DETECÇÃO DE METAIS DE AGREGADOS SIDERÚRGICOS EM CAMADAS DE PAVIMENTO: ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO EM BATELADA E EM COLUNA

Metal detection of steel aggregates in pavement layers: batch and column leaching tests

Maria Bárbara Lima de Carvalho Caúla
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará | Fortaleza, Ceará | maria.barbara.lima06@aluno.ifce.edu.br

Juceline Batista dos Santos Bastos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará | Fortaleza, Ceará | juceline.santos@ifce.edu.br

Rinaldo dos Santos Araujo
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará | Fortaleza, Ceará | rinaldo@ifce.edu.br

Gemmelle Oliveira Santos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará | Fortaleza, Ceará | gemmelle@ifce.edu.br

Resumo

Entre os agregados siderúrgicos destacam-se o Dry Pit, resíduo sólido da produção de ferro-gusa e o Baosteel Slag Short Flow, resíduo da produção de aço. Este artigo comparou os métodos de lixiviação em batelada e em coluna quanto à liberação de metais pelos agregados em camadas de base e sub-base usando misturas com Dry Pit e misturas com BSSF e solo natural. As lixiviações em batelada e em coluna foram avaliadas segundos os métodos NBR 10005 e ASTM D4874, respectivamente. No ensaio em coluna, os extratos lixiviados das misturas com BSSF e solo natural não apresentaram concentrações de Pb (chumbo), Hg (mercúrio) e Se (selênio) quando comparados ao ensaio em batelada. Nas misturas com Dry Pit, além desses metais, As (Arsênio), Ba (bário), Cd (cádmio) e Cr total (cromo total) não lixiviaram independente da técnica. Em geral, os agregados siderúrgicos investigados não apresentaram riscos ambientais visando aplicação em pavimento.

Palavras-chave: *Agregados Siderúrgicos; Baosteel Slag Short Flow; Dry Pit; Lixiviação; Metal*

ABSTRACT

Among the steelmaking aggregates, Dry Pit, a solid waste from pig iron production, and Baosteel Slag Short Flow, a solid waste from steel manufacturing, are noteworthy. This study compared batch and column leaching methods regarding metal release from steelmaking aggregates used in base and sub-base pavement layers, using mixtures containing Dry Pit and mixtures containing BSSF and natural soil. The batch and column leaching tests were conducted in accordance with the NBR 10005 and ASTM D4874 standards, respectively. In the column test, the leachates from mixtures containing BSSF and natural soil showed no detectable concentrations of Pb (lead), Hg (mercury), and Se (selenium) when compared to the batch test leachates. In the mixtures with Dry Pit, As (arsenic), Ba (barium), Cd (cadmium), and total Cr (chromium) were not leached regardless of the method used. Overall, the steelmaking aggregates investigated did not pose environmental risks for use in pavement layers.

Keywords: Steel Aggregates; Baosteel Slag Short Flow; Dry Pit; Leaching; Metal

1 INTRODUÇÃO

Os agregados siderúrgicos Dry Pit e Baosteel Slag Short Flow (BSSF) são coprodutos da indústria siderúrgica com potencial para aplicação em infraestrutura viária. A escória Linz Donawitz (LD) ou de forno básico de oxigênio (BOF), precursora da BSSF é estabilizada por meio da reação do óxido de cálcio (CaO) (Skaf *et al*., 2021). No Brasil, a geração de escória LD/BOF foi estimada em aproximadamente 24,3 milhões de toneladas no ano de 2023 (Instituto Aço Brasil, 2024). O Dry Pit, por sua vez, é coproduto da produção de ferro-gusa. Na indústria siderúrgica ArcelorMittal Monlevade, Minas Gerais, a produção desse material atinge 80 t por mês (ArcelorMittal Monvelade, 2021). No entanto, o anuário do IAB (2024) indica a existência de 12 siderúrgicas produtoras de ferro-gusa no Brasil, sugerindo que volumes superiores de Dry Pit requerem uma disposição final ambientalmente adequada.

A avaliação da mobilidade de contaminantes em materiais siderúrgicos é importante para sua viabilidade ambiental. O ensaio de lixiviação em coluna, normatizado pela American Society for Testing and Materials (ASTM) D 4874 (ASTM, 2017), permite investigar a liberação de substâncias químicas em condições análogas às encontradas em ambientes construídos (Knop, 2003; Vasconcelos, 2018). Dayioglu e Aydilek (2019), ao conduzirem esse ensaio em um aterro rodoviário com agregados siderúrgicos, analisaram a lixiviação de Al (alumínio), Cu (cobre) e Zn (zinco), evidenciando a necessidade de monitoramento da interação desses materiais com o meio ambiente.

Com o crescente interesse na utilização de resíduos industriais para o desenvolvimento de novos materiais torna-se fundamental avaliar o potencial de lixiviação de metais desses agregados. Como não existem métodos normatizados específicos para esses materiais diversos protocolos podem ser aplicados para este fim. Nesse contexto, este artigo avalia a composição química e a mobilidade de metais lixiviáveis dos agregados Dry Pit e BSSF quando aplicados em camadas de base e sub-base de pavimentos utilizando estratégias de contato em batelada e em coluna.

2 METODOLOGIA

2.1 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados no estudo foram Dry Pit, BSSF, solo arenoso natural (SN) e água destilada. O Dry Pit e BSSF foram fornecidos pela indústria ArcelorMittal Pecém, situada no Complexo Industrial e Portuário do Pecém, no município de São Gonçalo do Amarante, Ceará (IAB, 2024).

A preparação das amostras seguiu os procedimentos normatizados pelo DNER (1994a), enquanto a compactação foi conforme as diretrizes estabelecidas pelo DNER (1994b). A mistura contendo 50% de BSSF e 50% de SN foi compactada na energia modificada (M_{BSSF}) (DNER, 1994b).

A mistura com Dry Pit (M_{DryPit}), foi produzida apenas com esse AS em duas granulometrias distintas, na energia de compactação modificada. A mistura contém 65% de Dry Pit com maioria dos grãos com dimensões até 10 mm e 35% com maioria dos grãos entre 10 mm e 50 mm. No ensaio de lixiviação em coluna, as misturas foram compactadas dentro de um aparelho de lixiviação em coluna, Figura 1, desenvolvido nesta pesquisa, de acordo com a ASTM D 4874 (ASTM, 2017).

Figura 1: Coluna com M_{BSSF} compactada

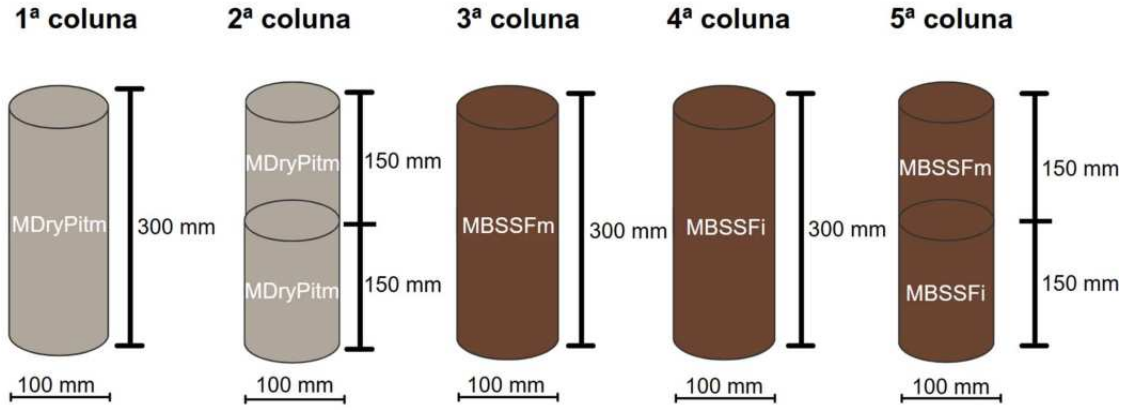


Fonte: Autoria própria (2025)

2.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A M_{DryPit} foi submetida neste trabalho ao ensaio de lixiviação em batelada, conforme a NBR 10005 (ABNT, 2004b). A M_{BSSF} foi submetida a esse ensaio na pesquisa anterior (Costa, 2023). Nos ensaios de lixiviação em coluna foram construídas cinco colunas de lixiviação: a 1 ª coluna com M_{DryPit} com 300 mm de altura e 100 mm de diâmetro foi compactada na energia modificada ($M_{DryPitm}$) para simular a camada de base de um pavimento. A 2ª coluna com M_{DryPit} apresenta duas camadas com 150 mm de altura e simula também uma camada de base executada em duas camadas, conforme a Figura 2.

Figura 2: Estrutura das colunas de lixiviação



Fonte: Autoria própria (2025)

As misturas M_{BSSF} foram compactadas nas energias modificada (M_{BSSFm}) e intermediária (M_{BSSFi}), correspondentes às 3ª e 4ª colunas, respectivamente, com 300 mm de altura e 100 de diâmetro cada. A 5ª coluna foi composta por duas camadas com 150 mm de altura cada, representado uma base (M_{BSSFm}) e uma sub-base (M_{BSSFi}). Em cada coluna com M_{DryPit}, foram coletados três extratos lixiviados de 800 mL, submetidos a percolações sequenciais; no caso da M_{BSSFm}, realizaram-se duas percolações. Para os ensaios de lixiviação por batelada, utilizaram-se as amostras com partículas inferiores a 9,5 mm. O meio extrator foi preparado com uma solução de ácido acético (HOAc), hidróxido de sódio (NaOH) e água destilada (pH = 7) (ABNT, 2004b). As amostras foram agitadas em agitador rotativo a 300 rpm e mantidas a 23 ± 2 ºC por 18 ± 2 horas. A lixiviação em coluna seguiu a norma ASTM D 4874 (ASTM, 2017), com amostras compactadas e fluxo ascendente de água destilada sob pressão de 7 bar. O equipamento em coluna permitiu a coleta de 12 extratos lixiviados.

Os extratos foram armazenados sob temperatura controlada (< 4 ºC) até a etapa de filtração e análise de metais. A filtração foi realizada com membranas de 0,22 µm, e a quantificação dos metais efetuada por espectrofotometria de absorção atômica, utilizando o equipamento Varian AA240FS. As concentrações obtidas foram comparadas com os limites estabelecidos por distintas normativas: NBR 10004 (ABNT, 2004a), EPA (2024), CONAMA 420 (Brasil, 2009), Norma Holandesa (Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, 2000) e EPA (2020). O pH das soluções foi determinado com o auxilo do pHmetro Orion Dual Star pH/ISE Benchtop.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

A Tabela 1 apresenta as concentrações de metais dos extratos lixiviados das misturas M_{DryPit} 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 valores máximos permitidos (VMPs) listados no anexo F da NBR 10004 (ANBT, 2010a) caracterizando-o como resíduo não perigoso (Costa, 2023). O mesmo ocorre com a M_{DryPit}, com a especificidade da concentração desses metais estarem todas abaixo do limite de detecção do aparelho.

Os resultados da M_{BSSF} (Tabela 1) confirmam os dados de Cartaxo (2022), que indicam ausência de lixiviação de substâncias tóxicas acima dos VMPs em concretos com BSSF. 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) também ficaram abaixo dos VMPs.

Tabela 1: Parâmetros químicos dos extratos lixiviados conforme NBR 10005 (mg/L)

Metal	M_{BSSF}[a]	M_{DryPit}	Padrões				
			NBR 10004 Anexo F[b]	EPA[b]	CONAMA 420[c]	Norma holandesa[d]	EPA[e]
As	< 0,01	< 0,01	1,00	5,00	0,01	0,01	5,00
Ba	6,20	<0,005	70,00	100,00	0,70	0,05	100,00
Cd	0,004	< 0,005	0,50	1,00	0,005	0,0004	1,00
Pb	0,02	<0,01	1,00	5,00	0,01	0,015	5,00
Cr total	< 0,005	<0,005	5,00	5,00	0,05	0,001	5,00
Hg	0,002	<0,001	0,10	0,20	0,001	0,00005	0,20
Se	0,02	<0,01	1,00	1,00	0,01	-	1,00

Fonte: Autoria própria (2025)

Nota: [a] Costa (2023); [b] Concentração máxima de metais para características de toxicidade. [c] Valores orientadores para águas subterrâneas. [d] Valores alvo para águas rasas. [e] Regulamentos nacionais de água potável primária.

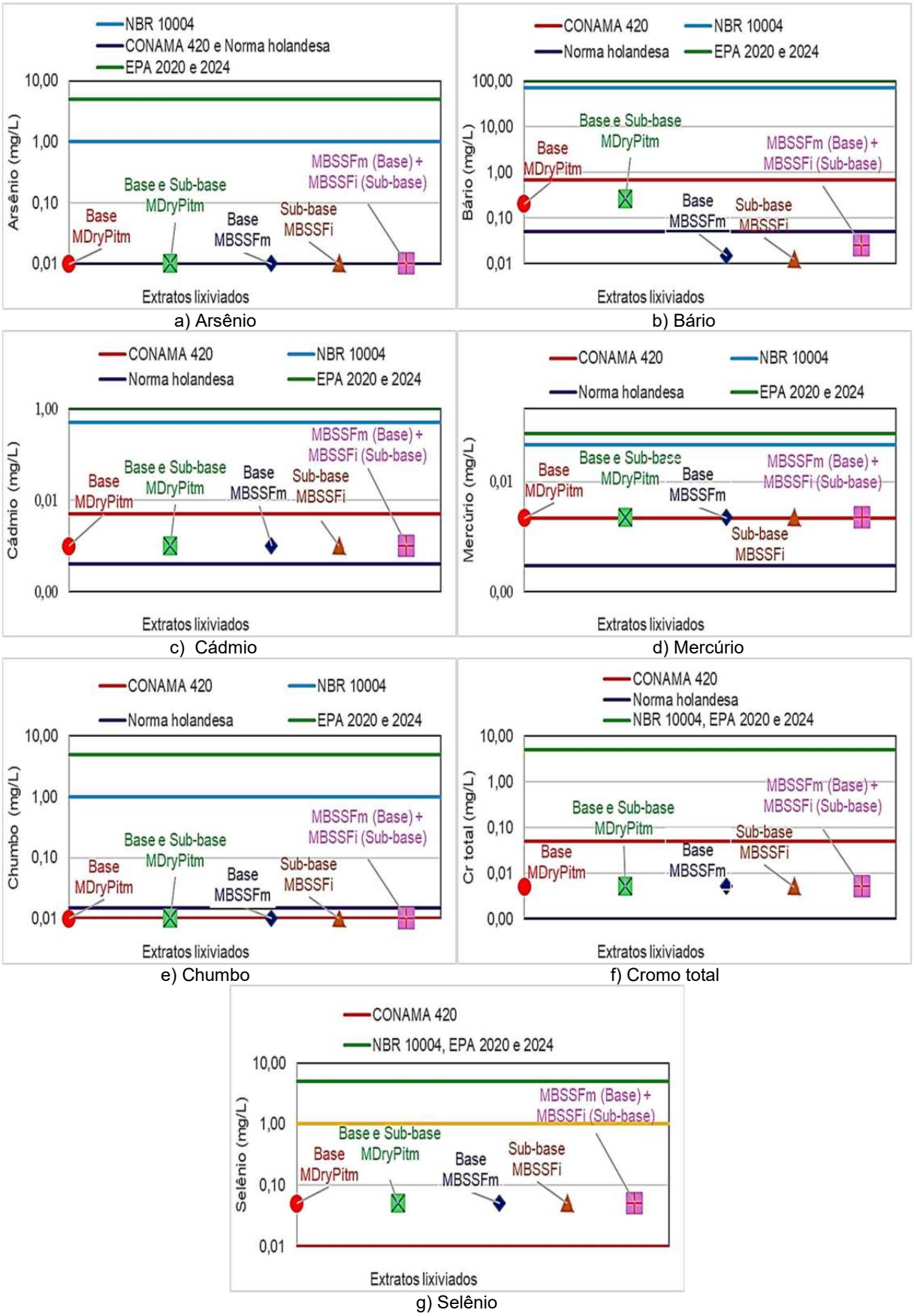
A M_{DryPit} atendeu aos limites da CONAMA 420 (Brasil, 2009), Norma Holandesa (VROM, 2000) e normas da EPA (2020, 2024), não apresentando risco ambiental por toxicidade metálica. Na M_{BSSF}, os elementos Ba, Pb e Hg excederam os limites da CONAMA 420 e da Norma Holandesa; Cd ultrapassou apenas a Norma Holandesa, e Se excedeu o limite da CONAMA 420.

A avaliação dos extratos lixiviados (Figura 3a) demonstrou que As apresentou concentrações inferiores aos limites estabelecidos por todas as normativas em todas as misturas, indicando baixa mobilidade. Para o Ba (Figura 3b), 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 (Figura 3c) 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 (Figura 3d) 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 (Figura 3e) foi o único elemento que permaneceu dentro dos limites normativos em todas as misturas, demonstrando estabilidade. O Cr total (Figura 3f) 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 (Figura 3g) ultrapassou o limite da Resolução CONAMA 420 exclusivamente na mistura M_{BSSFi} (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.

A Figura 3 mostra que 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 VMPs da NBR 10004, classificando as misturas como resíduo não perigoso.

Figura 3: Parâmetros químicos dos extratos lixiviados com uso de aparelho de coluna



Fonte: Autoria própria (2025)

4 CONCLUSÃO

Este artigo avaliou a lixiviação de As, Ba, Cd, Cr total, Pb, Hg e Se dos extratos lixiviados dos ensaios de lixiviação em batelada e em coluna, aplicados a resíduos siderúrgicos tipo BSSF e de Dry Pit (M_{DryPit}). Os principais resultados indicam que:

- As misturas avaliadas apresentaram, em geral, comportamento ambiental satisfatório, com excedentes localizados e restritos, majoritariamente, aos parâmetros mais conservadores da Norma Holandesa. A mistura M_{BSSFi} (sub-base) foi a que apresentou maior número de não conformidades, enquanto M_{DryPit} e M_{BSSFm} demonstraram desempenho mais seguro. A estabilidade dos elementos As e Pb em todas as amostras reforça o potencial de aproveitamento dessas misturas como materiais não perigosos, desde que respeitadas as exigências normativas específicas do contexto de aplicação.
- 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.
- 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 de engenharia sustentável.

5 AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa recebeu apoio financeiro da Fundação Cearense de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e do CNPq (CNPq 408682/2021-3 e 406246/2022-0) pelo financiamento do projeto. Os autores também agradecem à Universidade Federal do Ceará, ao Laboratório de Mecânica de Pavimentos, Laboratório de Análise de Traços; ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Fortaleza, ao Laboratório de Tecnologia Química, ao Laboratório de Mecânica dos Solos e ao Laboratório de Asfalto pelo apoio.

REFERÊNCIAS

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 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. **ABNT NBR 10005**: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b. Disponível em: https://wp.ufpel.edu.br › filesPDFABNT NBR 10005. Acesso em: 19 jul. 2023.

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

CARTAXO, Fábio de Moraes. 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.

COSTA, Lívia Indrid de Oliveira. 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.

DAYIOGLU, Asli Yalcin; AYDILEK, Ahmet Halen. Effect of pH and Subgrade Type on Trace-Metal Leaching from Steel-Slag Embankments into Groundwater, **Journal of Materials in Civil Engineering**, Istambul, Turquia, v. 31, n. 8, ago. 2019. ISSN 0899-1561.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME – 162**: Solos - ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro: DNER, 1994b.

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

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Characteristics** - introduction and regulatory definitions. In: Hazardous Waste Test Methods/SW-846. Estados Unidos: EPA, 2020. Disponível em: https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/basic-information-about-lead-drinking-water#health. Acesso em: 24 abr. 2024.

GUPTA, Nidhi; GEDAM, Vidyadhar V.; MOGHE, Chandrashekhar; LABHASETWAR, Pawan. Comparative assessment of batch and column leaching studies for heavy metals release from Coal Fly Ash Bricks and Clay Bricks. **Environmental Technology & Innovation**, Nagpur, India, v. 16, e 100461, nov. 2019. INSS 2352-1864.

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

KNOP, Alexandre. Encapsulamento de solos contaminados por hidrocarbonetos. 2003. 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.

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

PAGIO, Mariana Zani; CARRARETO, Lilian Favarato; VIEIRA, Geilma Lima; MAGALHÃES, Diego Corrêa Caracterização de resíduos siderúrgicos visando à aplicação em matrizes cimentícias. **Ambiente Construído**, Vitória, ES, v. 22, n. 2, p. 167-186, abr-jun. 2022. ISSN 1415-8876.

SKAF, Marta; BARTOLOMÉ, Javier; GONZALO-ORDEN, Hernán; LINARES-UNAMUNZAGA, Alaitz; ORTEGA-LÓPEZ, Vanessa; MANSO, Juan Manuel. Bituminous base courses for flexible pavements with steel slags. **Transportation Research Procedia**, Roma, v. 58, p. 83-89, jul. 2021. ISSN 2352-1465. doi: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.11.012.

VASCONCELOS, Sarah Denise. **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.