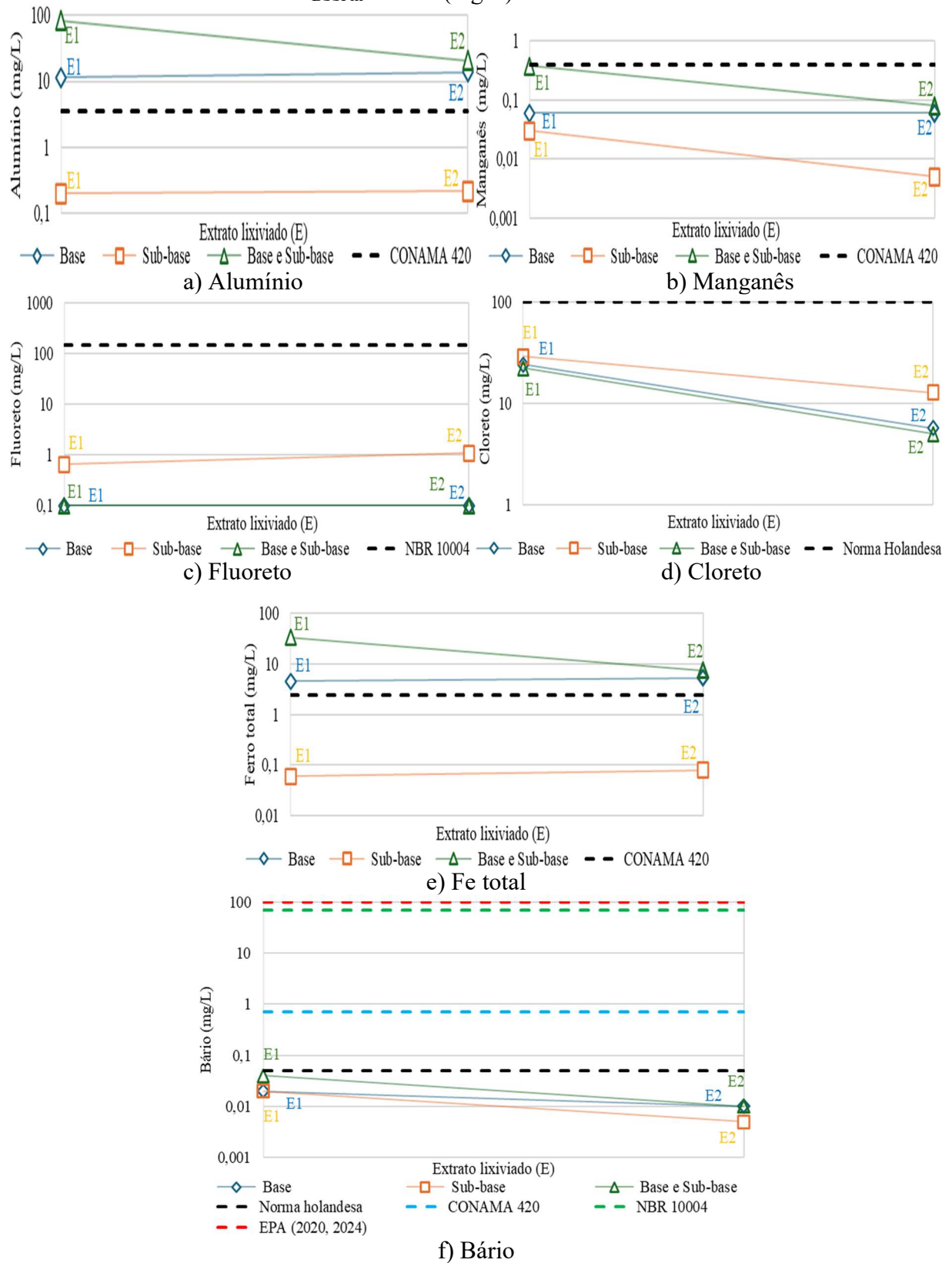
Para Gupta *et al.* (2019), a percolação constante da solução de extração no aparelho de coluna diminui a precipitação dos metais, algo que pode ter ocorrido no ensaio executado nesta pesquisa. Em relação ao pH, observa-se que os extratos lixiviados passam de pH 10 para 8, deixando de ser um percolado alcalino e fonte de contaminação para o lençol freático, atendendo ao limite da CONAMA 357 (Brasil, 2005).

Observando as concentrações de Cd, Cr total e Pb, contata-se que nenhuma mistura apresenta toxicidade metálica [NBR 10004 (ABNT, 2004a); EPA, 2024]. Nesses ensaios, o Fe total e Cr total não se apresentam como risco para qualidade de água [CONAMA 420 (Brasil, 2009); EPA, 2020]. Devido ao limite detecção do aparelho não é possível concluir se Cd e Cr

total estão de acordo com a Norma holandesa (VROM, 2000), porém todos não foram detectados.

Os parâmetros químicos As, Cd, Pb, CN^- total, Cu, Cr total, Hg, NO_3^- (nitrato como nitrogênio), Ag, Se e Zn não foram encontrados em nenhum dos extratos lixiviados obtidos por meio do aparelho de lixiviação em coluna construídos de acordo com as especificações da D 4874 nesta pesquisa. A inexistência de Cd e Cr total mesmo em alta pressão (7 bar) confirma os resultados obtidos com o uso do permeâmetro. Além disso, com exceção do Cr que está presente apenas no BSSF em 0,20% da sua composição na forma de Cr_2O_3 e do Zn que faz parte de 0,15% do BSSF e 0,05% do SN, na forma de ZnO, os demais elementos não fazem parte da composição do BSSF e SN (Costa, 2023).

Figura 22 — Parâmetros químicos dos extratos lixiviados com uso de aparelho de coluna com coluna simulando base com $M_{BSSFm} - 7$ bar (mg/L)



Fonte: elaborada pela autora (2025).

Souza (2016), Wang e Chen (2016) e Chaves (2017) não detectaram concentração de Cr na composição química do BSSF, o que pode estar relacionado ao limite de detecção do

aparelho utilizado. Cr tem um padrão de lixiviação anfotérico e é possível observar que mesmo com a variação do pH nos ensaios com MBSSF não foi extraído (Komonweeraket *et al.*, 2015).

A não contaminação de recursos hídricos por Cd diminui o risco de uma pessoa contrair doenças renais e dermatite alérgica por contato (EPA, 2009). Já a contaminação por Pb pode causar convulsões e morte (EPA, 2024).

A composição química do BSSF e SN não apresentou BaO nesta pesquisa, porém foi encontrado Ba nos extratos lixiviados (Costa, 2023), em baixas concentrações. De modo habitual, BaO não é detectado na composição química do BSSF e SN (Souza, 2016; Wang; Chen, 2016; Chaves, 2017; Campos; Rafael; Cabral, 2018; Amancio *et al.*, 2021a; Cartaxo *et al.*, 2023; Costa, 2023). No entanto, o Ba é encontrado no extrato lixiviado do BSSF e misturas com esse agregado (Cartaxo *et al.*, 2023; Costa, 2023), o que indica que o Ba está presente no BSSF, porém não na forma de óxido.

Comparando os valores de As, Cd, Cr total, Hg, Ag, Se, Ba, Pb e F^- com os VMP da NBR 10004 (Brasil, 2004a) para extrato lixiviado todos os limites foram atendidos e as misturas se caracterizam como resíduo não perigoso em um processo de lixiviação utilizando alta pressão (Figura 22).

O Al encontrado nos extratos (Figura 22a) tem origem no Al_2O_3 presente nos materiais utilizados: BSSF, 2,79% e SN, 31,31%. Como o SN possui uma quantidade expressiva de Al_2O_3 foram extraídas maiores concentrações de Al das MBSSF.

Fe total também foi lixiviado: E1, 4,59 mg/L e E2, 5,25 mg/L (Figura 23c); E1, 0,06 mg/L e E2, 0,08 mg/L (Figura 24c) e; E1, 33,35 mg/L e 7,39, mg/L (Figura 25c). Isso é esperado devido à presença expressiva de Fe_2O_3 na composição química do BSSF e SN (34,60% e 11,40%, respectivamente).

Cl^- e SO_4^{2-} foram detectados nos extratos de todas as misturas. Cl^- está presente na composição química do BSSF (0,01%), enquanto o SO_3 , que dá origem ao SO_4^{2-} , faz parte de 0,10% da composição da MBSSF.

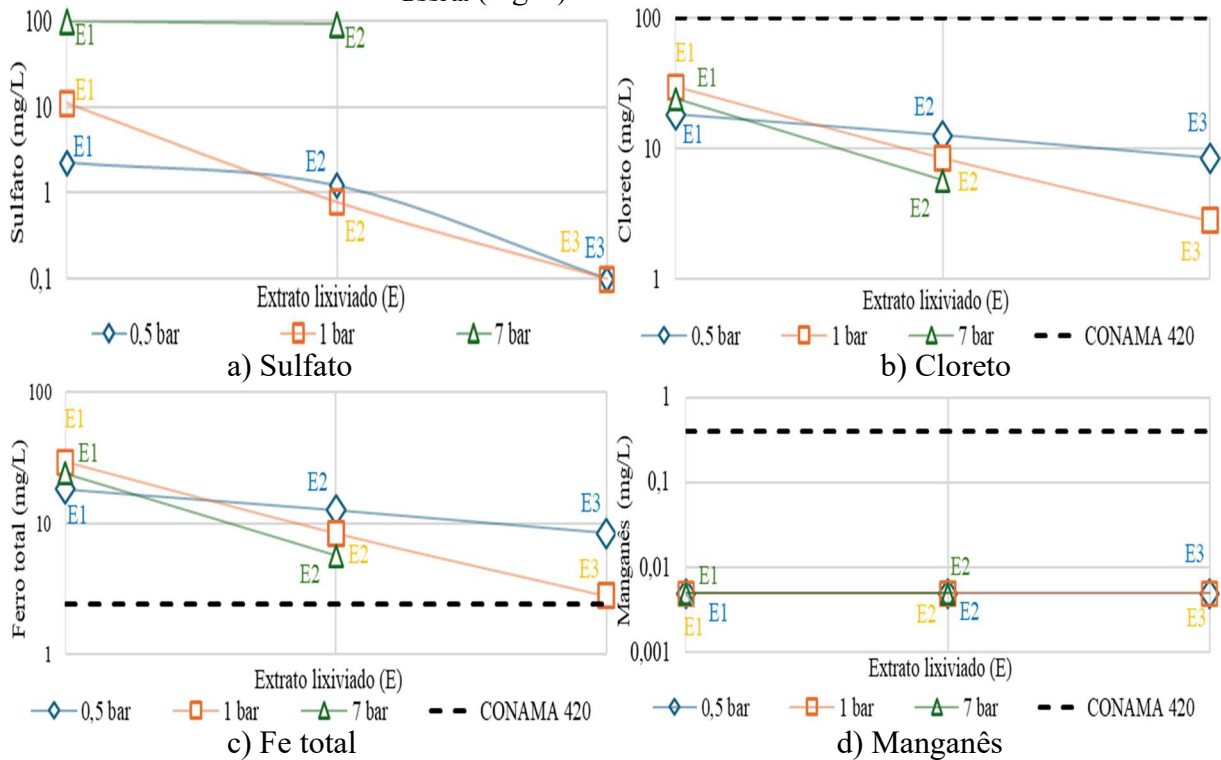
Mn foi lixiviado, consequência da presença de 2,76 % de MnO na composição do BSSF. O padrão de lixiviação catiônica foi identificado nesses ensaios a 7 bar, diminuindo a lixiviação de Mn com o aumento do pH (Komonweeraket *et al.*, 2015). Em relação ao pH, os extratos das misturas ficaram compreendidos entre 6 e 9. Os pH elevados deve estar relacionada a hidratação do agregado que gera a liberação de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (Bye, 1999).

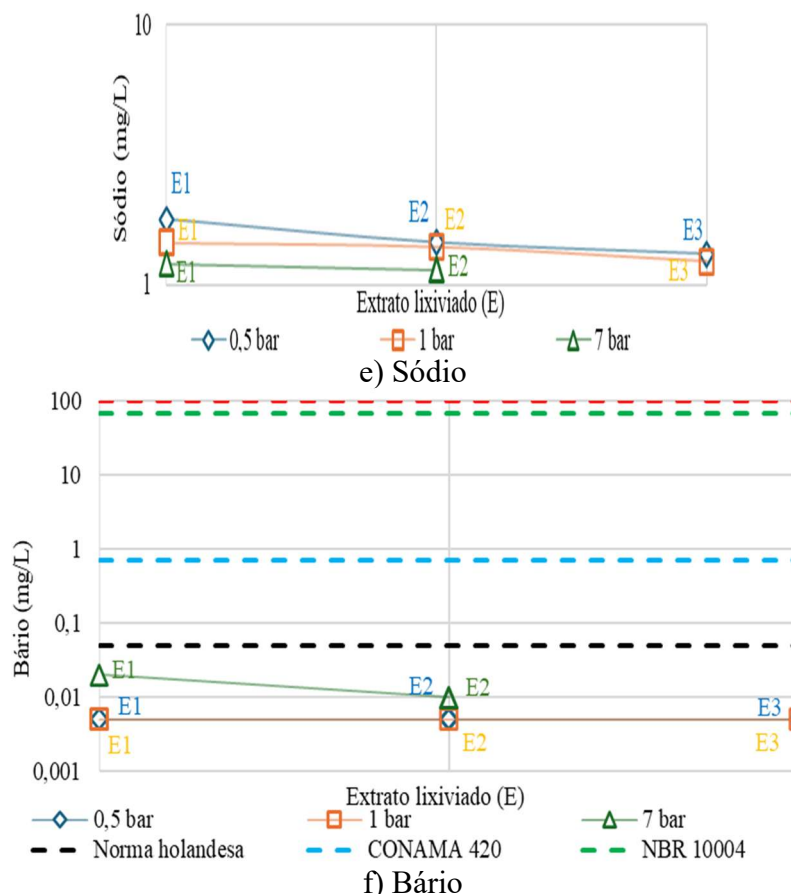
A avaliação dos extratos lixiviados demonstrou que As apresentou concentrações inferiores aos limites estabelecidos por todas as normativas em todas as misturas, indicando baixa mobilidade. Para o Ba todos os limites da Norma holandesa (VROM, 2000), NBR 10004,

CONAMA 420 e EPA (2020, 2024) foram atendidos integralmente. O Cd excedeu os limites da Norma holandesa em todas as misturas, mas manteve-se abaixo dos valores da NBR 10004, CONAMA 420 e EPA. Todas as misturas também apresentaram concentrações de Hg acima dos limites da Norma holandesa, sugerindo risco potencial em condições de percolação contínua, embora os valores estejam abaixo das demais normas avaliadas. O Pb foi o único elemento que permaneceu dentro dos limites normativos em todas as misturas, demonstrando estabilidade. O Cr total seguiu o seguinte padrão: todas as misturas excederam os limites da Norma holandesa, mas atenderam à NBR 10004, CONAMA 420 e EPA. Por fim, o Se ultrapassou o limite da CONAMA 420 exclusivamente na mistura M_{BSSF_i} (sub-base), sendo o único caso de não conformidade com a normativa brasileira.

No ensaio de lixiviação em coluna conduzido por Gupta *et al.* (2019), utilizando solução de extração a pH 4, observou-se Cd, Cr total, Fe total e Pb apresentam maior mobilidade em meios ácidos. Os autores destacam que a percolação contínua da solução reduz a precipitação de metais, o que pode explicar o comportamento do Ba no presente estudo.

Figura 23 — Parâmetros químicos dos extratos lixiviados com uso de aparelho de coluna com coluna simulando base com M_{BSSF_m} (mg/L)





Fonte: elaborada pela autora (2025).

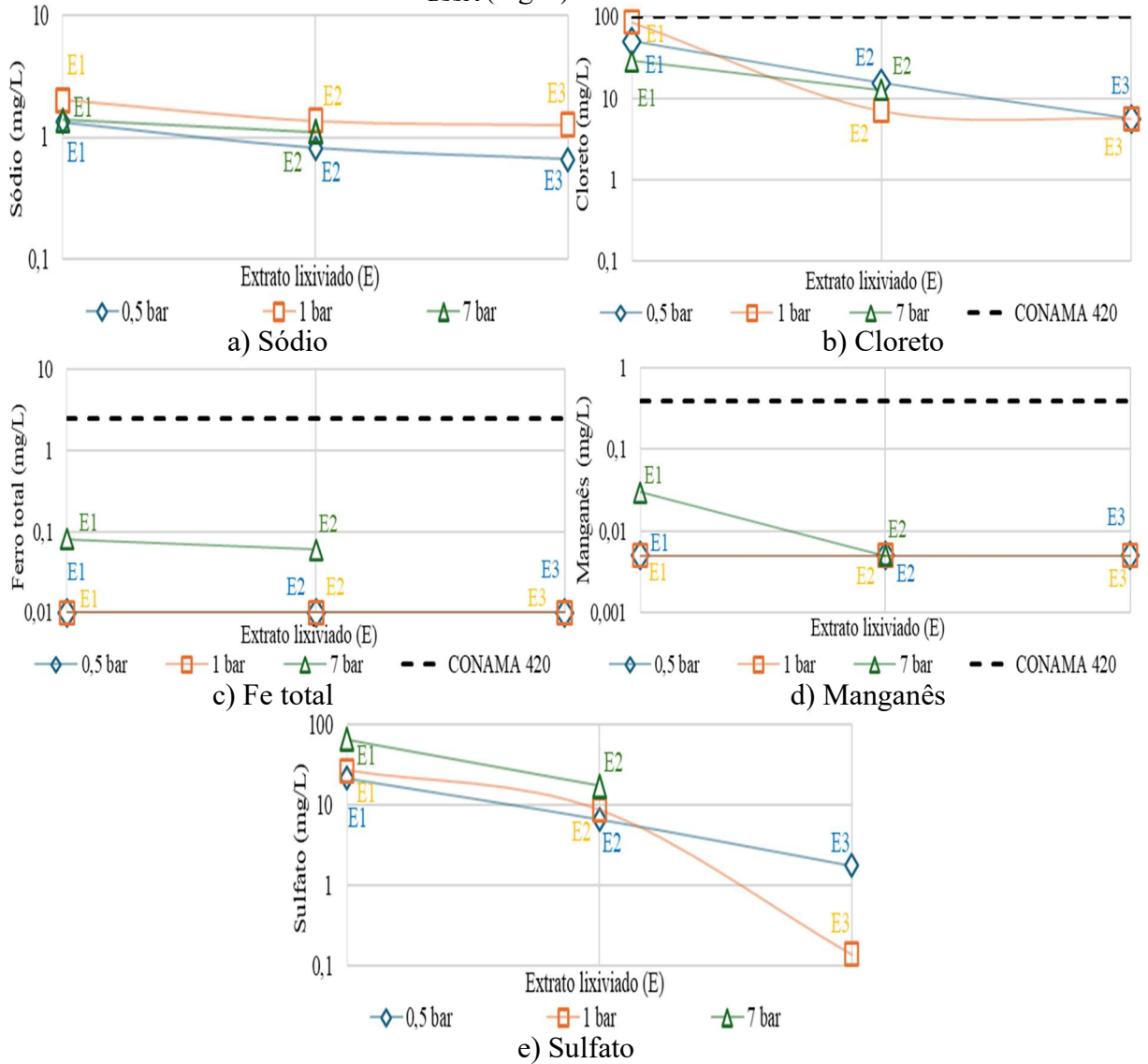
As Figuras 23c e 23d mostram que Fe total (E1 - 5,25 mg/L e E2 - 4,59 mg/L) e Mn (E1 - 0,06 mg/L e E2 - 0,06 mg/L), respectivamente, foram detectados nos ensaios de lixiviação em coluna com a M_{BSSFm} a 7 bar, exclusivamente, ocorrendo com todos os ensaios com BSSF e SN. Nessa pressão, as concentrações de SO_4^{2-} (E1 - 99,00 mg/L) - Figura 23a - e Ba (E1 - 0,02 mg/L) - Figura 23f - apresentaram valores acima das demais pressões. Nos ensaios com M_{BSSFm} ocorreu a peculiaridade de na pressão 1 bar, no primeiro extrato, serem detectados as maiores concentrações de Cl^- (29,42 mg/L).

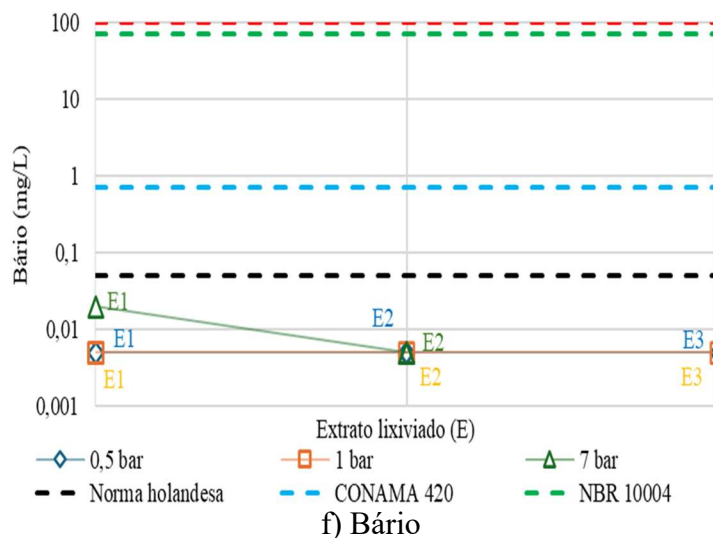
O pH dos extratos coletados a 0,5 e 7 bar se manteve em 8. No ensaio a 1 bar o primeiro e segundo extratos se mantiveram em pH 6 e o terceiro apresentou pH 8. Dessa forma, todos os pH se adequaram ao pH de uma água doce classe 1 (Brasil, 2005), de forma similar a mesma mistura compacta na energia intermediária (M_{BSSF_i}).

A M_{BSSFm} não apresenta toxicidade de Ba conforme NBR 10004 (ABNT, 2004a) e EPA (2024). Os limites da CONAMA 420 (Brasil, 2009) para Ba, Fe total e Mn; da EPA (2020) para Ba e da Norma holandesa (VROM, 2000) para Ba e Cl^- são respeitados. A Norma holandesa (VROM, 2000) é atendida em todos os extratos. Com a exceção do ensaio a 7 bar, que excedeu o limite da CONAMA 420 (Brasil, 2009) no parâmetro Fe total (E1 - 5,25 mg/L e E2 - 4,59

mg/L) - Figura 23c, os demais extratos não possuem toxicidade metálica e estão de dentro do limite de qualidade de água (Figura 24c e 25c).

Figura 24 — Parâmetros químicos dos extratos lixiviados com uso de aparelho de coluna com coluna simulando sub-base com M_{BSSF_i} (mg/L)





Fonte: elaborada pela autora (2025).

As Figuras 24a, 24c e 24d evidenciam que as concentrações de Ba (E1 - 0,02 mg/L; E2 - 0,005 mg/L), Fe total (E1 - 0,08 mg/L; E2 - 0,06 mg/L) e Mn (E1 - 0,03 mg/L), respectivamente, foram detectadas exclusivamente nos ensaios conduzidos à pressão de 7 bar. Nessa mesma condição, observou-se a maior concentração de SO_4^{2-} (E1 - 64,80 mg/L), conforme ilustrado na Figura 24e.

No ensaio realizado sob 1 bar de pressão, o primeiro extrato apresentou as maiores concentrações de Na (2,01 mg/L) e Cl^- (85,46 mg/L), conforme demonstrado nas Figuras 24a e 24b. De modo geral, todos os parâmetros químicos analisados atenderam aos limites estabelecidos pelas normas ambientais para toxicidade e qualidade da água, comportamento semelhante ao observado para a mistura M_{BSSFm} .

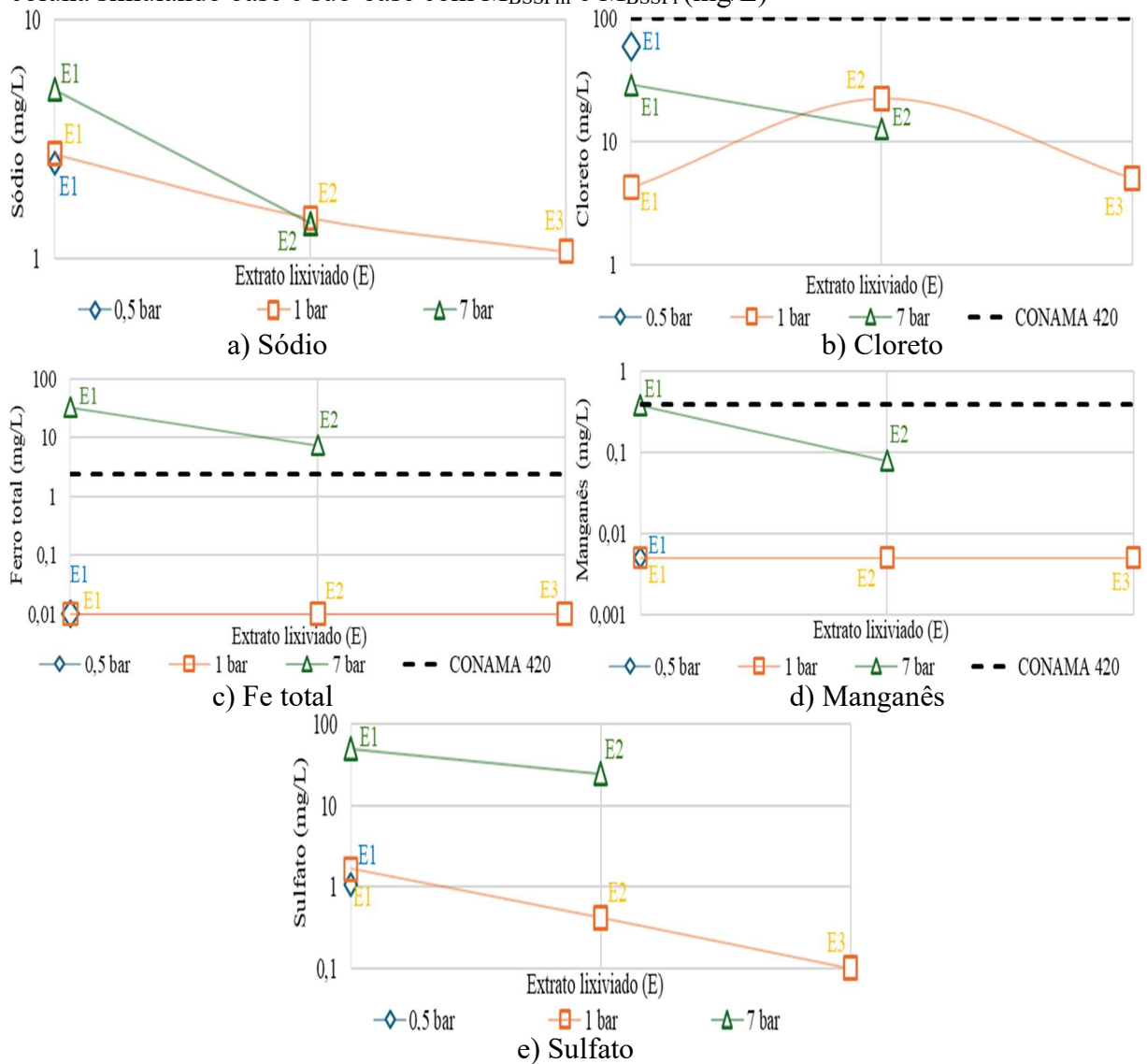
Quanto ao pH, no ensaio com a mistura M_{BSSFi} , os valores mantiveram-se em torno de 6. Nos extratos obtidos a 1 bar, os valores oscilaram entre 6 e 8, enquanto nos ensaios a 7 bar foram observados valores entre 6 e 7, indicando uma tendência de aumento ao longo da extração.

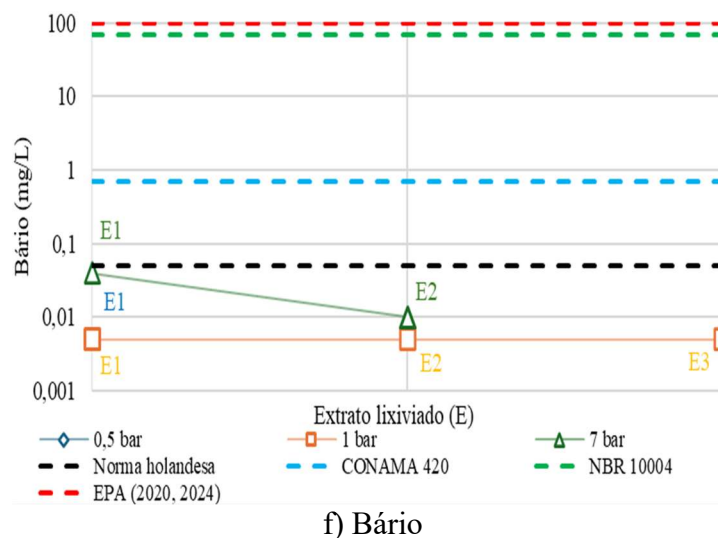
A mistura M_{BSSFi} , diferentemente das demais, não apresentou evidências de toxicidade metálica, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004a) e pela EPA (2024). Além disso, todos os extratos atenderam aos limites de qualidade da água preconizados pela Norma holandesa (VROM, 2000), pela CONAMA 420 (Brasil, 2009) e pela EPA (2020).

Observou-se que os ensaios com a mistura M_{BSSFi} foram, em média, 45 vezes mais demorados que aqueles com a M_{BSSFm} . Tal comportamento pode estar associado a uma possível desagregação dos grãos durante a compactação com energia modificada, resultando em uma estrutura mais permeável. Essa menor permeabilidade da M_{BSSFi} favoreceu a imobilização dos

metais presentes nos extratos. Por fim, os valores aproximados da $MEAS_{m\acute{a}x}$ para as misturas M_{BSSFm} ($2,589 \text{ g/cm}^3$) e M_{BSSFi} ($2,525 \text{ g/cm}^3$), bem como as respectivas umidades ótimas (6,77% e 6,47%), indicam similaridade nas curvas de compactação das duas formulações.

Figura 25 — Parâmetros químicos dos extratos lixiviados com uso de aparelho de coluna com coluna simulando base e sub-base com M_{BSSFm} e M_{BSSFi} (mg/L)





Fonte: elaborada pela autora (2025).

Conforme evidenciado nas Figuras 25c, 25d e 25f, as concentrações de Fe total (E1 - 33,35 mg/L; E2 - 7,39 mg/L), Mn (E1 - 0,38 mg/L; E2 - 0,08 mg/L) e Ba (E1 - 0,04 mg/L; E2 - 0,01 mg/L) foram detectadas exclusivamente nos extratos obtidos sob pressão de 7 bar. Nessa mesma condição experimental, observou-se maior extração de Na (E1 - 5,11 mg/L; E2 - 0,08 mg/L), conforme demonstrado na Figura 25a, quando comparado aos ensaios realizados em pressões inferiores.

Nos ensaios conduzidos a 0,5 bar, registraram-se as maiores concentrações de íons Cl^- (58,84 mg/L) e SO_4^{2-} (1,06 mg/L), conforme ilustrado nas Figuras 25b e 25e. Esse comportamento pode estar relacionado à maior lentidão no processo de percolação dos extratos, cuja coleta demandou aproximadamente 46 horas.

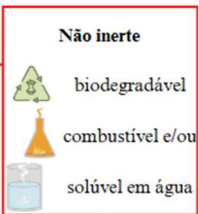
Quanto ao comportamento do pH, no ensaio a 0,5 bar foi observado valor constante de 5. No ensaio a 1 bar, o pH inicial foi 5, estabilizando-se posteriormente em 7. Já no ensaio realizado a 7 bar, identificou-se tendência crescente nos valores de pH ao longo da extração (E1 - 7; E2 - 8; E3 - 9). Os extratos com pH igual a 5 não atendem aos critérios estabelecidos para águas doces de Classe 1, conforme disposto na CONAMA 357 (Brasil, 2005).

Apenas os extratos obtidos sob pressão de 7 bar apresentaram concentrações de Ferro total superiores ao limite estabelecido pela CONAMA 420 (Brasil, 2009), com destaque para E1 (33,35 mg/L) e E2 (7,39 mg/L), como demonstrado na Figura 25c. Os demais extratos não apresentaram concentrações metálicas que ultrapassassem os padrões de qualidade para águas, permanecendo dentro dos limites considerados seguros água potável.

5.2.3 Estudo de lixiviação em regime de batelada e caracterização e avaliação ambiental do agregado siderúrgico Dry Pit

As concentrações dos parâmetros químicos Ar, Ba, Cd, Pb, Cr total, Fl^- , Hg e Ag ficaram abaixo do VMP do anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004a), classificando o agregado como resíduo não perigoso. No ensaio de solubilização, os parâmetros ferro, sulfato e surfactantes aniônicos ficaram acima do VMP do anexo G, classificando o material como um resíduo não inerte, ou seja, aquele que apresenta biodegradabilidade, combustibilidade e/ou solubilidade em água. A Figura 26 mostra as concentrações dos parâmetros químicos obtidos nesses ensaios com Dry Pit e, consequentemente, da mistura com esse material.

Figura 26 — Classificação ambiental do agregado siderúrgico Dry Pit após ensaios de solubilização e lixiviação

Extrato lixiviado		Não perigoso	Extrato solubilizado		Não inerte biodegradável combustível e/ou solúvel em água
Arsênio	<0,01		Alumínio	<0,02	
Bário	<0,005		Arsênio	<0,01	
Cádmio	<0,005		Bário	0,22	
Chumbo	<0,01		Cádmio	<0,005	
Cromo total	<0,005		Chumbo	<0,01	
Fluoreto	1,14		Cianeto Total	<0,01	
Mercúrio	<0,001		Cloreto	122,9	
Prata	<0,005		Cobre	<0,01	
			Cromo total	<0,005	
			Ferro	0,51	
			Fluoreto	0,61	
			Manganês	0,02	
			Mercúrio	<0,001	
			Nitrato (como N)	<1,0	
			Prata	<0,005	
			Selênio	<0,01	
			Sódio	16,94	
			Sulfato	279,3	
			Surfactantes Aniônicos	0,94	
			Zinco	0,09	

Fonte: elaborada pela autora (2025).

A presença de ferro no solubilizado pode ser atribuída a presença de Fe_2O_3 na composição química do Dry Pit. A determinação de SO_4^{2-} é justificada pela presença de SO_3 (Figura 26).

A Tabela 8 apresenta as concentrações de metais dos extratos lixiviados do Dry Pit/ M_{DryPit} provenientes do ensaio em batelada e os valores limites de normas orientadoras para qualidade água e limite de toxicidade metálica.

Tabela 8 — Parâmetros químicos dos extratos lixiviados conforme NBR 10005

Parâmetro	Dry Pit/ M_{DryPit}	Padrões				
		NBR 10004 Anexo F ^a	EPA ^a	CONAMA 420 ^b	Norma holandesa ^c	EPA ^d
As (mg/L)	< 0,01	1,00	5,00	0,01	0,01	5,00
Ba (mg/L)	< 0,005	70,00	100,00	0,70	0,05	100,00
Cd (mg/L)	< 0,005	0,50	1,00	0,005	0,0004	0,005
Cr total (mg/L)	< 0,005	5,00	5,00	0,05	0,001	0,10
Fe total (mg/L)	< 0,01	-	-	2,45	-	-
Pb (mg/L)	< 0,01	1,00	5,00	0,01	0,015	0,015
Hg (mg/L)	< 0,001	0,10	0,20	0,001	0,00005	0,20
Se (mg/L)	< 0,01	1,00	1,00	0,01	-	1,00
pH	7	-	-	-	-	-

Fonte: elaborada pela autora (2025).

Notas: ^a Concentração máxima de metais para características de toxicidade; ^b Valores orientadores para águas subterrâneas; ^c Valores alvo para águas rasas; ^d Regulamentos nacionais de água potável primária; ^e Costa (2023); Valores em negrito indicam que ultrapassaram os VMP de uma ou mais normas.

Notadamente, encapsular Cr total é complexo, pois este metal possui padrão de lixiviação anfotérico, ou seja, capacidade de reagir em condições ácidas ou básicas (Komonweeraket *et al.*, 2015). No entanto, segundo Liang, Peng e Luan (2012), Cr e Pb podem ser precipitados na forma de hidróxidos e carbonatos, em soluções básicas como os extratos lixiviados obtidos no ensaio em batelada, gerando a imobilização desses metais. Esses autores afirmam que o óxido de ferro pode adsorver metais tóxicos provocando a sua imobilização.

No ensaio em batelada de Pagio *et al.* (2022) com Dry Pit, as concentrações de Ba (1,99 mg/L), Pb (0,00264 mg/L), Cd (0,00012 mg/L), Cr total (0,02422 mg/L), As (0,00302 µg/L), Se (0,02963 mg/L) e Zn (0,08024 mg/L) ficaram abaixo dos VMP. Nesta pesquisa a M_{DryPit} atendeu aos limites da CONAMA 420 (Brasil, 2009), Norma holandesa (VROM, 2000) e normas da EPA (2020, 2024), não apresentando risco ambiental por toxicidade metálica.

As concentrações de Cd, Cr total e Pb estiveram abaixo do limite de detecção. A análise de conformidade das concentrações de Cd, Cr total e Hg em relação a Norma holandesa não pôde ser realizada devido aos limites de detecção do Espectrofotômetro de Absorção Atômica por Chama utilizado serem maiores que os limites de concentração da resolução. A CONAMA 357 (Brasil, 2005) define que águas doces classe 1 devem possuir o pH entre 6 e 9. O Dry Pit atendeu a esse limite (pH 9,5).

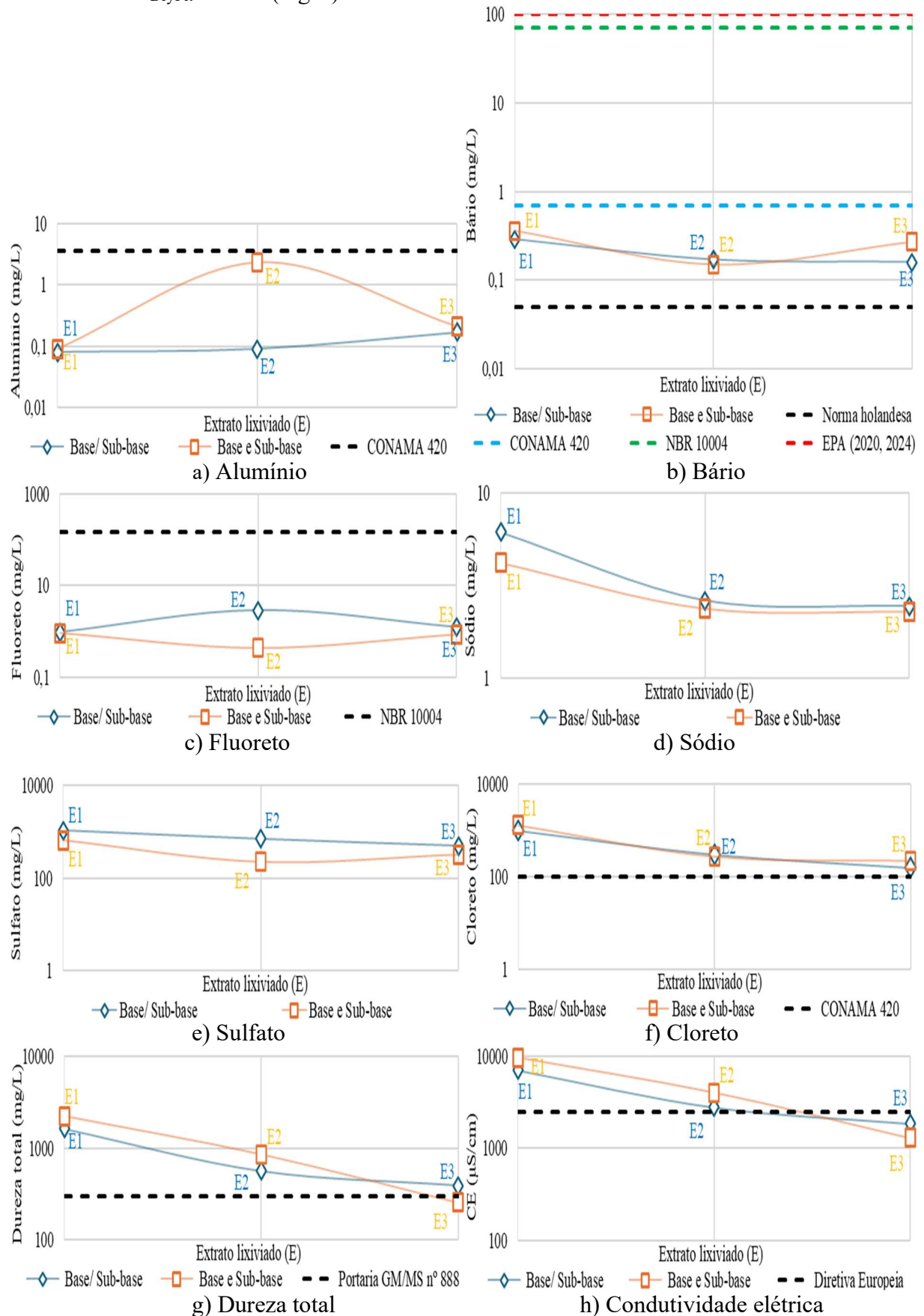
5.2.4 Estudo de lixiviação em regime de coluna ao longo do tempo e sob diferentes pressões e avaliação ambiental do M_{DryPit}

Os extratos lixiviados obtidos no aparelho de coluna, a pressão de 7 bar, demonstraram concentrações inferiores aos limites estabelecidos por todas as normativas em todas as misturas, indicando baixa mobilidade (Figura 27). Para o Ba (Figura 27), apenas a mistura M_{DryPit} excedeu o limite da Norma holandesa (VROM, 2000), permanecendo, contudo, dentro dos valores definidos pela NBR 10004, CONAMA 420 e EPA (2020, 2024); as demais misturas atenderam integralmente a todos os critérios.

O Cd excedeu os limites da Norma holandesa em todas as misturas, mas manteve-se abaixo dos valores da NBR 10004, CONAMA 420 e EPA. No ensaio de lixiviação em coluna executado por Gupta *et al.* (2019), com solução de extração com pH 4, foi identificado que Cd, Cr total, Fe total e Pb tendem a lixiviar em meios ácidos. Gupta *et al.* (2019) afirmam que a percolação constante da solução de extração no aparelho de coluna diminui a precipitação dos metais, algo que pode ter ocorrido no ensaio executado nesta pesquisa.

Todas as misturas apresentaram concentrações de Hg acima dos limites da Norma holandesa, sugerindo risco potencial em condições de percolação contínua, embora os valores estejam abaixo das demais normas avaliadas. O Pb foi o único elemento que permaneceu dentro dos limites normativos em todas as misturas, demonstrando estabilidade. O Cr total seguiu o seguinte padrão: todas as misturas excederam os limites da Norma holandesa, mas atenderam à NBR 10004, CONAMA 420 e EPA. Por fim, o Fe total, Mn e Se não ultrapassaram o limite da Resolução CONAMA 420.

Figura 27 — Parâmetros químicos dos extratos lixiviados com uso de aparelho de coluna com coluna com M_{DryPit} – 7 bar (mg/L)



Fonte: elaborada pela autora (2025).

A Figura 27 mostra os parâmetros químicos lixiviados nos extratos em ensaios em coluna a 7 bar de pressão. As, Cd, Pb, CN^- total, Cu, Cr total, Hg, NO_3^- (nitrato como nitrogênio), Ag, Se e Zn não foram encontrados em nenhum dos extratos lixiviados obtidos em coluna. Desses elementos apenas o Zn faz parte 0,09% do Dry Pit, na forma de ZnO, os demais elementos não fazem parte da composição do Dry Pit.

As concentrações de As, Cd, Cr total, Pb, Hg e Se permaneceram abaixo do limite de detecção do equipamento, mesmo sob percolação em alta pressão. Esses resultados confirmam os baixos teores obtidos nos ensaios em batelada e demonstram conformidade com os VMP da NBR 10004, classificando as misturas como resíduo não perigoso. A não contaminação de recursos hídricos por Cd diminui o risco de uma pessoa contrair doenças renais e dermatite alérgica por contato (EPA, 2009). Já a contaminação por Pb pode causar convulsões e morte (EPA, 2024).

O Ba foi detectado nas misturas com Dry Pit (Figura 28). A análise por FRX realizado nesta pesquisa não identificou BaO no Dry Pit, mas alguns autores encontraram esse óxido na composição desse agregado: Dimitrova (1996), 3,00%, Dimitrova e Mehanjiev (2000), 3,03%, Soumik (2018), 0,05% e Pagio *et al.* (2022), 0,16%.

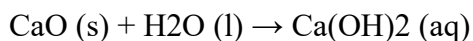
Comparando os valores de As, Cd, Cr total, Hg, Ag, Se, Ba, Pb e F^- com os VMP da NBR 10004 (Brasil, 2004a) todos os limites foram atendidos e a misturas se caracterizam como resíduo não perigoso em um processo de lixiviação utilizando alta pressão.

O Al encontrado nos extratos tem origem no Al_2O_3 presente no Dry Pit, 2,38%. SO_4^{2-} (Figura 28e) e Cl^- (Figura 28f) apresentaram grandes concentrações nos extratos das misturas com Dry Pit, influenciando a elevada CE, ocorrendo a diminuição dessas concentrações nos extratos E2 e E3 de cada. Cl^- está presente na composição química do Dry Pit (0,11%), enquanto o SO_3 , que dá origem ao SO_4^{2-} , faz parte de 4,76% do Dry Pit.

A concentração máxima de Cl^- foi nos primeiros extratos das colunas com base/ sub-base com M_{DryPitm} e da coluna com base e sub-base com M_{DryPitm} , 1002,0 mg/L e 1304,5, respectivamente. SO_4^{2-} também alcançou o ápice da concentração nas misturas: 1060 mg/L no E1 (base/ sub-base com M_{DryPitm}) e 655,0 no E1 (base e sub-base com M_{DryPitm}). Esse comportamento era o esperado pelo fato de no extrato solubilizado a concentração de Cl^- ter sido de 122,9 mg/L e SO_4^{2-} de 279,3 mg/L.

A presença de Ca nos extratos lixiviados tem origem na composição química do 65,86% de CaO. As grandes concentrações de Ca se apresentaram nos primeiros extratos coletados em cada coluna, porém de forma decrescente no decorrer da coleta dos extratos seguintes.

Em relação ao pH, os extratos das misturas com Dry Pit possuem pH 10. O pH elevado das misturas deve estar relacionada a hidratação do agregado que gera a liberação de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) (Bye, 1999) de acordo com a reação:

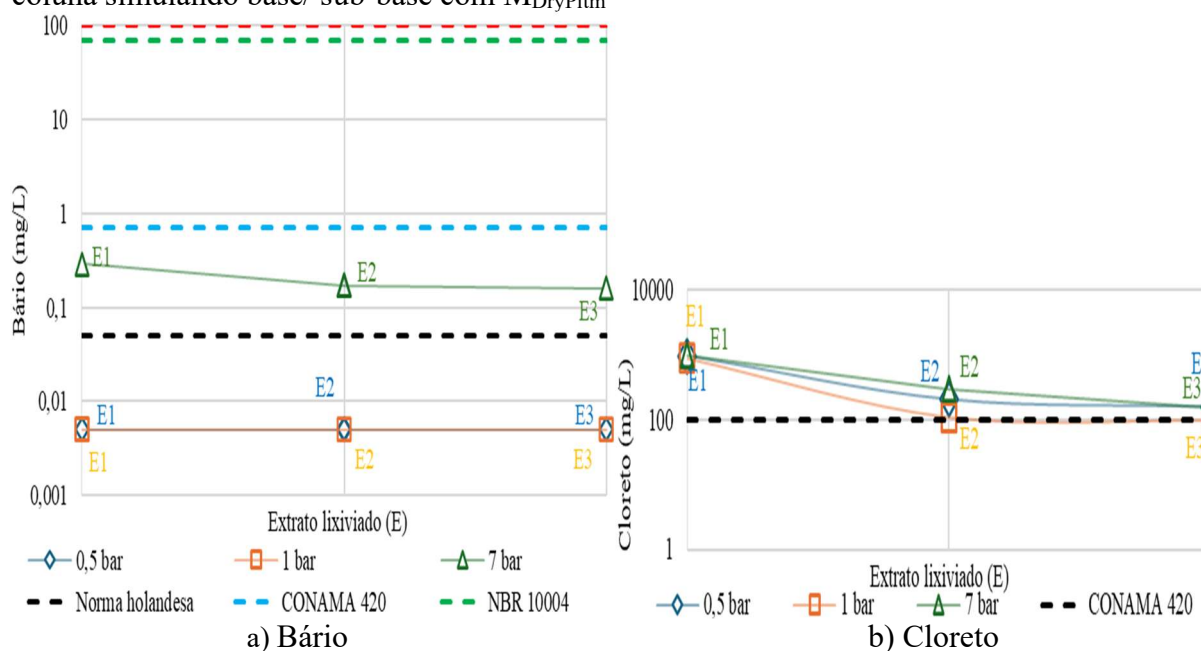


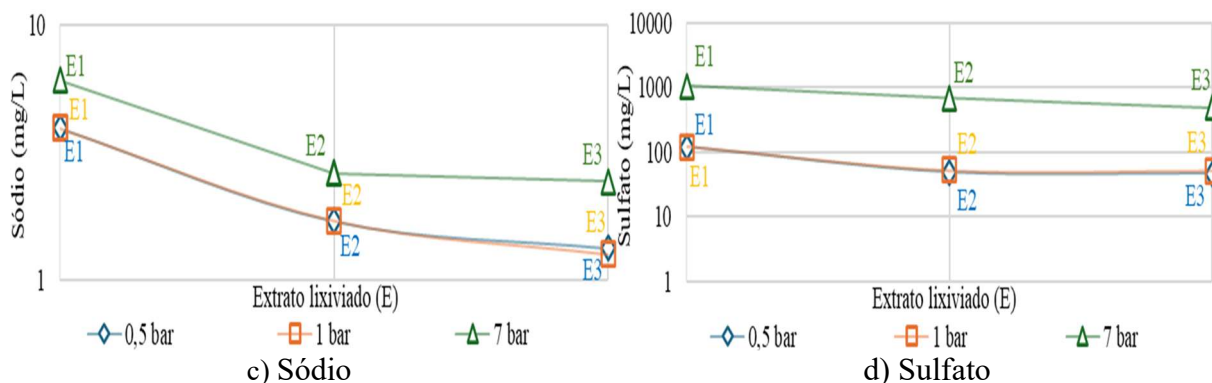
Em geral, os extratos superaram o limite do CE da diretiva da União Europeia 2020/2184 de 2500 $\mu\text{S/cm}$ (União Europeia, 2020) foram E1, 7040,00 $\mu\text{S/cm}$, e E2, 2800,00 $\mu\text{S/cm}$, da M_{DryPitm} e E1, 9640,00 $\mu\text{S/cm}$, e E2, 4050,00 $\mu\text{S/cm}$, da coluna com duas camadas da M_{DryPitm} .

Os elementos Fe total e Mn não foram extraídos das colunas, independente da pressão utilizada nos ensaios. Esse comportamento da lixiviação desses metais ocorreu também nos ensaios de lixiviação em coluna com uso do aparelho de coluna com base e sub-base com M_{DryPitm} , apontando isso como uma característica do Dry Pit. Segundo Mahedi, Cetin e Dayioglu (2019), a solubilidade de Fe diminui em meios alcalinos, como nos extratos das M_{DryPit} .

A Figura 28 mostra os parâmetros químicos lixiviados em lixiviação em coluna no sistema simulado base/ sub-base com M_{DryPitm} .

Figura 28 — Parâmetros químicos dos extratos lixiviados com uso de aparelho de coluna com coluna simulando base/ sub-base com M_{DryPitm}





Fonte: elaborada pela autora (2025).

As concentrações de Ba (E1 - 0,29 mg/L, E2 - 0,17 mg/L e E3 - 0,16 mg/L) só são identificados nos ensaios com pressão de 7 bar (Figura 28a). Não se pode relacionar essas concentrações ao comportamento de lixiviação anfotérico do Ba (Mahedi, Cetin e Dayioglu, 2019), pois não há variação do pH e ainda ocorre a diminuição desse metal no decorrer das coletas.

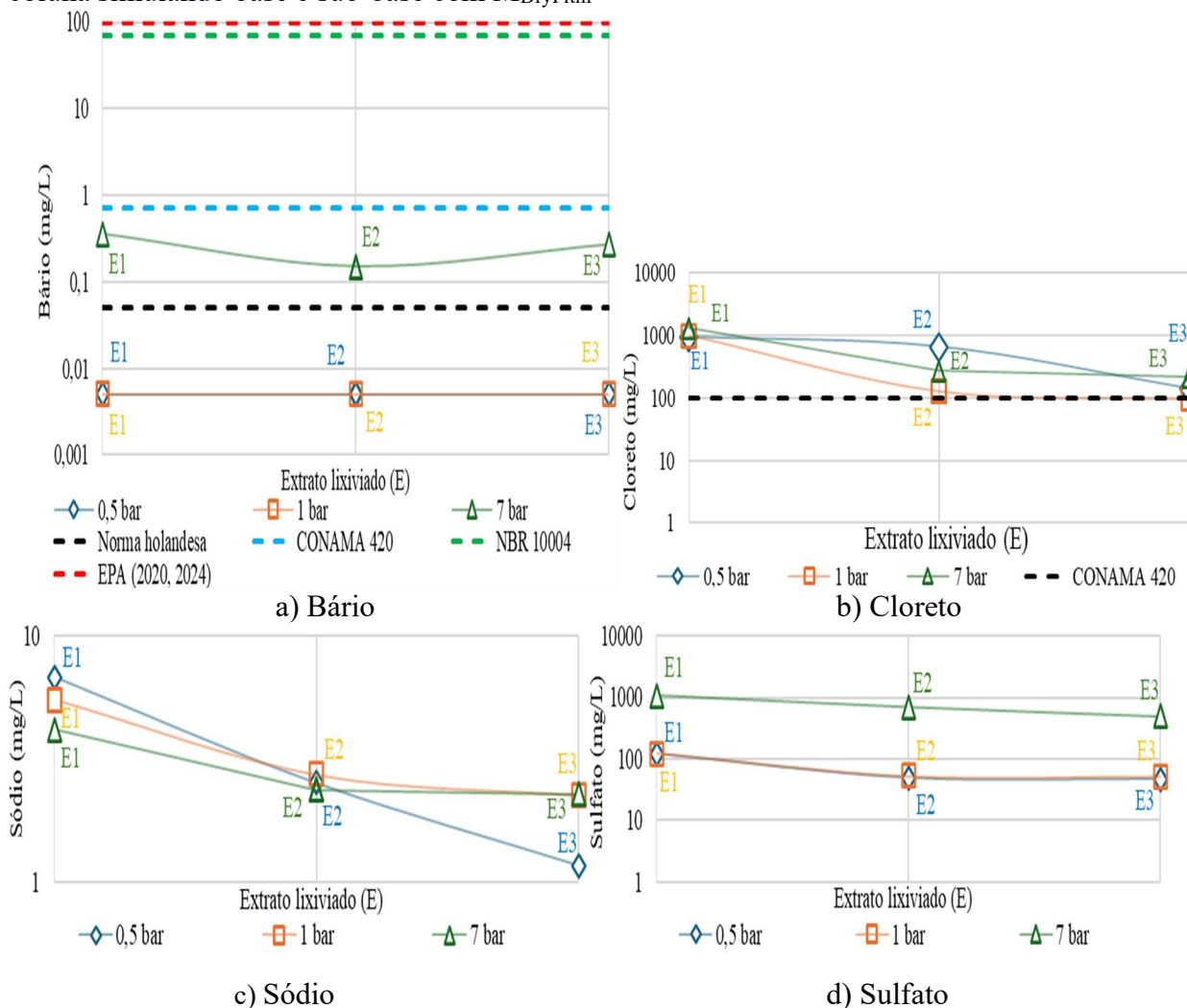
A pressão de 7 bar influenciou no aumento da concentração de Na (E1 - 6,11 mg/L, E2 - 2,62 mg/L e E3 - 2,44 mg/L) (Figura 28c) e SO_4^{2-} (E1 - 1060,00 mg/L, E2 - 698,00 mg/L e E3 - 497,50 mg/L) nos três extratos coletados (Figura 29d).

No ensaio em 0,5 bar é possível verificar a diminuição do pH no decorrer da coleta dos três extratos (8; 6,5 e 6,5, respectivamente). Nas pressões de 1 bar o pH dos extratos lixiviados se manteve em 7 e no ensaio a 7 bar em pH 10, não se adequando às características de água doce classe 1 (Brasil, 2005).

Analisando as normas, constata-se que M_{DryPitm} não apresenta toxicidade de Ba ao não ultrapassar os VMP da NBR 10004 (ABNT, 2004a) - 70 mg/L - e EPA (2024) - 100 mg/L. O Ba encontrado nos três extratos coletados no ensaio a 7 bar (0,29 mg/L, 0,17 mg/L e 0,16 mg/L) ficaram acima do limite da Norma holandesa (VROM, 2000), não se adequando a esse limite de qualidade de água.

Os limites para Ba (0,70 mg/L), Fe total (2,45 mg/L) e Mn (0,40 mg/L), de acordo com a CONAMA 420 (Brasil, 2009), e para Ba (100,00 mg/L), conforme a EPA (2020), foram respeitados. O limite de 100 mg/L de Cl^- da Norma holandesa (VROM, 2000) apenas foi respeitado pelo terceiro extrato (98,07 mg/L) do ensaio a 1 bar, indicando que esse extrato é o único adequado da M_{DryPitm} aos limites de toxicidade e de qualidade de água (Figura 28b).

Figura 29 — Parâmetros químicos dos extratos lixiviados com uso de aparelho de coluna com coluna simulando base e sub-base com $M_{DryPitm}$



Fonte: elaborada pela autora (2025).

A lixiviação de Na (E1 - 6,83 mg/L) também foi máxima na pressão de 0,5 bar com colunas com duas camadas de pavimento (Figura 29c), diferente da mistura que representa apenas uma camada de pavimento com Dry Pit com concentração menor de Na (E1 - 5,49 mg/L) - Figura 28c. Ba foi encontrado apenas nos extratos a 7 bar (E1 - 0,36 mg/L, E2 - 0,15 mg/L e E3 - 0,27 mg/L), enquanto as concentrações de SO_4^{2-} aumentaram conforme o aumento da pressão, mas diminuindo no decorrer de cada ensaio.

O pH é crescente no decorrer dos ensaios a 0,5 bar (5, 6 e 8) e 1 bar (6, 7 e 9). Apenas o primeiro extrato do ensaio a 0,5 bar não obteve um pH de acordo com uma água doce classe 1 (Brasil, 2005). No ensaio a 7 bar o pH permaneceu em 10.

Do mesmo modo que a $M_{DryPitm}$, o ensaio com duas camadas com $M_{DryPitm}$ não apresenta toxicidade de Ba conforme NBR 10004 (ABNT, 2004a) e EPA (2024). O Ba encontrado nos

três extratos coletados no ensaio a 7 bar (0,36 mg/L, 0,27 mg/L, 0,15 mg/L) ficaram acima do limite da Norma holandesa (VROM, 2000).

Os limites da CONAMA 420 (Brasil, 2009) para Ba, Fe total e Mn e da EPA (2020) para Ba foram respeitados. O limite de 100 mg/L de Cl^- da Norma holandesa (VROM, 2000) apenas é respeitado pelo terceiro extrato (95,27 mg/L) do ensaio a 1 bar, indicando, da mesma forma que a M_{DryPitm} , que esse extrato é o único adequado aos limites de toxicidade e de qualidade de água de modo geral.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação avaliou o comportamento da lixiviação de parâmetros químicos dos extratos lixiviados dos ensaios de lixiviação em batelada do BSSF, Dry Pit, M_{BSSF} e da M_{DryPit} e em coluna das amostras com base/sub-base com $M_{DryPitm}$, base e sub-base com $M_{DryPitm}$, base com M_{BSSFm} , sub-base com M_{BSSF_i} e base e sub-base com M_{BSSFm} e M_{BSSF_i} . Assim, as seguintes conclusões podem ser realizadas:

6.1 Principais conclusões

6.1.1 Caracterização do ponto de vista físico, mecânico e químico dos agregados Dry Pit, BSSF e solo natural e camadas de base e sub-base de pavimento

Os ensaios de compactação realizados com M_{BSSFm} , M_{BSSF_i} e $M_{DryPitm}$ mostraram a inadequação dos ensaios de compactação de solos, orientado pela NBR 7182/20, em consequência da curva de saturação está acima da curva de compactação.

O comportamento das curvas de compactação das M_{BSSFm} e M_{BSSF_i} sugerem uma possível quebra dos grãos com o aumento da energia de compactação. A proximidade entre os valores de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima das misturas mostram uma similaridade entre as características físicas das misturas.

O ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) da M_{BSSF} indica um maior potencial, em razão da maior porcentagem em massa do composto em forma de óxido, da M_{BSSF} de lixiviar Si (silício), Fe (ferro), Al (alumínio), K (potássio), Ti (titânio), Cr (cromo), Mn (manganês), Zn (zinco) e Zr (zircônio) em comparação a M_{DryPit} . Enquanto a composição química da mistura com Dry Pit mostra maior propensão de lixiviação de Ca (cálcio), P (fósforo), Cl⁻ (cloreto), S (enxofre) e Sr (estrôncio).

6.1.2 Investigar a lixiviação de metais e outros componentes químicos em camadas de base, sub-base nos ensaios em batelada, conforme NBR 10005

As (arsênio), Cd (cádmio), Cr total e Pb (chumbo) não foram lixiviados dos agregados siderúrgicos e de suas respectivas misturas pelo método de lixiviação em batelada.

BSSF e M_{BSSF} lixiviaram Ba, Fe total, Hg e Se, se configurando fontes de contaminação de água potável. No entanto as concentrações não representam toxicidade metálica. Já Dry Pit/

M_{DryPit} não lixiviam metais tóxicos. Além disso, os agregados siderúrgicos e suas misturas, de acordo com a lixiviação em batelada, são fontes de dureza da água.

6.1.3 Investigar a lixiviação de metais e outros componentes químicos em camadas de base, sub-base e base e sub-base nos ensaios em coluna ao longo do tempo e sob diferentes pressões, conforme ASTM D 4874

As misturas avaliadas apresentaram, em geral, comportamento ambiental satisfatório, com excedentes localizados e restritos, majoritariamente, aos parâmetros mais conservadores da Norma holandesa. A M_{BSSF}, diferente das demais misturas, não apresenta toxicidade metálica e respeita todos os limites de qualidade de água. Contudo, base e sub-base com M_{DryPit}, no terceiro extrato a 1 bar, está de acordo com os limites de toxicidade e de qualidade de água de modo geral. A estabilidade dos elementos As, Cd, Pb, Cu, Cr total, Hg e Ag em todas as amostras, independente da pressão aplicada e do tempo de ensaio, reforça o potencial de aproveitamento dessas misturas como materiais não perigosos, desde que respeitadas as exigências normativas específicas do contexto de aplicação.

Em relação a Ca e Mg, as misturas com BSSF e Dry Pit não se configuram como fonte de contaminação por dureza total em todos os ensaios de coluna realizados.

6.1.4 Caracterizar e classificar os agregados siderúrgicos e camadas de base e sub-base por meio de ensaios de lixiviação

BSSF e Dry Pit, por não apresentarem substâncias tóxicas em níveis críticos, configuram-se como alternativas viáveis de agregado para a construção civil. Sua reutilização representa uma solução ambientalmente adequada, evitando a disposição final em aterros.

Dado a escória de ferro e aço não ser categorizadas como resíduos perigosos no anexo B (ABNT, 2004a), constata-se que Dry Pit e BSSF são resíduos não perigosos. Isso é corroborado pelas concentrações obtidas nos ensaios de batelada e coluna que demonstram um comportamento ambiental satisfatório desses materiais em camadas de pavimento.

As contribuições desta pesquisa fornecem subsídios técnicos sobre a toxicidade e impactos ambientais associados ao uso de agregados siderúrgicos, contribuindo para a superação de barreiras regulatórias e para a ampliação de sua aplicação em projetos sustentáveis.

Embora os estudos analisados caracterizem o Dry Pit e o BSSF como resíduos sólidos não perigosos e não inertes, é importante salientar que, apesar da ausência generalizada de lixiviação de materiais perigosos, a solubilização de compostos químicos permanece como uma questão ambiental relevante. Essa característica pode restringir o uso desses agregados em determinadas aplicações e reforça a necessidade de estratégias complementares para mitigar riscos ambientais.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

No intuito de avançar na compreensão da lixiviação de metais provenientes do BSSF e Dry Pit em camadas de base e sub-base de pavimentos, os seguintes estudos são sugeridos.

1. Um aspecto ainda pouco explorado, mas com potencial significativo, refere-se ao uso de técnicas de encapsulamento de contaminantes. Tal abordagem, que combina estabilização química e física, pode contribuir para a redução dos impactos ambientais associados ao uso de Dry Pit e BSSF, ampliando sua viabilidade em aplicações mais exigentes.
2. A análise também revelou lacunas importantes na literatura, especialmente no que se refere à padronização das metodologias analíticas e à investigação de condições ambientais variáveis, como pH, temperatura e exposição prolongada. A escassez de estudos que relacionam correlacionem as propriedades químicas e mecânicas desses agregados com seu desempenho ambiental destaca a necessidade de uma abordagem mais abrangente nas pesquisas futuras.
3. Além do processo de lixiviação é necessário explorar os conhecimentos relacionados aos processos de solubilização de parâmetros químicos, devido ao fato do Dry Pit e o BSSF, e suas respectivas misturas, se caracterizarem como resíduos não inertes.

REFERÊNCIAS

ARCELORMITTAL MONLEVADE. **Catálogo de coprodutos** - público externo. Monlevade: ArcelorMittal Monvelade, 2021.

ARCELORMITTAL PECÉM. **Relatório de resultados**. Pecém: ArcelorMittal Pecém, 2024.

AMANCIO, F. A. **Estudo de propriedades no estado fresco de argamassas de revestimento com escória de aciaria BSSF**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

AMANCIO, F. A.; DIAS, A. R. O.; LIMA, D. A.; CABRAL, A. E. B. Estudo do comportamento no estado fresco e endurecido de argamassa com escória de aciaria BSSF. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 3, p. e13031, 2021a.

AMANCIO, F. A.; DIAS, A. R. O.; LIMA, D. A.; CABRAL, A. E. B.; MESQUITA, E. F. T. Evaluation of mortars produced with Baosteel slag short flow (BSSF) steel slag as fine aggregate. **Cerâmica**, v. 67, n. 381, p. 48–57, 2021b.

AMANCIO, F. A.; LIMA, D. A.; DIAS, A. R. O.; MESQUITA, E. F. T.; CABRAL, A. E. B. Propriedades mecânicas de argamassas com substituição da areia natural por escória de aciaria BSSF (baosteel's slag short flow). **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, p. e-12562, 2020.

ARAÚJO, L. B. R. **Rheological, mechanical and durability evaluation of alkali-activated pastes and concretes designed based on fly ash and steel slag**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estrutura e construção Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2023.

ARAÚJO, L. B. R.; TARGINO, D. L. L.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; FABBRI, A.; CABRAL, A. E. B.; CHEHADE, R.; COSTA, H. N. Impact of curing temperature and steel slag aggregates on high-strength self-compacting alkali-activated concrete. **Buildings**, Fortaleza, v. 15, n. 3, p. 457, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15030457>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/3/457>. Acesso em: 12 abr. 2025.

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DO CEARÁ. **Plano estratégico de saneamento básico do Ceará**. Fortaleza, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2015/03/nbr-07211-2005-agregados-para-concreto-especificacao.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004a. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/170/nbr10004-residuos-solidos-classificacao>. Acesso em: 19 jul. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b. Disponível em: [https://wp.ufpel.edu.br/filesPDFABNT/NBR 10005](https://wp.ufpel.edu.br/filesPDFABNT/NBR%2010005). Acesso em: 19 jul. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c. Disponível em: [https://wp.ufpel.edu.br/filesPDFABNT/NBR 10005](https://wp.ufpel.edu.br/filesPDFABNT/NBR%2010006). Acesso em: 19 jul. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: solo - determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: solo - determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4327 – 03**: Standard Test Method for Anions in Water by Chemically Suppressed Ion Chromatography. Estados Unidos, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4874 – 95**: Standard Test Method for Leaching Solid Material in a Column Apparatus. Estados Unidos, 2017.

BARROS, K. S. **Estudo de cinzas volantes de uma termelétrica da região metropolitana de Fortaleza-CE para aplicação em camadas granulares de pavimentos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/25073>. Acesso em: 22 jul. 2023.

BAUNE, M.; THÖMING, J. Recycling options for steel working slag and upcycling perspectives. **Procedia Manufacturing**, v. 8, p. 643-648, 2017.

BENITTEZ, L. H.; MARQUES NETO, J. C.; FERREIRA, F. G. S.; CHOTOLI, F. F.; SANTOS, R. F. C.; GUILGE, M. S. Bloco de concreto com incorporação de escória de aciaria BSSF: um estudo para substituição de agregados naturais. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, Paraíba, v. 59, n. 3, p. 785-801, 2022.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras; ABEDA, 2022.

BEZERRA, A. K.; MELO, A. R.; FREITAS, I. L.; BABADOPULOS, L. F.; CARRET, J. C.; SOARES, J. B. Determination of modulus of elasticity and Poisson's ratio of cementitious materials using S-wave measurements to get consistent results between static, ultrasonic and resonant testing. **Construction and Building Materials**, v. 398, p. 132456, 2023.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e ambientais para o seu enquadramento [...]. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 53, p. 58-63, 18 mar. 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas [...]. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 249, p. 81-84, 30 dez. 2009.

BRASIL. Decreto nº 875, de 19 de julho de 1993. Promulga o texto da Convenção sobre o Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu Depósito. **Diário Oficial da União**: Poder Executivo: seção 1, Brasília, DF, p. 10050, 1993.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: Poder Legislativo: seção 1, Brasília, DF, p. 3, 2010. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2010/lei-12305-2-agosto-2010-607598-publicacaooriginal-154180-pl.html>. Acesso em: 29 mai. 2023.

BRASIL. **Manual de pavimentação**. 3. ed. rev. Rio de Janeiro: 2006.

BRASIL. Portaria nº 52, de 15 de março de 2021. Estabelece o Regulamento Técnico para os Sistemas Orgânicos de Produção e as listas de substâncias e práticas para o uso nos Sistemas Orgânicos de Produção. **Diário Oficial da União**: Poder Executivo: seção 1, Brasília, DF, p. 10, 15 mar. 2021a. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=23/03/2021&jornal=515&pagina=10>. Acesso em: 22 jan. 2024.

BRASIL. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**: Poder Executivo: seção 1, Brasília, DF, p. 10, 2021b.

BYE, G. C. **Portland cement composition: production and properties**. 2. ed. London: Thomas Telford Publishing, 1999.

CAMPOS, S. A.; RAFAEL, M. F. C.; CABRAL, A. E. B. Evaluation of steel slag of Companhia Siderúrgica do Pecém replacing fine aggregate on mortars. **Procedia Structural Integrity**, v. 11, p.145-152, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.020>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618301215>. Acesso em: 19 ago. 2023.

CAMPELLO, F. A. **Estudo da lixiviação e da estabilização de elementos tóxicos presentes em cinzas leve de carvão**. 2018. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN/SP), São Paulo, 2018.

CAPUTO, P. C. **Mecânica dos solos e suas aplicações** – Fundamentos. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CARTAXO, F. M. **Durabilidade a longo prazo de concretos produzidos com agregados de escória de aciaria BSSF**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

CARTAXO, F.; FERREIRA, F. G. S.; FREITAS, K. M. G. F.; NASCIMENTO, L. C.; GUILGE, M. S.; ZANETTI, C. Propriedades mecânicas de concretos sustentáveis com incorporação de escória de aciaria BSSF em substituição aos agregados naturais. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB [Online]**, v. 60, n. 4, p. 1413-1433, 2023.

CAVALCANTE, F. C. I. T. **O uso da técnica de encapsulamento como alternativa para o emprego de solo contaminado por derivados de petróleo em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/13379>. Acesso em: 22 jul. 2023.

CETIN, B.; AYDILEK, A. H.; LI, L. Experimental and numerical analysis of metal leaching from fly ash-amended highway bases. **Waste Management**, v. 32, n.5, p. 965–978, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.12.012>. Acesso em: 20 abr. 2025.

CHAVES, I. L. **Análise do desempenho de um processo hidrometalúrgico de separação de óxidos da escória de conversor a oxigênio obtida no processo BSSF a variação dos reagentes HCl e CH₃COOH**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/29543>. Acesso em: 19 ago. 2023.

CHEN, J. S.; WEI, S. H. Performance Evaluation of Asphalt Pavements Mixed with Steel Slag. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v. 11, n. 0, p. 1686-1699, 2015. DOI: <https://doi.org/10.11175/easts.11.1686>. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/easts/11/0/11_1686/_article/-char/en. Acesso em: 19. jun. 2023.

CHEN, S.; PRAMESTHI, T. W.; PARAMITHA, P. A.; WU, C. Environmental impact assessment and total cost analysis of BOF and BSSF slag in asphalt concrete. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 31, n. 4, p. 04017034, 2017a.

CHEN, T. T.; WANG, C. C.; HSIUNG, B. C. B.; WANG, H. Y. Seven-day test result assessment of the developed strength in composite cement mortar with slag. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 587-597, 2017b.

COSTA, L. I. O. **Análise da viabilidade técnica e ambiental da utilização do agregado siderúrgico Baosteel Slag Short Flow (BSSF) na estabilização de solos**. 2023. Dissertação

(Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2023.

COSTA, L. I. O.; BESSA, I. S., BASTOS, J. B. S., VALE, A. C. F., FARIAS, T. R. L. Predictive performance evaluation of an eco-friendly pavement using Baosteel's Slag Short Flow (BSSF) by means of mechanistic-empirical simulations, **SSRN**, 2024.

DAYIOGLU, A. Y.; AYDILEK, A. H. Effect of pH and subgrade type on trace-metal leaching from steel-slag embankments into groundwater, **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 8, p. 04019149, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME – 041**: Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 1994a.

_____. **DNER – ME – 080**: Análise Granulométrica por Peneiramento - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 1994b.

DIAS, A. R. O.; AMANCIO, F. A.; SOUSA, I. L. X.; LUCAS, S. O.; LIMA, D. A.; CABRAL, A. E. B. Efeitos da substituição do cimento Portland por escória de aciaria BSSF nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, p. e-12890, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1190>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/MB4B78ZQwfDsJDNLKJLSLrK/?format=pdf>. Acesso em: 19 ago. 2023.

DIMITROVA, S. V. Metal sorption on blast-furnace slag. **Water Research**, v. 30, n. 1, p. 228-232, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00104-S](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00104-S). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/004313549500104S>. Acesso em: 02 fev. 2024.

DIMITROVA, S. V.; MEHANJIEV, D. R. Interaction of blast-furnace slag with heavy metal ions in water solutions. **Water Research**, v. 34, n. 6, p. 1957-1961, 2000.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 139/2010 - ES**: Pavimentação: Sub-base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT 141/2010 - ES**: Base Estabilizada Granulometricamente – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2022.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **40 CFR 261.24**. Estados Unidos: Environmental Protection Agency, 2024. Disponível em: <https://www.ecfr.gov/current/title-40/part-261/section-261.24>. Acesso em: 20 jan. 2024.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Basic Information about Lead in Drinking Water**. Estados Unidos: Environmental Protection Agency, 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/basic-information-about-lead-drinking-water#health>. Acesso em: 24 abr. 2024.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2020. **Characteristics - introduction and**

regulatory definitions. In: Hazardous Waste Test Methods/SW-846. Estados Unidos: Environmental Protection Agency, 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/basic-information-about-lead-drinking-water#health>. Acesso em: 24 abr. 2024.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **National Primary Drinking Water Regulations.** Estados Unidos: Environmental Protection Agency, 2009.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 1311 Toxicity characteristic leaching procedure.** Estados Unidos: Environmental Protection Agency, 1992.

FERNANDES, D. P. **Metodologia para estabilização química do agregado siderúrgico para aplicação como lastro ferroviário.** 2016. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Núcleo de Geotecnia, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

FERRAZZO, S. T.; ARAÚJO, M. T, BRUSCHI, G. J.; KORF, E. P.; LEVANDOSKI, W. M. K.; SANTOS, C. P.; CONSOLI, N. C. Metal encapsulation of waste foundry sand stabilized with alkali-activated binder: Batch and column leaching tests. **Journal of Environmental Management**, v. 348, p. 119287, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119287>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723020753>. Acesso em: 24 abr. 2024.

GOMES, R. K. C. A.; COSTA, L. I. O.; BASTOS, J. B. S.; FARIAS, T. R. L. **Avaliação ambiental da substituição de agregados naturais pelos agregados siderúrgicos Baosteel Slag Short Flow (BSSF) em camadas de pavimentos.** 2023. Trabalho apresentado ao 7º SSS - Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis, Porto Alegre, 2023.

GUPTA, N.; GEDAM, V. V.; MOGHE, C.; LABHASETWAR, P. Comparative assessment of batch and column leaching studies for heavy metals release from coal fly ash bricks and clay bricks. **Environmental Technology & Innovation**, v. 16, p. 100461, 2019.

HO, C. L.; WANG, H. Y.; LIN, C. C.; HSIAO, Y. L. Study of Durability Property of Composite Cement Mortar Containing Baosteel Slag Short Flow. **Journal of Chinese Corrosion Engineering**, v. 30, n. 3, p. 30-36, 2016.

HOLANDA, Y. S; SILVA, L. S. V.; BASTOS, J. B. S. **Avaliação comparativa do comportamento mecânico de misturas asfálticas com fileres sustentáveis versus fileres tradicionais.** 2023. Trabalho apresentado ao 37º ANPET - Congresso de pesquisa e ensino em transportes, Santos, 2023.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário Estatístico 2022.** Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2023.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário Estatístico 2023.** Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2024.

KLUG, J. L; MEDEIROS, S. L. S.; CALDAS, H.; BENTES, M.; BECKER, H. Separation of Iron and Calcium from a BSSF Steelmaking Slag Through Acid Leaching. **Materials**

Research, v. 25, p. e20210571, 2022.

KNOP, A. **Encapsulamento de solos contaminados por hidrocarbonetos**. 2003. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2003. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3971/000395498.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 jul. 2023.

KOMONWEERAKET, K.; CETIN, B.; AYDILEK, A. H.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. Effects of pH on the leaching mechanisms of elements from fly ash mixed soils. **Fuel**, v. 140, p. 788-802, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236114009375>. Acesso em: 04 mar. 2024.

KOZISEK, R. Regulations for calcium, magnesium or hardness in drinking water in the European Union member states. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 112, p. 104589, 2020.

KUSUMAWARDANI, D. M. **Evaluations of Performance and Thermal Properties in Porous Asphalt Concrete Containing Steel Slag**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Department of Civil Engineering Master Thesis, National Central University, Taiwan, 2014.

KUSUMAWARDANI, D. M.; LIN, J. D. Evaluations of performance and thermal properties in porous asphalt concrete containing steel slag. **Advanced Materials Research**, v. 1025–1026, p. 688–692, 2014.

LEITÃO, A. E. C. Análise da viabilidade técnica da utilização do agregado siderúrgico do tipo dry pit para camadas de pavimento. 2025. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento da Construção Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2025.

LIANG, Z.; PENG, X.; LUAN, Z. Immobilization of Cd, Zn and Pb in sewage sludge using red mud. **Environ Earth Sci**, v. 66, n. 5, p. 1321–1328, 2012.

LIMA, D. A. **Propriedades mecânicas de argamassas com substituição de areia natural por escória de aciaria Baosteel's Slag Short Flow (BSSF)**. 2022. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

LIU, P.; LIN, D. F.; WANG, W. J. Effect of mixed slag aggregate replacement on performance of asphalt concrete. **Journal of Mater Cycles Waste Management**, v. 24, n. 4, p. 1251–1266, 2022.

MACIEL, F. W. F.; SOUSA, M.; CABRAL, A. E. B. **Avaliação do uso de escória de aciaria em blocos intertravados de concreto para pavimentação**. 2020. Trabalho apresentado ao XVIII Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído, Porto Alegre, 2020.

MAHEDI, M., CETIN, B., DAYIOGLU A. Y. Leaching behavior of aluminum, copper, iron and zinc from cement activated fly ash and slag stabilized soils. **Waste Management**, v. 95,

p. 334–355, 2019. <https://doi-org.ez138.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.wasman.2019.06.018>. Acesso em: 20 abr. 2025.

MERIDE, Y., AYENEW, B. Drinking water quality assessment and its effects on residents health in Wondo genet campus, Ethiopia. **Environ Syst Res**, v. 5, n. 1, p. 1, 2016.

MINISTRY OF HOUSING, SPATIAL PLANNING AND THE ENVIRONMENT. **Dutch Target and Intervention Values**. Holanda: VROM, 2000.

MUDERSBACH, D.; MOTZ, H. Wärmerückgewinnung aus Stahlwerksschlacken. **Schlacken aus der Metallurgie**, v. 3, p. 149-165, 2014.

NICULA, L. M.; CORBU, O.; ILIESCU, M. **Influence of slag powder in the cement mortar mixes on the characteristics of compactness and freeze –thaw strength**. 2019. Trabalho apresentado ao International Conference on Innovative Research - ICIR EUROINVENT, Romênia, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/572/1/012013>. Disponível em: Acesso em: 06 fev. 2024.

NICULA, L. M.; CORBU, O.; ARDELEAN, I. SANDU, A. V.; ILIESCU, M.; SIMEDRU, D. Freeze–Thaw effect on road concrete containing blast furnace slag: NMR Relaxometry Investigations. **Materials**, v. 14, n. 12, p. 3288, 2021a.

NICULA, L. M.; CORBU, O.; ILIESCU, M.; SANDU, A. V.; HEGYI, A. Study on the durability of road concrete with blast furnace slag affected by the corrosion initiated by chloride. **Advances in Civil Engineering**, v. 2021, n. 1, p. 8851005, 2021b.

NUNES, V. A.; BORGES, P. H. R. Recent advances in the reuse of steel slags and future perspectives as binder and aggregate for alkali-activated materials. **Construction and Building Materials**, v. 281, p. 122605, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122605>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821003652>. Acesso em: 19 jun. 2023.

OUJING, T. Research and development of blasting abrasive made of steelmaking slag. **Baosteel Technical Research**, v. 9, n. 2, p. 49, 2015.

PAGIO, M. Z.; CARRARETO, L. F.; VIEIRA, G. L.; MAGALHÃES, D. C. Caracterização de resíduos siderúrgicos visando à aplicação em matrizes cimentícias. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 2, p. 167-186, 2022.

PARK, J. H.; SEO, D. C.; KIM, S. H.; PARK, M. G.; KANG, B. H.; LEE, S. W.; LEE, S. T.; CHOI, I. W.; CHO, J. S.; HEO, J. S. Phosphorus Adsorption Characteristic of Ferronickel and Rapid Cooling Slags. **Korean Journal of Environmental Agriculture**, v. 33, n. 3, p. 169-177, 2014.

PARK, J. H.; KIM, S. H.; DELAUNE, R. D.; KANG, B. H.; KANG, S. W.; CHO, J. S., OK, Y. S.; SEO, D. C. Enhancement of phosphorus removal with near-neutral pH utilizing steel and ferronickel slags for application of constructed wetlands. **Ecological Engineering**, v. 95, p. 612-621, 2016a.

PARK, J. H.; KIM, H. C.; KIM, S. H.; LEE, S. T.; KANG, B. H.; KANG, S. W.; SEO, D. C. Competitive adsorption characteristics of rapid cooling slag in single-and multi-metal solutions. **Korean Journal of Environmental Agriculture**, v. 35, n. 1, p. 24-31, 2016b.

PARK, J. H.; WANG, J. J.; KIM, S. H.; CHO, J. S.; KANG, S. W.; DELAUNE, R. D.; SEO, D. C. Phosphate removal in constructed wetland with rapid cooled basic oxygen furnace slag. **Chemical Engineering Journal**, v. 327, p. 713-724, 2017.

PRAMESTHI, T. W. **Life cycle assessment of BSSF and BOF slag DGAC pavement**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – National Central University.

PEREZ, I. M. **Avaliação do potencial de encapsulamento de um solo contaminado com cloreto de zinco através da adição de cal e cimento**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. DOI: <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.31398>. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=31398@2>. Acesso em: 19 jun. 2023.

PIMENTEL, H. W.; CARVALHO, I. C.; SILVA, W. B. C.; CHAVES, A. R.; BABADOPULOS, L. F. A. L. Relationship between the performance of pervious concrete slabs, with steel slag, and the shape properties of coarse aggregates. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 17, n. 5, e17501, 2024.

PORTUGAL. Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de agosto de 2007, Estabelece o regime da qualidade da água destinada ao consumo humano, revendo o Decreto-Lei n.º 243/2001, de 5 de Setembro, que transpõe para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 98/83/CE, do Conselho, de 3 de Novembro. **Diário da República**, Poder Executivo, Lisboa, Série I, p. 5747-5765.

QUINA, M. J.; BORDADO, J. C. M.; QUINTA-FERREIRA, R. M. The influence of pH on the leaching behaviour of inorganic components from municipal solid waste APC residues. **Waste Management**, v. 29, n. 9, p. 2483–2493, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.012>. Acesso em: 20 abr. 2025.

RIBEIRO, L. P. **Análise do concreto com substituição de agregados por escória dry pit para utilização em pavimentos rígidos**. 2022. Projeto (Especialização em Engenharia de Infraestrutura Urbana) – Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Urbana, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

RYLANDER, R. Magnesium in drinking water - a case for prevention? **J Water Health**, v. 12, n. 1, p. 34-40, 2014.

SILVA, L. C.; COSTA, D. F.; FIALHO, P. F. Produção de concreto sem função estrutural através da incorporação de escória Dry-Pit e resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Brasil, v. 10, n. 3, p. 156-170, 2018.

SILVA, E. M.; FREITAS, F. A. E.; CAMPOS, D. B. C. Use of slag from steelworks (BSSF and BOF) in the manufacture of concrete as a possible environmental solution: case Study with tailings from the CSP of the Port of Pecém in Ceará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 4, p. 2984-2990, 2024.

SILVA, W. K. D. **Caracterização de escórias de aciaria e avaliação do seu uso na produção de argamassa de revestimento**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/42261>. Acesso em: 13 set. 2023.

SILVA, T. B.; CORREIA, N. S.; KÜHN, V. O. Effect of compaction energy on grain breakage of CDW, local soil and soil-CDW mixtures. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 16, n. 2, p.165–175, 2021. Disponível em: <https://www-tandfonline-com.ez138.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1080/19386362.2021.1932311>. Acesso em: 29 abr. 2025.

SILVA, W. K. D.; AMANCIO, F. A.; DIAS, A. R. O.; LIMA, D. A.; CABRAL, A. E. B. Estudo preliminar da utilização da escória de aciaria como agregado miúdo em argamassas de revestimento. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Brasil, v. 11, n. 2, p. 59-70, 2019. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/13267/209209211244>. Acesso em: 19 ago. 2023.

SKAF, M.; BARTOLOMÉ, J.; GONZALO-ORDEN, H.; LINARES-UNAMUNZAGA, A.; ORTEGA-LÓPEZ, V.; MANSO, J. M. Bituminous base courses for flexible pavements with steel slags. **Transportation Research Procedia**, Roma, v. 58, p. 83-89, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.11.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146521007717>. Acesso em: 04 mai. 2023.

SOUMIK, S. **Evaluation of waste slag to remove target metals from industrial stormwater runoff**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências aplicadas) – Dalhousie University Halifax, Canadá, 2018. Disponível em: <https://dalspace.library.dal.ca/bitstream/handle/10222/73827/Soumik-Sadman-MASc-CIVL-March-2018.pdf?sequence=5>. Acesso em: 22 mai. 2023.

SOUSA, F. E. D. **Avaliação do uso de escória Baosteel Slag Short Flow (BSSF) na produção de cimento supersulfatado**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2025.

SOUZA, M. L.; LIMA E. F.; MELO A. R. S.; BARBOSA L. H.; BABADOPULOS L. F. A. L.; BASTOS J. B. S. Efflorescence analysis and its effect on the compressive strength of an alkali-activated binder rich in BSSF. 2024a. Trabalho apresentado ao **XXI International Conference on Building Pathology and Constructions Repair**, 2024a.

SOUZA, M. L.; MELO, A. R. S.; PRÉVITALI, L.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; BASTOS, J. B. S.; BESSA I. S. Desenvolvimento de ligantes álcali-ativados para a pavimentação. 2024b. Trabalho apresentado ao **XXII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto (CILA)**, 2024b.

SOUZA, T. V. P. **Caracterização de escória de conversor a oxigênio obtida no processo BSSF antes e após tratamento hidrometalúrgico**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/22587/1/2016_dis_tvpsouza.pdf. Acesso em: 19 ago. 2023.

SOUZA FILHO, F. L. S. **A utilização de co-podrutos da siderurgia e da indústria de beneficiamento de rochas ornamentais na produção de tijolos prensados.** 2005.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santos, Vitória, 2005. Disponível em:

https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/22587/1/2016_dis_tvpsouza.pdf. Acesso em: 19 ago. 2023.

SOUZA JUNIOR, J. D. **O efeito da energia de compactação em propriedades**

dos solos utilizados na pavimentação do estado do Ceará. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia do Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005. Disponível em:

<https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/4860>. Acesso em: 29 abr. 2025.

UNIÃO EUROPEIA. Directiva 2008/105/CE, 16 de dezembro de 2008. Altera a Decisão 2000/532/CE relativa à lista de resíduos em conformidade com a Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. **Jornal Oficial da União Europeia**, L 348, p. 84-97.

UNIÃO EUROPEIA. Decisão da comissão 2014/955/UE, de 18 de dezembro de 2014.

Altera a Decisão 2000/532/CE relativa à lista de resíduos em conformidade com a Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. **Jornal Oficial da União Europeia**, L 370, p. 44.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2020/2184, de 16 de dezembro de 2020. Relativa à qualidade da água destinada ao consumo humano (reformulação). **Jornal Oficial da União Europeia**, L 435, p. 1-62.

VASCONCELOS, S. D. **Avaliação das cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica para construção de camadas de pavimentos.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

WANG, H.; CHEN, K. A study of the engineering properties of CLSM with a new type of slag. **Construction and Building Materials**, v. 102, n. 1, p. 422-427, 2016.

WANG, C.; WANG, H., CHEN, B., HSIAO, Y.; HUNG, H. **A study on the strength and expansion of composite cement mortar with BSSF slag.** 2017. Trabalho apresentado ao The 2017 World Congress, Advances in Structure Engineering and Mechanics (ASEM 17), IIsan, 2017.

WANG, X.; SHAO, J.; WEN, P.; ZENG, W.; WANG, C. Research Progresson Composition and Working Performance of Green Controlled Low Strength Material. **Bulletin of the Chinese Ceramic Society**, v. 42, n. 7, p. 2629, 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Calcium and magnesium in drinking-water: public health significance.** Switzerland: WHO, 2009.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Total production of crude steel - World total 2023.** Bruxelas: WORLDSTEEL, 2024.

XIANG, X. D.; XI, J. C.; LI, C. H.; JIANG, X. W. Preparation and application of the cement-free steel slag cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 874-879, 2016.

ZHOU, H.; MARGENOT, A. J.; LI, Y.; SI, B.; WANG, T.; ZHANG, Y.; LI, S.; BHATTARAI, R. Controle da poluição por fósforo usando adsorventes à base de resíduos: síntese, modificação e sustentabilidade de materiais. **Revisões Críticas em Ciência e Tecnologia Ambiental**, v. 52, n. 12, p. 2023-2059, 2022.