

JULIANA DE PAULA REZENDE

**ESTUDO DE MISTURAS DE SOLO E RESÍDUOS SIDERÚRGICOS
OTIMIZADAS ESTATISTICAMENTE PARA APLICAÇÕES EM *LINERS* DE
ATERROS SANITÁRIOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga

Coorientadores: Rejane Nascentes
Roberto Lopes Ferraz
Taciano Oliveira da Silva

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

R467e
2024

Rezende, Juliana de Paula, 1991-

Estudo de misturas de solo e resíduos siderúrgicos
otimizadas estatisticamente para aplicações em *liners* de aterros
sanitários / Juliana de Paula Rezende. – Viçosa, MG, 2024.

1 tese eletrônica (171 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2024.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.672>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Aterro sanitário - Revestimento. 2. Resíduos de metal -
Testes. 3. Metais pesados. 4. Adsorção. I. Pitanga, Heraldo
Nunes, 1973-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento
de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 628.44564


JULIANA DE PAULA REZENDE

**ESTUDO DE MISTURAS DE SOLO E RESÍDUOS SIDERÚRGICOS
OTIMIZADAS ESTATISTICAMENTE PARA APLICAÇÕES EM *LINERS* DE
ATERROS SANITÁRIOS**


Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*

APROVADA: 28 de fevereiro de 2024

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 JULIANA DE PAULA REZENDE
Data: 21/10/2024 18:28:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Juliana de Paula Rezende
Autora

Documento assinado digitalmente
 HERALDO NUNES PITANGA
Data: 15/10/2024 08:49:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Heraldo Nunes Pitanga
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar comigo sempre, ser meu melhor amigo, por guiar meus passos e me dar forças para superar as dificuldades.

Aos meus pais Luiz Carlos e Adair, pelo amor, apoio, confiança, por serem meus exemplos de determinação e pela motivação incondicional. Às minhas queridas irmãs Jaqueline e Cristiane, pelo amor, carinho e apoio de sempre. Vocês serão sempre as razões de todos os meus esforços e motivos das minhas vitórias. A vocês, dedico esse trabalho!

Ao meu orientador Heraldo, pela orientação, ensinamentos, dedicação e valiosa contribuição para a execução deste trabalho.

À professora Rejane Nascentes, pela disponibilidade, ensinamentos, amizade e apoio técnico à pesquisa.

Aos professores Taciano Oliveira da Silva e Leonardo Gonçalves Pedroti, por auxiliar na aquisição dos materiais desse trabalho e pelo apoio à pesquisa.

Ao professor Klaus Henrique de Paula Rodrigues, pelo companheirismo, disponibilidade e apoio técnico à pesquisa.

Ao Marcelo, pela disponibilidade e boa vontade na execução dos ensaios de laboratório.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFV, por todo o conhecimento transmitido.

À Universidade Federal de Viçosa, por permitir a realização deste trabalho e a obtenção desse título.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), pelo incentivo à pesquisa, pelas oportunidades concedidas e pela bolsa concedida.

A todos os amigos que contribuíram de alguma forma para essa conquista, muito obrigada!

RESUMO

REZENDE, Juliana de Paula, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2024. **Estudo de misturas de solo e resíduos siderúrgicos otimizadas estatisticamente para aplicações em *liners* de aterros sanitários.** Orientador: Heraldo Nunes Pitanga. Coorientadores: Roberto Lopes Ferraz, Rejane Nascentes e Taciano Oliveira da Silva.

Este estudo tem como objetivo pesquisar a viabilidade técnica do reaproveitamento de resíduos siderúrgicos (escórias de aciaria elétrica) em diferentes proporções, combinados a um solo residual tropical, visando à composição de barreiras impermeabilizantes (*liners*) de aterros sanitários. Foi desenvolvido um planejamento experimental de misturas em rede simplex, composto por três componentes (escórias de aciaria elétrica primária e secundária e um solo residual argiloso), com o intuito de promover a otimização da dosagem de misturas solo-resíduos siderúrgicos. As matérias-primas que compõem as misturas foram submetidas às caracterizações física, química, mineralógica e morfológica. Corpos de prova das composições definidas por meio do planejamento experimental, moldados nos respectivos pontos de ótimo da energia do Proctor Normal, foram caracterizados quanto à resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral (RT) e permeabilidade saturada (K_{sat}). Em posse dos resultados obtidos dos ensaios, foi determinada, por meio de software de planejamento experimental, a composição ideal representativa das misturas analisadas que atendesse às exigências técnicas de projeto inerentes a *liners* de aterros sanitários, na qual se buscou a maior porcentagem possível dos resíduos siderúrgicos. Para essa composição ideal, foram realizadas caracterizações geomecânicas (RCS e RT) e hidráulica (K_{sat}) das amostras compactadas, sendo submetidas também às caracterizações química, mineralógica, morfológica e ambiental, de modo a ampliar as interpretações dos resultados no que diz respeito ao desempenho técnico dessa mistura. Foram realizados também, para a mistura ideal, os ensaios de compressão triaxial CIU (Consolidado Isotropicamente e Não Drenado) e de adensamento edométrico. Observou-se que a adição da escória de aciaria promoveu melhorias nas propriedades de resistência (RCS, RT e resistência ao cisalhamento), rigidez, além de reduzir a permeabilidade saturada. No que se refere particularmente à caracterização ambiental, as concentrações de metais obtidas nos extratos solubilizados e lixiviados foram inferiores aos limites

determinados por normas técnicas, indicando que, do ponto de vista ambiental, a mistura ideal produzida com escória de aciaria elétrica apresentou bom comportamento, ocorrendo uma boa imobilização dos metais. Trabalhou-se com uma solução multiespécie com os metais pesados Cd, Mn, Ni, Pb e Zn, para uso nos ensaios de permeabilidade saturada. De posse dos resultados obtidos no estudo após percolação desses metais pesados, para fins práticos de engenharia, concluiu-se que a mistura ideal não apresentou grandes alterações nas propriedades de engenharia investigadas em relação aos corpos de prova percolados com água, considerando-se os resultados de RCS, RT e K_{sat} . Foi avaliada, também, a influência da estrutura compactada da mistura ideal nos parâmetros de transporte da solução contaminante produzida artificialmente por meio do ensaio de percolação em coluna e também da estrutura solta da mistura ideal sob a influência de diferentes concentrações de metais pesados, levando em consideração o ensaio de equilíbrio em lote. A mistura ideal apresentou significativa capacidade de adsorção dos metais pesados em estudo, uma vez que parte do quantitativo da solução multiespécie foi adsorvida em sua massa. A aplicação dos resíduos industriais em barreiras impermeabilizantes (*liners*) mostrou-se uma alternativa tecnicamente viável, atendendo aos limites de projeto propostos na literatura técnica para as propriedades mecânicas, hidráulicas e ambientais avaliadas, indicando o potencial de aproveitamento desses resíduos em tais barreiras, as quais comumente demandam grandes quantitativos de materiais.

Palavras-chave: Dosagem de misturas solo-resíduos siderúrgicos. *Liners*. Planejamento experimental. Escória de aciaria elétrica. Metais pesados. Adsorção. Percolação em coluna. Equilíbrio em lote.

ABSTRACT

REZENDE, Juliana de Paula, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2024. **Study of mixtures of soil and steel waste statistically optimized for applications in landfill liners.** Advisor: Heraldo Nunes Pitanga. Co-advisors: Roberto Lopes Ferraz, Rejane Nascentes and Taciano Oliveira da Silva.

This study aims to investigate the technical viability of reusing steel waste (electric arc furnace slag) in different proportions, combined with a tropical residual soil, aiming at the composition of waterproofing barriers (liners) for sanitary landfills. An experimental design of mixtures in a simplex network was developed, consisting of three components (primary and secondary electric arc furnace slag and a clayey residual soil), with the aim of promoting the optimization of the dosage of soil-steel waste mixtures. The raw materials that make up the mixtures were subjected to physical, chemical, mineralogical and morphological characterization. Specimens of the compositions defined through the experimental design, molded at the respective optimum points of standard Proctor energy, were characterized in terms of Unconfined Compressive Strength (UCS), tensile strength by diametral compression (TS) and saturated permeability (K_{sat}). With the results obtained from the tests, the optimal composition representative of the analyzed mixtures was determined using experimental planning software, which meets the technical design requirements inherent to the waterproofing barrier, in which the highest possible percentage of steel waste is applied. For this ideal composition, geomechanical (UCS and TS) and hydraulic (K_{sat}) characterizations of the compacted samples were carried out, being also submitted to chemical, mineralogical, morphological and environmental characterizations, in order to expand the interpretation of the results with regard to the technical performance of this mixture. The CIU (Isotropically Consolidated Undrained) triaxial compression and oedometer tests were also carried out for the optimal mixture. It was observed that the addition of electric arc furnace slag promoted improvements in resistance properties (UCS, TS and shear strength), stiffness properties, in addition to reducing saturated permeability. With regard to environmental characterization, the concentrations of metals obtained in the solubilized and leached extracts were lower than the limits determined by technical standards. This indicates that, from an

environmental point of view, the optimal mixture produced with electric arc furnace slag presented good behavior, with good immobilization of the metals. A multispecies solution with the heavy metals Cd, Mn, Ni, Pb and Zn was used for use in saturated permeability tests. With the results obtained in the study after percolation of these heavy metals, for practical engineering purposes, it was concluded that the optimal mixture did not present major changes in mechanical and hydraulic resistance in relation to the specimens percolated with water, considering the results of the unconfined compression, tensile strength and saturated permeability tests. The influence of the compacted structure of the optimal mixture on the transport parameters of the artificially produced contaminant solution through the column percolation test and also the loose structure of the loose mixture under the influence of different concentrations of heavy metals, taking into account the batch equilibrium test, was also evaluated. The optimal mixture showed a significant adsorption capacity for the heavy metals under study, since practically the entire quantity of the multispecies solution was adsorbed in its mass. Therefore, the application of industrial waste in waterproofing barriers (liners) proved to be a viable alternative given the design limits proposed in the technical literature for the mechanical, hydraulic and environmental properties evaluated, indicating that it is a good alternative for using these wastes in waterproofing barriers of landfills, which commonly require large quantities of materials.

Keywords: Dosage of soil-steel waste mixtures. Liners. Experimental planning. Electric arc furnace slag. Heavy metals. Adsorption. Column percolation tests. Batch Equilibrium Tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da jazida de coleta do solo.....	30
Figura 2 - Talude de corte do solo residual coletado.....	31
Figura 3 - Amostras moídas das escórias de aciaria elétrica empregadas na pesquisa: (a) EAEP; (b) EAES	33
Figura 4 - Curva granulométrica da amostra de solo BR 120 (AF: areia fina; AM: areia média; AG: areia grossa), de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 2022).....	34
Figura 5 - Difratoograma da amostra de solo BR 120 obtido por DRX.....	36
Figura 6 - Micrografias da amostra de solo residual obtidas por MEV: (a) x100; (b) x200; (c) x650; (d) x1000	38
Figura 7 - Curvas granulométricas das amostras de EAEP (a) e EAES (b) (Fonte: Resultado da pesquisa).....	40
Figura 8 - Difratoogramas das amostras de EAEP (a) e EAES (b)	42
Figura 9 - Micrografias da amostra de EAEP obtidas por MEV: (a) x650; (b) x1000; (c) x2500 e (d) x5000	44
Figura 10 - Micrografias da amostra de EAES obtidas por MEV: (a) x650; (b) x1000; (c) x2500 e (d) x5000	45
Figura 11 - <i>Design</i> do planejamento experimental em rede Simplex-Centróide.....	57
Figura 12 - Curvas de compactação das misturas analisadas	65
Figura 13 - Valores de RCS aos 7 dias de cura obtidos para as misturas analisadas	68
Figura 14 - Superfície de resposta para a RCS das misturas experimentais aos 7 dias de cura	68
Figura 15 - Valores de RT aos 7 dias de cura obtidos para as misturas analisadas .	70
Figura 16 - Superfície de resposta para a RT (em kPa) das misturas experimentais aos 7 dias de cura	70
Figura 17 - Valores de K_{sat} aos 7 dias de cura obtidos para as misturas analisadas	72
Figura 18 - Superfície de resposta para a K_{sat} das misturas experimentais aos 7 dias de cura	73
Figura 19 - Difratoograma da mistura ideal obtida por DRX.....	77

Figura 20 - Micrografias da mistura ideal obtidas por MEV: (a) x650; (b) x1000; (c) x2500 e (d) x5000	78
Figura 21 - Ensaio Triaxial CIU: gráfico tensão desvio máxima ($q_{m\acute{a}x}$) <i>versus</i> tensões médias totais (p).....	81
Figura 22 - Ensaio Triaxial CIU: gráfico tensão desvio máxima ($q_{m\acute{a}x}$) <i>versus</i> tensões médias efetivas (p').....	81
Figura 23 - Tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial (Ensaio triaxial CIU – Solo residual)	84
Figura 24 - Excesso de poropressão <i>versus</i> deformação axial (Ensaio triaxial CIU – Solo residual)	84
Figura 25 - Tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial (Ensaio triaxial CIU – Mistura ideal sem cura).....	85
Figura 26 - Excesso de poropressão <i>versus</i> deformação axial (Ensaio triaxial CIU – Mistura ideal sem cura)	85
Figura 27 - Tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial (Ensaio triaxial CIU – Mistura ideal com cura de 7 dias)	86
Figura 28 - Excesso de poropressão <i>versus</i> deformação axial (Ensaio triaxial CIU – Mistura ideal com cura de 7 dias).....	86
Figura 29 - Tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial (Ensaio triaxial CIU – Mistura ideal com cura de 28 dias)	87
Figura 30 - Excesso de poropressão <i>versus</i> deformação axial (Ensaio triaxial CIU – Mistura ideal com cura de 28 dias).....	87
Figura 31 - Coeficiente de adensamento médio em função da tensão efetiva vertical aplicada para todos os cenários analisados.....	90
Figura 32 - Resultados do ensaio de adensamento: mistura ideal (sem cura e com curas de 7 dias e 28 dias) e solo residual puro	93
Figura 33 - Equipamento de percolação em coluna	113
Figura 34 - Micrografias da amostra da mistura ideal sem cura obtidas por MEV: (a) x650; (b) x1000; (c) x2500 e (d) x5000	118
Figura 35 - Micrografias da amostra da mistura ideal com cura de 7 dias obtidas por MEV: (a) x650; (b) x1000; (c) x2500 e (d) x5000	119
Figura 36 - Micrografias da amostra da mistura ideal com cura de 28 dias obtidas por MEV: (a) x650; (b) x1000; (c) x2500 e (d) x5000	120

Figura 37 - Gráfico comparativo dos resultados do ensaio de RCS sob diferentes condições prévias de cura e de percolação (com e sem contaminante)	121
Figura 38 - Gráfico comparativo dos resultados do ensaio de RT sob diferentes condições prévias de cura e de percolação (com e sem contaminante)	122
Figura 39 - Gráfico comparativo dos resultados do ensaio de K_{sat} sob diferentes condições prévias de cura e de percolação (com e sem contaminante)	125
Figura 40 - Linearização Freundlich (a), Linearização Langmuir (b) e Isoterma de adsorção de Freundlich (c) para o Cobre	149
Figura 41 - Linearização Freundlich (a), Linearização Langmuir (b) e Isoterma de adsorção de Freundlich (c) para o Manganês	150
Figura 42 - Linearização Freundlich (a), Linearização Langmuir (b) e Isoterma de adsorção de Freundlich (c) para o Cádmiio	151
Figura 43 - Linearização Freundlich (a), Linearização Langmuir (b) e Isoterma de adsorção de Freundlich (c) para o Zinco	152
Figura 44 - Curvas de concentração do metal pesado Cu (Cobre) na solução efluente <i>versus</i> tempo de percolação	154
Figura 45 - Curvas de concentração do metal pesado Mn (Manganês) na solução efluente <i>versus</i> tempo de percolação.....	154
Figura 46 - Curvas de concentração do metal pesado Cd (Cádmiio) na solução efluente <i>versus</i> tempo de percolação	154
Figura 47 - Curvas da concentração do metal pesado Pb (Chumbo) na solução efluente <i>versus</i> tempo de percolação.....	155
Figura 48 - Curvas da concentração do metal pesado Zn (zinco) na solução efluente <i>versus</i> tempo de percolação adsorção.....	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio de caracterização geotécnica do solo empregado na pesquisa .	33
Tabela 2 - Caracterização e classificação geotécnica da amostra de solo analisada.	34
Tabela 3 - Composição química obtida por FRX e perda ao fogo (PF) da amostra de solo.....	35
Tabela 4 - Elementos químicos presentes na amostra de solo residual obtidos por EDS.....	39
Tabela 5 - Ensaio de caracterização física das escórias de aciaria elétrica moídas empregadas na pesquisa	39
Tabela 6 - Caracterização física das escórias de aciaria.	40
Tabela 7 - Ensaio de caracterização química das escórias de aciaria elétrica moídas empregadas na pesquisa	41
Tabela 8 - Composição química e perda ao fogo (PF) das amostras de escória de aciaria.....	41
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de caracterização química das escórias de aciaria elétrica moídas empregadas na pesquisa.....	41
Tabela 10 - Elementos químicos presentes nas amostras de escória obtidos por EDS.	45
Tabela 11 - Composições das misturas definidas no planejamento experimental	58
Tabela 12 - Parâmetros de ótimos das misturas analisadas.....	65
Tabela 13 - Propriedades alvo das misturas analisadas: RCS aos 7 dias de cura (valores em kPa)	67
Tabela 14 - Equação de regressão: RCS aos 7 dias de cura.	68
Tabela 15 - Propriedades alvo das misturas analisadas: RT aos 7 dias de cura (valores em kPa).....	69
Tabela 16 - Equação de regressão: RT aos 7 dias de cura.	71
Tabela 17 - Propriedades alvo das misturas analisadas: K_{sat} aos 7 dias de cura (valores em cm/s).....	72
Tabela 18 - Equação de regressão: K_{sat} aos 7 dias de cura.....	73
Tabela 19 - Valores de índice de Desejabilidade individual (IDi) e composta (IDc) referentes à mistura ideal para as propriedades analisadas.	74

Tabela 20 - Composição química obtida por FRX e perda ao fogo (PF) da mistura ideal	75
Tabela 21 - Caracterização geotécnica da mistura ideal.....	78
Tabela 22 - Resultados dos ensaios de Compressão Triaxial CIU para a mistura ideal (sem cura e com curas de 7 dias e 28 dias) e solo residual puro.....	80
Tabela 23 - Coeficientes de adensamento (C_v) dos cenários analisados para todas as amostras (solo residual puro, mistura ideal sem cura, mistura ideal - 7 dias de cura e mistura ideal - 28 dias de cura) em cm^2/s	89
Tabela 24 - Resultados dos ensaios de adensamento para a mistura ideal (sem cura e com curas de 7 dias e 28 dias) e solo residual puro	93
Tabela 25 - Concentrações dos elementos nos extratos solubilizados de amostra da mistura ideal (em mg/L).....	94
Tabela 26 - Concentrações dos elementos nos extratos lixiviados de amostra da mistura ideal (em mg/L).....	94
Tabela 27 - Avaliação da eficácia do método Simplex-Centróide na estimativa das propriedades mecânicas (RCS, RT) e hidráulica (K_{sat}) da mistura ideal	95
Tabela 28 - Resultados do ensaio de RCS (em kPa) para a mistura ideal previamente percolada com e sem contaminante (sem cura e com curas de 7 dias e 28 dias) ..	121
Tabela 29 - Resultados do ensaio de RT (em kPa) para a mistura ideal previamente percolada com e sem contaminante (sem cura e com curas de 7 dias e 28 dias) ..	121
Tabela 30 - Resultados do ensaio de K_{sat} (em cm/s) para a mistura ideal previamente percolada com e sem contaminante (sem cura e com curas de 7 dias e 28 dias) ..	125
Tabela 31 - Valores de concentração adotados para cada um dos metais pesados	142
Tabela 32 - Parâmetros estimados através das isotermas de sorção de Freundlich para os metais pesados Cu, Mn, Cd e Zn	153

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: Introdução geral.....	16
1.1. Considerações gerais	16
1.2. Objetivos	23
1.2.1. Objetivo geral.....	23
1.2.2. Objetivos específicos	23
1.3. Justificativa.....	24
1.4. Organização da tese	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25
CAPÍTULO 2: Caracterização do solo argiloso e das escórias de aciaria elétrica	30
2.1. Materiais	30
2.1.1 Solo.....	30
2.1.2 Escórias de aciaria elétrica	31
2.2. Métodos	31
2.2.1. Coleta e preparação do solo.....	31
2.2.2. Coleta e preparação da escória de aciaria elétrica.....	31
2.2.3. Ensaio de caracterização do solo	33
2.2.4. Ensaio de caracterização das escórias de aciaria elétrica.....	39
2.3. Conclusões	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
CAPÍTULO 3: Aplicação do delineamento experimental de misturas solo-resíduos siderúrgicos na otimização de <i>liners</i> para aterros sanitários.....	51
3.1. Introdução	51
3.2. Métodos	56
3.2.1 Protocolo de dosagem das combinações de solo residual e escórias de aciaria elétrica primária e secundária	56

3.2.2 Ensaio de caracterização da mistura ideal.....	62
3.3. Resultados e discussões	65
3.3.1 Ensaio de compactação.....	65
3.3.2 Variáveis de resposta das composições solo-escória de aciaria elétrica... 67	
3.3.3 Otimização das propriedades mecânicas e hidráulica analisadas: mistura ideal	74
3.3.4 Caracterização da mistura ideal.....	75
3.4. Conclusões	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
CAPÍTULO 4: Avaliação dos comportamentos mecânico e hidráulico de <i>liner</i> de solo-resíduos siderúrgicos sob influência da percolação de metais pesados	107
4.1. Introdução	107
4.2. Materiais	111
4.2.1 Solo.....	111
4.2.2 Escórias de aciaria elétrica	111
4.2.3 Mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal.....	111
4.2.4 Solução contaminante	112
4.2.5 Equipamento de percolação em coluna.....	113
4.3. Métodos	113
4.3.1 Considerações iniciais	113
4.3.2 Caracterização morfológica	115
4.3.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples	115
4.3.4 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	116
4.3.5 Ensaio de Permeabilidade saturada	116
4.4. Resultados e discussões	117
4.4.1 Caracterização morfológica	117
4.4.2 Ensaio mecânicos: RCS e RT.....	120

4.4.3 Ensaio hidráulico: K_{sat}	124
4.5 Conclusões	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128
CAPÍTULO 5. Avaliação do potencial de adsorção de metais pesados por <i>liner</i> de solo-resíduos siderúrgicos	137
5.1. Introdução	137
5.2. Materiais	141
5.2.1 Solo.....	141
5.2.2 Escórias de aciaria elétrica	141
5.2.3 Mistura solo-resíduos siderúrgicos	141
5.2.4 Solução contaminante multiespécie.....	142
5.3. Métodos	142
5.3.1 Ensaio de equilíbrio em lote	142
5.3.2 Percolação em coluna.....	144
5.4. Resultados e discussões	146
5.4.1 Ensaio de equilíbrio em lote	146
5.4.2 Percolação em coluna.....	153
5.5. Conclusões	157
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	159
CAPÍTULO 6: Conclusões e sugestões	168

CAPÍTULO 1: Introdução geral

1.1. Considerações gerais

Um dos dispositivos mais seguros e eficientes para o controle de contaminantes decorrentes da disposição de resíduos sólidos, devido à sua relativa simplicidade construtiva e sua relação custo-benefício, são as barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários (Zhou *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2017). As barreiras impermeabilizantes têm como objetivo garantir o isolamento dos resíduos e evitar a infiltração do contaminante, resultante da lixiviação e/ou decomposição dos resíduos, no subsolo. A utilização de materiais incapazes de garantir uma impermeabilização completa do revestimento de fundo de aterros sanitários pode causar sérios problemas ambientais. Nestas obras, a infiltração de percolados no subsolo abaixo do revestimento de fundo é a principal causa da poluição do solo e das águas subterrâneas (Barbero *et al.*, 2020).

A fim de minimizar a poluição do solo subjacente a aterros sanitários e a migração de contaminantes para águas subterrâneas de lençóis freáticos, vários tipos de barreiras hidráulicas são usadas em aterros para isolar os resíduos do meio ambiente. Embora a tecnologia do aterro sanitário e os regulamentos correspondentes tenham experimentado desenvolvimentos significativos nas últimas décadas, os sistemas tradicionais de barreiras impermeabilizantes de argila compactada ainda são uma das soluções técnicas mais empregadas na contenção e desvio de fluxo em aterros de disposição de resíduos (Zhang *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2017).

De acordo com Devarangadi *et al.* (2024), materiais naturais, como os solos argilosos, são frequentemente usados para construir revestimentos superiores e inferiores de aterros sanitários, contudo devem atender às exigências técnicas prescritas pelas normas relacionadas a aterros sanitários (Emmanuel *et al.*, 2020). Tais barreiras de fluxo devem atender, em geral, aos requisitos econômicos de adequada relação custo-benefício e aos requisitos técnicos de alta atenuação de contaminantes. Conforme a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2012), a condutividade hidráulica e a resistência à compressão de

um material de revestimento típico usado em aterros sanitários não devem ser maior que 10^{-7} cm/s e menor que 200 kPa, respectivamente.

Além da baixa condutividade hidráulica e da capacidade de minimizar a migração de lixiviados, a barreira final que separa os resíduos enterrados das águas subterrâneas também deve apresentar propriedades mecânicas satisfatórias. As forças que agem na barreira em um aterro sanitário incluem os pesos da massa de resíduos e do solo de cobertura, resultando em esforços de tração e compressão que requerem da barreira hidráulica propriedades de engenharia capazes de torná-las aptas a suportar tais solicitações mecânicas sem comprometer sua capacidade impermeabilizante (Huang *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2023).

Adicionalmente às características geotécnicas previamente citadas, que devem ser garantidas para o bom funcionamento das barreiras para aterros sanitários, é fundamental que se determine, nestas barreiras, a capacidade de adsorção dos metais potencialmente tóxicos provenientes de resíduos sanitários. A adsorção ocorre quando uma substância, denominada adsorvato, se acumula na interface sólido-líquido (Daramola, 2024; Shadi, 2022; Boscov, 2008). Em aterros sanitários, no âmbito das barreiras impermeabilizantes, esta interface é constituída pelo conjunto solução contaminante-material componente da barreira de fluxo.

Segundo Buschle *et al.* (2010), a compreensão da cinética de liberação de metais pesados para o meio físico é importante na investigação e qualificação do potencial de contaminação deste meio por metais pesados. Conhecendo-se os mecanismos de transporte do contaminante, é possível prever não só os teores acumulados, mas também a taxa de dessorção da substância para a solução do meio. O movimento de contaminantes em um meio determina a quantidade de poluentes transportados e a extensão atingida na camada adjacente ao aterro sanitário (Yan *et al.*, 2021).

A intensidade da interação química ou física entre a barreira impermeabilizante e os elementos tóxicos em solução leva em consideração uma série de propriedades do material componente da barreira, sendo algumas fundamentais nessa relação, tais como a composição química e a sua mineralogia. Este conhecimento é essencial para prever com precisão a mobilidade dos contaminantes, melhorar a precisão da avaliação de riscos e desenvolver estratégias eficazes de contenção e remediação (Daramola *et al.*, 2024).

Locastro e Angelis (2016) citam outros parâmetros a serem observados nos materiais destinados a barreiras impermeabilizantes, tais como composição granulométrica e limites de liquidez e de plasticidade. No entanto, segundo esses autores, é imprescindível levar em consideração diversos fatores que influenciam diretamente nos mecanismos de transporte e atenuação de contaminantes, tais como a afinidade química entre o material do *liner* do aterro sanitário e o agente contaminante, o grau de compactação do *liner* (no caso de solo ou material similar), a tensão de confinamento e o gradiente hidráulico, de maneira que ocorra a imobilização dos contaminantes.

Ainda no que concerne às barreiras impermeabilizantes, a disponibilidade local é uma das principais considerações para a seleção de um material economicamente viável para compor os revestimentos de aterros sanitários. Na ausência de solos naturais impermeáveis disponíveis que atendam às regulamentações técnicas ou em cenários nos quais os custos dos revestimentos sintéticos (por exemplo, Geomembranas e GCLs) são elevados, faz-se necessária a consideração em projeto da escolha de materiais alternativos que sejam técnica e economicamente viáveis (Motoshima *et al.*, 2023; Onyelowe *et al.*, 2023; Rasheed *et al.*, 2023). Dentro dessa perspectiva, como os solos argilosos são recursos naturais não renováveis e o revestimento de um aterro sanitário sempre consome grande quantidade desses solos para atender aos requisitos de impermeabilização e retenção de contaminantes, muitos estudos vêm sendo realizados para analisar as características de possíveis materiais alternativos que possam substituir integralmente ou parcialmente as argilas (Rubinos *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2017; Cai *et al.*, 2021).

Neste contexto, sabe-se que as atividades industriais geram quantidades significativas de resíduos sólidos passíveis de aproveitamento como materiais de construção, tais como rejeitos, ganga de carvão, cinzas volantes, escórias, resíduos de vidro e lama vermelha (Wang *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2017). Para o setor siderúrgico, em particular, em 2021, a produção de aço bruto mundial cresceu 3,7%, chegando a 1,95 bilhão de toneladas. O Brasil, que também faz parte do grupo dos maiores produtores de aço bruto do mundo, produziu, em 2021, aproximadamente 36 milhões de toneladas deste material, o que representa um aumento de 14,7% em comparação ao ano de 2020. Considerando-se que, para cada tonelada de aço produzido, há a geração de 600kg de coprodutos e resíduos, a perspectiva não sustentável de geração

de resíduos industriais sólidos siderúrgicos em quantidades significativas (Leopoldino *et al.*, 2019; Forbes Brasil, 2022; IAB, 2022) deve ser revertida para a perspectiva sustentável de aproveitamento destes como materiais de construção alternativos, aptos a compor obras de terra como as barreiras impermeáveis previamente citadas.

O armazenamento e o descarte sem controle desses resíduos industriais sólidos podem causar contaminação ambiental grave no solo e nas águas subterrâneas próximas e representam sérias ameaças à saúde e ao ecossistema humano. Diante disso, a reciclagem desses resíduos tem sido desafiadora para os engenheiros geotécnicos e ambientais (Wu *et al.*, 2017). As escórias siderúrgicas, por exemplo, são subprodutos industriais que são comumente aplicados em destinações eficientes e sustentáveis, diminuindo o descarte indiscriminado de resíduos em aterros sanitários e tornando racional o uso desses materiais (Montenegro-Cooper *et al.*, 2019).

No âmbito da engenharia civil, alguns autores estudaram o desempenho técnico de camadas impermeabilizantes de aterros sanitários compostas por resíduos siderúrgicos. Esses estudos demonstraram que as escórias de aciaria podem ser utilizadas de forma eficiente nessas camadas, desde que dosadas adequadamente. Devarangadi e M (2021) avaliaram a viabilidade técnica do uso de uma escória granulada de alto forno (GGBS) misturada com bentonita e cimento *Portland* em revestimentos para aterros sanitários a fim de evitar a contaminação das águas subterrâneas. Com base nos resultados das investigações experimentais, a porcentagem ideal de GGBS utilizada deveria situar-se entre 15% e 20%.

Zhan *et al.* (2022) analisaram a condutividade hidráulica saturada de misturas compactadas de escória de aciaria e bentonita em barreira hidráulica para cobertura de aterros sanitários. Esse estudo mostrou que os efeitos da granulometria da escória influenciaram significativamente na redução da permeabilidade dos corpos de prova compactados, sendo mais efetivos com teores de resíduo siderúrgico mais baixos ($\leq 10\%$).

Devarangadi e M (2021) investigaram o efeito da escória granulada moída de alto-forno misturada com solo laterítico, cimento e bentonita como barreira impermeabilizante em aterro sanitário. Os resultados obtidos mostraram que se trata de uma solução eficaz e ecológica, que não apenas reduz o problema de descarte,

mas melhora as propriedades de engenharia e atende aos pré-requisitos técnicos típicos de revestimentos de aterros de contenção de resíduos.

Francisca e Glatstein (2019) investigaram a eficácia de misturas de silte, bentonita e escória de forno de oxigênio (escória BOF) destinadas a compor barreiras impermeabilizantes. Os resultados evidenciaram que o uso da escória BOF (aproximadamente 20%) aumenta o fator de retardamento dos contaminantes, permitindo melhorar o projeto de barreiras reativas de baixa e alta condutividades, aumentando a vida útil do revestimento.

Herrmann *et al.* (2010) constataram que a permeabilidade saturada da mistura de dois tipos de escória de aço (proveniente do forno elétrico à arco e do forno panela) pode ser inferior a 10^{-11} m/s devido à reação química de cimentação. No entanto, é necessário que a escória de aciaria seja moída (diâmetro da partícula $d < 0,075$ mm), exigindo um esforço substancial na moagem ou peneiramento do resíduo siderúrgico.

Uma revisão dos estudos anteriores sugere que diferentes materiais podem ser utilizados para substituir argilas ou reduzir seu uso em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários, porém é necessária uma investigação em relação à viabilidade técnica desse material, bem como avaliar a proporção ideal dos componentes quando combinados para compor a camada de revestimento de aterro sanitário. Assim sendo, é fundamental utilizar materiais alternativos que possuam propriedades de engenharia e proporções adequadas e que sejam viáveis economicamente para a construção destes revestimentos (Li *et al.*, 2017; Devarangadi e M, 2019).

Dentro dessa perspectiva, tem-se que os teores de cada matéria-prima na composição de misturas alternativas são fatores que determinam as propriedades finais e o possível potencial técnico de aplicação dessas misturas na engenharia. No planejamento experimental de misturas, um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas é utilizado para a otimização dos teores de matérias-primas componentes por meio de um número reduzido de ensaios. Em vista disso, nesse planejamento, é possível prever uma determinada propriedade de engenharia para qualquer composição de mistura conforme a mudança das proporções dos componentes, mantendo constantes as condições de processamento da mistura (Mendes *et al.*, 2019).

Diante do que foi exposto anteriormente, percebe-se que é de suma importância pesquisar/investigar experimentalmente materiais alternativos e projetar

sistemas de barreiras impermeabilizantes inovadores para aterros sanitários que sejam capazes de impedir a liberação de contaminantes no meio ambiente. Aliada a essa necessidade, tem-se a hipótese de que resíduos siderúrgicos, tais como a escória de aciaria, possam contribuir para o processo de construção dessas barreiras, de maneira a promover um bom comportamento de engenharia, sendo vantajosos sob os pontos de vista sustentável e econômico, possibilitando a redução de áreas degradadas pela disposição desses resíduos.

Tendo em vista o uso sustentável da escória nesse estudo, ressalta-se que a Assembleia Geral das Nações Unidas (AGNU) adotou oficialmente a combinação de 17 objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) em setembro de 2015, que foram acompanhados por um conjunto abrangente de 169 metas para gerir as dimensões econômicas, ambientais e sociais, tais como a redução da pobreza, a criação de um planeta saudável e a garantia de um futuro próspero e pacífico para todos (Giles-Corti *et al.*, 2020). Alguns ODS, como, por exemplo, o 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), o 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e o 12 (Consumo e Produção Responsáveis), estão diretamente ligados ao presente estudo (Mujtaba *et al.*, 2024).

Nos últimos anos, as considerações ambientais, sociais e de governança do ESG (Governança ambiental, social e corporativa) emergiram como fundamentais para as decisões de investimento em várias empresas. A crescente ênfase dos investidores nos critérios ESG reflete uma mudança de paradigma na avaliação do desempenho empresarial para além das métricas financeiras tradicionais (Jin *et al.*, 2024). O componente ambiental do ESG abrange a forma como as empresas lidam com questões relacionadas ao meio ambiente. Isso inclui, entre outros, práticas de gestão de resíduos, eficiência energética, emissões de carbono, uso e conservação de recursos naturais (Zhang *et al.*, 2022; Yu *et al.*, 2024). Diante disso, este estudo traz uma contribuição sustentável que trata da incorporação de resíduos siderúrgicos na construção de revestimentos de aterros sanitários visando o melhor desempenho técnico e a diminuição da exploração de recursos naturais.

Diante do que foi exposto anteriormente, vislumbra-se, por meio desta pesquisa, a perspectiva de aplicação do método de delineamento experimental de misturas solo-resíduos siderúrgicos para fins de obtenção de uma mistura ideal tecnicamente viável para ser aplicada em barreiras impermeabilizantes (*liners*) de

aterros sanitários. Para isso, optou-se pela utilização de um planejamento experimental de misturas em rede simplex como ferramenta de dosagem estatística, a fim de determinar, com um número reduzido de experimentos, a composição ideal (mistura ideal) que atenda aos valores limites de parâmetros de projeto identificados na literatura técnica e que contemple a maior porcentagem possível dos resíduos siderúrgicos.

Foram avaliadas as interações solo-escória de aciaria e as consequências delas sobre os comportamentos de engenharia da mistura ideal compactada. Para isso, foram realizadas as caracterizações mineralógica, morfológica, química, geotécnica e ambiental de modo a explicar cientificamente o comportamento de engenharia da mistura ideal nessa aplicação (barreira impermeabilizante de aterro sanitário). Foi realizada a avaliação dos modelos de predição, baseada no comparativo, para as propriedades de engenharia investigadas, entre os valores experimentais obtidos por meio de ensaios de laboratório e os valores calculados a partir de equações de regressão.

Promoveu-se a percolação de metais pesados (Mn, Cd, Cu, Zn e Pb) na mistura ideal compactada de modo a avaliar, como resultado das interações físico-químicas resultantes desta percolação, as possíveis alterações em propriedades mecânicas e hidráulicas da barreira de fluxo proposta, comparativamente aos corpos de prova percolados com água (condição de referência), considerando-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral (RT) e permeabilidade saturada (K_{sat}).

Para os corpos de prova percolados com água, foram considerados, também, os ensaios de compressão triaxial CIU (Consolidado Isotropicamente e Não Drenado) e de adensamento edométrico, com vistas à caracterização das propriedades de resistência ao cisalhamento e de rigidez em adensamento da barreira hidráulica proposta.

Por fim, relativamente aos metais pesados percolados, analisou-se a capacidade de adsorção da estrutura compactada da mistura ideal, por meio de ensaios de percolação em coluna e de equilíbrio em lote.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo principal deste estudo é apresentar um protocolo de delineamento experimental de misturas solo-resíduos siderúrgicos, visando à definição de uma mistura ideal que atenda aos requisitos mínimos de construção de barreiras impermeabilizantes para aterros sanitários.

1.2.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos deste estudo, relacionados ao objetivo geral, citam-se:

- ✓ Definir, por meio de análises estatísticas, uma combinação ideal de solo residual e escórias de aciaria elétrica (primária e secundária), visando à incorporação do maior teor de resíduo siderúrgico possível, de forma a atender aos requisitos técnicos inerentes a uma barreira impermeabilizante de aterro sanitário;
- ✓ Verificar, a partir das caracterizações geomecânica e hidráulica da composição ideal de solo residual e escórias de aciaria elétrica, na condição compactada, a eventual equivalência entre os resultados experimentais obtidos e os valores estimados calculados por meio de modelos matemáticos, avaliando a eventual eficiência da ferramenta estatística na predição e otimização da caracterização da mistura ideal;
- ✓ Associar as características físicas, químicas, mineralógicas, morfológicas e ambientais dos componentes individuais da mistura ideal com os desempenhos de engenharia da composição ideal compactada, subsidiando cientificamente as interpretações dos resultados de engenharia obtidos;
- ✓ Verificar, a partir da percolação de solução contaminante na mistura ideal, possíveis alterações na resistência mecânica e condutividade hidráulica em relação aos corpos de prova percolados com água, considerando-se resultados dos ensaios de RCS, RT e K_{sat} ;
- ✓ Avaliar, para os corpos de prova percolados com água, por meio dos ensaios de compressão triaxial CIU (Consolidado Isotropicamente e Não Drenado) e

adensamento edométrico, as respectivas respostas de engenharia da mistura ideal quanto à resistência ao cisalhamento e à rigidez sob adensamento;

- ✓ Avaliar a influência das estruturas compactada e solta da mistura ideal nos parâmetros de transporte da solução contaminante produzida artificialmente, analisando suas capacidades de adsorção por meio de ensaios de percolação em coluna e de equilíbrio em lote.

1.3. Justificativa

Sabendo-se que a escassez de recursos financeiros é um dos fatores relevantes no planejamento dos investimentos públicos no Brasil, os grandes volumes de recursos exigidos na área de disposição de resíduos sólidos necessitam de técnicas inovadoras de construção que sejam incorporadas à prática de engenharia de maneira a reduzir custos e aumentar a eficiência funcional de barreiras impermeabilizantes em aterros sanitários, garantindo o retorno do capital investido.

Tendo em vista a necessidade da incorporação de recursos alternativos na construção de revestimentos de aterros sanitários, visando o melhor desempenho técnico e a diminuição da exploração de recursos naturais, faz-se necessária a avaliação de técnicas laboratoriais e estatísticas destinadas à determinação e ao acompanhamento do comportamento de materiais alternativos (escória de aciaria elétrica, por exemplo) e à escolha da melhor proporção utilizada, viabilizando a inclusão dos mesmos aos protocolos executivos ou sistemas construtivos existentes no país.

Dentro dessa perspectiva e considerando-se a proposição de uma mistura de solo residual com escórias de aciaria elétrica (primária e secundária), justifica-se a realização de um protocolo de otimização da dosagem de misturas solo-resíduos siderúrgicos por meio de um planejamento experimental em rede simplex (método estatístico de dosagem). Esse procedimento visa à obtenção estatística de modelos matemáticos que melhor correlacionam cada uma das propriedades de desempenho investigadas para as misturas (geomecânicas e hidráulicas) com as percentagens dos componentes individuais, além da obtenção de uma mistura ideal que esteja de acordo com as recomendações técnicas inerentes a barreiras impermeabilizantes, de forma a tornar-se uma boa alternativa de aproveitamento desses resíduos em obras de terra,

as quais comumente demandam grandes quantitativos de materiais, permitindo maximizar o uso dos resíduos siderúrgicos na mistura com solos.

1.4. Organização da tese

Formalmente, esta tese engloba um total de cinco capítulos que têm ligações entre si, tanto na concepção como no desenvolvimento dos experimentos, e o capítulo 6, no qual constam as conclusões e sugestões para trabalhos futuros:

CAPÍTULO 1: Introdução geral;

CAPÍTULO 2: Caracterização do solo argiloso e das escórias de aciaria elétrica;

CAPÍTULO 3: Aplicação do delineamento experimental de misturas solo-resíduos siderúrgicos na otimização de *liners* para aterros sanitários;

CAPÍTULO 4: Avaliação dos comportamentos mecânico e hidráulico da mistura ideal solo-resíduos siderúrgicos sob influência da percolação de metais pesados;

CAPÍTULO 5: Avaliação do potencial de adsorção da mistura ideal solo-resíduos siderúrgicos;

CAPÍTULO 6: Conclusões e sugestões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBERO, D.; MARONI, A.; PEYROT, S. Laboratory permeability and single ring infiltration tests for the testing of waterproofing barriers of landfill tanks. **Journal of geotechnical engineering**, volume 7, Issue 2, 2020.

BOSCOV, M. E. G. Geotecnia ambiental. 248 p. **Oficina de Textos**, São Paulo, 2008.

BUSCHLE, B. N.; PALMEIRO, J. K.; SADE, Y. B.; MELO, V. F.; ANDRADE, M. G.; BATISTA, A. H. Cinética de liberação de chumbo de solos de área de mineração e metalurgia de metais pesados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 1865-1874 p. 34, 2010.

CAI, G.; LIU, S.; DU, G.; CHEN, Z.; ZHENG, X.; LI, J. Mechanical performances and microstructural characteristics of reactive MgO-carbonated silt subjected to

- freezing-thawing cycles. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**. Volume 13, Issue 4, Pages 875-884, 2021.
- DARAMOLA, S.; DEMLIE, M.; HINGSTON, E. Mineralogical and sorption characterization of lateritic soils from Southwestern Nigeria for use as landfill liners. **Journal of Environmental Management**. Volume 355, 2024.
- DEVARANGADI, M. e M, U. S. Use of ground granulated blast furnace slag blended with bentonite and cement mixtures as a liner in a landfill to retain diesel oil contaminants. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Volume 7(5), 103360, 2019.
- DEVARANGADI, M. e M, U. S. Effect on engineering properties of ground granulated blast furnace slag admixed with laterite soil, cement and bentonite mixtures as a liner in landfill. **Journal of Cleaner Production**, Volume 329, 2021.
- DEVARANGADI, M.; VUPPALA, S.; M, U. S.; RAGHUNANDAN, M. E. Effect of collated fly ash, GGBS and silica fume on index and engineering properties of expansive clays as a sustainable landfill liner. **Cleaner Materials**, Volume 11, 2024.
- EMMANUEL, E.; ANGGRAINI, V.; RAGHUNANDAN, M. E.; ASADI, A. Utilization of marine clay as a bottom liner material in engineered landfills. **Journal Environ. Chem. Eng.**, Volume 8. Article 104048, 2020.
- FORBES BRASIL. Aço bruto. Disponível em: < <https://forbes.com.br/forbes-money/2021/12/setor-siderurgico-espera-altas-discretas-de-vendas-e-producao-em-2022/>> Acesso em 15/04/2022.
- FRANCISCA, F. M.; GLATSTEIN, D. A. Environmental application of basic oxygen furnace slag for the removal of heavy metals from leachates. **Journal of Hazardous Materials**, 121294, 2019.
- GILES-CORTI, B.; LOWE, M.; ARUNDEL, J. Achieving the SDGs: Evaluating indicators to be used to benchmark and monitor progress towards creating healthy and sustainable cities. **Health Policy**, Volume 124, Issue 6, Pages 581-590, 2020.
- HERRMANN, I.; ANDREAS, L.; DIENER, S.; LIND, L. Steel slag used in landfill linings: laboratory and field tests. **Waste management**, 2010.

- HUANG, Q.; YANG, C.; CHENG, Z.; WANG, H.; MOJIRI, A.; ZHU, N.; QIAN, X.; SHEN, Y.; WU, S.; LOU, Z. Exploring into a light-avoided environment: Mechanical-thermal coupled conditions responsible for the aging behavior of plastic waste in landfills. **Water Research**. Volume 242, 2023.
- INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB) (2022) Anuário Estatístico. Rio de Janeiro - RJ.
- JIN, X.; QI, H.; HUANG, X. Green financial regulation and corporate strategic ESG behavior: Evidence from China. **Finance Research Letters**, Volume 65, 105581, 2024.
- LEOPOLDINO, C. C. L.; BARBOSA, D. C.; MENDONÇA, F. M.; INFANTE, C. E. D. C.; NOGUEIRA, E. A. T. Impactos ambientais e financeiros da implantação do gerenciamento de resíduos sólidos em um complexo siderúrgico: um estudo de caso. **Eng Sanit Ambient**, v.24, n.6, 2019.
- LI, L.; LIN, C.; ZHANG, Z. Utilization of shale-clay mixtures as a landfill liner material to retain heavy metals. **Materials & Design**, 114, 73–82, 2017.
- LI, K.; XU, W.; CHEN, Y.; ZHAN, L.; KE, H.; XU, H.; XIAO, D. Biochemical, hydrological and mechanical behaviors of high food waste content MSW landfill: Numerical simulation analysis of a large-scale experiment. **Waste Management**. Volume 171, Pages 557-567, 2023.
- LOCASTRO, J. K. e ANGELIS, B. L. D. Barreiras de impermeabilização: configurações aplicadas em aterros sanitários. **Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)**, Volume 20, 200–210, 2016.
- MENDES, B. C.; PEDROTI, L. G.; FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, J. C. L.; VIEIRA, C. M. F.; PACHECO, A. A.; AZEVEDO, A. R. G. Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. **Construction and building materials**, v. 227, p. 116669, 2019.
- MONTENEGRO-COOPER, J. M.; CELEMÍN-MATACHANA, M.; CAÑIZAL, J.; GONZÁLEZ, J. J. (2019) Study of the expansive behavior of ladle furnace slag and its mixture with low quality natural soils. **Construction and Building Materials**, 203, 201–209, 2019.
- MOTOSHIMA, T.; ISO, S.; NISHIMURA, T. A preliminary study of hydro-mechanical

- properties for bentonite-sand mixture. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, 2023.
- MUJTABA, G.; SHAH, M. U. H.; HAI, A.; DAUD, M.; HAYAT, M. A holistic approach to embracing the United Nation's Sustainable Development Goal (SDG-6) towards water security in Pakistan. **Journal of Water Process Engineering**. Volume 57, 2024.
- ONYELOWE, K. C.; EBID, A. M.; BALDOVINO, J. J. A.; ONYIA, M. E. Hydraulic conductivity predictive model of RHA-ameliorated laterite for solving landfill liner leachate, soil and water contamination and carbon emission problems. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, Volume 17, Pages 1134–1144, 2022.
- RASHEED, R. M.; MOGHAL, A. A. B.; JANNEPALLY, S. S. R.; REHMAN, A. U.; CHITTOORI, B. C. S. Shrinkage and Consolidation Characteristics of Chitosan-Amended Soft Soil—A Sustainable Alternate Landfill Liner Material. **Journal Buildings**, 13(9), 2230, 2023.
- RUBINOS, D.; SPAGNOLI, G.; BARRAL, M. T. Assessment of bauxite refining residue (red mud) as a liner for waste disposal facilities. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, 29(6), 433–452, 2015.
- SHADI, A. M. H.; KAMARUDDIN, M. A.; NIZA, N. M.; OMAR, F. M.; HOSSAIN, M. S. Facile isotherms of iron oxide nanoparticles for the effectively removing organic and inorganic pollutants from landfill leachate: Isotherms, kinetics, and thermodynamics modelling. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. Volume 10, Issue 3, 2022.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Code of Federal Regulations (2012). Washington.
- WANG, J.; QIN, Q.; HU, S.; WU, K. A concrete material with waste coal gangue and fly ash used for farmland drainage in high groundwater level areas. **Journal of Cleaner Production**, 112, 631–638, 2016.
- WU, H.; WEN, Q.; HU, L.; GONG, M.; TANG, Z. Feasibility study on the application of coal gangue as landfill liner material. **Waste Management**, 63, 161–171, 2017.

- YAN, H.; XIE, H.; WU, J.; DING, H.; QIU, Z.; SUN, Z. Analytical model for transient coupled consolidation and contaminant transport in landfill liner system. **Computers and Geotechnics**. Volume 138, 2021.
- YU, Z.; FAROOQ, U.; ALAM, M. M.; DAI, J. How does environmental, social, and governance (ESG) performance determine investment mix? New empirical evidence from BRICS. **Borsa Istanbul Review**, 2024.
- ZHAN, L. T.; NI, J. Q.; FENG, S.; KONG, L. G.; FENG, T. Saturated hydraulic conductivity of compacted steel slag-bentonite mixtures - A potential hydraulic barrier material of landfill cover. **Waste Management**, Volume 144, Pages 349-356, 2022.
- ZHANG, J.; YANG, Q.; LIU, D. A comprehensive study on numerical analysis of contaminant migration process in compacted clay liner and underlying aquifer for MSW landfill. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 19(8), 950–975, 2015.
- ZHANG, D.; ZHAO, Z.; LAU, C. K. Sovereign ESG and corporate investment: New insights from the United Kingdom. **Technological Forecasting and Social Change**, 183, 2022.
- ZHOU, C.; GONG, Z.; HU, J.; CAO, A.; LIANG, H. A cost-benefit analysis of landfill mining and material recycling in China. **Waste Management**, Volume 35, 191–198, 2015.

CAPÍTULO 2: Caracterização do solo argiloso e das escórias de aciaria elétrica

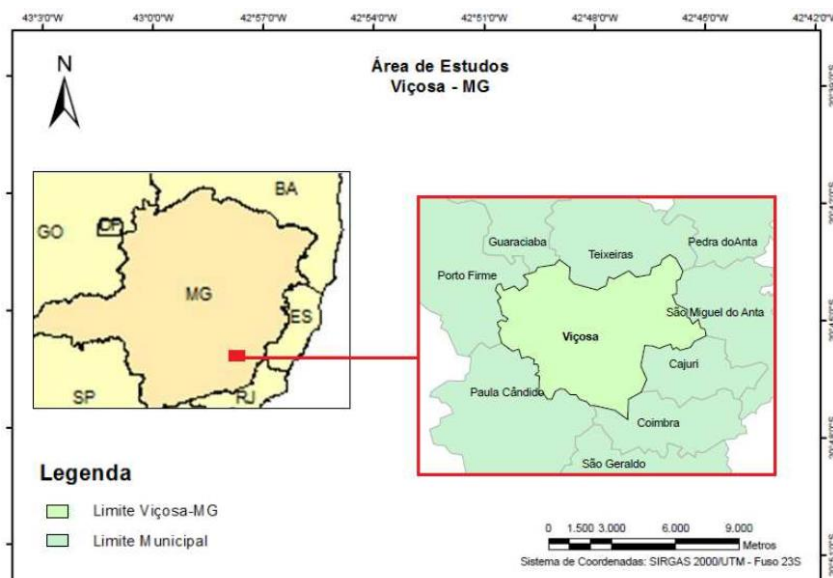
2.1. Materiais

Apresentam-se, a seguir, os materiais que foram necessários para o desenvolvimento da pesquisa, bem como as respectivas metodologias utilizadas para o atendimento das finalidades pretendidas. Salienta-se que tais ensaios foram executados nos Laboratórios do Departamento de Engenharia Civil (DEC), do Departamento de Física (DPF) e do Departamento de Solos (DPS) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), campus Viçosa, Estado de Minas Gerais (MG), Brasil, os quais dispõem de toda a infraestrutura necessária às suas respectivas realizações.

2.1.1 Solo

Foi utilizada, nessa pesquisa, uma amostra de solo residual argiloso proveniente do intemperismo de rochas gnáissicas (Lopes, 2021), aqui denominado “Solo BR 120”. A jazida na qual foi coletada a amostra de solo situa-se na microrregião de Viçosa, na Zona da Mata Norte do Estado de Minas Gerais (MG) (Figura 1).

Figura 1 - Localização da jazida de coleta do solo



Fonte: Pinheiro *et al.* (2014)

2.1.2 Escórias de aciaria elétrica

As escórias de aciaria utilizadas foram cedidas por uma empresa siderúrgica localizada no município de Jeceaba-MG, provenientes do forno elétrico à arco [escória oxidante primária, designada neste trabalho como EAEP (Escória de Aciaria Elétrica Primária)] e do forno panela (escória redutora secundária, designada nesse trabalho como EAES (Escória de Aciaria Elétrica Secundária)], coletadas no pátio de estocagem à céu aberto da referida empresa.

2.2. Métodos

2.2.1. Coleta e preparação do solo

O solo foi coletado em um talude de corte rodoviário (Figura 2) em conformidade com as orientações previstas na norma PRO 003 (DNER, 1994a). A amostra foi disposta em sacos plásticos devidamente vedados e estocada para uso posterior nos ensaios previstos para esse estudo, em obediência à NBR 6457 (ABNT, 2016a).

Figura 2 - Talude de corte do solo residual coletado



Fonte: Autoria própria

2.2.2. Coleta e preparação da escória de aciaria elétrica

Os dois tipos de amostras de escória de aciaria elétrica (primária e secundária) foram coletadas em conformidade com a NBR 10007 (ABNT, 2004) para amostragem

em campo de resíduos sólidos. Não houve qualquer processo de cura do material antes da realização dos ensaios.

Salienta-se que, antes do procedimento de coleta de campo, as escórias de aciaria elétrica utilizadas foram resfriadas em pátio de estocagem a céu aberto, sendo em seguida britadas e submetidas ao peneiramento.

A escória de aciaria elétrica primária (EAEP) é produzida por um forno elétrico à arco no refinamento primário da produção do aço bruto. Nesse processo, uma corrente elétrica é usada para aquecer a cal e/ou a dolomita até o estado líquido. Ao longo do processo de fusão, a cal e a dolomita são combinadas com sucata não metálica para formar uma escória líquida, que flutua no topo do material fundido e, posteriormente, é separada e resfriada, formando a EAEP. A escória de aciaria elétrica secundária (EAES) é produzida no processo de metalurgia secundária ou de refino, para gerar aços de alta qualidade. O aço é descarregado em um forno de concha, onde é desoxidado, dessulfurado e ligado sob a proteção da EAES. A cal e a dolomita são adicionadas no processo para fixar elementos indesejáveis e proteger o revestimento refratário do forno.

Sob a perspectiva de aplicação desses resíduos em misturas com solos, baseado no fato que a fração mais fina (moída) é, normalmente, a responsável pela mobilização da melhoria de suas propriedades mecânicas e hidráulicas (Devarangadi; M, 2021), escolheu-se trabalhar com o material original reduzido, por moagem e peneiramento, a uma granulometria com partículas de diâmetros menores que 2,0 mm (material passante na peneira #10). Para a moagem do material original, foi utilizado o equipamento de abrasão *Los Angeles* (moinho de bolas). O tempo médio de moagem empregado foi de duas horas, com aproximadamente 20 esferas de aço. Feito isso, essa amostra foi estocada para uso posterior nos ensaios previstos para esse estudo (Figura 3).

Figura 3 - Amostras moídas das escórias de aciaria elétrica empregadas na pesquisa: (a) EAEP; (b) EAES



Fonte: Autoria própria

2.2.3. Ensaios de caracterização do solo

2.2.3.1. Ensaios de caracterização física e classificação geotécnica

Na Tabela 1, apresentam-se a identificação dos ensaios e as correspondentes normas destinadas à caracterização geotécnica do solo residual empregado na pesquisa.

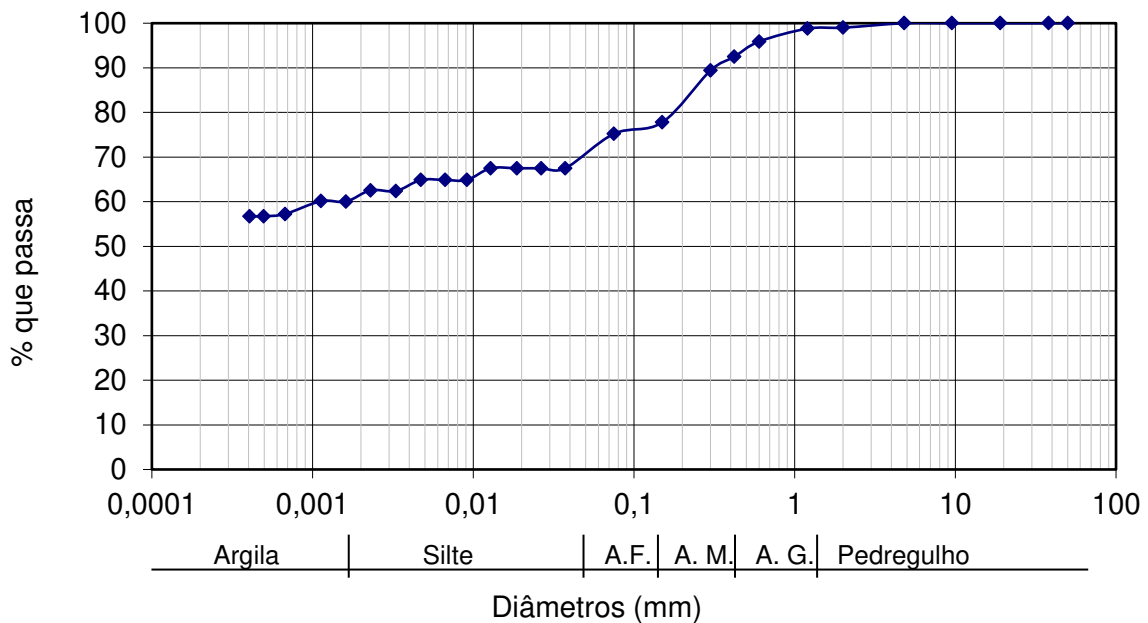
Tabela 1 - Ensaios de caracterização geotécnica do solo empregado na pesquisa

Identificação do ensaio	Norma
Análise granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 2018)
Limites de <i>Atterberg</i>	NBR 6459 (ABNT, 2017a) e NBR 7180 (ABNT, 2016b)
Peso específico dos sólidos	ME 093 (DNER, 1994b)
Compactação	NBR 7182 (ABNT, 2020)

A amostra de solo foi classificada segundo os sistemas *Transportation Research Board* (TRB) e *Unified Soil Classification System* (USCS). Para os sistemas TRB e USCS, foram seguidas as prescrições do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006). A Figura 4 apresenta a curva granulométrica da amostra do Solo BR 120, e a Tabela 2 evidencia a classificação segundo os referidos sistemas de classificação de solos e os valores obtidos na caracterização geotécnica do material. A curva de distribuição granulométrica permitiu concluir que o solo possui um alto teor de partículas de tamanho argila, correspondendo texturalmente a uma argila areno-siltosa. Os parâmetros de ótimo derivados do ensaio de compactação do solo

correspondem à energia do Proctor Normal. Adotou-se essa energia uma vez que a mesma atende aos requisitos técnicos mínimos de um projeto de barreiras sanitárias, não sendo necessário utilizar energias maiores. Outro fator que influenciou nessa escolha é que o acréscimo da energia de compactação aumenta a resistência ao cisalhamento, mas pode interferir em sua expansibilidade ou contração, quando em contato com a água (Yang, 2023; Liu, 2004).

Figura 4 - Curva granulométrica da amostra de solo BR 120 (AF: areia fina; AM: areia média; AG: areia grossa), de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 2022)



Fonte: Resultado da pesquisa

Tabela 2 - Caracterização e classificação geotécnica da amostra de solo analisada.

Parâmetro	Solo BR 120
% argila ($\phi < 0,002\text{ mm}$)	63
% silte ($0,002\text{ mm} < \phi < 0,06\text{ mm}$)	11
% areia ($0,06\text{ mm} < \phi < 2\text{ mm}$)	25
% pedregulho ($2\text{ mm} < \phi < 60\text{ mm}$)	1
LL (%)	79
LP (%)	38
IP (%)	41
ps (g/cm^3)	2,789
pd,max (g/cm^3)	1,468
wot (%)	28,95
TRB	A-7-5 (34)
SUCS	CH

NOTA: ϕ : diâmetro da partícula; LL: limite de liquidez; LP: limite de plasticidade; IP: índice de plasticidade; ps: massa específica dos sólidos; pd,max: massa específica aparente seca máxima; wot: umidade ótima.

Segundo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1993), os solos potencialmente utilizados como *liners* devem apresentar classificação unificada do tipo CL, CH, SC ou OH, porcentagem de finos maior ou igual a 30%, limite de liquidez (LL) maior ou igual a 30% e índice de plasticidade (IP) maior ou igual 30%. Diante disso, percebe-se que esse solo atende a todas as exigências de projeto estabelecidas para uma barreira estabilizante. Ressalta-se que os limites para os demais parâmetros presentes na Tabela 2 não foram estabelecidos pela CETESB.

2.2.3.2. Ensaio de caracterização química

A análise química da amostra de solo foi realizada pela técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), visando à identificação dos óxidos que compõem as amostras, sendo os resultados apresentados na Tabela 3. Nessa tabela, encontra-se também o valor de perda ao fogo (PF). Os testes foram realizados utilizando o equipamento PANalytical Epsilon3x. Salienta-se que os teores dos óxidos nas composições químicas dos materiais são apresentados considerando a normalização em 100% dos resultados.

Tabela 3 - Composição química obtida por FRX e perda ao fogo (PF) da amostra de solo

Material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)	Outros (%)	PF (%)
Solo residual	34,32	37,07	23,10	0,17	0,88	0,02	0,72	1,85	0,04	0,29	1,54	10,67

Na constituição química do solo, há a predominância de óxido de silício (SiO₂), relacionado ao mineral quartzo, sendo também predominante na fração mineral da amostra (Figura 5). Segundo Lepsch (2002), os minerais primários da fração pedregulho e areia, como o quartzo, constituem os principais minerais do solo e são quimicamente inertes. Isso faz com que esses materiais não sejam de muito interesse em relação à demanda funcional de barreiras impermeabilizantes para aterros sanitários, visto que a capacidade de reagir quimicamente é crucial na adsorção de metais pesados (Leme; Miguel, 2014; Devarangadi; M, 2021).

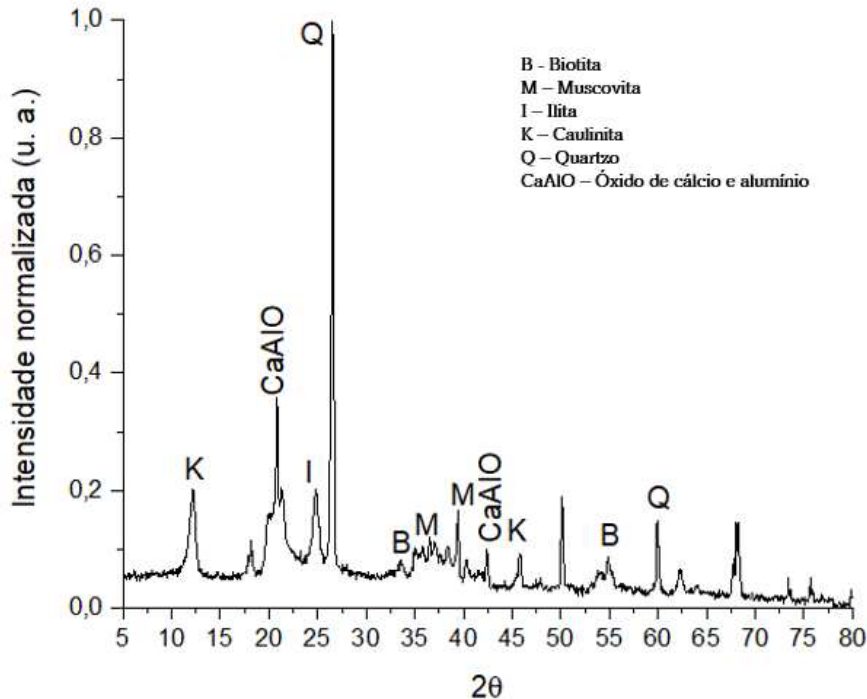
Para as frações de finos (silte e argila), porção de maior interesse para o estudo de barreiras impermeabilizantes por serem ativos quimicamente e, portanto, potenciais retentores de contaminantes contidos no lixiviado, encontrou-se em maior quantidade o óxido de alumínio (Al₂O₃), correspondendo à 37%. Porém, é importante

destacar que os elementos analisados podem não estar na sua totalidade na forma de óxidos no solo. Quando combinado com outros elementos, o Al_2O_3 forma argilominerais (ilita e caulinita, por exemplo). Segundo Almeida (2009), a presença de argilominerais tende a estimular a redução da movimentação de contaminantes do lixiviado pelo solo, os quais são aderidos na superfície das partículas do solo. A presença de hematita (Fe_2O_3), mesmo que em menor quantidade, foi confirmada pela coloração avermelhada do solo (Liu *et al.*, 2013).

2.2.3.3. Ensaio de caracterização mineralógica

A constituição mineralógica da amostra de solo foi obtida por Difração de Raios-X (DRX). Os difratogramas foram obtidos utilizando o difratômetro Bruker D8-Discover (radiação $\text{CuK}\alpha$, 40kV, 30mA, $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$, com medidas θ - 2θ na faixa de 5° a 80° , $0,02^\circ/\text{passo}$, 1s/passos). O resultado da análise de DRX está apresentado na Figura 5 para a amostra de solo residual.

Figura 5 - Difratograma da amostra de solo BR 120 obtido por DRX



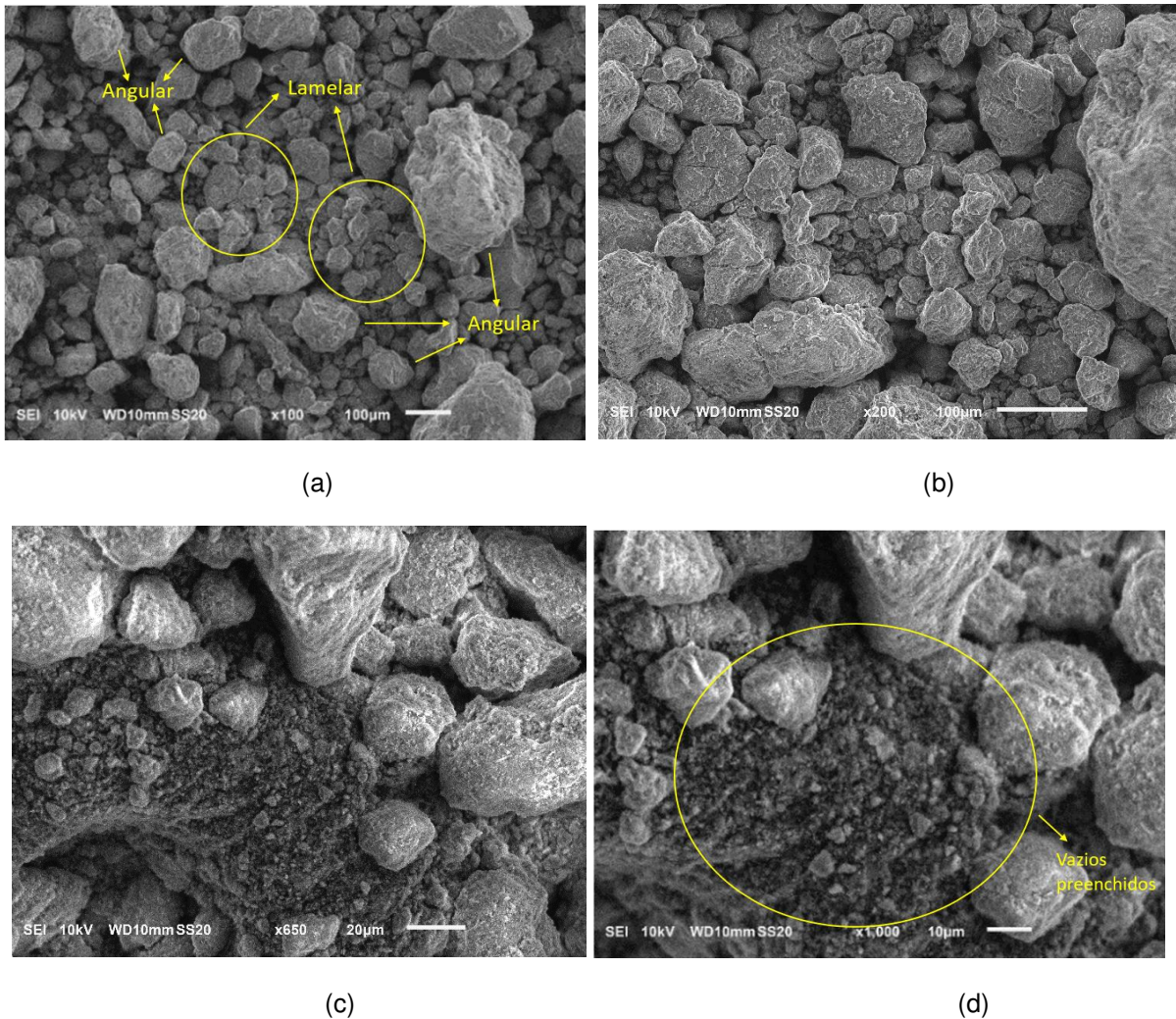
Fonte: Resultado da pesquisa

Foram identificados picos significativos de caulinita e quartzo, corroborando a análise de FRX realizada que indicou altos níveis de SiO_2 e Al_2O_3 , tratando-se, portanto, de um solo caulinitico. Também foram apontados picos dos minerais illita e muscovita. A presença dos minerais do grupo da illita em solos residuais pode ser um indício de que o material é adequado para ser utilizado como matéria-prima para a construção de barreiras impermeabilizantes (*liners*), visto que contribuem com a baixa permeabilidade dessas estruturas (Maritsa *et al.*, 2016).

2.2.3.4. Ensaios de caracterização morfológica

Para a caracterização morfológica da amostra de solo, foi utilizada a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A Figura 6 mostra as imagens resultantes das análises realizadas utilizando o equipamento JEOL JSM-6010LA (resolução de 4 nm, feixe a 20 kV, magnificação de 8X a 300.000X e voltagem de aceleração de 500 V a 20 kV), com a amostra do solo metalizada em ouro.

Figura 6 - Micrografias da amostra de solo residual obtidas por MEV: (a) x100; (b) x200; (c) x650; (d) x1000



Fonte: Resultado da pesquisa

As imagens microestruturais da amostra de solo mostraram que o solo apresenta granulação fina com predominância de grãos com formas angular e lamelar (Figuras 6a e 6b). Partículas lamelares são características de material argiloso e permitem um maior contato entre os grãos do solo, aumentando sua coesão após o processo de compactação. Essa configuração interfere diretamente na diminuição da permeabilidade, parâmetro de suma importância em projetos de barreiras de baixa permeabilidade (Silva, 2015; Batista *et al.*, 2017). As micrografias da amostra de solo residual indicaram tratar-se de um material com estrutura compacta, dispersa e com os vazios preenchidos com minerais de menor tamanho (Figuras 6c e 6d). Portanto, o tamanho, o formato e a distribuição das partículas, a homogeneidade da

microestrutura e a porosidade afetam as propriedades mecânicas e hidráulicas do material (Budhu, 2015).

Foi realizado também o ensaio de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), de modo a se obter os elementos químicos presentes na amostra de solo. Os dados obtidos por EDS corroboraram os dados obtidos pelo ensaio de FRX, mostrando que a amostra de solo possui quantidade significativa de Ferro, Silício e Alumínio na sua composição (Tabela 4).

Tabela 4 - Elementos químicos presentes na amostra de solo residual obtidos por EDS.

Fórmula química	% em massa
C	4,34
O	37,79
Al	20,14
Si	20,64
Fe	13,69
Mg	-
K	-

2.2.4. Ensaio de caracterização das escórias de aciaria elétrica

2.2.4.1. Ensaio de caracterização física

Na Tabela 5, apresentam-se a identificação dos ensaios e as correspondentes normas destinadas à caracterização física das escórias de aciaria elétrica moídas empregadas na pesquisa.

Tabela 5 - Ensaio de caracterização física das escórias de aciaria elétrica moídas empregadas na pesquisa

Identificação do ensaio	Norma
Análise granulométrica (difração a laser)	ISO 13320 (ISO, 2020)
Finura por peneiramento (peneira nº 200)	NBR 11579 (ABNT, 2013)
Finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)	NBR 16372 (ABNT, 2015)
Massa específica	NBR 16605 (ABNT, 2017b)

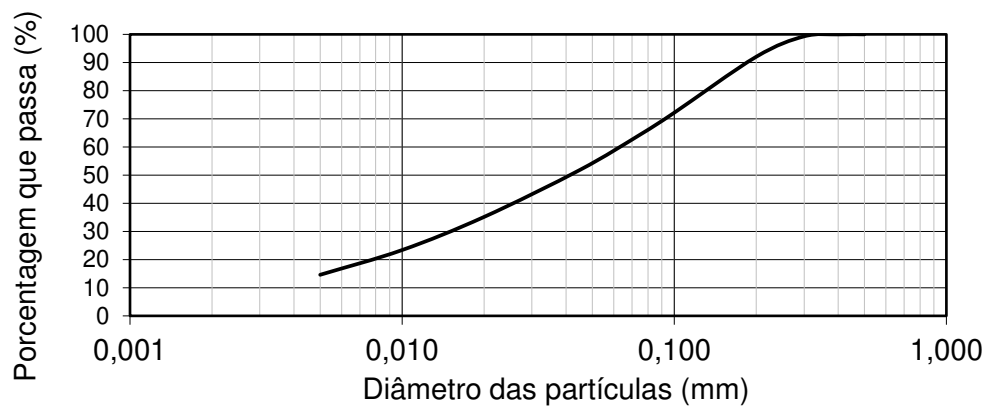
A Tabela 6 evidencia os valores obtidos na caracterização física das escórias utilizadas nesse estudo. As curvas granulométricas das amostras das escórias primária e secundária estão apresentadas na Figura 7. Essas curvas foram obtidas após o processamento do material, ou seja, tratam-se de partículas com diâmetros menores que 2,0 mm (passante na peneira #10). As escórias de aciaria usadas nessa

pesquisa foram tratadas como um material cimentício, razão pela qual foram utilizadas as mesmas normas empregadas para a caracterização do cimento *Portland*.

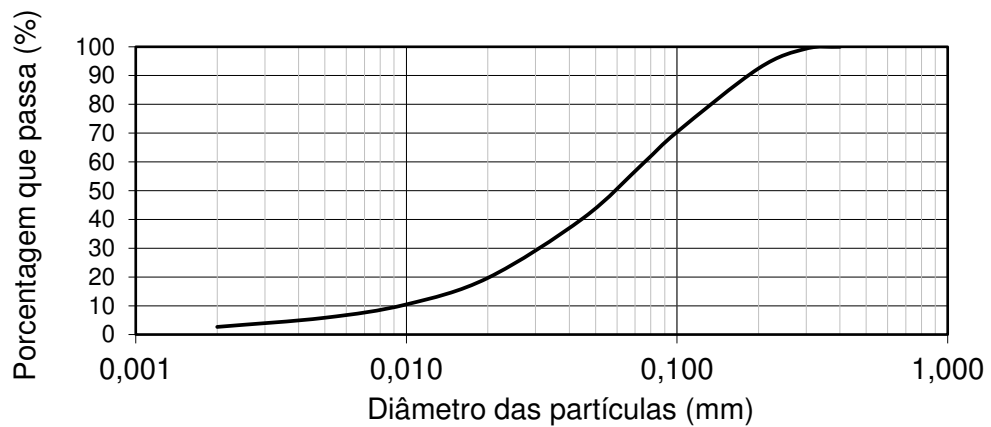
Tabela 6 - Caracterização física das escórias de aciaria.

Parâmetro	EAEP	EAES
Finura por peneiramento (peneira nº 200) [%]	18,81	37,82
Finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine) [cm ² /g]	1950,83	1612,7
Massa específica [g/cm ³]	3,83	2,89

Figura 7 - Curvas granulométricas das amostras de EAEP (a) e EAES (b) (Fonte: Resultado da pesquisa)



(a)



(b)

2.2.4.2. Ensaios de caracterização química

Os ensaios de caracterização química das escórias de aciaria elétrica moídas analisadas nessa pesquisa foram realizados seguindo as metodologias indicadas

pelos métodos de ensaios utilizados para a caracterização química de cimento *Portland*. Na Tabela 7, apresentam-se a identificação dos ensaios e as correspondentes normas.

Tabela 7 - Ensaios de caracterização química das escórias de aciaria elétrica moídas empregadas na pesquisa

Identificação do ensaio	Norma
Perda ao fogo	NBR 17086-6 (ABNT, 2023a)
Óxido de cálcio livre	NBR 17086-10 (ABNT, 2023b)
Resíduo insolúvel	NBR 17086-4 (ABNT, 2023c)
Determinação do pH	Manual de Análises de Solo da EMBRAPA (2017)

No que diz respeito ao ensaio de FRX, os compostos químicos e suas respectivas porcentagens presentes nas amostras de escória de aciaria estão mostradas na Tabela 8. Nessa tabela, encontra-se também o valor de perda ao fogo (PF). Os testes foram realizados utilizando o equipamento PANalytical Epsilon3x. Salienta-se que os teores dos óxidos nas composições químicas dos materiais são apresentados considerando a normalização em 100% dos resultados.

Tabela 8 - Composição química e perda ao fogo (PF) das amostras de escória de aciaria

Material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)	Outros (%)	PF (%)
EAEP	21,35	10,17	24,50	38,15	1,01	0,30	0,00	0,64	0,18	0,32	3,38	0,23
EAES	22,22	11,16	17,41	43,65	2,43	0,35	0,97	0,71	0,71	0,30	0,09	0,12

A Tabela 9 evidencia os valores dos demais parâmetros obtidos dos ensaios relacionados à caracterização química das escórias utilizadas nesse estudo.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de caracterização química das escórias de aciaria elétrica moídas empregadas na pesquisa

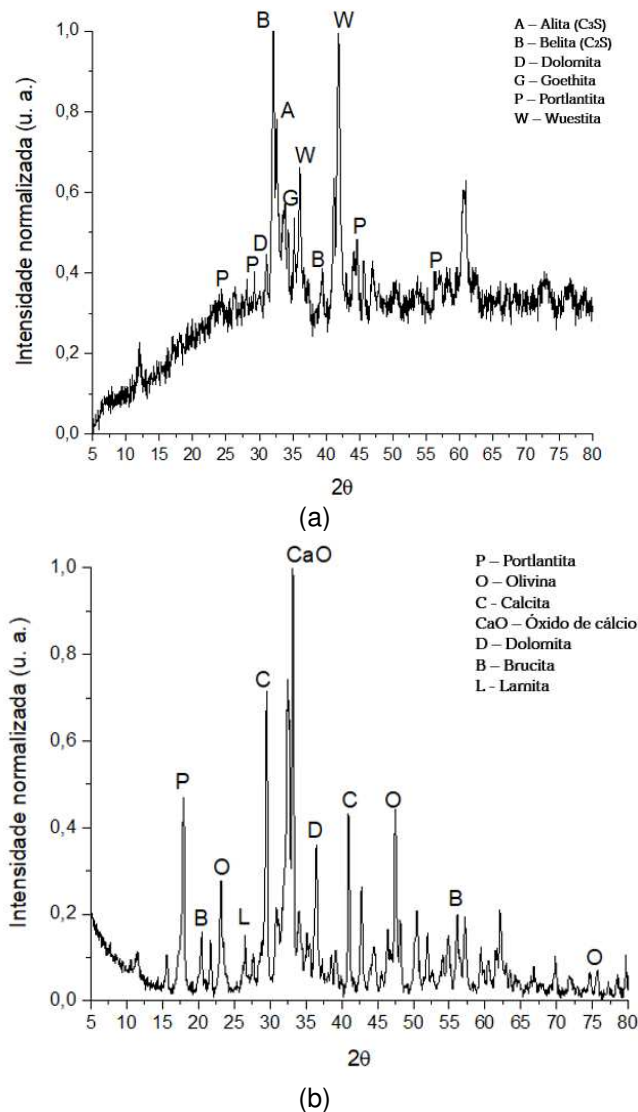
Parâmetro	EAEP	EAES
Óxido de cálcio livre (%)	1,05	0,41
Resíduo insolúvel (%)	6,98	21,81
pH	11,60	10,53

2.2.4.3. Ensaios de caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica das escórias de aciaria elétrica moídas consideradas nesse estudo foi obtida por meio da metodologia de Difração de Raios-

X. A Figura 8 apresenta o resultado das mineralogias das amostras das escórias (primária e secundária) obtidas por DRX. Os difratogramas foram obtidos utilizando o difratômetro Bruker D8-Discover (radiação $\text{CuK}\alpha$, 40kV, 30mA, $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$, com medidas θ - 2θ na faixa de 5° a 80° , $0,02^\circ/\text{passo}$, 1s/passos).

Figura 8 - Difratogramas das amostras de EAEP (a) e EAES (b)



Fonte: Resultado da pesquisa

A Figura 8(a) apresenta o resultado da mineralogia da amostra de EAEP obtida por DRX. Através do difratograma, observou-se uma ampla variedade de minerais constituintes do material. Os picos de alta intensidade de belita, alita e wustita

confirmam os resultados da análise por FRX que apontaram significativa porcentagem de óxido de cálcio e óxido de ferro. A alita (C_3S - Silicato tricálcico) é responsável pela resistência de materiais cimentícios (argamassas e concretos, por exemplo) em todas as idades, mas principalmente nas idades iniciais, liberando calor após a aplicação. Já a belita (C_2S - Silicato dicálcico) é responsável pela resistência em idades mais avançadas (1 mês), liberando calor lentamente. A presença de wustite (FeO - óxido de ferro) garante elevadas dureza e massa específica para a EAEP (Nelson, 1990; Melo, 2012).

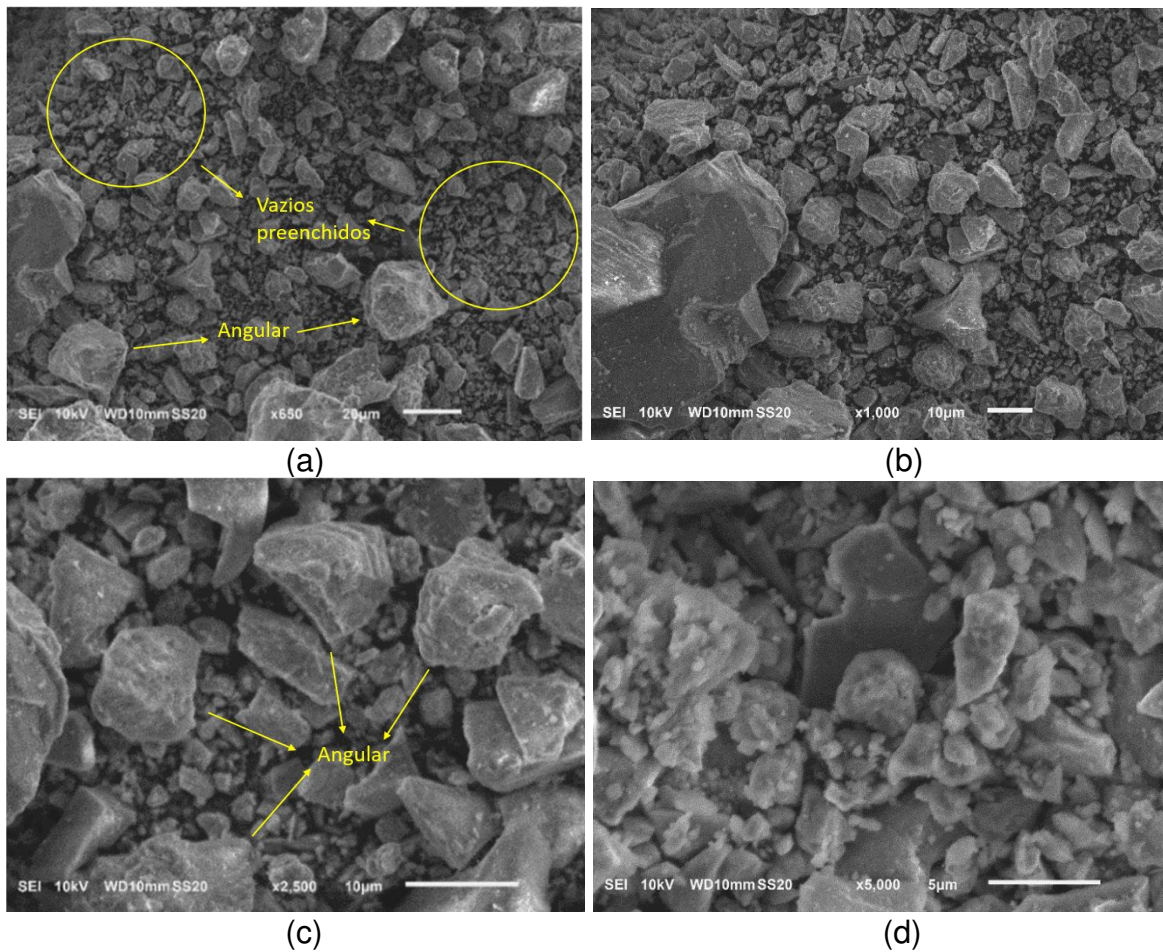
Para a amostra de EAES [Figura 8(b)], as principais fases mineralógicas identificadas no material foram CaO , olivina, calcita, dolomita, brucita e larnita. Os picos de alta intensidade de óxido de cálcio e olivina (silicatos de magnésio e ferro) confirmam os resultados da análise por FRX.

A dissolução incompleta da dolomita durante o processo de refino do aço resulta na formação do periclásio, que é a espécie química contribuinte no processo de expansão. Uma das possíveis alternativas propostas por alguns pesquisadores para reduzir o problema de expansão do MgO seria a redução da dimensão dos grãos para obter o menor tamanho possível, o que facilita a dissolução e a reação completa desse óxido (Machado, 2000; Montgomery; Wang, 1991).

2.2.4.4. Ensaio de caracterização morfológica

Para a caracterização morfológica das amostras de EAEP e EAES, foi utilizada a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A Figura 9 mostra as micrografias da EAEP. Pode-se observar a predominância de partículas angulares (Figuras 9c e 9d), com presença de partículas menores, que também apresentam a configuração angular, preenchendo os vazios (Figuras 9a e 9b).

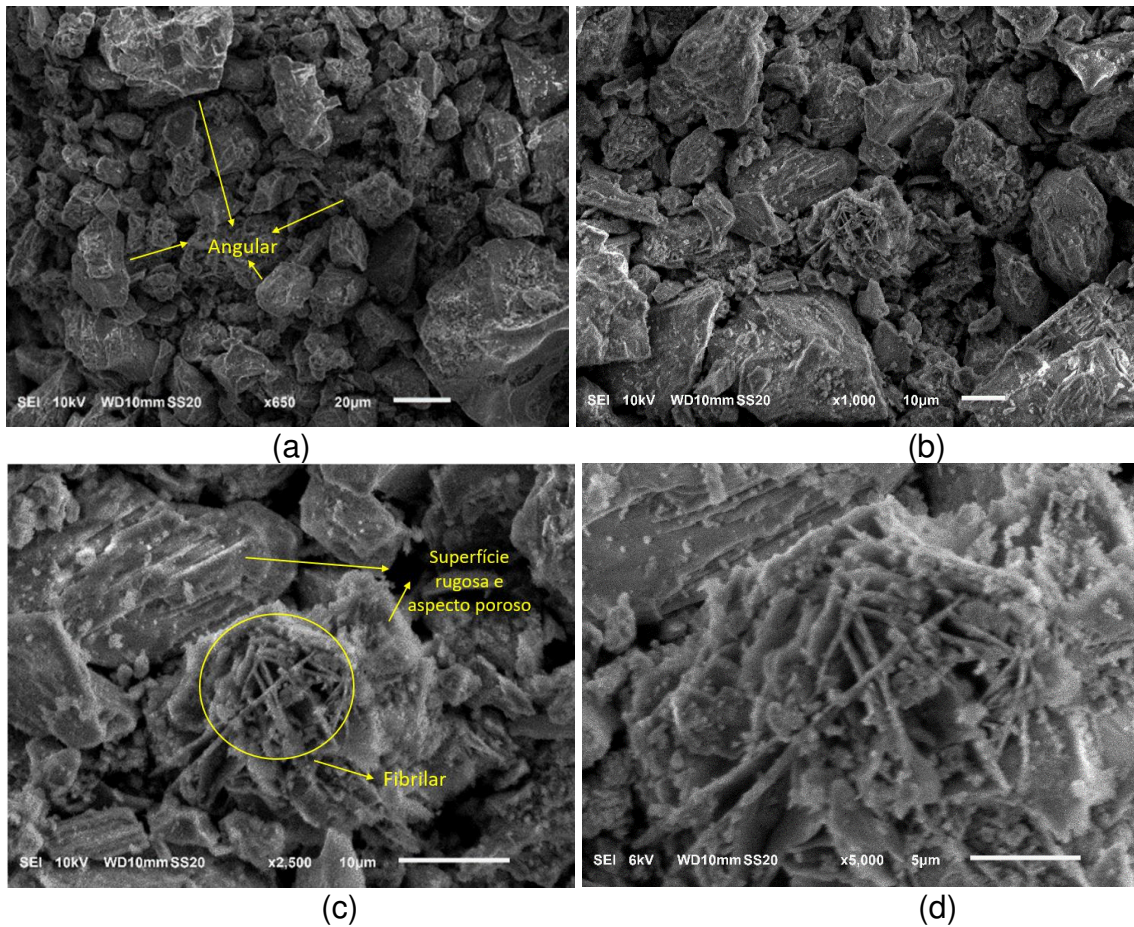
Figura 9 - Micrografias da amostra de EAEP obtidas por MEV: (a) x650; (b) x1000; (c) x2500 e (d) x5000



Fonte: Resultado da pesquisa

Em relação à EAES (Figura 10), tem-se que as partículas apresentam geometrias diversas, sendo predominantemente angulares (Figuras 10a e 10b). Percebe-se que as partículas apresentam tamanhos relativamente maiores em relação às partículas presentes na EAEP (Figuras 9a e 9b). Além disso, ressalta-se a presença de partículas com superfície rugosa e aspecto poroso, tendo uma geometria fibrilar (Figuras 10c e 10d).

Figura 10 - Micrografias da amostra de EAES obtidas por MEV: (a) x650; (b) x1000; (c) x2500 e (d) x5000



Fonte: Resultado da pesquisa

Foi realizado também o ensaio de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) de modo a se obter os elementos químicos presentes nas amostras de escória. Os dados obtidos por EDS (Tabela 10) corroboraram os dados obtidos pelo ensaio de FRX, mostrando que as amostras de escória possuem quantidade significativa de Ferro, Silício, Alumínio e Cálcio na sua composição.

Tabela 10 - Elementos químicos presentes nas amostras de escória obtidos por EDS.

EAEP		EAES	
Fórmula química	% em massa	Fórmula química	% em massa
C	3,26	C	3,65
O	32,48	O	34,23
Al	2,59	Al	4,80
Si	5,87	Si	5,36
Fe	6,32	Fe	4,97
Mg	2,84	Mg	2,71
Na	0,06	Na	0,03
P	0,27	P	0,19
S	0,12	S	0,14
Ca	31,63	Ca	39,33

2.3. Conclusões

Este capítulo teve como objetivo apresentar as caracterizações do solo residual e das escórias de aciaria elétrica primária e secundária, visando inferir, na sequência do trabalho, a respeito da influência da incorporação de resíduos siderúrgicos como matérias-primas em *liners*.

Em relação ao solo residual, foi constatado que esse material atende a todas as exigências de projeto estabelecidas para uma barreira impermeabilizante. Ressalta-se que nem todos os parâmetros estudados dispõem de limites estabelecidos pelo órgão técnico adotado como referência (CETESB).

As escórias de aciaria elétrica utilizadas nessa pesquisa (EAEP e EAES) são compostas sobretudo por óxidos de cálcio, silício e alumínio. Esses óxidos são os principais constituintes de silicatos e aluminatos de cálcio que possuem fortes propriedades de ligação cimentícia. Esses componentes fazem com que as escórias reajam com a água e formem estruturas semelhantes ao cimento endurecido.

A dissolução incompleta da dolomita, identificada nas amostras das escórias, resulta na formação do periclásio, que é a espécie química contribuinte no processo de expansão. A fim de minimizar esse problema de expansão do MgO, as escórias foram reduzidas a uma granulometria com partículas de diâmetros menores que 2,0 mm (material passante na peneira #10), o que facilita a dissolução e a reação completa desse óxido.

Tendo em vista as caracterizações apresentadas nesse capítulo, vislumbra-se o potencial técnico de utilização combinada do solo argiloso e das escórias de aciaria elétrica como materiais de construção para barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários. Os resultados apresentados neste estudo oferecem novas possibilidades ou perspectivas de encontrar aplicações sustentáveis para as escórias de aciaria elétrica investigadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, T. L. **Implicações ambientais dos processos de atenuação de lixiviado em locais de disposição de resíduos sólidos urbanos**. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos - SP, 2009.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17086-6**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. (2023a). Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17086-10**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. (2023b). Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17086-4**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. (2023c). Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502**: Rochas e Solos. (2022). Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação (2020). Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Análise Granulométrica, Solos - Método de Ensaio. (2018). Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solo - Determinação do Limite de Liquidez. (2017a). Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. (2017b). Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. (2016a). Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade (2016b). Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). (2015). Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).

- (2013). Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. (2004). Rio de Janeiro.
- BATISTA, A. H.; MELO, V. F.; GILKES, R. Scanning and transmission analytical electron microscopy (STEM-EDX) identifies minor minerals and the location of minor elements in the clay fraction of soils. **Applied Clay Science**. Volume 135, January 2017, Pages 447-456.
- BUDHU, M. Soil mechanics fundamentals. **John Wiley & Sons**, 2015.
- Companhia de tecnologia e de saneamento ambiental de São Paulo - CETESB. Resíduos sólidos industriais. São Paulo/SP, 1993.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 003**: Coleta de amostras deformadas de solos. (1994a). Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 093**: Solos - determinação da densidade real. (1994b). Rio de Janeiro.
- DEVARANGADI, M.; M, U. S. Effect on engineering properties of ground granulated blast furnace slag admixed with laterite soil, cement and bentonite mixtures as a liner in landfill. **Journal of Cleaner Production**, Volume 329, 2021.
- ISO 13320:2020, Partice Size Analysis - Laser Diffraction Methods, the International Organization for Standardization, 2020.
- LEME, M. A. G.; MIGUEL, M. G. **Estudo Geotécnico de uma mistura de Solos utilizada em Liner de Aterros Sanitários**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Brasil. COBRAMSEG 2014.
- LEPSCH, I. F. Formação e conservação dos solos. São Paulo: Oficina de Textos. 178 p., 2002.
- LIU, X.; CHEN, W.; LIANG, S.; HAN, W. Influencing factors of loess compacting. **Journal Desert Res.**, 24 (5), pp. 657-662, 2004.
- LIU, C.; STARCHER, R. D. Effects of curing conditions on unconfined compressive

- strength of Cement- and Cement-Fiber-Improved Soils. **J. Mater. Civ. Eng.**, 25(8): 1134-1141, 2013.
- LOPES, E. C. **Avaliação tecnológica de coprodutos siderúrgicos visando o melhoramento de propriedades de engenharia de solos tropicais.** Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, tese de doutorado, 2021.
- MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria.** Tese de Mestrado. Sc., POLI/USP, São Paulo - SP, 2000.
- MANUAL DE MÉTODOS DE ANÁLISE DE SOLO Revista e ampliada, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa. Solos Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 3ª edição, Embrapa Brasília - DF, 2017.
- MARITSA, L.; TSAKIRIDIS, P. E.; KATSIOTIS, N. S.; TSIAVOS, H.; VELISSARIOU, D.; XENIDIS, A.; BEAZI-KATSIOTI, M. Utilization of spilitic mining wastes in the construction of landfill bottom liners. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 4(2), 1818–1825, 2016.
- MELO, C. G. M. B. **Influência da adição do NaCl e KCl em sistemas de pastas contendo sílica para poços de petróleo em zonas evaporárias e carbonáticas.** Tese de Doutorado (Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.
- MONTGOMERY, D. G.; WANG, G. Instant-chilled Steel Slag Aggregate in Concrete – Stregth Related Properties. **Cement and Concrete research**, Volume 21, p. 1083- 1091, 1991.
- NELSON, E. B. Well cementing, Saint-Etienne: Schulumberger Educational Services, 1990.
- PINHEIRO, P. B. B.; SANTOS, A. P.; MEDEIROS, N. G.; ABREU, M. V. S. **Geoprocessamento aplicado à avaliação do conforto domiciliar urbano e rural do município de Viçosa (MG).** Universidade Federal de Viçosa – UFV, 2014.
- SILVA, C. F. **Estudo do comportamento hidráulico de mistura solo-bentonita**

visando alternativa de emprego como Sistema de proteção para aterros sanitários, Universidade de São Paulo, São Carlos. Dissertação de Mestrado, 2015.

YANG, J.; NIU, X.; GUO, Q.; WEN, Z.; CAO, H. Strength and deformation characteristics of compacted loess with different moisture content and compaction energy. **Results in Engineering**. Volume 20, 2023.

CAPÍTULO 3: Aplicação do delineamento experimental de misturas solo-resíduos siderúrgicos na otimização de *liners* para aterros sanitários

3.1. Introdução

A fim de reduzir a migração de agentes contaminantes para águas subterrâneas de lençóis freáticos subjacentes aos aterros sanitários, vários tipos de barreiras impermeabilizantes são usados em aterros para isolar os resíduos poluentes do ambiente. Embora a tecnologia do aterro sanitário e os regulamentos correspondentes tenham experimentado desenvolvimentos significativos nas últimas décadas, os sistemas de barreiras selantes (*liners*) de argila compactada ainda representam uma das mais empregadas soluções técnicas destinadas à contenção e desvio de fluxo em aterros de disposição de resíduos modernos (Liu; Hu, 2014; Zhang *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2017; Devarangadi; M, 2021).

De acordo com Guney *et al.* (2014), os revestimentos de fundo e de cobertura dos aterros sanitários são via de regra construídos com solos argilosos naturais disponíveis localmente devido à sua alta resistência à compressão simples e baixa condutividade hidráulica na condição compactada. Essas barreiras de fluxo devem atender, em geral, aos requisitos técnicos de alta atenuação de contaminantes e aos requisitos econômicos de adequada relação custo-benefício. A condutividade hidráulica e a resistência à compressão simples de um material de revestimento típico usado em aterros sanitários não devem ser maior que 10^{-7} cm/s e menor que 200 kPa, respectivamente (USEPA, 2012).

Muitos estudos vêm sendo realizados de maneira a analisar as características de materiais alternativos que possam substituir parcialmente ou integralmente os solos argilosos, que são geralmente utilizados na construção de barreiras selantes. Para a confecção de um revestimento de aterro sanitário, é necessária uma quantidade expressiva de material para atender aos requisitos de baixa permeabilidade e bloqueio de contaminantes, do que resulta o incentivo em se utilizar outros materiais em substituição ou complementação aos recursos tradicionais (solos) não renováveis (Rubinos *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2017; Devarangadi; M, 2021).

Tendo em vista a necessidade de materiais alternativos disponíveis, é importante destacar que a exploração e a utilização de recursos minerais, destinadas a atender às demandas crescentes da sociedade de consumo, produz grandes quantidades de resíduos sólidos industriais, incluindo rejeitos, ganga de carvão, cinzas volantes, escórias, resíduos de vidro e lama vermelha (Wang *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2017).

A produção mundial de aço bruto para os 71 países que reportam à Associação Mundial do Aço (*worldsteel*) foi de 148,1 milhões de toneladas (Mt) em janeiro de 2024. A produção de aço bruto no Brasil em fevereiro de 2024 foi de 2,8 milhões de toneladas, um aumento de 13,1% frente ao apurado no mesmo mês de 2023. A Ásia e a Oceania produziram 107,6 Mt. Estima-se que a China tenha produzido 77,2 Mt em janeiro de 2024. A Índia produziu 12,5 Mt, um aumento de 7,3% em relação a janeiro de 2023. O Japão produziu 7,3 Mt, um aumento de 0,6%. Os Estados Unidos produziram 6,8 Mt. Estima-se que a Rússia tenha produzido 6,2 Mt, um aumento de 1,2%. A Coreia do Sul produziu 5,7 Mt, um aumento de 1,5%. Considerando-se que para cada tonelada de aço produzido há a geração de 600 kg de coprodutos e resíduos, é nítida a crescente geração de resíduos industriais sólidos em quantidades significativas (Leopoldino *et al.*, 2019; IAB, 2024).

Dentro desta perspectiva, alguns autores estudaram o desempenho técnico de camadas impermeabilizantes de aterros sanitários compostas por resíduos siderúrgicos. Esses estudos mostraram que as escórias de aciaria podem ser utilizadas de forma eficiente nessas camadas, desde que dosadas adequadamente. Devarangadi e M (2019) avaliaram a viabilidade técnica do uso de uma escória granulada de alto forno (GGBS) misturada com bentonita e cimento *Portland* em revestimentos para aterros sanitários a fim de evitar a contaminação das águas subterrâneas subjacentes às camadas impermeabilizantes dos aterros sanitários. Investigações experimentais foram conduzidas para estudar o efeito do GGBS misturado com bentonita e cimento *Portland* sobre parâmetros geotécnicos, como limite de liquidez (LL), índice de expansão livre, compactação, resistência à compressão não confinada e condutividade hidráulica. Com base nos resultados das investigações experimentais, a porcentagem ideal de GGBS utilizada deveria situar-se entre 15% e 20%.

Zhan *et al.* (2022) analisaram a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) de misturas compactadas de escória de aciaria e bentonita em barreiras hidráulicas para cobertura de aterros sanitários. Esse estudo evidenciou que os efeitos da granulometria da escória influenciaram significativamente na redução da permeabilidade dos corpos de prova compactados. Diante disso, o uso de escória de aciaria bem graduada misturada com apenas 10% de bentonita reduziu significativamente o K_{sat} (ordem de $1,2 \times 10^{-10}$ m/s).

Devarangadi e M (2021) investigaram o efeito da escória granulada moída de alto-forno misturada com solo laterítico, cimento e bentonita como barreira impermeabilizante em aterro sanitário. Testes de laboratório, como limites de consistência, índice de expansão livre, compactação Proctor, condutividade hidráulica, características do lixiviado e resistência à compressão não confinada com análise pós-teste, foram conduzidos para avaliar a mistura ideal. Os resultados obtidos mostraram que a mistura proposta constitui uma solução eficaz e sustentável, que não apenas reduz o problema de descarte da escória, mas melhora as propriedades de engenharia da barreira de fluxo, atendendo aos pré-requisitos técnicos relacionados ao seu emprego como revestimento impermeabilizante de aterro sanitário.

Francisca e Glatstein (2019) investigaram a eficácia de misturas de silte, bentonita e escória de forno de oxigênio (escória BOF) destinadas a compor barreiras impermeabilizantes. Os resultados mostraram que a utilização de escória BOF (aproximadamente 20%) promoveu a sorção dos contaminantes, possibilitando melhorar o dimensionamento de barreiras reativas, além de ampliar o ciclo de vida do revestimento.

Uma revisão dos estudos anteriores sugere que diferentes materiais podem ser utilizados para substituir argilas ou reduzir seu uso em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários, porém é necessária uma investigação em relação à viabilidade técnica desse material, bem como avaliar com melhor fundamentação científica a proporção ideal dos componentes quando combinados para compor a camada. Assim sendo, é fundamental encontrar materiais alternativos que tenham propriedades e proporções adequadas e que sejam econômicos para a construção de revestimentos de aterros sanitários (Li *et al.*, 2017; Devarangadi; M, 2019).

Diante disso, percebe-se que os teores de cada matéria-prima na composição de misturas alternativas e sua granulometria são cruciais na definição das

propriedades finais e do potencial técnico de utilização dessas misturas na engenharia. No planejamento experimental de misturas, um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas é empregado para a otimização dos teores de matérias-primas componentes por meio de um número reduzido de experimentos. Portanto, nesse planejamento, é possível prever uma determinada propriedade de engenharia para qualquer composição conforme a mudança das proporções dos componentes da mistura, mantendo constantes as condições de processamento (Mendes *et al.*, 2019).

Planejamentos experimentais são ferramentas estatísticas aplicadas para desenvolver e otimizar sistemas, processos e produtos. Há uma variedade de delineamentos, dependendo dos casos encontrados pelo experimentador, como planejamentos fatoriais, planejamentos fracionários, planejamentos compostos centrais, *design* Box-Behnken e *design* de Doehlert (Bouyakhsass *et al.*, 2023; Haddaji *et al.*, 2022).

Existem muitos delineamentos experimentais adaptados a casos diversos, sendo cada tipo de planejamento experimental resultante de um estudo de alternativas entre o número de testes e a precisão das respostas, considerando as restrições do campo experimental estudado. Assim, a realização dos experimentos requer a compreensão e aplicação de métodos estatísticos (Bouyakhsass *et al.*, 2023). Os experimentos podem ser planejados e analisados usando softwares estatísticos apropriados. Os softwares comerciais mais conhecidos são Minitab, Design Expert, JMP, Statistica, Matlab, NemrodW (Gomaa *et al.*, 2021; Haddaji *et al.*, 2022).

Diante do exposto, percebe-se que é de suma importância pesquisar/investigar experimentalmente materiais alternativos e projetar sistemas de barreiras impermeabilizantes inovadores para aterros sanitários que sejam capazes de impedir a liberação de contaminantes no meio ambiente. Aliada a essa necessidade, tem-se a hipótese de que resíduos siderúrgicos, tais como a escória de aciaria, possam contribuir para o processo de construção dessas barreiras, de maneira a promover um bom comportamento de engenharia, sendo vantajosos sob os pontos de vista sustentável e econômico, possibilitando a redução de áreas degradadas pela disposição desses resíduos.

Tendo em vista o caráter sustentável desse estudo, alguns ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) adotados pela Assembleia Geral das Nações Unidas (AGNU) estão diretamente ligados à ideia de se incentivar o uso de materiais

alternativos de maneira sustentável, visto que se trata de resíduos siderúrgicos (Mujtaba *et al.*, 2024). A Assembleia Geral das Nações Unidas adotou oficialmente a combinação de 17 objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) em setembro de 2015, que foram acompanhados por um conjunto abrangente de 169 metas para gerir as dimensões econômicas, ambientais e sociais, tais como a criação de um planeta saudável (Giles-Corti *et al.*, 2020). Além disso, tem-se a crescente ênfase dos grandes investidores de empresas nos critérios do ESG (Governança ambiental, social e corporativa), os quais tratam das melhores práticas relacionadas ao meio ambiente, governança e sociedade dentro das empresas. As instituições financeiras e os investidores dão cada vez mais prioridade ao desenvolvimento sustentável em detrimento do desempenho financeiro tradicional, particularmente nessas práticas ESG (Chen; Xie, 2022). As atividades ESG com foco ambiental podem ajudar as empresas a mitigar os riscos futuros associados ao ambiente natural e a fazer a transição para modelos de negócios mais sustentáveis (Choi *et al.*, 2024).

Diante disso, este estudo traz uma perspectiva de contribuição sustentável que trata da incorporação de recursos alternativos, resultantes de processos produtivos industriais, na construção de revestimentos de aterros sanitários, visando o melhor desempenho técnico destes revestimentos, o aproveitamento adequado de resíduos industriais e a diminuição da exploração de recursos naturais (Zhang *et al.*, 2022; Yu *et al.*, 2024).

O objetivo principal desse capítulo é a aplicação do método de delineamento experimental de misturas solo-escória de aciaria para fins de obtenção de uma mistura ideal tecnicamente viável para ser aplicada em barreiras impermeabilizantes (*liners*) de aterros sanitários. Para isso, optou-se pela utilização de um planejamento experimental de misturas em rede Simplex-Centróide como ferramenta de dosagem estatística, a fim de determinar, com um número reduzido de experimentos, a composição ideal (mistura ideal) que atenda aos valores limites previstos na literatura técnica para parâmetros de projeto destas barreiras (RCS, RT e K_{sat}) e que contemple a maior porcentagem possível dos resíduos siderúrgicos. Como objetivos secundários, serão realizados, sobre a mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal, ensaios de caracterização geotécnica, química, mineralógica, microestrutural, ambiental e de desempenho (resistência, rigidez e permeabilidade), visando subsidiar cientificamente

a demonstração da viabilidade técnica do produto de engenharia resultante do protocolo de dosagem estatística proposto.

3.2. Métodos

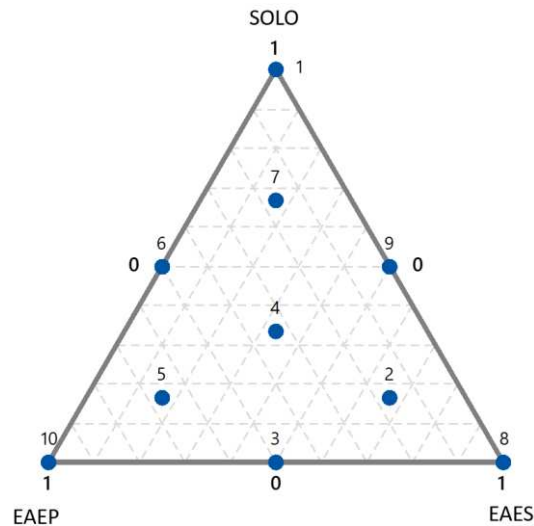
3.2.1 Protocolo de dosagem das combinações de solo residual e escórias de aciaria elétrica primária e secundária

3.2.1.1 Planejamento experimental em rede Simplex-Centróide

No intuito de melhor avaliar a influência da escória de aciaria elétrica nas propriedades geomecânicas e hidráulicas de misturas solo-escória de aciaria (primária e secundária) e determinar a mistura ideal que atenda aos requisitos normativos inerentes a camadas impermeabilizantes de aterros sanitários, maximizando o teor de resíduos na mistura, optou-se pela utilização de um planejamento experimental de misturas em rede Simplex-Centróide.

O planejamento experimental foi composto por 3 matérias-primas: a escória de aciaria elétrica primária (EAEP), a escória de aciaria elétrica secundária (EAES) e o solo residual, sendo seus quantitativos percentuais em massa as variáveis independentes. As proporções dos componentes são dependentes entre si, de modo que a soma dos teores, em cada mistura, deve ser igual à unidade (ou a 100%). A representação gráfica é baseada em triângulos equiláteros, sendo que cada vértice corresponde à porcentagem máxima de determinado componente da mistura representado pelo número "1". Logo, o número "0" mostrado no lado oposto ao vértice mostra que, quando a mistura é composta por 100% de um dos materiais, não há presença dos demais componentes (Figura 11).

Figura 11 - *Design* do planejamento experimental em rede Simplex-Centróide



Fonte: Resultado da pesquisa

As faixas de variação definidas para os componentes foram de 0 a 100% para os resíduos siderúrgicos (EAEP e EAES) e de 0 a 100% para o solo residual considerado. Essas faixas, previamente definidas, foram propostas com o intuito de vislumbrar todas as possibilidades de combinação, mas também devido ao fato de que as literaturas consultadas, que tratavam de misturas alternativas destinadas a camadas de revestimento de fundo de aterros sanitários, apresentavam variabilidade em relação à proporção ideal de resíduo siderúrgico na mistura.

Para a definição das misturas, foi utilizado o delineamento experimental em centróide simples de grau três (modelo cúbico especial). Tal modelo foi escolhido em virtude do número de componentes e para que o efeito da interação ternária pudesse ser analisado. Dessa forma, as superfícies de respostas obtidas ao final da análise estatística foram matematicamente expressas por equações polinomiais de grau até três. Para possibilitar o cálculo das superfícies de resposta nestas condições, foram necessários dez pontos (ou misturas) no triângulo definido, seis localizados nos vértices e pontos médios das arestas e quatro no seu interior. As proporções de todos os componentes das misturas foram definidas conforme apresentado na Tabela 11, que correspondem às porcentagens de cada um dos componentes da mistura em relação à massa seca total da mistura. Esse planejamento experimental se deu por meio do software estatístico Minitab® 2018.

Tabela 11 - Composições das misturas definidas no planejamento experimental

Mistura	Solo residual	EAEP	EAES
M1	1,000	0	0
M2	0,167	0,167	0,667
M3	0	0,500	0,500
M4	0,333	0,333	0,333
M5	0,167	0,667	0,167
M6	0,500	0,500	0
M7	0,667	0,167	0,167
M8	0	0	1,000
M9	0,500	0	0,500
M10	0	1,000	0

3.2.1.2 Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação para o solo residual foram realizados segundo as recomendações da NBR 7182 (ABNT, 2020a). Em relação às combinações do solo com os resíduos siderúrgicos, foi adotada a norma NBR 12023 (ABNT, 2012a), justificada pelo caráter cimentício das escórias de aciaria. Os corpos de prova foram moldados via compactação por processo dinâmico, utilizando-se o molde do ensaio de compactação Proctor, empregando-se a energia do ensaio Proctor Normal. Adotou-se essa energia uma vez que a mesma atende aos requisitos técnicos mínimos de um projeto de barreiras sanitárias, não sendo necessário utilizar energias maiores. Outro fator que influenciou nessa escolha é que o acréscimo da energia de compactação aumenta a resistência ao cisalhamento, mas pode interferir em sua expansibilidade ou contração, quando em contato com a água (Liu, 2004; Yang, 2023).

Foram determinadas as curvas de compactação das composições pré-determinadas de solo residual com as escórias de aciaria. Por meio dessas curvas de compactação, foram definidos os respectivos parâmetros ótimos de compactação (peso específico aparente seco máximo e umidade ótima).

3.2.1.3 Ensaios de determinação das variáveis de resposta das composições solo-escória de aciaria elétrica

As variáveis de resposta correspondem às propriedades alvo das misturas solo-escória de aciaria elétrica compactadas que serviram de referência para a obtenção estatística de modelos matemáticos (equações) que as correlacionam com as variáveis de entrada (percentagens dos componentes individuais das misturas). As propriedades mecânicas e hidráulica utilizadas para avaliação do planejamento experimental desta pesquisa estão diretamente relacionadas com os critérios de seleção de materiais para composição de barreiras impermeabilizantes para aterros sanitários.

O p-valor e o coeficiente de determinação R^2 dessas equações são valores estatísticos que indicam numericamente se a correlação pode ser considerada forte ou fraca. Conforme Ferreira e Patino (2015) e Almeida *et al.* (2019), valores de p-valor inferiores a 0,05 e coeficientes de determinação R^2 superiores a 0,5 indicam correlações fortes.

Segundo Mukaka (2012), o R^2 não indica se um modelo de regressão é adequado. É possível ter um valor baixo de R^2 para um bom modelo. Em algumas áreas, é esperado que seus valores de R^2 sejam baixos em virtude da heterogeneidade do material que está sendo estudado. Para este autor, valores de R^2 entre 0,9 a 1,0 indicam uma correlação muito forte, de 0,7 a 0,9 indicam uma correlação forte, e de 0,5 a 0,7 indicam uma correlação moderada.

Todos os ensaios foram realizados com as composições de solo residual e escórias de aciaria, em corpos de prova moldados nos parâmetros ótimos de compactação relativos à energia Proctor Normal. Nesta pesquisa, visando a determinação estatística da mistura ideal, foram adotadas e determinadas as seguintes variáveis de resposta: Resistência à Compressão Simples (RCS), Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e Permeabilidade saturada (K_{sat}).

Foi considerado o período de cura em câmara úmida de 7 dias, sendo adotado apenas um período de cura de maneira a reduzir o volume de ensaios e pelo fato desse tempo de cura representar o período em que pesquisadores associam a intensificação das reações pozolânicas em materiais cimentícios com ganhos

significativos de resistência mecânica (Jo *et al.*, 2015; Rocha, 2018). Para cada propriedade, foram confeccionados 3 corpos de prova (CPs), sendo determinada a média das 3 determinações, com coeficiente de variação máximo de 10%.

Os ensaios realizados para a obtenção da Resistência à Compressão Simples (RCS) para o solo residual foram conduzidos de acordo com as exigências da NBR 12770 (ABNT, 2022). Em relação às combinações com as escórias de aciaria elétrica, foi adotada a norma NBR 12025 (ABNT, 2012b), em função do caráter cimentício dos resíduos siderúrgicos. Os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) foram realizados de acordo com a metodologia descrita em ME 181 (DNER, 1994).

Para a realização dos ensaios de Permeabilidade saturada (K_{sat}), foi utilizado o equipamento exposto no estudo de Caneschi (2012) e foram consultadas as normas NBR 14545 (ABNT, 2021a) e NBR 13292 (ABNT, 2021b). Esse equipamento promoveu o fluxo de água nos corpos de prova compactados previamente saturados. O gradiente hidráulico aplicado foi definido conforme as recomendações da ASTM D 5084 (2016). De acordo com essa norma, o uso de gradientes hidráulicos elevados pode levar ao carreamento de partículas finas no interior do corpo de prova de solos argilosos e ocasionar o aprisionamento de partículas menores na sua porção final, o que pode bloquear o fluxo e reduzir a permeabilidade, ou levar ao carreamento total das partículas finas no caso de solos granulares, aumentando a permeabilidade. Por isso, durante o ensaio, adotou-se um gradiente hidráulico de 30 (pressão hidráulica de aproximadamente 40kPa), valor considerado representativo em relação aos coeficientes de permeabilidade característicos do material estudado. Segundo Caneschi (2012), barreiras selantes de aterros sanitários apresentam pressão hidráulica entre 50 e 100 kPa.

3.2.1.4 Análise estatística: determinação da composição ideal

De posse dos resultados obtidos nos ensaios de determinação das variáveis de resposta (RCS, RT e K_{sat}), foi realizada a análise estatística. Essa análise consistiu no ajuste dos dados experimentais de cada ensaio a modelos matemáticos polinomiais em função das percentagens de cada um dos componentes das misturas, de acordo com a significância (α) adotada. Definiu-se α igual a 5% em virtude da natureza dos dados obtidos, sujeitos a grande variabilidade. Dessa forma, o nível de confiança das

expressões calculadas foi igual a 95% (p -valor = 0,05). Foi determinado, ainda, o coeficiente de determinação das equações (R^2), que permitiu verificar a qualidade estatística do modelo matemático de ajuste.

Para o modelo matemático que proporcionasse o melhor ajuste estatístico para as propriedades analisadas nessa pesquisa, foi definida uma correspondente superfície de resposta. Trata-se de uma região geométrica dos pontos (misturas) que representam o modelo matemático resultante. Pela superposição das respectivas superfícies de resposta de cada propriedade de engenharia (RCS, RT, K_{sat}) e pela definição de valores limites dessas propriedades prescritos ou recomendados pelas especificações técnicas destinadas a projetos de barreiras impermeabilizantes para aterros sanitários, foi determinada a mistura ideal, a qual corresponde à proporção que melhor atende simultaneamente às diferentes exigências pertinentes a essas propriedades.

A determinação dessa composição ideal de solo-resíduos siderúrgicos foi realizada por meio da função estatística Desejabilidade, na qual foram apresentados os valores (de 0 a 1) relacionados aos critérios de aceitação estipulados para cada propriedade analisada nesse estudo. Valores mais próximos da unidade (1) evidenciam que os critérios definidos foram mais atendidos ou, ainda, superaram os critérios estipulados. Portanto, foi determinada uma composição que melhor se enquadrou nesses critérios da função Desejabilidade, de maneira a obter um maior aproveitamento possível do resíduo siderúrgico na mistura. Essas análises estatísticas foram realizadas no software Minitab® 2018.

No que se refere à otimização das propriedades analisadas através da função Desejabilidade, foram definidos limites para cada propriedade. O limite inferior adotado para a RCS foi 200 kPa, conforme recomendação da USEPA (2012). Para a K_{sat} , segundo o USEPA (2012), foi adotado o limite superior de 10^{-7} cm/s, aplicável aos materiais de revestimento de fundo de aterros sanitários. Já para a RT, foi adotado um intervalo de maneira a evitar uma excessiva rigidez do material, o que pode acarretar trincas e, conseqüentemente, patologias indesejáveis na camada de revestimento capazes de comprometer sua integridade hidráulica. Esse intervalo, segundo as literaturas técnicas consultadas, deve corresponder a $20 \text{ kPa} \leq RT \leq 90 \text{ kPa}$ (Costa, 2015; Cheng *et al.*, 2020).

3.2.2 Ensaio de caracterização da mistura ideal

De posse da proporção considerada ideal entre os componentes da mistura de solo residual e escórias de aciaria elétrica (primária e secundária), foram realizados ensaios de caracterização e de desempenho da mistura ideal solta e compactada de maneira a evidenciar a influência dos resíduos siderúrgicos nessa mistura. Todos os ensaios em que foi utilizada a amostra compactada foram moldados nos parâmetros ótimos de compactação relativos à energia do ensaio Proctor Normal, considerando-se os tempos de cura em câmara úmida de 7 e 28 dias e sem cura, com coeficiente de variação máximo de 10% nos resultados dos ensaios considerados na pesquisa. O intuito desses ensaios consistiu em evidenciar o comportamento técnico da mistura ideal antes que as reações químicas ocorressem (sem cura) e verificar se, após sucessivos períodos de cura (7 e 28 dias), as reações químicas se intensificariam, garantindo maior ganho nas propriedades mecânicas e hidráulica investigadas.

3.2.2.1 Caracterizações química, mineralógica e microestrutural

A análise química da amostra da mistura ideal foi realizada pela técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), visando à identificação dos óxidos que compõem a mistura. Os testes foram realizados utilizando o equipamento PANalytical Epsilon3x. Saliencia-se que os teores dos óxidos nas composições químicas dos materiais são apresentados considerando a normalização em 100% dos resultados. A constituição mineralógica da amostra da mistura ideal foi obtida por Difração de Raios-X (DRX). Os difratogramas foram obtidos utilizando o difratômetro Bruker D8-Discover (radiação $\text{CuK}\alpha$, 40kV, 30mA, $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$, com medidas θ - 2θ na faixa de 5° a 80° , $0.02^\circ/\text{passo}$, $1\text{s}/\text{passo}$). Para a caracterização morfológica da amostra da mistura ideal, foi utilizada a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

3.2.2.2 Caracterização geotécnica

Após a definição da mistura ideal, foi realizada a caracterização geotécnica que contemplou os ensaios de Limites de Atterberg, compactação, massa específica dos sólidos, classificação TRB, classificação USCS e granulometria. Ressalta-se que as normas utilizadas foram as mesmas empregadas para os materiais puros (Capítulo 2).

3.2.2.3 Ensaio Triaxiais CIU

Os ensaios de compressão triaxial realizados sobre a mistura ideal compactada seguiram as prescrições impostas pela ASTM D 4767 (ASTM, 2020), que versa sobre o ensaio de compressão triaxial do tipo CIU (consolidado isotropicamente e não-drenado). Após a confecção dos corpos de prova cilíndricos, estes foram retirados dos respectivos moldes e levados à ruptura no equipamento de compressão triaxial, determinando-se as envoltórias de resistência ao cisalhamento, em termos de tensões totais e tensões efetivas, a partir dos resultados obtidos dos corpos de prova ensaiados. Foram consideradas as tensões confinantes de 200kPa, 400kPa e 800kPa. Para cada tensão confinante, foram confeccionados 3 CPs e consideradas as médias para a apresentação dos resultados obtidos. Para cada envoltória de resistência ao cisalhamento, foram definidos os respectivos valores de ângulo de atrito e de coesão.

3.2.2.4 Ensaio de adensamento

Os ensaios de adensamento realizados sobre a mistura ideal compactada seguiram as orientações constantes na NBR 16853 (ABNT, 2020b). Dos resultados desse ensaio, foram determinados os coeficientes de adensamento (C_v), pelo método de Casagrande, para cada estágio de carregamento do ensaio, além dos coeficientes de compressão (C_c) e de expansão (C_s) e da tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}), pelo método de Casagrande. Para cada cenário analisado, foram confeccionados 3 CPs. Foram representadas as três curvas de adensamento (índice de vazios *versus* logaritmo da tensão efetiva vertical) individuais de cada cenário, sendo os parâmetros derivados do ensaio (C_v , C_c , C_s , σ'_{vm}) determinados segundo a média de três determinações.

3.2.2.5 Caracterização ambiental

A caracterização ambiental da mistura ideal, em termos de solubilização e lixiviação, foi realizada em amostras preparadas a partir da composição ideal, considerando o material no estado solto e com cura de 7 dias. O ensaio de

solubilização foi utilizado para classificar o material como inerte ou não-inerte, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004a). A obtenção do extrato solubilizado da mistura foi realizada de acordo com o procedimento exposto na norma NBR 10006 (ABNT, 2004b). O filtrado obtido, definido como o extrato solubilizado, foi levado ao Laboratório de Espectrofotometria de Absorção Atômica (Departamento de Solos – UFV) para a análise das concentrações de chumbo, cromo, ferro, alumínio, manganês, zinco e cobre. A escolha destes elementos foi baseada na composição química das matérias-primas utilizadas na mistura, obtida por meio da técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX). A análise foi feita utilizando o método ICP, no equipamento ICP – Optima 8300 DV Perkin Elmer (USEPA, 2012).

A lixiviação de metais pesados e outros elementos da mistura ideal foi determinada de acordo com o procedimento estabelecido pela norma NBR 10005 (ABNT, 2004c) para a lixiviação de não-voláteis em amostras com teor de sólidos igual a 100%. Este ensaio permitiu classificar os materiais avaliados como não tóxicos ou tóxicos (com periculosidade). Alíquotas foram retiradas e analisadas de acordo com o método ICP, no equipamento ICP – Optima 8300 DV Perkin Elmer, seguindo os procedimentos estabelecidos no USEPA – SW 846 (USEPA, 2012). Os elementos considerados na análise foram chumbo e cromo, de acordo com a composição química das matérias-primas. Outros metais, como ferro, alumínio, zinco e cobre, também foram quantificados, mesmo que não haja limites máximos de concentração constantes na NBR 10004 (ABNT, 2004a) para a avaliação quanto à lixiviação.

3.2.2.6 Avaliação da predição das propriedades de interesse

Foi proposta, neste estudo, a aplicação de técnicas estatísticas para prever propriedades de engenharia prescritas ou recomendadas pelas especificações técnicas destinadas a projetos de barreiras impermeabilizantes para aterros sanitários. Para a mistura ideal, a qualidade dos modelos matemáticos de predição foi avaliada mediante comparação entre os respectivos valores de RCS, RT e K_{sat} obtidos experimentalmente e os respectivos valores obtidos mediante equação representativa do modelo matemático de cada uma destas propriedades.

3.3. Resultados e discussões

3.3.1 Ensaio de compactação

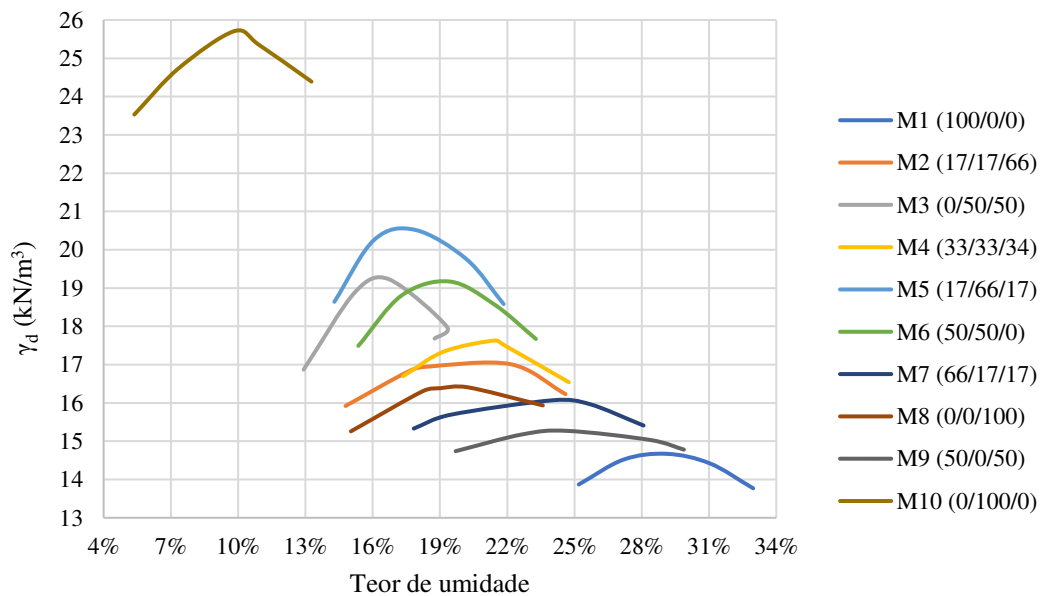
A Tabela 12 apresenta os parâmetros de ótimo [peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) e teor de umidade ótimo (w_{ot})], obtidos através das curvas de compactação das misturas analisadas e compactadas na energia do Proctor Normal. A Figura 12 mostra as curvas de compactação de cada mistura ensaiada.

Tabela 12 - Parâmetros de ótimo das misturas analisadas

Mistura	w_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)
M1 (100/0/0)	28,95	14,68
M2 (17/17/66)	20,72	16,99
M3 (0/50/50)	16,05	19,17
M4 (33/33/34)	20,92	17,60
M5 (17/66/17)	17,95	20,56
M6 (50/50/0)	19,36	19,14
M7 (66/17/17)	23,16	16,10
M8 (0/0/100)	20,84	16,47
M9 (50/0/50)	24,89	15,28
M10 (0/100/0)	9,90	25,54

M: Mistura [solo (%)/EAEP(%)/EAES(%)]

Figura 12 - Curvas de compactação das misturas analisadas



A partir dos resultados dos ensaios de compactação apresentados na Tabela 12, observou-se que a adição de EAEP e EAES às amostras de solo proporcionou expressivas reduções no teor de umidade ótimo (w_{ot}) e incrementos significativos nos valores de peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$). O solo residual, por se tratar de um material argiloso, necessita de maior quantidade de água de forma a propiciar um melhor rearranjo entre as partículas, que se acomodam durante a compactação. Diante disso, a substituição de parte desse material argiloso por um material que possui diâmetros maiores (silte-arenoso) confere às misturas uma estrutura mais granular, ocasionando a redução de w_{ot} e o aumento de $\gamma_{dm\acute{a}x}$. Isso fica mais evidente com o acréscimo de EAEP à mistura, implicando em menores teores de umidade de compactação e maiores valores de peso específico aparente seco.

A maior redução na w_{ot} ocorreu na mistura M10, em que 100% do material é constituído por EAEP. Observou-se que, com o aumento do teor de escória de aciaria, sobretudo com o teor de EAEP, o teor de umidade ótima diminuiu, tendência também observada por outros autores (Francisca; Glatstein, 2019; Gunarti; Raharja, 2020; Sebbar *et al.*, 2020). De acordo com Aldeeky e Al Hattamleh (2017), essa redução é devida a uma hidratação prévia dos óxidos de cálcio presentes na escória, gerando o composto hidróxido de cálcio, o que implica em menor demanda de água na mistura para alcançar seu peso específico aparente seco máximo.

Ressalta-se que o aumento nos teores de resíduos nas misturas gerou acréscimos nos valores de peso específico aparente seco máximo, sendo mais significativo com a adição de EAEP. Esse aumento se deve ao fato de que a massa específica real da EAEP é maior do que a do solo e a da EAES, conforme evidenciado na Tabela 6 (Capítulo 2).

Resultados de aumento do peso específico aparente seco máximo com adição de escória de aciaria também foram encontrados na literatura técnica, os quais foram relatados como sendo responsáveis por melhorias de propriedades mecânicas devidas à maior massa específica real da EAEP e da EAES que substituem parte das partículas de solo (Aldeeky; Al Hattamleh, 2017; Devarangadi; M, 2019).

3.3.2 Variáveis de resposta das composições solo-escória de aciaria elétrica

Os resultados das propriedades de engenharia (RCS, RT, K_{sat}), aos 7 dias de cura, foram inseridos no software Minitab® 2018 para a determinação da superfície de resposta, a qual representa graficamente a variação dessas propriedades em função da percentagem em massa seca de cada componente na composição das misturas, sendo as variáveis independentes as percentagens em massa de solo (S), EAEP (E1) e EAES (E2).

3.3.2.1 Resistência à Compressão Simples

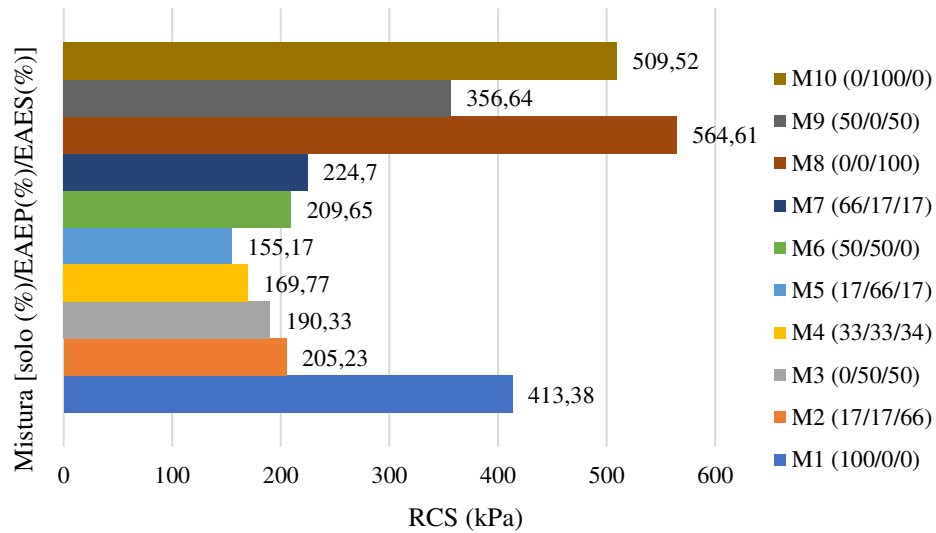
Foram confeccionados corpos de prova para o ensaio mecânico de RCS, considerando os parâmetros de ótimo dos ensaios de compactação (γ_{dmax} e w_{ot}) para todas as 10 misturas consideradas nesse estudo. Os resultados de RCS aos 7 dias de cura, apresentados na Tabela 13, estão também mostrados graficamente na Figura 13. Os valores de RCS, obtidos para cada uma das misturas analisadas, foram inseridos no software Minitab® 2018 para a determinação da superfície de resposta, apresentada na Figura 14, a qual representa graficamente a variação da RCS das misturas experimentais analisadas em função da percentagem em massa de cada componente na composição das misturas. A Tabela 14 mostra a equação de regressão (modelo matemático) obtida a partir dessa superfície de resposta, sendo as variáveis independentes as percentagens em massa de solo (S), EAEP (E1) e EAES (E2).

Tabela 13 - Propriedades alvo das misturas analisadas: RCS aos 7 dias de cura (valores em kPa)

Mistura	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	RCS _{médio}	Coef. de variação
M1 (100/0/0)	409,45	419,13	411,57	413,38	1,23%
M2 (17/17/66)	214,16	205,44	196,10	205,23	4,40%
M3 (0/50/50)	181,19	199,26	190,55	190,33	4,75%
M4 (33/33/34)	160,96	176,82	171,53	169,77	4,76%
M5 (17/66/17)	163,16	150,29	152,07	155,17	4,49%
M6 (50/50/0)	208,89	223,68	196,38	209,65	6,52%
M7 (66/17/17)	221,05	232,54	220,52	224,70	3,02%
M8 (0/0/100)	582,57	554,39	556,87	564,61	2,76%
M9 (50/0/50)	339,85	369,45	360,63	356,64	4,26%
M10 (0/100/0)	522,47	502,49	503,60	509,52	2,20%

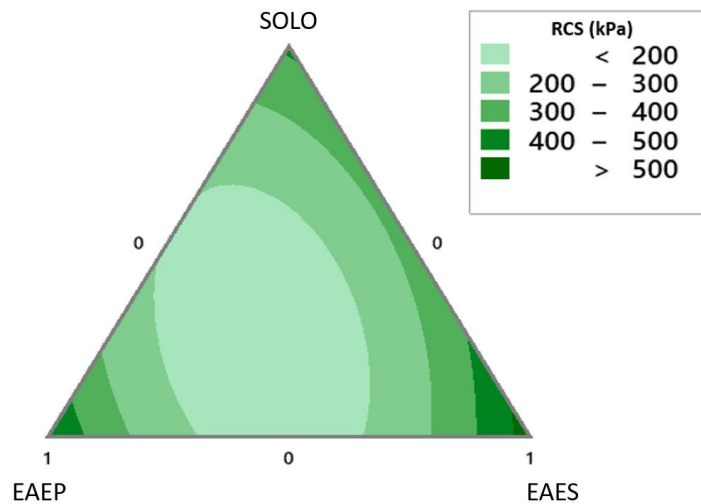
M: Mistura [solo (%)/EAEP(%)/EAES(%)]

Figura 13 - Valores de RCS aos 7 dias de cura obtidos para as misturas analisadas



Fonte: Resultado da pesquisa

Figura 14 - Superfície de resposta para a RCS das misturas experimentais aos 7 dias de cura



Fonte: Resultado da pesquisa

Tabela 14 - Equação de regressão: RCS aos 7 dias de cura.

Propriedade mecânica	Equação de regressão	R ²
RCS (kPa)	$420,3.S + 503,8.E1 + 554,2.E2 - 1070.S.E1 - 602.S.E2 - 1484.E1.E2$	0,9621

A análise do diagrama (Figura 14) mostra que há diferentes dosagens possíveis para se obter produtos com RCS satisfatória, conforme as exigências relacionadas à construção de revestimento de fundo para aterros sanitários ($RCS \geq 200$ kPa). Nota-se também uma maior tendência de aumento nos valores de RCS para as misturas

localizadas mais próximas da porção inferior direita do diagrama, na qual o teor de EAES na mistura é máximo. Comportamento parecido foi observado no estudo de Devarangadi e M (2019).

Essas hipóteses podem ser corroboradas a partir da avaliação estatística dos coeficientes individuais do modelo matemático apresentado na Tabela 14, que diz respeito à análise da média em módulo desses coeficientes individuais. Esse teste visa avaliar o valor potencial individual das variáveis no modelo de regressão (Montgomery; Runger, 2012). Diante disso, tem-se que coeficientes maiores que a média contribui positivamente com o aumento da RCS, caso contrário esse material promove decréscimos nessa propriedade. Dentro dessa perspectiva, percebe-se que o solo (S) contribui negativamente no ganho de RCS (média = 492,77), diferentemente da E1(EAEP) e da E2 (EAES).

Cabe ressaltar que os coeficientes do modelo que expressaram a interação entre os três materiais não apresentaram relevância estatística nessa análise, considerando o nível de significância de 95%. O modelo matemático obtido para RCS apresentou R^2 igual a 0,9621, demonstrando a boa correlação entre o modelo de ajuste e os dados experimentais.

3.3.2.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

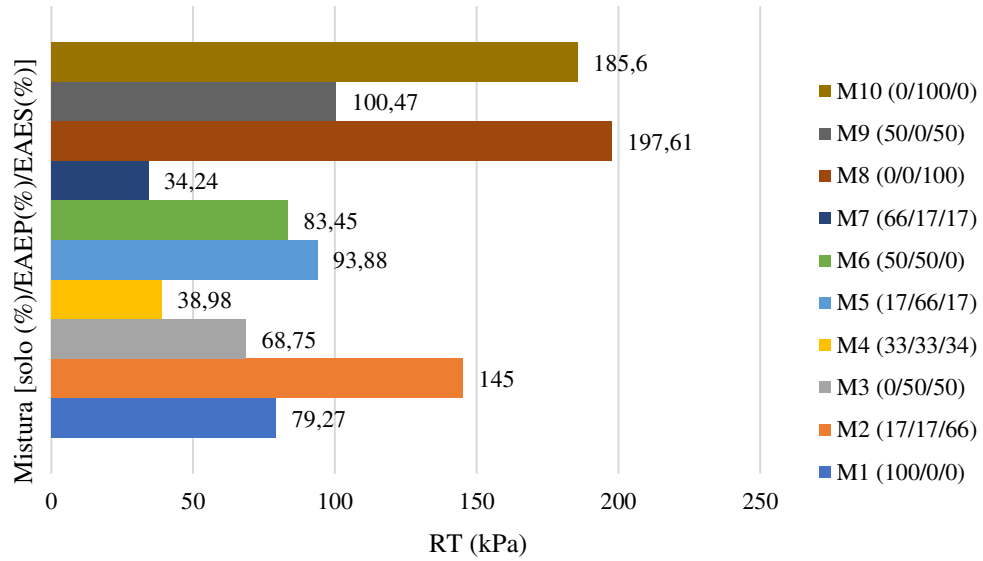
Foram confeccionados corpos de prova para o ensaio mecânico de RT, considerando os parâmetros de ótimo dos ensaios de compactação (γ_{dmax} e w_{ot}) para todas as 10 misturas consideradas nesse estudo. Os resultados de RT aos 7 dias de cura, apresentados na Tabela 15, foram mostrados graficamente na Figura 15.

Tabela 15 - Propriedades alvo das misturas analisadas: RT aos 7 dias de cura (valores em kPa)

Mistura	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	RT _{médio}	Coef. de variação
M1 (100/0/0)	75,54	82,29	79,98	79,27	4,33%
M2 (17/17/66)	142,00	153,86	139,15	145,00	5,38%
M3 (0/50/50)	73,53	65,32	67,41	68,75	6,21%
M4 (33/33/34)	40,89	37,97	38,08	38,98	4,25%
M5 (17/66/17)	97,19	90,46	93,99	93,88	3,59%
M6 (50/50/0)	85,90	81,29	83,16	83,45	2,78%
M7 (66/17/17)	32,32	35,27	35,12	34,24	4,85%
M8 (0/0/100)	205,51	195,20	192,12	197,61	3,55%
M9 (50/0/50)	95,22	105,52	100,66	100,47	5,13%
M10 (0/100/0)	196,25	182,18	178,36	185,60	5,08%

M: Mistura [solo (%)/EAEP(%)/EAES(%)]

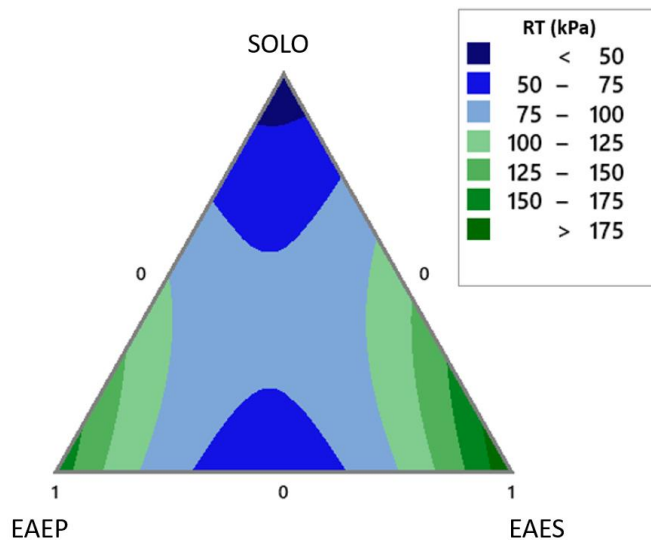
Figura 15 - Valores de RT aos 7 dias de cura obtidos para as misturas analisadas



Fonte: Resultado da pesquisa

Os valores de RT foram inseridos no software Minitab® 2018 para a determinação da superfície de resposta, apresentada na Figura 16, a qual representa graficamente a variação da RT das misturas experimentais analisadas em função da porcentagem em massa de cada componente na composição das misturas. A Tabela 16 mostra a equação de regressão (modelo matemático) obtida a partir dessa superfície de resposta, sendo as variáveis independentes as porcentagens em massa de solo (S), EAEP (E1) e EAES (E2).

Figura 16 - Superfície de resposta para a RT (em kPa) das misturas experimentais aos 7 dias de cura



Fonte: Resultado da pesquisa

Tabela 16 - Equação de regressão: RT aos 7 dias de cura.

Propriedade mecânica	Equação de regressão	R ²
RT (kPa)	32,8.S + 166,5.E1 + 197,2.E2 – 482.E1.E2	0,7554

A análise do diagrama (Figura 16) permite inferir que há diferentes dosagens possíveis para se obter produtos com RT satisfatória, conforme as exigências relacionadas à construção de revestimento de fundo para aterros sanitários ($20 \text{ kPa} \leq \text{RT} \leq 90 \text{ kPa}$). Nota-se também uma diminuição nos valores de RT para as misturas que apresentam maior teor de solo na sua composição, sendo os menores valores observados quando a porcentagem de solo é máxima.

Essas hipóteses podem ser corroboradas a partir da avaliação estatística dos coeficientes individuais do modelo matemático apresentado na Tabela 16, que diz respeito à análise da média em módulo desses coeficientes individuais. Esse teste visa avaliar o valor potencial individual das variáveis no modelo de regressão (Montgomery; Runger, 2012). Diante disso, tem-se que coeficientes maiores que a média contribui positivamente com o aumento da RT, caso contrário esse material promove decréscimos nessa propriedade. Dentro dessa perspectiva, percebe-se que o solo (S) contribui negativamente no ganho de RT (média = 132,17), diferentemente da E1 (EAEP) e da E2 (EAES).

Cabe ressaltar que os coeficientes do modelo que expressaram a interação entre os três materiais e entre o solo e ambas as escórias não apresentaram relevância estatística nessa análise, considerando o nível de significância de 95%. O modelo obtido para RT apresentou R² igual a 0,7554, demonstrando a boa correlação entre o modelo de ajuste e os dados experimentais.

3.3.2.3 Permeabilidade saturada

Foram confeccionados corpos de prova para o ensaio de K_{sat} , considerando os parâmetros de ótimo dos ensaios de compactação (γ_{dmax} e w_{ot}) para todas as 10 misturas consideradas nesse estudo. Os resultados de K_{sat} aos 7 dias de cura, apresentados na Tabela 17, foram mostrados graficamente na Figura 17. Os valores de K_{sat} foram inseridos no software Minitab® 2018 para a determinação da superfície

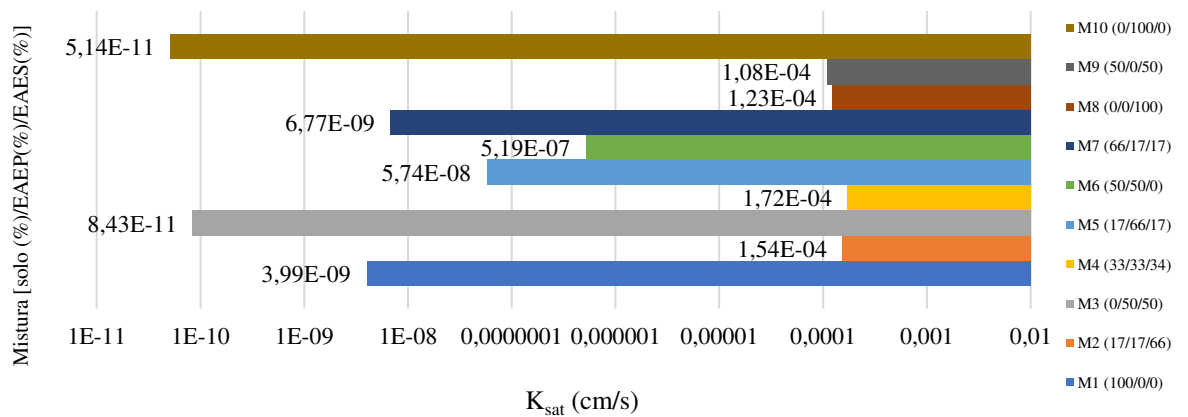
de resposta, apresentada na Figura 18, a qual representa graficamente a variação de K_{sat} das misturas experimentais analisadas em função da percentagem em massa de cada componente na composição das misturas. A Tabela 18 mostra a equação de regressão (modelo matemático) obtida a partir dessa superfície de resposta, sendo as variáveis independentes as percentagens em massa de solo (S), EAEP (E1) e EAES (E2).

Tabela 17 - Propriedades alvo das misturas analisadas: K_{sat} aos 7 dias de cura (valores em cm/s)

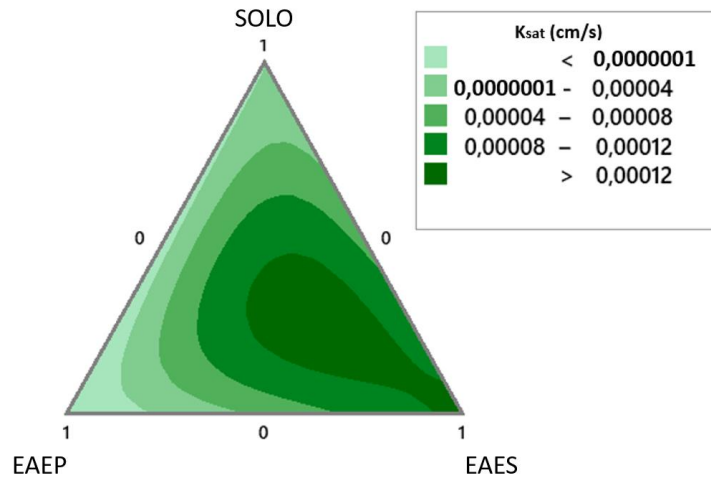
Mistura	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	K_{sat} médio	Coef. de Variação
M1 (100/0/0)	$3,82 \times 10^{-9}$	$4,09 \times 10^{-9}$	$4,05 \times 10^{-9}$	$3,99 \times 10^{-9}$	3,66%
M2 (17/17/66)	$1,51 \times 10^{-4}$	$1,47 \times 10^{-4}$	$1,65 \times 10^{-4}$	$1,54 \times 10^{-4}$	6,12%
M3 (0/50/50)	$9,02 \times 10^{-11}$	$8,12 \times 10^{-11}$	$8,15 \times 10^{-11}$	$8,43 \times 10^{-11}$	6,06%
M4 (33/33/34)	$1,80 \times 10^{-4}$	$1,74 \times 10^{-4}$	$1,62 \times 10^{-4}$	$1,72 \times 10^{-4}$	5,33%
M5 (17/66/17)	$5,88 \times 10^{-8}$	$6,08 \times 10^{-8}$	$5,26 \times 10^{-8}$	$5,74 \times 10^{-8}$	7,45%
M6 (50/50/0)	$5,40 \times 10^{-7}$	$5,14 \times 10^{-7}$	$5,02 \times 10^{-7}$	$5,19 \times 10^{-7}$	3,75%
M7 (66/17/17)	$6,89 \times 10^{-9}$	$6,53 \times 10^{-9}$	$6,89 \times 10^{-9}$	$6,77 \times 10^{-9}$	3,07%
M8 (0/0/100)	$1,30 \times 10^{-4}$	$1,22 \times 10^{-4}$	$1,16 \times 10^{-4}$	$1,23 \times 10^{-4}$	5,73%
M9 (50/0/50)	$1,11 \times 10^{-4}$	$1,12 \times 10^{-4}$	$1,01 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-4}$	5,63%
M10 (0/100/0)	$4,98 \times 10^{-11}$	$5,17 \times 10^{-11}$	$5,26 \times 10^{-11}$	$5,14 \times 10^{-11}$	2,78%

M: Mistura [solo (%)/EAEP(%)/EAES(%)]

Figura 17 - Valores de K_{sat} aos 7 dias de cura obtidos para as misturas analisadas



Fonte: Resultado da pesquisa

Figura 18 - Superfície de resposta para a K_{sat} das misturas experimentais aos 7 dias de cura

Fonte: Resultado da pesquisa

Tabela 18 - Equação de regressão: K_{sat} aos 7 dias de cura.

Propriedade hidráulica	Equação de regressão	R^2
K_{sat} (cm/s)	$-0,000001.S - 0,000037.E1 + 0,000132.E2 + 0,00263.S.E1.E2$	0,7041

A análise do diagrama (Figura 18) permite inferir que a K_{sat} dessas misturas aumenta conforme tem-se o aumento do teor de EAES em sua composição, principalmente para as misturas que se aproximam dos teores máximos desse resíduo. A combinação dos 3 materiais também favorece o aumento dessa propriedade. Nota-se também uma diminuição nos valores de K_{sat} para as misturas que apresentam maior teor de solo e EAEP na sua composição, sendo os menores valores observados quando a porcentagem de solo e EAES é máxima. Uma vez que o objetivo desse estudo, em se tratando de barreiras impermeabilizantes para aterros sanitários, é que a mistura apresente o menor valor possível de K_{sat} , as combinações mais satisfatórias são as que apresentarem tendências de diminuição dessa propriedade. A condutividade hidráulica aceitável é o valor que garante que não haja contaminação do solo adjacente, retardando a passagem de contaminante.

Essas hipóteses podem ser corroboradas a partir da avaliação estatística dos coeficientes individuais do modelo matemático apresentado na Tabela 14, que diz respeito à análise da média em módulo desses coeficientes individuais. Esse teste visa avaliar o valor potencial individual das variáveis no modelo de regressão (Montgomery; Runger, 2012). Diante disso, tem-se que coeficientes menores que a

média contribui positivamente com a diminuição da permeabilidade saturada, caso contrário esse material promove acréscimos nessa propriedade. Dentro dessa perspectiva, percebe-se que o solo (S) e a EAEP (E1) contribuem positivamente no decréscimo da permeabilidade (média = 0,000057), diferentemente da EAES (E2). Isso está diretamente associado à composição granulométrica dos materiais que compõem as misturas, sendo determinante na composição ideal, garantindo que todas as propriedades de engenharia sejam atendidas.

Cabe ressaltar que os coeficientes do modelo que expressaram a interação entre o solo e ambas as escórias não apresentaram relevância estatística nessa análise, considerando o nível de significância de 95%. O modelo obtido para essa propriedade apresentou R^2 igual a 0,7041, demonstrando a boa correlação entre o modelo de ajuste e os dados experimentais.

3.3.3 Otimização das propriedades mecânicas e hidráulica analisadas: mistura ideal

Com o objetivo de determinar qual foi a melhor dosagem para as misturas analisadas, utilizou-se o recurso da função Desejabilidade através do software Minitab® 2018. A função Desejabilidade apontou como dosagem ideal a mistura contendo 64% da amostra de solo, 34,1% de EAEP e 1,9% de EAES. A Tabela 19 apresenta os valores dos índices de Desejabilidade individual (IDi) e composta (IDc) obtidos para a mistura ideal. Essa mistura apresentou valores de Desejabilidade individuais de 1,00 para a RCS, RT e K_{sat} , o que significa que a mistura atendeu a todos os limites adotados de acordo com as prescrições extraídas das normas e literaturas técnicas consideradas nessa pesquisa.

Tabela 19 - Valores de índice de Desejabilidade individual (IDi) e composta (IDc) referentes à mistura ideal para as propriedades analisadas.

Propriedade	Valor limite	IDi
RCS	$RCS \geq 200 \text{ kPa}$	1,00
RT	$20 \text{ kPa} \leq RT \leq 90 \text{ kPa}$	1,00
K_{sat}	$K_{sat} \leq 10^{-7} \text{ cm/s}$	1,00
	IDc	1,00

Ressalta-se que as equações de regressão apresentadas para cada propriedade envolvida na otimização mostraram que a EAEP e a EAES contribuíram positivamente com o aumento dos valores das propriedades mecânicas (RCS e RT) analisadas devido aos maiores coeficientes que acompanham as variáveis E1 e E2. O mesmo não ocorreu para a propriedade hidráulica (K_{sat}) estudada, já que a EAEP influenciou positivamente na diminuição do K_{sat} e a EAES, por sua vez, apresentou influência negativa na permeabilidade. A interferência desses resíduos siderúrgicos nas propriedades mecânicas e hidráulica condiz com a mistura ideal obtida por meio do software. Apesar de estar em menor proporção, a EAES, quando combinada com a EAEP, contribui positivamente no incremento das propriedades mecânicas e hidráulica, intensificando as reações cimentícias.

3.3.4 Caracterização da mistura ideal

3.3.4.1. Caracterizações química, mineralógica e microestrutural

A análise química da mistura ideal foi realizada pela técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), visando à identificação dos óxidos que compõem a amostra, sendo os resultados apresentados na Tabela 20. Nessa tabela, encontra-se também o valor de perda ao fogo (PF).

Tabela 20 - Composição química obtida por FRX e perda ao fogo (PF) da mistura ideal

Material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)	Outros (%)	PF (%)
Mistura ideal	24,38	21,07	18,10	32,17	0,92	0,12	0,48	1,36	0,06	0,26	1,08	5,97

De acordo com os resultados, predominam os compostos SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e CaO, que representam, aproximadamente, 96% em peso da massa da mistura. Também foram encontrados em quantidades menos expressivas, na faixa de 5% em peso da amostra total, os compostos MgO, Na₂O e TiO₂. A identificação desses óxidos e sua quantificação na matriz da mistura ideal podem ser relevantes para a quantidade e qualidade de eventuais reações pozolânicas, visto que as amostras das escórias de aciaria utilizadas na pesquisa foram fontes de óxidos silicosos e aluminosos necessários para que essas reações ocorram. A presença desses óxidos permite que ocorram reações pozolânicas quando em contato com água, ocasionando a

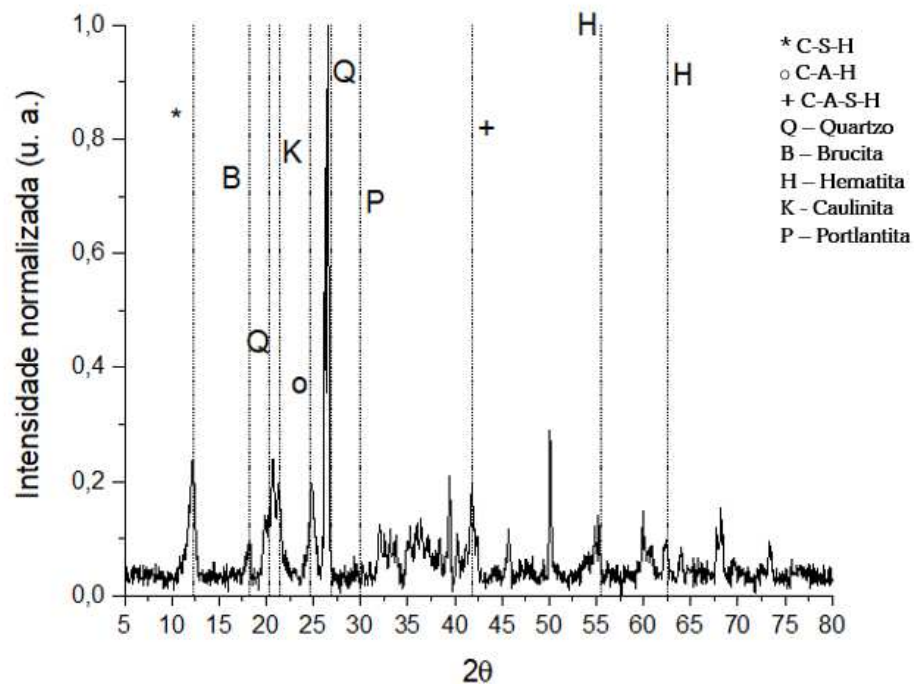
dissociação do CaO e a combinação dos íons Ca^{+2} com os materiais silicosos e aluminosos. Diante disso, ocorre a formação de compostos pozolânicos que são responsáveis pelo incremento de resistência em curto e em longo prazos (Tastan *et al.*, 2011).

A inserção das escórias de aciaria ao solo argiloso na composição da mistura ideal proporcionou a diminuição do volume total de poros na mistura. Isso pode ser atribuído às etapas do processo de hidratação, uma vez que os íons cálcio presentes no resíduo siderúrgico se dissociam em água para formar o hidróxido de cálcio (CH). O CH liberado reage com silicatos e aluminatos presentes na mistura ideal, formando compostos cimentícios. Portanto, esse composto diminui o espaço poroso e resulta em menor condutividade hidráulica ao permear a água (Sharma; Sivapullaiah, 2016; Devarangadi; M, 2020).

Importante observar que cal, óxido de ferro e sílica são elementos usuais da composição química do cimento Portland. A presença de grandes quantidades de CaO, SiO_2 e, em menores proporções, MgO, e sua elevada relação CaO/ SiO_2 (3,5) são indicativos da reatividade potencial do material como um ligante hidráulico (Poh *et al.*, 2006). Segundo Montenegro *et al.* (2013), a reatividade do resíduo siderúrgico, quando finamente moído e/ou ativado com um material alcalino (tipicamente cal hidratada), pode ser suficiente para aplicações, tais como o aprimoramento de solos naturais para construção de obras geotécnicas (Kambole *et al.*, 2017).

A Figura 19 apresenta o resultado da composição mineralógica da mistura ideal obtida por DRX. Para a caracterização morfológica (Figura 20), foi utilizada a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) aplicada em um fragmento da mistura ideal compactada e selada em câmara úmida por 7 dias.

Figura 19 - Difratoograma da mistura ideal obtida por DRX

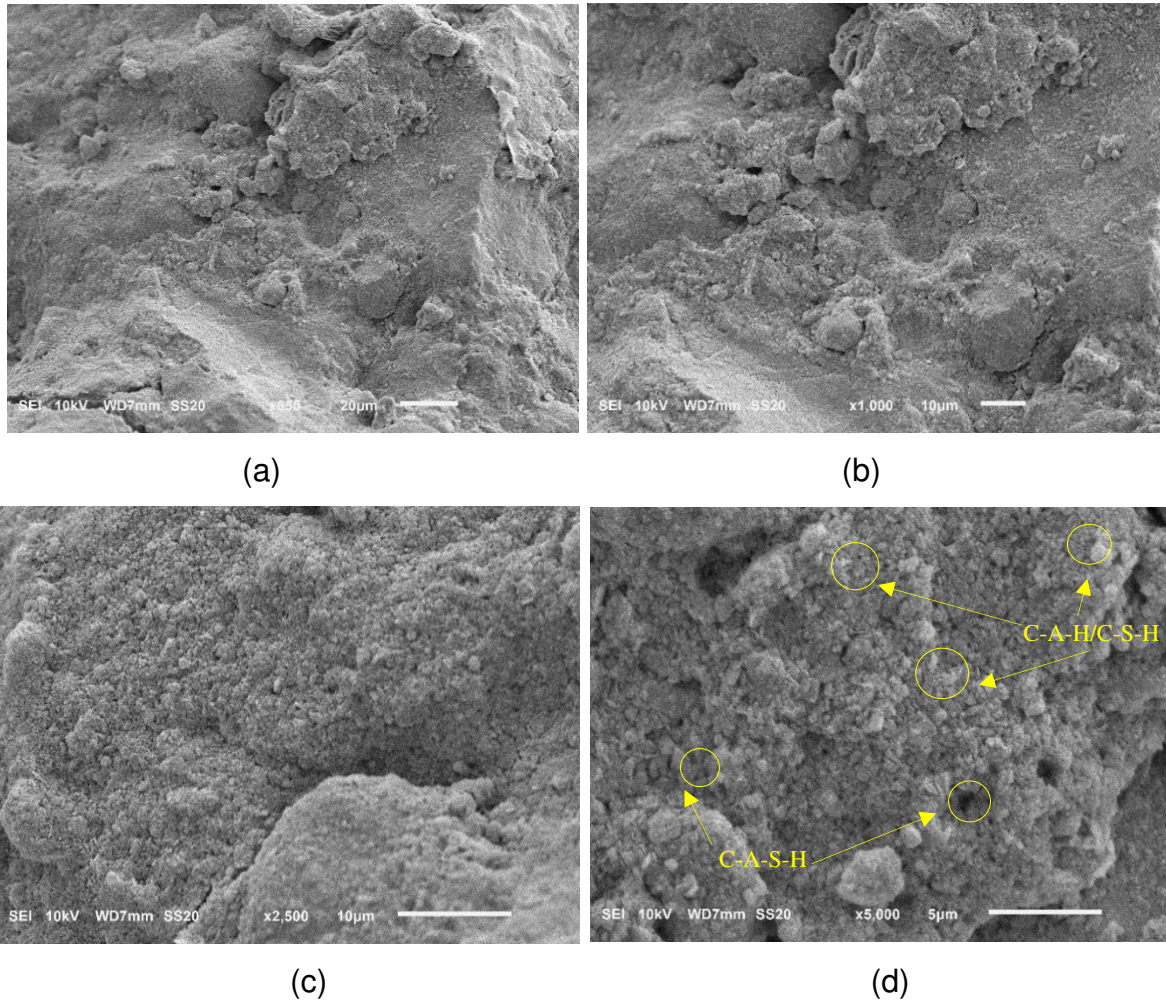


Fonte: Resultado da pesquisa

Os ensaios de DRX (Figura 19) e MEV (Figura 20) apontaram para a formação de estruturas de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), etringita (C-S-A-H) e aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H). Após 7 dias de reação, um material gelatinoso se desenvolveu na superfície das partículas de solo, preenchendo os poros e fortalecendo a aglomeração entre as partículas (Figura 20d). De acordo com a composição da mistura ideal, evidenciada no resultado da análise de DRX, os aglomerados foram compostos, principalmente, por géis densos de C-S-H/C-A-H hidratado e C-A-S-H, os quais promovem o preenchimento de espaços vazios, resultando em pastas mais densas com maiores resistência e rigidez mecânicas (Yi *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2022).

As micrografias derivadas do MEV (Figura 20) indicam que as escórias de aciaria promoveram uma alteração no arranjo estrutural da mistura ideal: os efeitos físicos e químicos dos finos provocaram a ligação entre as partículas e o preenchimento dos vazios entre os grãos das misturas, proporcionando um maior intertravamento e, conseqüentemente, um aumento na resistência e rigidez das misturas compactadas (Mamatha; Dinesh, 2017; Aldeeky; Al Hattamleh, 2017; Sebbar *et al.*, 2020; Devarangadi; M, 2021).

Figura 20 - Micrografias da mistura ideal obtidas por MEV: (a) x650; (b) x1000; (c) x2500 e (d) x5000



Fonte: Resultado da pesquisa

3.3.4.2 Caracterização geotécnica

A Tabela 21 mostra a caracterização geotécnica da mistura ideal.

Tabela 21 - Caracterização geotécnica da mistura ideal

Parâmetro	Mistura ideal
% argila ($\phi < 0,002$ mm)	49
% silte ($0,002$ mm $< \phi < 0,06$ mm)	25
% areia ($0,06$ mm $< \phi < 2$ mm)	24
% pedregulho (2 mm $< \phi < 60$ mm)	2
LL (%)	37
LP (%)	29
IP (%)	9
ρ_s (g/cm ³)	3,369
$\rho_{d,max}$ (g/cm ³)*	1,769
w_{ot} (%)*	21,08
TRB	A-4 (0)
SUCS	ML

*Correspondentes à curva de compactação obtida na energia do Proctor Normal

A partir da Tabela 21, foi possível verificar que houve uma diminuição do LL e do índice de plasticidade (IP), associada à alteração da granulometria do material, podendo observar também que os parâmetros de ótimo do ensaio de compactação bem como a classificação da mistura sofreram alteração com o acréscimo de resíduos siderúrgicos ao solo argiloso (mistura ideal), em relação ao solo puro.

Segundo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1993), os solos potencialmente utilizados como *liners* devem apresentar classificação unificada do tipo CL, CH, SC ou OH, porcentagem de finos maior ou igual a 30%, limite de liquidez maior ou igual a 30% e índice de plasticidade (IP) maior ou igual a 30%. Diante disso, percebe-se que a mistura ideal não atende à maioria dessas exigências de projeto estabelecidas para uma barreira impermeabilizante, porém, tratando-se do comportamento técnico que diz respeito às propriedades mecânicas (RCS e RT) e hidráulica (K_{sat}) exigidas no projeto de camadas impermeabilizantes de fundo para aterros sanitários, percebe-se que os requisitos foram plenamente atendidos (Tabela 19).

3.3.4.3 Ensaio Triaxiais CIU

Todos os ensaios triaxiais foram realizados com amostras de solo residual puro e com a mistura ideal, moldadas nos parâmetros ótimos dos ensaios de compactação (γ_{dmax} e w_{ot}) na energia Proctor Normal, levando-se em consideração amostras sem cura (0 dia) e amostras submetidas à cura de 7 dias e de 28 dias, em câmara úmida. Foram consideradas as tensões confinantes de 200kPa, 400kPa e 800kPa. Os resultados desse ensaio foram apresentados na Tabela 22.

A partir da Tabela 22, percebe-se que houve melhorias dos parâmetros de resistência totais e efetivos em relação ao solo residual puro. Segundo Vargas (1977), a estabilização de solos com materiais cimentantes provoca cimentação e aglomeração dos seus grãos e, conseqüentemente, o incremento da coesão efetiva do solo. Acredita-se que ocorreu uma intensificação da reação de hidratação aos 7 dias de cura e que a formação de produtos de gel hidratado tenha sido gradualmente estabilizada com o tempo (Liu *et al.*, 2022). Isso pode ser observado na Tabela 22,

visto que houve maiores incrementos nos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) obtidos na cura de 7 dias.

Tabela 22 - Resultados dos ensaios de Compressão Triaxial CIU para a mistura ideal (sem cura e com curas de 7 dias e 28 dias) e solo residual puro

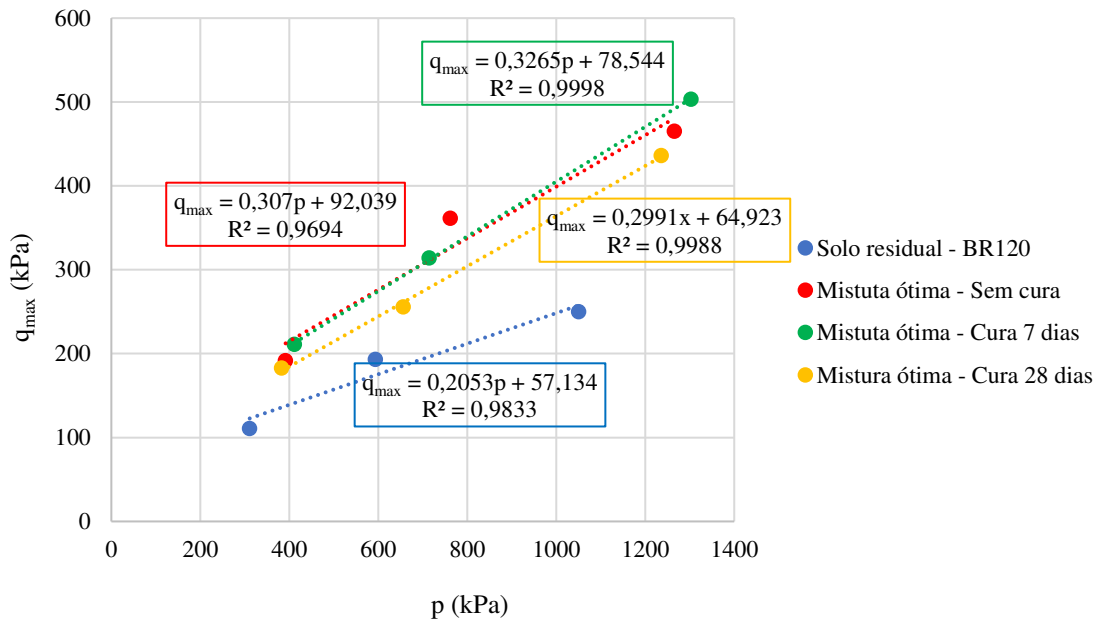
Solo residual puro													
	σ_d	σ_3	σ_1	u	σ'_3	σ'_1	p	p'	q_{max}	c	ϕ	c'	ϕ'
200	222	200	422	125	75	297	311	186	111				
400	387	400	787	227	173	560	593	366	193	67	11	66	18
800	500	800	1300	424	376	876	1050	626	250				
Mistura ideal - Sem Cura													
	σ_d	σ_3	σ_1	u	σ'_3	σ'_1	p	p'	q_{max}	c	ϕ	c'	ϕ'
200	383	200	583	21	179	562	392	371	192				
400	723	400	1123	97	303	1026	762	665	362	97	18	34	28
800	931	800	1731	307	493	1424	1265	958	465				
Mistura ideal - Cura de 7 dias													
	σ_d	σ_3	σ_1	u	σ'_3	σ'_1	p	p'	q_{max}	c	ϕ	c'	ϕ'
200	422	200	622	21	179	601	411	390	211				
400	629	400	1029	253	147	776	714	461	314	83	19	41	32
800	1007	800	1807	410	390	1397	1303	893	503				
Mistura ideal - Cura de 28 dias													
	σ_d	σ_3	σ_1	u	σ'_3	σ'_1	p	p'	q_{max}	c	ϕ	c'	ϕ'
200	366	200	566	93	107	473	383	290	183				
400	512	400	912	21	379	891	656	635	256	68	17	39	26
800	873	800	1673	407	393	1266	1236	829	436				

σ_d : tensão desviadora, u: poropressão, σ'_1/σ_1 : tensão principal maior (efetiva/total), σ'_3/σ_3 : tensão principal menor (efetiva/total), p: tensão média total, p': tensão média efetiva, q_{max} : tensão desvio máxima, c: coesão total, ϕ : ângulo de atrito total, c': coesão efetiva, ϕ' : ângulo de atrito efetivo.

OBS.: Todos os valores da tabela são em kPa, exceto ângulo de atrito em graus.

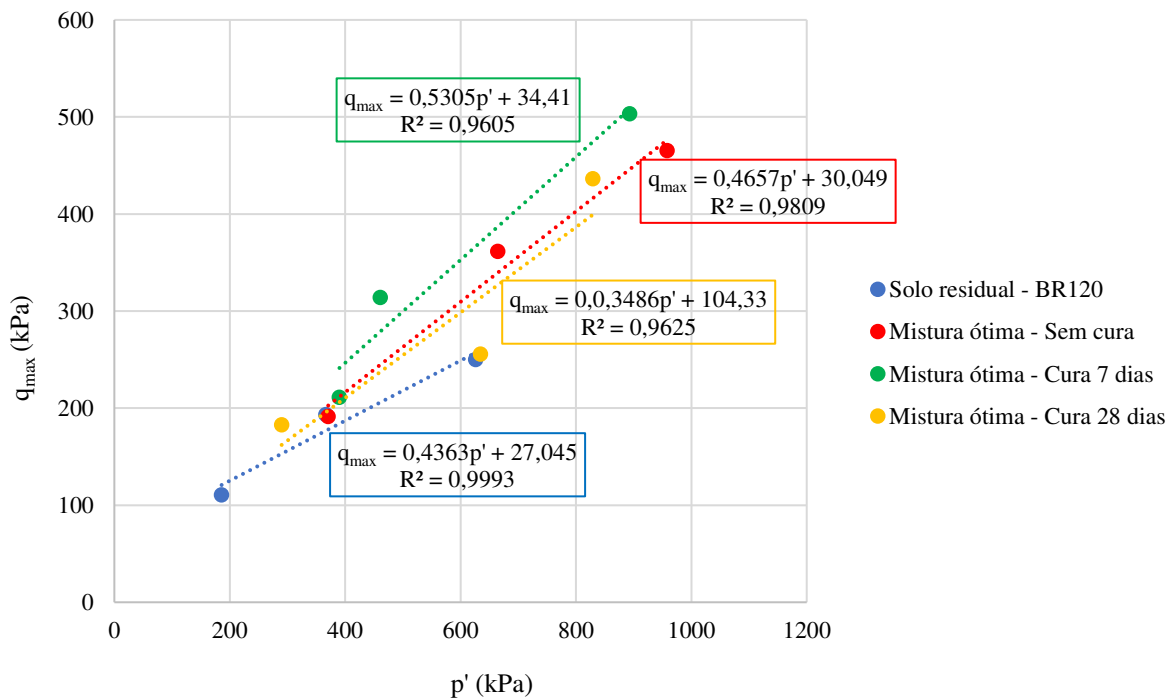
As Figuras 21 e 22 também confirmam que houve uma estabilização dos incrementos após 7 dias de cura. Percebe-se que a adição de escória de aciaria na mistura e a influência do tempo de cura contribuíram positivamente no ganho de resistência ao cisalhamento da amostra, sendo mais expressivo nas amostras com cura de 7 dias e sem cura. Conforme Salimi *et al.* (2020), as reações de ganho de resistência para misturas solo-escória requerem um tempo maior. Um dos catalisadores dessa reação são os compostos cimentantes resultantes da hidratação da escória, o que justifica os ganhos de resistência observados, após os períodos de cura, nas misturas investigadas.

Figura 21 - Ensaio Triaxial CIU: gráfico tensão desvio máxima (q_{\max}) versus tensões médias totais (p)



Fonte: Resultado da pesquisa

Figura 22 - Ensaio Triaxial CIU: gráfico tensão desvio máxima (q_{\max}) versus tensões médias efetivas (p')



Fonte: Resultado da pesquisa

As tendências comportamentais apresentadas nos ensaios de resistência ao cisalhamento podem ser explicadas à luz dos dados de caracterização previamente apresentados e de resultados oriundos de pesquisas similares encontradas na literatura. Al-Amoudi *et al.* (2017) observaram um aumento das propriedades mecânicas com o acréscimo de escória de aciaria elétrica em solos argilosos, o qual foi atribuído à cimentação promovida pelo mineral wustite (FeO), gerando uma estrutura mais densa nos corpos de prova. Al-Homidy *et al.* (2017) estudaram misturas contendo escória de aciaria e atribuíram a formação de C-S-H à presença de compostos cimentícios, destacando que o acréscimo de escória de aciaria elétrica à mistura promoveu a formação destes compostos. É importante ressaltar que as caracterizações química, mineralógica e microestrutural previamente apresentadas (item 3.3.4.1) comprovam a presença do mineral wustite (FeO) bem como a formação de C-S-H na mistura ideal.

Levando-se em consideração a análise de FRX realizada na mistura ideal (Tabela 20), percebe-se a presença de elevados teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ em sua composição. A identificação desses óxidos e sua quantificação na matriz da mistura podem ser relevantes para a quantidade e qualidade de eventuais reações pozolânicas na mistura, visto que possuem óxidos silicosos e aluminosos necessários para que essas reações ocorram (Rodrigues, 2022a). Adicionalmente, a presença de elevados teores de CaO nas escórias de aciaria utilizadas nessa pesquisa permite que ocorram reações pozolânicas quando em contato com água, situação em que ocorre a dissociação do CaO e a combinação dos íons Ca⁺² com os materiais silicosos e aluminosos, derivando em compostos pozolânicos que são responsáveis pelo incremento de resistência em curto e em longo prazos (Tastan *et al.*, 2011; Rodrigues, 2022a).

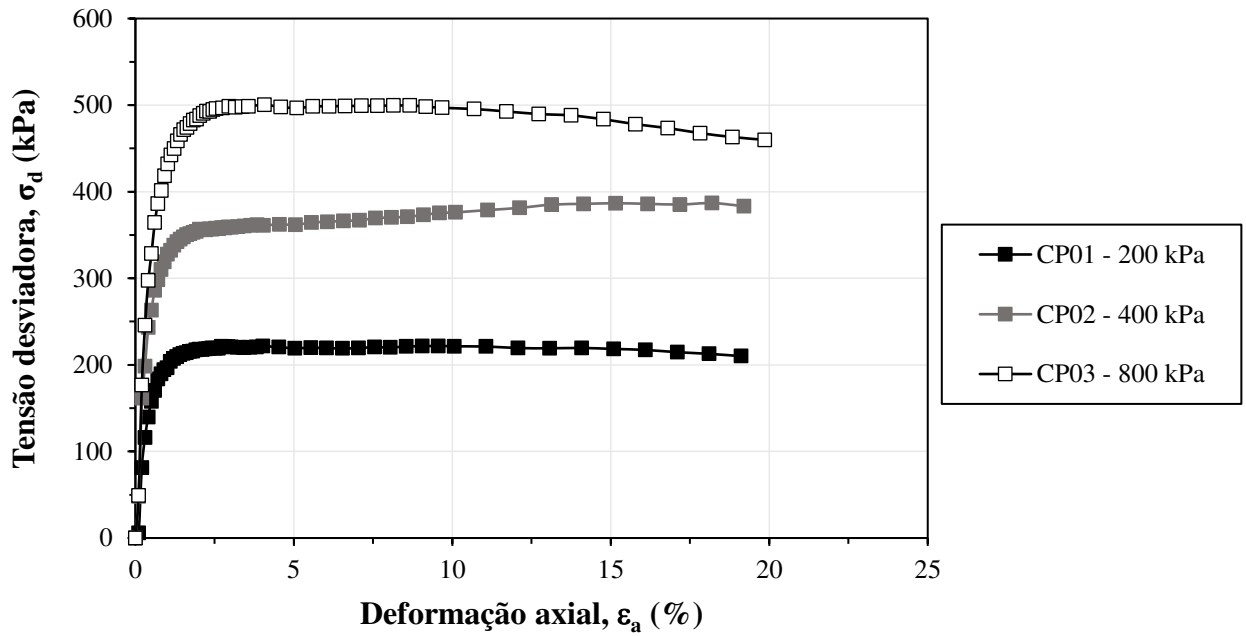
As principais fases mineralógicas identificadas nas escórias de aciaria foram a portlandita, olivina, calcita, dolomita, brucita e larnita. A presença dessas fases mineralógicas está de acordo com os minerais encontrados por outros autores em diversos estudos que abordam materiais similares aos desse estudo (Rodrigues, 2022b; Lopes, 2021) e pode ser um indicativo da reatividade do material, visto que minerais como a larnita apresentam elevada hidraulicidade, o que pode promover a ocorrência de reações de hidratação desses compostos e a formação de compostos cimentantes de maior resistência (Diniz *et al.*, 2017; Aldeeky; Hattamleh, 2017).

Segundo Brand *et al.* (2020), esse aumento da resistência sugere que os compostos CaO e Ca(OH)₂ presentes na escória de aciaria elétrica reagiram com as partículas de argila presentes no solo e/ou que as partículas de escória de aciaria estão estabilizando o solo fisicamente. Constata-se, em pesquisas similares, através dos ensaios de DRX, que houve formação de compostos cimentícios, como o C-S-H, o que confere às misturas solo-escória de aciaria maior resistência mecânica, além do aumento do grau de flocculação na estrutura da mistura, devido ao processo de troca catiônica entre os cátions presentes na escória e na amostra de solo (Ismail; Awad; Mwafy, 2019; Rodrigues, 2022b). Gunarti e Raharja (2020) afirmam que a elevação da resistência é devida aos novos grãos que se formam resultantes de reações químicas entre o solo e a escória de aciaria, sendo que o processo de troca de cátions gera uma alteração na estrutura do material, tornando-a mais flocculada.

Nas Figuras 23 a 30, são apresentadas as curvas de tensão desviadora (σ_d) *versus* deformação axial (ϵ_a) e também as curvas de variação do excesso de poropressão (u) *versus* deformação axial (ϵ_a) durante a fase de cisalhamento de cada corpo de prova ensaiado, considerando o solo residual puro e a mistura ideal (sem cura, cura de 7 dias e cura de 28 dias). Observou-se que houve uma estabilização da tensão desviadora e do excesso de poro-pressão após a ruptura nas amostras de solo residual e mistura ideal sem cura (Figuras 23 a 26), diferentemente das amostras com cura de 7 e 28 dias, em que foi identificada uma redução significativa desses parâmetros, principalmente nas amostras com cura de 28 dias (Figuras 27 a 30).

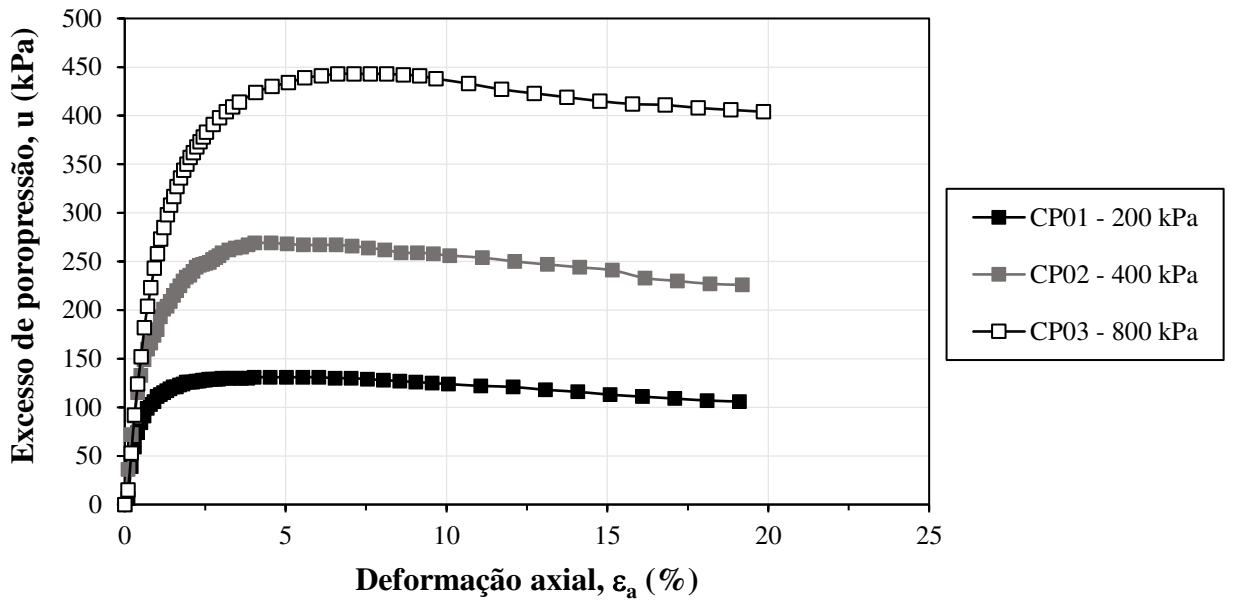
De acordo com Pinto (2006), a quebra da cimentação nos corpos de prova pode ocorrer nas fases de adensamento ou de cisalhamento, dependendo da tensão confinante efetiva aplicada. Quando a tensão de adensamento é muito inferior à tensão necessária para a quebra da cimentação (tensão de cedência), a curva tensão-deformação apresenta um pico de tensão até a total quebra da cimentação e, na sequência, é estabilizada na resistência residual, na qual a resistência é dada pelo atrito mobilizado nos contatos entre os grãos (Figuras 23 e 24). De acordo com esse autor, para uma tensão confinante mais alta, porém ainda menor que a tensão de cedência, após a quebra da cimentação, ocorre um pequeno aumento da tensão desviadora devido à mobilização da tensão ocorrida pelo atrito resultante do contato entre os grãos (Figura 25).

Figura 23 - Tensão desviadora *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU – Solo residual)



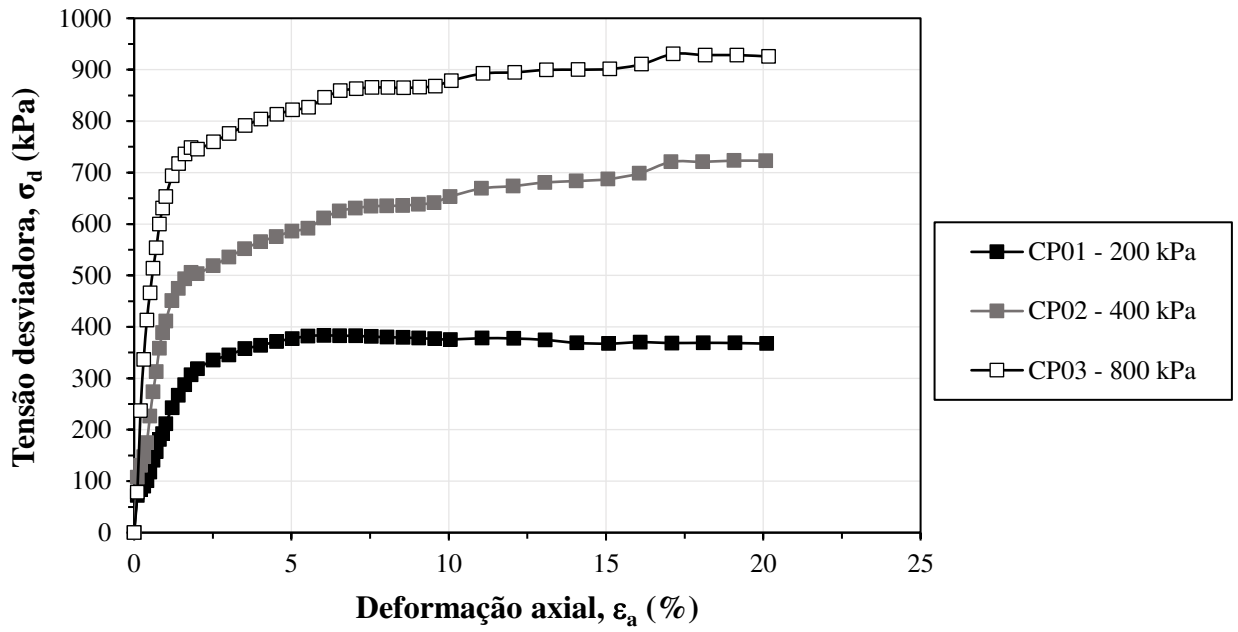
(Fonte: Resultado da pesquisa)

Figura 24 - Excesso de poropressão *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU – Solo residual)



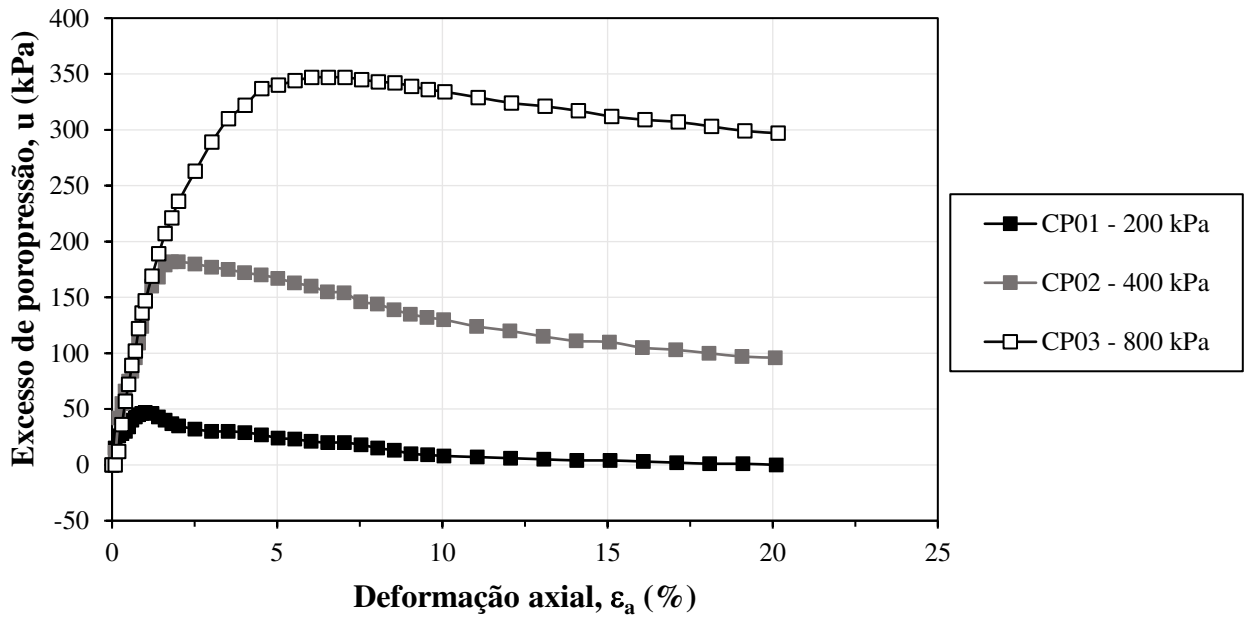
Fonte: Resultado da pesquisa

Figura 25 - Tensão desviadora *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU – Mistura ideal sem cura)



Fonte: Resultado da pesquisa

Figura 26 - Excesso de poropressão *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU – Mistura ideal sem cura)



Fonte: Resultado da pesquisa

Figura 27 - Tensão desviadora *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU – Mistura ideal com cura de 7 dias)

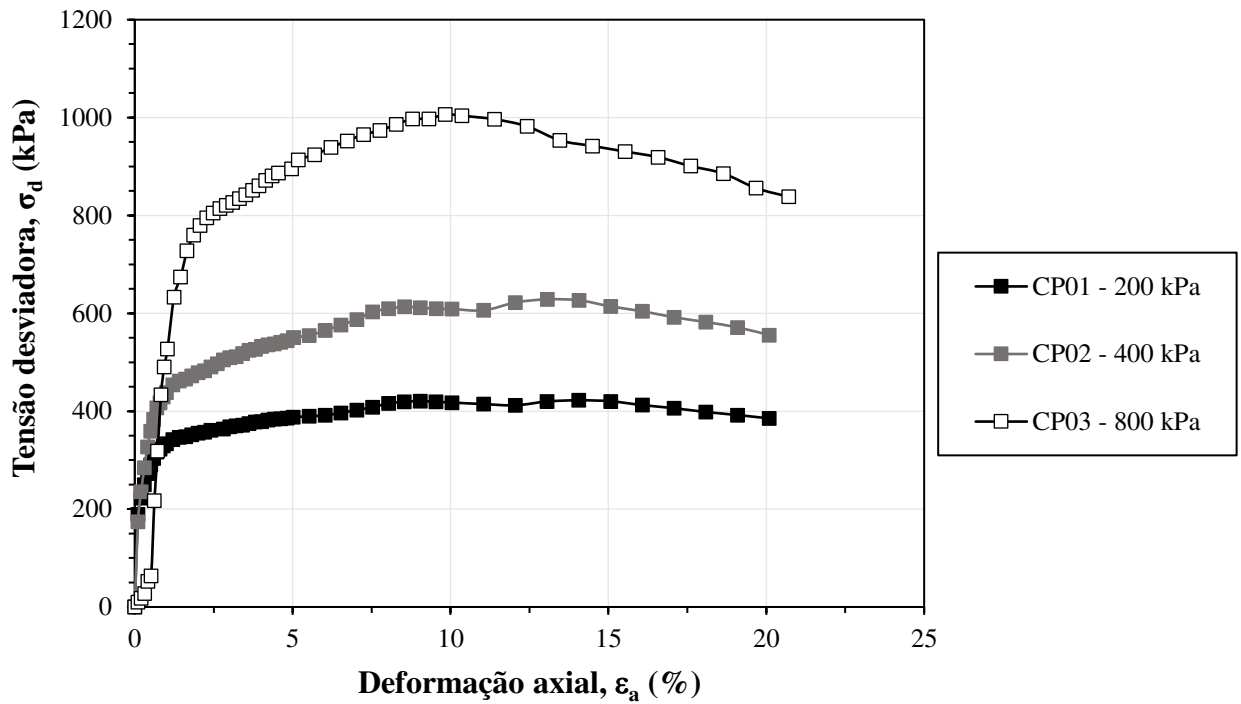


Figura 28 - Excesso de poropressão *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU – Mistura ideal com cura de 7 dias)

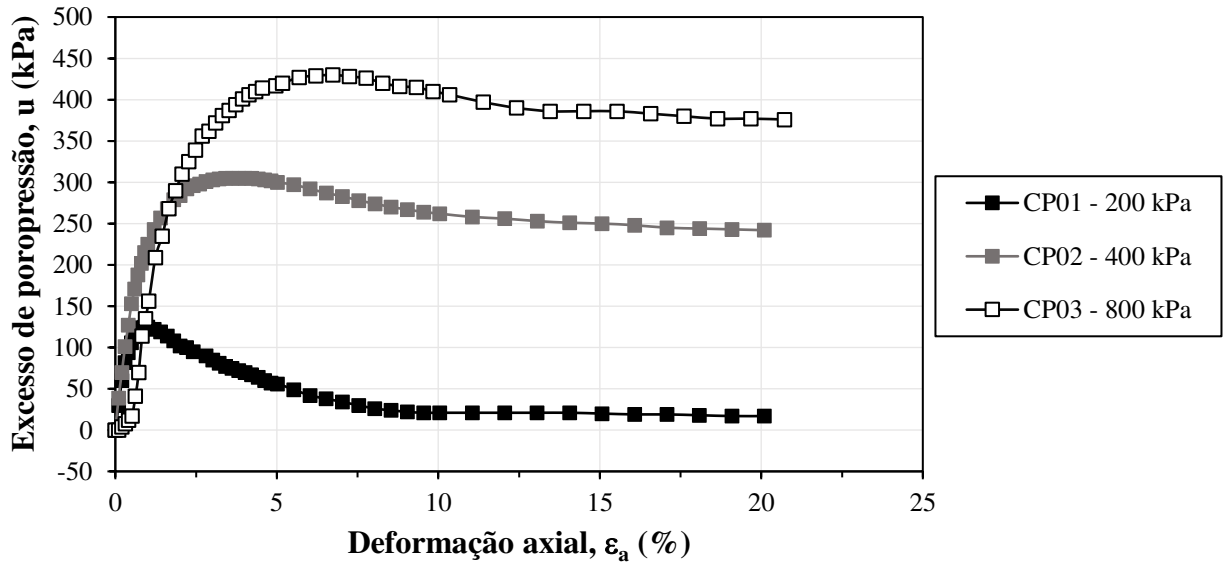
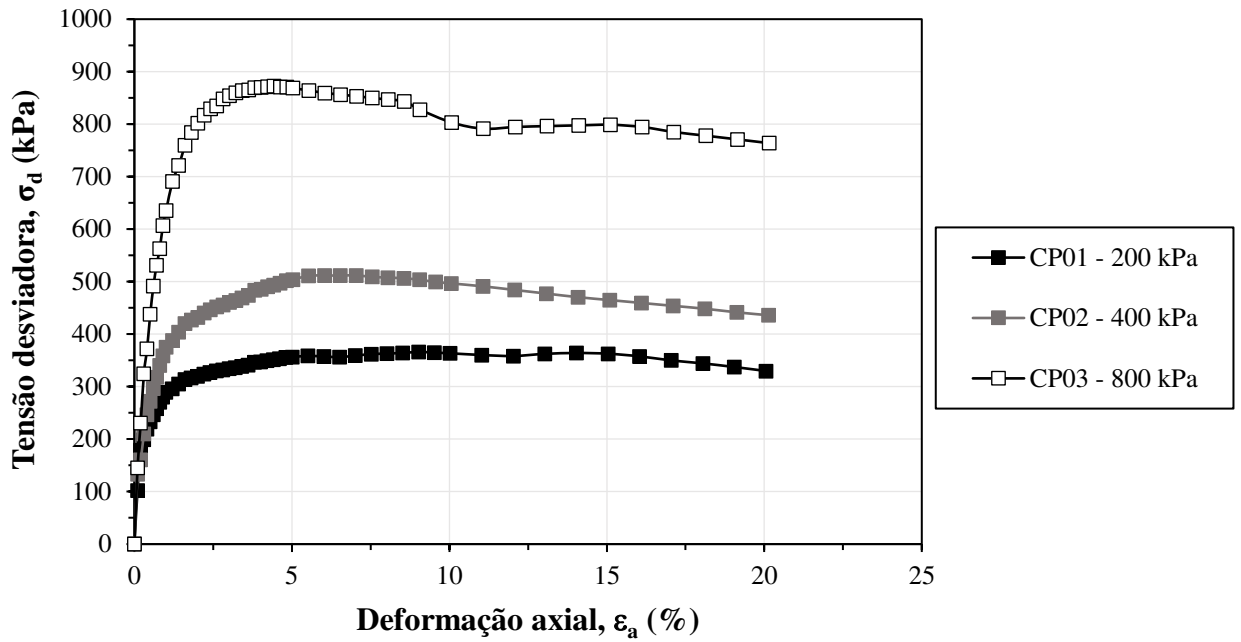
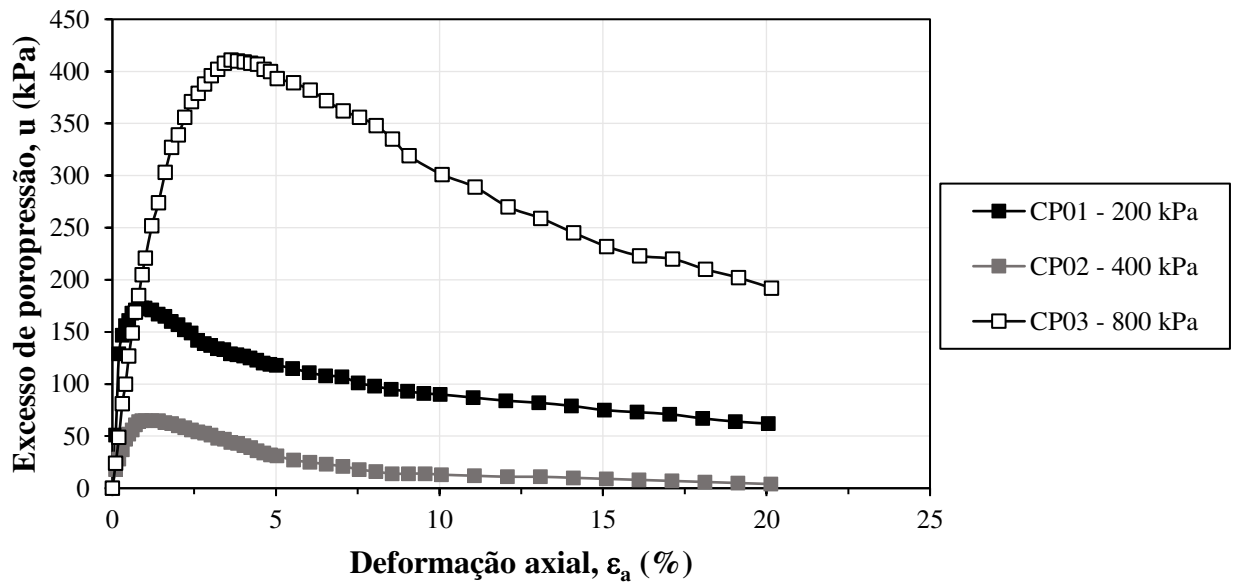


Figura 29 - Tensão desviadora *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU – Mistura ideal com cura de 28 dias)



Fonte: Resultado da pesquisa

Figura 30 - Excesso de poropressão *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU – Mistura ideal com cura de 28 dias)



Fonte: Resultado da pesquisa

3.3.4.4 Ensaios de Adensamento Edométrico

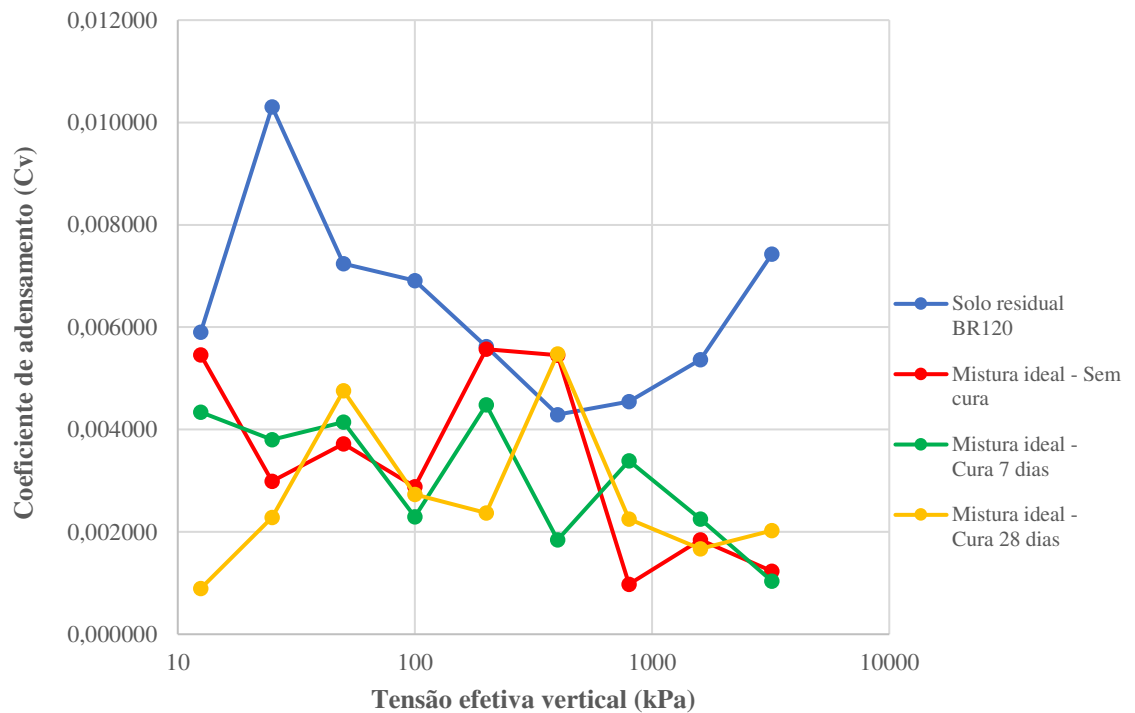
Todos os ensaios de adensamento edométrico foram realizados em corpos de prova de amostras de solo residual puro e com a mistura ideal, moldados nos parâmetros ótimos das respectivas curvas de compactação Proctor Normal (γ_{dmax} e w_{ot}), levando-se em consideração corpos de prova sem cura (0 dia) e submetidos à cura de 7 dias e de 28 dias, em câmara úmida.

A Tabela 23 mostra os valores dos coeficientes de adensamento (C_v) para cada um dos estágios analisados, para todos os cenários e amostras ensaiadas. A Figura 31 mostra os coeficientes de adensamento médios obtidos, correspondentes às 3 repetições de ensaio.

Tabela 23 - Coeficientes de adensamento (Cv) dos cenários analisados para todas as amostras (solo residual puro, mistura ideal sem cura, mistura ideal - 7 dias de cura e mistura ideal - 28 dias de cura) em cm²/s

Tensão efetiva vertical (kPa)	Solo residual				Mistura ideal - sem cura				Mistura ideal - 7 dias de cura				Mistura ideal - 28 dias de cura			
	Cv1	Cv2	Cv3	Cv médio	Cv1	Cv2	Cv3	Cv médio	Cv1	Cv2	Cv3	Cv médio	Cv1	Cv2	Cv3	Cv médio
12,5	0,00509	0,006717	0,005903	0,005903	0,006101	0,004821	0,005461	0,005461	0,002538	0,006147	0,004343	0,004343	0,001012	0,000777	0,000894	0,000894
25	0,007569	0,013047	0,010308	0,010308	0,002734	0,003239	0,002987	0,002987	0,002305	0,005299	0,003802	0,003802	0,001918	0,002648	0,002283	0,002283
50	0,007895	0,00659	0,007242	0,007242	0,004248	0,003199	0,003723	0,003723	0,003044	0,005249	0,004147	0,004147	0,003906	0,005612	0,004759	0,004759
100	0,007354	0,006466	0,00691	0,006910	0,002918	0,00285	0,002884	0,002884	0,001937	0,002648	0,002292	0,002292	0,002896	0,002574	0,002735	0,002735
200	0,005741	0,005498	0,00562	0,005620	0,005692	0,005448	0,00557	0,005570	0,003828	0,005133	0,004481	0,004481	0,00317	0,001565	0,002368	0,002368
400	0,003256	0,005328	0,004292	0,004292	0,005578	0,005333	0,005455	0,005455	0,001879	0,001814	0,001846	0,001846	0,005601	0,005357	0,005479	0,005479
800	0,003276	0,005821	0,004548	0,004548	0,000454	0,001502	0,000978	0,000978	0,001839	0,004943	0,003391	0,003391	0,001532	0,002972	0,002252	0,002252
1600	0,006083	0,004653	0,005368	0,005368	0,001325	0,002365	0,001845	0,001845	0,001794	0,00271	0,002252	0,002252	0,001334	0,002004	0,001669	0,001669
3200	0,005409	0,009444	0,007426	0,007426	0,001259	0,001211	0,001235	0,001235	0,000884	0,001192	0,001038	0,001038	0,001366	0,002682	0,002024	0,002024

Figura 31 - Coeficiente de adensamento médio em função da tensão efetiva vertical aplicada para todos os cenários analisados



Fonte: Resultado da pesquisa

Observou-se que, de forma geral, a adição de escória de aciaria ao solo (mistura ideal) reduziu os valores de C_v , expressando uma tendência de redução proporcional ao aumento do tempo de cura. Salienta-se que o coeficiente de adensamento (C_v) é um parâmetro relacionado com a velocidade de adensamento, por meio do qual podem ser estimados os tempos necessários para a dissipação do excesso de poropressão gerado pelo carregamento aplicado (Moura, 2004). A redução na velocidade de adensamento ocorre em função de uma menor permeabilidade do meio poroso com subsequente aumento do tempo necessário para que o recalque ocorra sob a ação de uma determinada carga aplicada (Soares, 1997).

No caso específico da mistura ideal, a redução do C_v é justificada, portanto, pela redução de sua permeabilidade decorrente do preenchimento dos poros de maior tamanho da estrutura compactada do solo argiloso pelos finos de escória de aciaria e, com o avanço do processo de cura, pelo preenchimento adicional dos vazios pelos compostos cimentícios resultantes da hidratação das escórias de aciaria (He *et al.*, 2023). No que diz respeito a essa redução do C_v indicada na Figura 31, foi realizado

um teste estatístico (ANOVA) sobre os valores médios dos 4 cenários tratados na Figura 31 para verificar se há diferença estatística significativa entre os cenários. Constatou-se que não houve diferença significativa entre as amostras de mistura ideal, independente do tempo de cura, diferentemente da amostra de solo residual que apresentou valores significativamente superiores de C_v em relação às amostras de mistura ideal.

De forma geral, verificou-se, também, a redução do índice de vazios inicial das amostras, sendo o menor valor associado às amostras da mistura com cura de 7 e 28 dias (Figura 32). Isso também reflete diretamente na diminuição da permeabilidade da mistura. Uma vez que o objetivo desse estudo, em se tratando de barreiras impermeabilizantes para aterros sanitários, é que a mistura apresente o menor valor possível de K_{sat} , as combinações mais satisfatórias são as que apresentarem tendências de diminuição dessa propriedade. A condutividade hidráulica aceitável é o valor que garante que não haja contaminação do solo adjacente, retardando a passagem de contaminante.

Tomando como base as curvas de compressibilidade resultantes dos ensaios de adensamento edométrico (Figura 32), foram obtidos os coeficientes C_c e C_s que representam, respectivamente, os comportamentos deformacionais dos materiais investigados quando expostos a acréscimos (carregamento) e a alívios (descarregamento) de tensões verticais efetivas.

Percebe-se, nos resultados apresentados na Tabela 24, que o acréscimo de escória de aciaria ao solo argiloso (mistura ideal) implicou em menores valores de C_c e C_s , principalmente com o aumento do tempo de cura. Esses resultados são tecnicamente positivos no que diz respeito à perspectiva de aplicação da mistura ideal em *liners*, visto que as deformações excessivas nos materiais utilizados na construção de barreiras impermeabilizantes podem causar trincas e fissuras capazes de comprometer a integridade hidráulica da estrutura e, conseqüentemente, comprometer a sua funcionalidade (Tapahuasco, 2009; Morandini; Schneider, 2017).

Observou-se a existência de uma correlação favorável entre o tempo de cura e as diminuições do C_c e do C_s (Tabela 24), de forma que a mistura com 28 dias de cura apresentou os menores coeficientes de compressão e de expansão em relação ao solo argiloso natural. Sugere-se que a diminuição do C_c na mistura com o aumento do tempo de cura esteja relacionada com a formação dos compostos hidratados (C-

S-H, C-A-H, C-A-S-H), conforme evidenciado na caracterização morfológica da mistura ideal (Figura 20), visto que estes promovem o fechamento de poros da estrutura interna, propiciando a formação de uma matriz sólida mais densa e rígida, contribuindo, assim, para uma melhor resposta mecânica, em adensamento, do arcabouço interno da mistura (Al-Amoudi *et al.*, 2017; Amini; Ghasemi, 2019; Wu *et al.*, 2019; Rodrigues, 2022a).

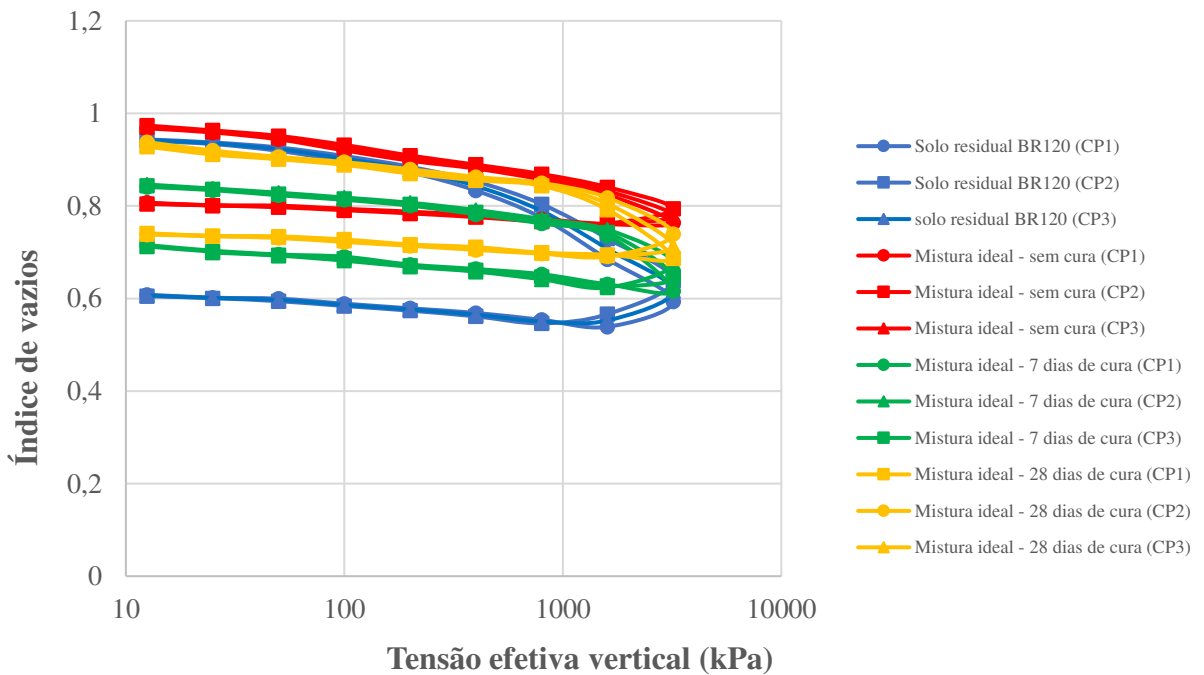
Observou-se, também, que a adição de escória de aciaria ao solo argiloso elevou a tensão de pré-adensamento quando comparados a mistura ideal (sem cura, 7 e 28 dias de cura) e o solo argiloso natural. Percebe-se que os valores foram mais significativos para as amostras com curas de 7 e 28 dias, principalmente para as amostras submetidas à cura de 7 dias. Ressalta-se que elevações das tensões de pré-adensamento resultam do incremento da rigidez do material proporcionado pelos agentes de cimentação (Kumar; Yong, 2002). Isso pode ser confirmado através dos ensaios de DRX e MEV, que evidenciaram a formação de estruturas de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), sílico-aluminatos de cálcio hidratados (C-A-S-H) e aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H) responsáveis pelo ganho de rigidez mecânica. Os óxidos de silício e de alumínio são responsáveis pela formação dos compostos cimentícios quando se combinam com hidróxido de cálcio, o que acarreta alterações nas propriedades de engenharia de solos estabilizados com algum componente que possui grande quantidade de óxido ou hidróxido de cal em sua constituição (Yoobanpot *et al.*, 2020).

O C-S-H e o C-A-H são produtos resultantes das reações primárias de hidratação do cimento *Portland*, sendo um dos principais responsáveis pelo ganho de resistência e rigidez em misturas solo-cimento (Oliveira *et al.*, 2019). O C-A-S-H (etringita), também gerado durante a fase de hidratação do cimento, é um mineral expansivo que se desenvolve na presença de sulfato, cálcio e alumínio e em elevados valores de pH (Rezende *et al.*, 2017). A etringita é responsável por incrementos na resistência e rigidez de solos tratados com estabilizantes hidráulicos e por ocupar vazios à medida que se expande (Oliveira *et al.*, 2019; Parsaei *et al.*, 2021). Esses compostos, aqui identificados, também foram observados em outros estudos envolvendo misturas solo-escória (Ismail *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2019; Mozejko; Francisca, 2020).

Tabela 24 - Resultados dos ensaios de adensamento para a mistura ideal (sem cura e com curas de 7 dias e 28 dias) e solo residual puro

Cenário	Coeficiente de compressão (Cc)				Tensão de pré-adensamento (kPa)				Coeficiente de expansão (Cs)			
	CP1	CP2	CP3	Média	CP1	CP2	CP3	Média	CP1	CP2	CP3	Média
Solo residual	0,34	0,36	0,32	0,34	470	520	510	500	0,02	0,03	0,04	0,03
Mistura ideal - sem cura	0,26	0,20	0,23	0,23	685	723	692	700	0,02	0,02	0,02	0,02
Mistura ideal - cura 7 dias	0,23	0,22	0,18	0,21	1322	1368	1360	1350	0,015	0,025	0,02	0,02
Mistura ideal - cura 28 dias	0,20	0,18	0,19	0,19	1020	1070	1060	1050	0,01	0,01	0,01	0,01

Figura 32 - Resultados do ensaio de adensamento: mistura ideal (sem cura e com curas de 7 dias e 28 dias) e solo residual puro



3.3.4.5. Caracterização ambiental

Nas Tabelas 25 e 26, estão apresentados os resultados obtidos na análise dos extratos solubilizados e lixiviados de amostras da mistura ideal de solo com escória de aciaria elétrica. São mostrados, ainda, os limites máximos de concentração dos

elementos para a classificação do resíduo como “não inerte” (solubilização) e “não perigoso” (lixiviação), segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004a) e USEPA – *Code of Federal Regulations* (USEPA, 2012).

Tabela 25 - Concentrações dos elementos nos extratos solubilizados de amostra da mistura ideal (em mg/L).

Elemento	Limite estipulado pela NBR 10004 (ABNT, 2004a)	Mistura ideal
Pb	0,01	n.d.
Cr	0,05	n.d.
Fe	0,3	0,0923
Al	0,2	0,1624
Mn	0,1	0,0382
Zn	5,0	n.d.
Cu	2,0	n.d.
n.d.: não detectado		

Tabela 26 - Concentrações dos elementos nos extratos lixiviados de amostra da mistura ideal (em mg/L).

Elemento	Limite estipulado pela NBR 10004 (ABNT, 2004a)	Limite estipulado pela USEPA (2012)	Mistura ideal
Pb	1,0	5,0	n.d.
Cr	5,0	5,0	n.d.
Fe	-	-	0,4820
Al	-	-	1,7236
Mn	-	-	0,1256
Zn	-	-	0,2250
Cu	-	-	0,0356
n.d.: não detectado			

Em relação aos extratos solubilizados, as concentrações foram inferiores aos limites máximos especificados pela NBR 10004 (ABNT, 2004a). Sendo assim, a mistura ideal pode ser classificada como inerte. No que se refere à lixiviação, as normas especificam valores máximos apenas para os metais arsênio (As), chumbo (Pb) e cromo (Cr). As concentrações obtidas nas amostras foram inferiores aos limites determinados. Isso indica que, do ponto de vista ambiental, a mistura produzida com escória de aciaria elétrica apresentou comportamento tecnicamente aceitável, ocorrendo uma boa imobilização dos metais. Sugere-se que isso tenha ocorrido devido ao alto teor de óxido de ferro (Fe_2O_3) presente nas escórias (24,50%) e,

consequentemente, na mistura ideal (18,10%), conforme evidenciado nos ensaios de FRX realizados nessa pesquisa.

De acordo com Xue *et al.* (2009) e Francisca e Glatstein (2019), o óxido de ferro possui a capacidade de sorção e incorporação de metais pesados e tem sido empregado na remoção de tais elementos de efluentes líquidos e residuais. Pode-se dizer que a barreira impermeabilizante, mesmo com a incorporação de escória de aciaria, causa baixo impacto ambiental, não sendo agressiva ao meio e à saúde humana durante a vida útil do aterro sanitário.

As escórias siderúrgicas apresentam alta capacidade de remoção de metais pesados da solução devido à sua alta alcalinidade (Francisca; Glatstein, 2019). Sua capacidade de aumentar o pH da solução e assim promover a precipitação do metal serve como um processo secundário, retardando a passagem de contaminantes por *liners* ou mesmo por barreiras reativas permeáveis (Ruhl *et al.*, 2014; Duan *et al.*, 2016; Shabalala *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2019).

3.3.4.6. Avaliação da predição das propriedades de interesse

Para todos os cenários, foi possível observar que os requisitos exigidos para a construção de barreiras impermeabilizantes de fundo de aterros sanitários, no que diz respeito às propriedades analisadas no protocolo de dosagem (RCS, RT, K_{sat}), foram atendidos. Ressalta-se que, para a mistura ideal, os valores obtidos experimentalmente para tais propriedades foram compatíveis com os valores estimados calculados por meio dos respectivos modelos matemáticos (Tabelas 14, 16 e 18), atestando a eficiência da ferramenta estatística na predição das magnitudes das propriedades de interesse, conforme evidenciado na Tabela 27. Desta forma, tais modelos foram considerados acurados para a predição das propriedades de interesse.

Tabela 27 - Avaliação da eficácia do método Simplex-Centróide na estimativa das propriedades mecânicas (RCS, RT) e hidráulica (K_{sat}) da mistura ideal

Parâmetro	Experimental	Modelo matemático	Variação
RCS – 7 dias (kPa)	341,73	301,26	+13,43%
RT – 7 dias (kPa)	70,46	78,39	-10,12%
K_{sat} – 7 dias (cm/s)	$1,83 \times 10^{-7}$	$1,56 \times 10^{-7}$	+17,03%

3.4. Conclusões

Este capítulo teve como objetivo principal apresentar um protocolo de delineamento experimental de misturas solo-resíduos siderúrgicos, visando à aplicação em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários. Baseado nos resultados do planejamento experimental em rede Simplex-Centróide, foi possível determinar a composição ideal representativa das misturas analisadas que atende às exigências técnicas de projeto inerentes a barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários, possibilitando a aplicação da maior porcentagem possível dos resíduos siderúrgicos. A composição da mistura ideal correspondeu a 64% de solo, 34,1% de escória de aciaria elétrica primária (EAEP) e 1,9% de escória de aciaria elétrica secundária (EAES).

Vislumbra-se, assim, por meio do protocolo proposto, a possibilidade de suprir a ausência, na literatura técnico-científica, de um protocolo de dosagem de misturas solo-resíduos siderúrgicos fundamentado em método estatístico de planejamento experimental com vistas à otimização das propriedades de engenharia de interesse e da porcentagem de resíduos siderúrgicos empregados, em conjunto com solos argilosos, na composição de barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários. Ressalta-se, também, a perspectiva técnica de definição de critérios objetivos norteadores do procedimento de dosagem de misturas solo-resíduos siderúrgicos baseados em um conjunto relevante de propriedades de desempenho (RCS , RT , K_{sat}), além da perspectiva de que a validação técnico-científica do protocolo de dosagem proposto possa substituir os métodos de dosagem empíricos tradicionais envolvendo misturas solos-resíduos siderúrgicos, os quais se mostram deficientes quanto à replicabilidade de dosagens prévias.

Em caráter secundário, foi demonstrada a viabilidade técnica do produto de engenharia (mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal) resultante do protocolo de dosagem estatística proposto. Tal demonstração se deu através de resultados de ensaios de caracterização geotécnica, química, mineralógica e microestrutural que subsidiaram as análises das respostas mecânicas (resistência à compressão, resistência à tração, resistência ao cisalhamento, rigidez sob adensamento) e hidráulica (permeabilidade saturada) da mistura ideal compactada, cujo desempenho de engenharia se mostrou equivalente ou superior ao do solo argiloso compactado

(condição de referência). Também foi evidenciada a adequabilidade ambiental da mistura solo-resíduos siderúrgicos por meio de ensaios de solubilização e lixiviação.

Observou-se, através dos ensaios de caracterização química (FRX), mineralógica (DRX) e microestrutural (MEV), que houve a formação de compostos cimentícios [silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), sílico-aluminatos de cálcio hidratados (C-A-S-H) e aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H)] resultantes da hidratação das escórias de aciaria elétrica (EAEP e EAES) componentes da mistura ideal, conferindo à mistura solo-resíduos siderúrgicos compactada maiores resistência e rigidez mecânicas e menor permeabilidade saturada. Conclui-se que a melhoria mecânica decorrente da adição de escória de aciaria ao solo argiloso deve-se primordialmente à ação dos agentes de cimentação nos pontos de contato interpartículas. A formação dos compostos cimentícios também é responsável pela diminuição do espaço poroso, do que resulta a menor condutividade hidráulica do meio.

Para a mistura ideal, os valores obtidos experimentalmente para as propriedades de engenharia analisadas nessa pesquisa foram compatíveis com os valores estimados calculados por meio dos modelos matemáticos, atestando a eficiência da ferramenta estatística na predição das magnitudes das propriedades de interesse.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALDEEKY, H.; HATTAMLEH, O. A. Experimental Study on the Utilization of Fine Steel Slag on Stabilizing High Plastic Subgrade Soil. **Hindawi Advances in Civil Engineering**, v.2017, 11p., 2017.
- ALMEIDA, M. A.; FREITAS, R. B.; WIEBBELLING, V. Determinação dos Parâmetros do solo laterítico de Cascavel/PR por meio do cone de penetração dinâmica. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. Vol. 11, Nº 3, pp 242 a 253, 2019.
- AL-AMOUDI, O. S. B.; AL-HOMIDY, A. A.; MASLEHUDDIN, M.; SALEH, T. A. Method and Mechanisms of Soil Stabilization Using Electric Arc Furnace Dust. **Scientific Reports**, 7, n. 1, p. 46676, 2017.
- AL-HOMIDY, A. A.; AL-AMOUDI, O.; MASLEHUDDIN, M.; SALEH, T. A. Stabilisation

of dune sand using electric arc furnace dust. **International Journal of Pavement Engineering**, 18, n. 6, p. 513-520, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM D 5084**: Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. (2016). USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM D 4767**: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. (2020). USA.

AMINI, O.; GHASEMI, M. Laboratory study of the effects of using magnesium slag on the geotechnical properties of cement stabilized soil. **Construction and Building Materials**, 223, 409-420, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. (2004a). Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. (2004b). Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. (2004c). Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12023**: Solo-cimento — Ensaio de compactação. (2012a). Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12025**: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio. (2012b). Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação (2020a). Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16853**: Solo — Ensaio de adensamento unidimensional. (2020b). Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14545**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga

variável. (2021a). Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13292**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. (2021b). Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12770**: Solo coesivo– determinação da resistência à compressão não confinada. (2022). Rio de Janeiro.

BOUYAKHSASS, R.; SOUABI, S.; RIFI, S. K.; TALEB, A.; PALA, A.; MADINZI, A. Optimization of coagulation-flocculation for landfill leachate treatment: An experimental design approach using response surface methodology, **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**. Volume 20, 2023.

BRAND, A. S.; SINGHVI, P.; FANIJO, E. O.; TUTUMLUER, E. Stabilization of a Clayey Soil with Ladle Metallurgy Furnace Slag Fines. **Materials**, 13, n. 19, p. 4251, 2020.

CANESCHI, F. P. **Estudos geoambientais em solos modificados quimicamente**. Universidade Federal de Viçosa - Viçosa-MG, 2012.

CETESB Companhia de tecnologia e de saneamento ambiental de São Paulo. Resíduos sólidos industriais. São Paulo/SP, 1993.

CHEN, Y.; LIANG, W.; LI, Y.; WU, Y.; CHEN, Y.; XIAO, W.; ZHAO, L.; ZHANG, J.; LI, H. Modification, application and reaction mechanisms of nano-sized iron sulfide particles for pollutant removal from soil and water: a review. **Chem. Eng. J.**, 362, pp. 144-159, 2019.

CHEN, Z.; XIE, G. ESG disclosure and financial performance: Moderating role of ESG investors. **International Review of Financial Analysis**, Volume 83, October 2022.

CHENG, Q.; TANG, C.; CHEN, Z.; EL-MAARRY, M. R.; ZENG, H.; SHI, B. Tensile behavior of clayey soils during desiccation cracking process. **Engineering Geology**, volume 279, 2020.

CHOI, S. Y.; RYU, D.; YOU, W. ESG activities and financial stability: The case of Korean financial firms. **Borsa Istanbul Review**, Available online 23 May 2024.

- COSTA, C. M. C. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos**. Tese de doutorado em geotecnia, Universidade de Brasília, 2015.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 181: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral**. (1994). Rio de Janeiro.
- DEVARANGADI, M.; M, U. S. Use of ground granulated blast furnace slag blended with bentonite and cement mixtures as a liner in a landfill to retain diesel oil contaminants. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 7(5), 103360, 2019.
- DEVARANGADI, M.; M, U. S. Correlation studies on geotechnical properties of various industrial byproducts generated from thermal power plants, iron and steel industries as liners in a landfill- a detailed review. **Journal of Cleaner Production**, Volume 261, 2020.
- DEVARANGADI, M.; M, U. S. Effect on engineering properties of ground granulated blast furnace slag admixed with laterite soil, cement and bentonite mixtures as a liner in landfill. **Journal of Cleaner Production**, Volume 329, 2021.
- DINIZ, D. H.; CARVALHO, J. M. F. d.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical Soil Stabilizer for Use in Roads. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 29, n. 9, p. 040171118, 2017.
- DUAN, Y.; HAN, D. S.; BATCHELOR, B.; ABDEL-WAHAB, A. Application of a reactive adsorbent-coated support system for removal of mercury (II). **Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.**, 509 , pp. 623-630, 2016.
- FERREIRA, J. C.; PATINO, C. M. O que realmente significa o valor-p?. Educação Continuada: Metodologia Científica. **Jornal Brasileiro Pneumologia**. p. 485, 2015.
- FRANCISCA, F. M.; GLATSTEIN, D. A. Environmental application of basic oxygen furnace slag for the removal of heavy metals from leachates. **Journal of Hazardous Materials**, 121294, 2019.
- GILES-CORTI, B.; LOWE, M.; ARUNDEL, J. Achieving the SDGs: Evaluating

- indicators to be used to benchmark and monitor progress towards creating healthy and sustainable cities. **Health Policy**, Volume 124, Issue 6, Pages 581-590, 2020.
- GOMAA, H. E.; ALOTAIBI, A. A.; GOMAA, F. A.; BAJUAYFIR, E.; AHMAD, A.; ALOTAIBI, K. M. Integrated ion exchange-based system for nitrate and sulfate removal from water of different matrices: Analysis and optimization using response surface methodology and Taguchi experimental design techniques. **Process Safety and Environmental Protection**. Volume 153, Pages 500-517, 2021.
- GUNARTI, A. S. S.; RAHARJA, I. Mechanical Properties Improvement of Clays Using Silica Sand Waste and Dust Sand Foundry Waste. IOP Conference Series: **Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 012002, 2020.
- GUNEY, Y.; CETIN, B.; AYDILEK, A. H.; TANYU, B. F.; KOPARAL, S. Utilization of sepiolite materials as a bottom liner material in solid waste landfills. **Waste Management**, 34(1), 112–124, 2014.
- HADDAJI, C.; ENNACIRI, K.; DRIOUICH, A.; DIGUA, K.; SOUABI, S. Optimization of the coagulation-flocculation process for vegetable oil refinery wastewater using a full factorial design. **Process Safety and Environmental Protection**. Volume 160, Pages 803-816, 2022.
- HE, Z.; SHAO, X.; CHEN, X. Effect of Carbonation Treatment on the Strength and CO₂ Uptake Rate of Composite Cementitious Material with a High Steel Slag Powder Content. **Journals Materials**, volume 16 (Issue 18), 2023.
- INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB) Anuário Estatístico. Rio de Janeiro - RJ, 2024.
- ISMAIL, A. I. M.; AWAD, S. A.; MWAFY, M. A. G. The Utilization of Electric Arc Furnace Slag in Soil Improvement. **Geotechnical and Geological Engineering**, 37, n. 1, p. 401-411, 2019.
- ISMAIL, A. I. M.; AWAD, S. A.; MWAFY, M. A. G. The utilization of electric arc furnace slag in soil improvement. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 37, p. 401–411, 2018.
- JO, B. W.; CHAKRABORTY, S.; KIM, H. Prediction of the curing time to achieve maturity of the nano cement based concrete using the Weibull distribution model. **Construction and Building Materials**, Volume 84, June 2015, Pages 307-314.

- KAMBOLE, C.; PAIGE-GREEN, P.; KUPOLATI, W. K.; NDAMBUKI, J. M.; ADEBOJE, A. O. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. **Construction and Building Materials**, n. 148, p. 618-631, 2017.
- KUMAR, S.; YONG, W. Effect of Bentonite on Compacted Clay Landfill Barriers. **Environmental Science, Engineering Soil and Sediment Contamination: An International Journal**, volume 11, 71-89, 2002.
- LEOPOLDINO, C. C. L.; BARBOSA, D. C.; MENDONÇA, F. M.; INFANTE, C. E. D. C.; NOGUEIRA, E. A. T. Impactos ambientais e financeiros da implantação do gerenciamento de resíduos sólidos em um complexo siderúrgico: um estudo de caso. **Eng Sanit Ambient**, volume 24, n.6, 2019.
- LI, L.; LIN, C.; ZHANG, Z. Utilization of shale-clay mixtures as a landfill liner material to retain heavy metals. **Materials & Design**, 114, 73–82, 2017.
- LIU, X.; CHEN, W.; LIANG, S.; HAN, W. Influencing factors of loess compacting. **Journal Desert Res.**, 24 (5), pp. 657-662, 2004.
- LIU, T.; HU, L. Organic acid transport through a partially saturated liner system beneath a landfill. **Geotextiles and Geomembranes**, 42(5), 428–436, 2014.
- LIU, M.; LU, H.; DENG, Q.; JI, S.; QIN, L.; WAN, Y. Shear strength, water permeability and microstructure of modified municipal sludge based on industrial solid waste containing calcium used as landfill cover materials. **Waste Management**, Volume 145 , 15 de maio de 2022 , Páginas 20-28, 2022.
- LOPES, E. C. **Avaliação tecnológica de coprodutos siderúrgicos visando o melhoramento de propriedades de engenharia de solos tropicais**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, 2021.
- MAMATHA, K. H.; DINESH, S. V. Resilient modulus of black cotton soil. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 10, n. 2, p. 171–184, 2017.
- MENDES, B. C.; PEDROTI, L. G.; FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, J. C. L.; VIEIRA, C. M. F.; PACHECO, A. A.; AZEVEDO, A. R. G. Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. **Construction and building materials**, v. 227, p. 116669, 2019.

- MONTENEGRO, J. M. et al. Ladle Furnace Slag in the Construction of Embankments: Expansive Behavior. **Journal of Materials in Civil Engineering**, volume 25, n. 8, p. 972–979, agosto 2013.
- MONTGOMERY, D.; RUNGER G. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. LTC, São Paulo, 2012.
- MORANDINI, T. L. C.; SCHNEIDER, V. C. Compressibilidade em misturas de solo laterítico, bentonita e fibras para uso em barreiras de fluxo. **Holos Environment**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 66. Lepidus Tecnologia, 2017.
- MOURA, A. P. **Adensamento com velocidade controlada de deformação (crs): desenvolvimento do equipamento e realização de ensaios em solos moles do leste de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2004.
- MOZEJKO, C. A.; FRANCISCA, F. M. Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 239, 117901, 2020.
- MUKAKA, M. M. (Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. **Malawai Medical Journal**. 2012.
- MUJTABA, G.; SHAH, M. U. H.; HAI, A.; DAUD, M.; HAYAT, M. A holistic approach to embracing the United Nation's Sustainable Development Goal (SDG-6) towards water security in Pakistan. **Journal of Water Process Engineering**. Volume 57, 2024.
- OLIVEIRA JÚNIOR, A. A.; PIMENTEL, M. G.; PICANÇO, M. S. Propriedades mecânicas e análise microestrutural de um concreto produzido com agregado da região Amazônica brasileira. **Revista Matéria**, v.00, n.0, 2019.
- PARSAEI, M.; VAKILI, A. H.; SALIMI, M.; FARHADI, M. S.; FALAMAKI, A. Effect of electric arc and ladle furnace slags on the strength and swelling behavior of cementstabilized expansive clay. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 80, n. 8, p. 6303–6320, 2021.
- PINTO, C. S. Curso básico de Mecânica dos Solos, com exercícios resolvidos. Editora Oficina do Texto. 3ª ed. São Paulo – SP, 2006.

- POH, H. Y.; GHATAORA, G. S.; GHAZIREH, N. Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 18, n. 2, p. 229–240, 2006.
- REZENDE, L. R. et al. Laboratory Study of Phosphogypsum, Stabilizers, and Tropical Soil Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 1, 2017.
- ROCHA, G. S. **Efeito da cal na resposta mecânica de um solo residual maduro: análise da resistência à compressão não confinada, permeabilidade, compressibilidade e efeito da cura acelerada na resistência mecânica.** Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2018.
- RODRIGUES, K. H. P. **Utilização de resíduos industriais na estabilização de solos tropicais para aplicação em pavimentação.** Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, 2022a.
- RODRIGUES, M. H. R. **Otimização da dosagem e das propriedades mecânicas e de expansibilidade de misturas entre solos e coprodutos siderúrgicos.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 2022b.
- RUBINOS, D.; SPAGNOLI, G.; BARRAL, M. T. Assessment of bauxite refining residue (red mud) as a liner for waste disposal facilities. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, 29(6), 433–452, 2015.
- RUHL, A. S.; FRANZ, G.; GERNERT, U.; JEKEL, M. Corrosion product and precipitate distribution in two-component Fe (0) permeable reactive barriers. **Chem. Eng. J.**, 239, pp. 36-32, 2014.
- SALIMI, M.; ILKHANI, M.; VAKILI, A. H. Stabilization treatment of Na-montmorillonite with binary mixtures of lime and steelmaking slag, **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 14, n. 3, p. 295–301, 2020.
- SHARMA, A. K.; SIVAPULLAIAH, P. V. Cinzas volantes modificadas com escória de alto-forno granulada moída como estabilizador de solo expansivo, **Solos encontrados.** , 56, pp. 205 - 212 , 2016.
- SEBBAR, N.; LAHMILI, A.; BAHI, L.; OUADIF, L. Treatment of clay soils with steel slag, in road engineering. E3S Web of Conferences. **EDP Sciences**, 02017, 2020.

- SHABALALA, A. N.; EKOLU, S. O.; DIOP, S.; SOLOMON, F. Pervious concrete reactive barrier for removal of heavy metals from acid mine drainage– column study. **J. Hazard. Mater.**, 323, pp. 641-653, 2017.
- SOARES, J. M. D. **Estudo do comportamento geotécnico do depósito de argila mole da grande Porto Alegre**. Tese (Doutorado em engenharia) Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997.
- TASTAN, E. O.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H.; AYDILEK, A. H. Stabilization of organic soils with fly ash. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 137, 819- 833, 2011.
- TAPAHUASCO, W. F. C. **Análise do comportamento de maciços sanitários e proposta de um novo modelo de previsão de recalques considerando a parcela de biodegradação**. Tese de Doutorado - Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil, UnB, 2009.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA Code of Federal Regulations. USEPA **SW 846** – Test methods for evaluating solid waste – Physical/chemical methods - Washington, 2012.
- VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. Mcgraw-Hill, Editora da Universidade de Sao Paulo, 1977.
- WANG, J.; QIN, Q.; HU, S.; WU, K. A concrete material with waste coal gangue and fly ash used for farmland drainage in high groundwater level areas. **Journal of Cleaner Production**, 112, 631–638, 2016.
- WU, H.; WEN, Q.; HU, L.; GONG, M.; TANG, Z. Feasibility study on the application of coal gangue as landfill liner material. **Waste Management**, 63, 161–171, 2017.
- WU, J.; LIU, Q.; DENG, Y.; YU, X.; FENG, Q.; YAN, C. Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways. **Soils**. 2019.
- XUE, Y.; HOU, H.; ZHU, S. Competitive adsorption of copper (II), cadmium (II), lead (II) and zinc (II) onto basic oxygen furnace slag. **J. Hazard. Mater.**, 162, pp. 391-401, 2009.
- YANG, J.; NIU, X.; GUO, Q.; WEN, Z.; CAO, H. Strength and deformation characteristics of compacted loess with different moisture content and compaction

- energy. **Results in Engineering**. Volume 20, 2023.
- YI, Y.; LISKA, M.; AL-TABBAA, A. Properties of Two Model Soils Stabilized with Different Blends and Contents of GGBS, MgO, Lime, and PC. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 26, 267-274, 2014.
- YOOBANPOT, N.; JAMSAWANG, P.; POORAHONG, H.; JONGPRADIST, P. et al. Multiscale laboratory investigation of the mechanical and microstructural properties of dredged sediments stabilized with cement and fly ash. **Engineering Geology**, 267, p. 105491, 2020/03/20/ 2020.
- YU, Z.; FAROOQ, U.; ALAM, M. M.; DAI, J. How does environmental, social, and governance (ESG) performance determine investment mix? New empirical evidence from BRICS. **Borsa Istanbul Review**, 2024.
- ZHANG, D.; ZHAO, Z.; LAU, C. K. Sovereign ESG and corporate investment: New insights from the United Kingdom. **Technological Forecasting and Social Change**, 183, 2022.
- ZHAN, L. T.; NI, J. Q.; FENG, S.; KONG, L. G.; FENG, T. Saturated hydraulic conductivity of compacted steel slag-bentonite mixtures - A potential hydraulic barrier material of landfill cover. **Waste Management**, Volume 144, Pages 349-356, 2022.
- ZHANG, J.; YANG, Q.; LIU, D. A comprehensive study on numerical analysis of contaminant migration process in compacted clay liner and underlying aquifer for MSW landfill. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 19(8), 950–975, 2015.

CAPÍTULO 4: Avaliação dos comportamentos mecânico e hidráulico de *liner* de solo-resíduos siderúrgicos sob influência da percolação de metais pesados

4.1. Introdução

O aumento significativo da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) em todo o mundo tornou o descarte desses materiais um importante ponto de discussão e de deliberação visando a manutenção sustentável das atividades atuais (Penteado *et al.*, 2021). O aumento exponencial da população mundial, associado ao desenvolvimento da indústria e da tecnologia, bem como ao uso contínuo e crescente dos recursos naturais, contribuem para o aumento significativo da geração de resíduos sólidos (Wu *et al.*, 2015). Segundo Saadatlu *et al.* (2022), mais de 1,3 bilhão de toneladas de RSU são produzidas anualmente em todo o mundo, com estimativas de que até 2025 essa geração ultrapassará 2,2 bilhões de toneladas. Isso torna imprescindível o descarte adequado destes resíduos, devido aos danos que podem causar ao meio ambiente quando manejados de forma inadequada (Du; Li, 2023).

Para que ocorra um descarte adequado dos resíduos sólidos urbanos (RSU), são necessárias barreiras impermeáveis ou *liners*, os quais devem apresentar como características funcionais uma baixa condutividade hidráulica, resistência e rigidez mecânicas compatíveis às exigidas em projeto, resistência às intempéries e manutenção de suas propriedades (durabilidade) durante o período de projeto (Devarangadi; M, 2021). Quanto aos materiais de construção que as compõem, podem ser utilizados materiais naturais, como o solo, e artificiais, como os geossintéticos (geomembranas e GCLs), e até mesmo a combinação desses materiais (Alonso, 2005).

Em se tratando da condutividade hidráulica, Williams (2005) relata que as barreiras impermeáveis necessitam atender a exigências técnicas mínimas para desempenharem, com eficiência, seu papel funcional quanto ao fluxo advectivo de contaminantes. Esse autor informa valores limites, por exemplo, para a condutividade hidráulica, que deve ser inferior a 10^{-9} m/s, para resíduos perigosos, permitindo-se o uso de materiais com até 10^{-7} m/s, no caso de descarte de materiais inertes. Entretanto, destaca que a condutividade hidráulica não é o único fator de projeto e

construção a ser considerado nos *liners* de aterros sanitários, ressaltando, dentre outras exigências funcionais, aquelas relacionadas ao comportamento mecânico.

Conforme a USEPA (2012), a condutividade hidráulica e a resistência à compressão simples de um material de revestimento típico usado em aterros sanitários não devem ser maior que 10^{-9} m/s e menor que 200 kPa, respectivamente. Já para a resistência à tração, é recomendado um intervalo de maneira a evitar uma excessiva rigidez do material, o que pode acarretar trincas e, conseqüentemente, patologias indesejáveis na camada de revestimento capazes de comprometer sua integridade hidráulica. Esse intervalo, segundo literaturas técnicas consultadas, deve corresponder a $20 \text{ kPa} \leq RT \leq 90 \text{ kPa}$ (Costa, 2015; Cheng *et al.*, 2020).

O principal motivo pelo qual os aterros sanitários devem atender a todos os requisitos técnicos de construção é que esses dispositivos estão associados a riscos de contaminação ambiental, com relevância para a contaminação do solo subjacente com metais pesados, com destaque para As, Ag, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Sn e Zn (Yong, 2001). No caso dos metais pesados, eles são prejudiciais à vida humana, bem como de plantas e animais, quando ocorrem em quantidades anormais, ou seja, além daquelas necessárias para o bom funcionamento do organismo. Por outro lado, têm a característica de serem cumulativos, não sendo expulsos e, na maioria das vezes, produzindo distúrbios nos organismos vivos (Chakraborty *et al.*, 2024).

Embora parte destes metais seja essencial para a vida de certos seres vivos, como é o caso do Cu, Mn, Ni e Zn que, dentro de certos limites, são fundamentais para a saúde de plantas e animais, particularmente no caso humano, concentrações superiores a certos limites podem se tornar problemáticas. Existem, ainda, outros tipos de elementos químicos que não possuem funcionalidade para a vida e, ao se concentrarem em determinadas partes do organismo, se tornam nocivos, como o Cd e o Pb, além daqueles com maior facilidade de serem encontrados no ambiente contaminado através de ações antrópicas (Selim; Amacher, 1997; Balali *et al.*, 2023).

Os metais pesados são poluentes que estão presentes nos lixiviados e que possuem potencial poluente e bioacumulativo. Além de representarem uma ameaça à água e ao solo, podem comprometer a segurança alimentar, afetar as lavouras próximas à região do aterro sanitário e representar um risco à saúde, principalmente para as pessoas que vivem próximas ao local de disposição de resíduos (Ma *et al.*, 2018; Jayasundara *et al.*, 2023). Em vista disso, a mobilidade e a retenção de metais

pesados na barreira impermeabilizante dependem de complexas interações com a fase sólida, tanto orgânica quanto inorgânica (Brady, 1989).

Quanto aos mecanismos químicos relacionados à interação entre tais contaminantes e as barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários, diversos processos podem ocorrer, dependendo do meio poroso (característica do *liner*) e da solução contaminada (He *et al.*, 2022). Via de regra, essas reações causam retardamento do fenômeno de transporte de poluentes em meio poroso. As reações de precipitação-dissolução e adsorção-dessorção podem gerar transferência de poluente da fase líquida para a fase sólida. Os outros processos, oxidação-redução, complexação e quelatação, podem atuar afetando a disponibilidade dos poluentes para os processos de transferência ou alterando a forma do poluente, elevando ou reduzindo seus efeitos de contaminação. As atividades biológicas também podem atuar em processos de transferência ou como processo de oxi-redução (Lange *et al.*, 2002).

Além dos impactos nas propriedades químicas, muitos estudos verificaram o impacto dos metais pesados nas propriedades físicas e mecânicas do solo (Li *et al.*, 2016). Mozejko e Francisca (2020) estudaram a permeabilidade em longo prazo da argila compactada afetada pelo lixiviado. Os resultados evidenciaram que o lixiviado reduziu a condutividade hidráulica do solo compactado visto que os poros efetivos estavam obstruídos pelo lixiviado. Wang *et al.* (2020) investigaram o cisalhamento e as propriedades químicas da laterita poluída com lixiviado e descobriram que a coesão, o pH e a capacidade de troca catiônica (CEC) apresentaram incrementos, enquanto o ângulo de atrito reduziu à medida que a concentração de lixiviado aumentou.

Liu *et al.* (2023) desenvolveram um estudo que teve como objetivo avaliar o desempenho de longo prazo do lodo municipal desidratado modificado como uma barreira de revestimento de aterro. Resíduos sólidos industriais (escória) contendo cálcio foram usados como um material modificado para o lodo em contato com o chorume. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão - c , ângulo de atrito - φ), resistência à compressão e condutividade hidráulica do lodo modificado foram estudados usando cisalhamento direto, compressão uniaxial e testes de penetração. Gesso e etringita foram gerados, e a estrutura esquelética do lodo modificado foi construída. Além disso, o material cimentício produzido pela reação de

hidratação preencheu os aglomerados e os poros das partículas. Posteriormente, uma estrutura densa do material modificado foi gerada, e a resistência ao cisalhamento do lodo modificado melhorou.

A compreensão dos mecanismos de interação entre contaminantes (metais pesados) e *liners* é crucial para avaliar seu impacto nas propriedades de engenharia. Essas interações ocorrem principalmente através de processos químicos, como adsorção, difusão e reações superficiais, podendo provocar alterações significativas na estrutura interna dos *liners* (Mozejko; Francisca, 2020; Özçoban *et al.*, 2022). Além disso, metais pesados podem formar complexos estáveis com grupos funcionais na estrutura do *liner*, modificando suas propriedades físico-químicas e, conseqüentemente, suas propriedades hidráulicas e mecânicas (Jones; Brown, 2017).

Mudanças na porosidade do *liner* devidas à interação química também podem ser observadas, afetando sua permeabilidade e capacidade de transporte de fluidos, fatores críticos para aplicações hidráulicas (Chen *et al.*, 2019). Essas alterações influenciam diretamente as propriedades mecânicas e hidráulicas dos *liners*, podendo alterar sua eficácia como barreira hidráulica, influenciando o fluxo hidráulico dentro das estruturas (Wang; Liu, 2016; Li; Zhang, 2018; Zhang *et al.*, 2021). Assim, a identificação e compreensão desses mecanismos são essenciais para mitigar impactos adversos na funcionalidade dos *liners* em engenharia civil, assegurando sua durabilidade e eficiência ao longo do tempo.

A interação entre metais pesados e *liners* compostos por solo-resíduos siderúrgicos pode intervir significativamente em suas propriedades de engenharia devido a diversos mecanismos químicos. Estes incluem a adsorção de contaminantes na matriz do *liner*, o que pode alterar a estrutura interna do material e resultar no incremento de suas propriedades mecânicas, como resistência à tração e flexibilidade (Silva *et al.*, 2020; Garg *et al.*, 2020; Özçoban *et al.*, 2022; Kumar; Kumari, 2024). Além disso, a difusão de íons metálicos dentro do *liner* pode causar mudanças na sua porosidade e na distribuição de espaços vazios, afetando diretamente a permeabilidade e a capacidade de barreira hidráulica do material (Rosin-Paumier *et al.*, 2011).

Diante disso, é importante averiguar a eficiência funcional dessas barreiras impermeáveis, avaliando se a presença desses metais pesados promove a perda de capacidade de retenção dessas barreiras sanitárias e, conseqüentemente, a

contaminação do solo adjacente às mesmas. Além do eventual efeito do contaminante sobre o mecanismo de contaminação advectivo, traduzido pela condutividade hidráulica, é importante avaliar o eventual efeito do contaminante sobre as propriedades mecânicas da barreira de fluxo (Marinho *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2023).

Assim, este capítulo tem como objetivo analisar os comportamentos mecânico (RCS, RT) e hidráulico (K_{sat}) da mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal compactada, após a realização prévia de ensaios de percolação em coluna com solução multiespécie dos metais pesados Cd, Mn, Cu, Pb e Zn. Foi apresentado um comparativo dos resultados das propriedades mecânicas e hidráulicas das amostras com e sem a presença do contaminante, avaliando o eventual impacto dessa solução multiespécie sobre propriedades de engenharia relevantes sob a perspectiva do desempenho funcional de barreiras impermeabilizantes constituídas por tal mistura.

4.2. Materiais

4.2.1 Solo

Foi utilizada, nessa pesquisa, uma amostra de solo residual argiloso proveniente do intemperismo de rochas gnáissicas (Lopes, 2021), aqui denominado “Solo BR 120”. A jazida na qual foi coletada a amostra de solo situa-se na microrregião de Viçosa, na Zona da Mata Norte do Estado de Minas Gerais, no local de coordenadas 725.040,90 m E e 7.699.555,09 m S.

4.2.2 Escórias de aciaria elétrica

As escórias de aciaria elétrica utilizadas foram cedidas por uma empresa siderúrgica, proveniente do forno elétrico à arco (escória oxidante primária - EAEP) e do forno panela (escória redutora secundária - EAES), coletadas no pátio de estocagem à céu aberto da referida empresa.

4.2.3 Mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal

A mistura solo-resíduos siderúrgico investigada correspondeu à mistura ideal determinada segundo o protocolo de dosagem apresentado no Capítulo 3. Trata-se, portanto, da mistura contendo 64% da amostra de solo residual argiloso, 34,1% de

escória de aciaria elétrica primária (EAEP) e 1,9% de escória de aciaria elétrica secundária (EAES).

4.2.4 Solução contaminante

A solução contaminante multiespécie utilizada nos ensaios de percolação em coluna apresentou concentrações de 0,9, 101,2, 14,9, 10,1 e 35,6 mg/L, respectivamente, para os metais Cd, Mn, Cu, Pb e Zn. Para a definição da solução contaminante, foi referenciado o procedimento utilizado por Caneschi (2012), visto que foram utilizadas as mesmas concentrações. Inicialmente, foi realizado um levantamento de dados nas literaturas técnicas nacional e internacional, para se definir as concentrações dos metais Cd, Mn, Ni, Pb e Zn de uma solução contaminante multiespécie a ser utilizada em ensaios de percolação em coluna. Portanto, o primeiro passo foi buscar na literatura quantitativos de cátions em lixiviados oriundos de áreas contaminadas, tais como aterros sanitários ou controlados, organizando um banco de dados abrangente.

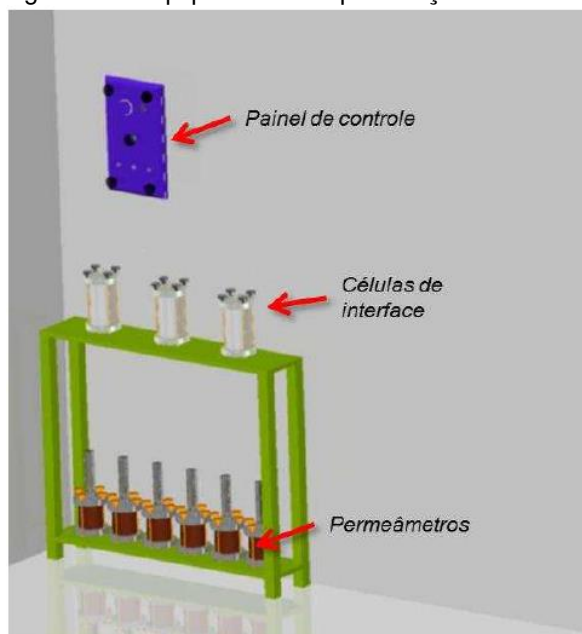
Na sequência, procedeu-se ao cálculo da média e do desvio padrão da amostra de cada cátion e comparou-se o conjunto de resultados com valores médios e máximos de concentrações de metais pesados encontrados em lixiviados de aterros sanitários (Souto; Povinelli, 2007), bem como os valores máximos permitidos para lançamento no ambiente, de acordo com a legislação brasileira (CONAMA, 2011).

Entretanto, considerando-se que o objetivo desse estudo foi definir as concentrações de cada metal pesado para produção da solução multiespécie, de modo que a mesma representasse, no mínimo, a realidade passível de ser encontrada no campo, por segurança, optou-se por definir estas concentrações aumentando-se os valores através da adoção de um fator de multiplicação de 10, aplicado sobre os quantitativos referentes ao intervalo de cada média mais o respectivo desvio padrão, na busca de se aumentar a faixa de abrangência do estudo e, obviamente, reduzir-se o risco.

4.2.5 Equipamento de percolação em coluna

Para a realização dos ensaios de percolação em coluna, utilizou-se o equipamento exposto na Figura 33. O equipamento é constituído basicamente por um painel de controle, um conjunto de células de interface e um conjunto de permeâmetros interligados por tubos flexíveis. Para o protocolo de ensaio, foi utilizado, como referência, o estudo realizado por Caneschi (2012).

Figura 33 - Equipamento de percolação em coluna



Fonte: Caneschi (2012)

O equipamento funciona basicamente por ar comprimido (alimentado por um compressor de ar) que pressuriza as células de interface, a fim de produzir o gradiente hidráulico desejado para promover o fluxo da solução contaminante multiespécie nos corpos de prova localizados nos permeâmetros. Após a percolação, o líquido é retido nos tubos de vidro graduado na parte superior, nos quais se faz a leitura do volume percolado e a coleta do efluente para análises posteriores.

4.3. Métodos

4.3.1 Considerações iniciais

Os corpos de prova foram saturados antes da percolação com a solução contaminante. Para saturar as amostras, foi percolada água destilada nos corpos de prova até ser atingida uma vazão de saída constante (regime de fluxo permanente). O fluxo, por ser ascendente, auxilia no processo de saturação, facilitando a expulsão de bolhas de ar. Segundo Scarpedas (1994) *apud* Boscov (1997), recomenda-se uma saturação maior do que 90% em ensaios em coluna. Os corpos de prova foram saturados com água por 30 dias para que se pudesse observar quaisquer variações na vazão de saída e, desta forma, tentar garantir o valor recomendado de saturação.

Para a contaminação das amostras por meio da solução contaminante multiespécie, foram realizados ensaios de Permeabilidade saturada (K_{sat}), utilizando o equipamento exposto no estudo de Caneschi (2012), e foram consultadas as normas NBR 14545 (ABNT, 2021a) e NBR 13292 (ABNT, 2021b). Esse equipamento de percolação em coluna promoveu o fluxo dos metais pesados nos corpos de prova da mistura ideal, compactados no ótimo da energia Proctor Normal (Tabela 21, Capítulo 3), previamente saturados com água.

De acordo com a norma ASTM D 5084 (ASTM, 2016), o uso de gradientes hidráulicos elevados pode levar ao carreamento de partículas finas no interior do corpo de prova de solos argilosos e ocasionar o aprisionamento de partículas menores na sua porção final, o que pode bloquear o fluxo e reduzir a permeabilidade, ou levar ao carreamento total das partículas finas no caso de solos granulares, aumentando a permeabilidade. Por isso, durante o ensaio, adotou-se um gradiente hidráulico de 30 (pressão hidráulica de aproximadamente 40kPa), valor considerado representativo em relação aos coeficientes de permeabilidade característicos do material estudado. Segundo Caneschi (2012), barreiras selantes de aterros sanitários apresentam pressão hidráulica entre 50 e 100 kPa.

Após a conclusão da fase de contaminação dos corpos de prova por meio da solução contaminante multiespécie no ensaio de percolação em coluna, os mesmos foram extraídos dos permeômetros imediatamente após a desmontagem desses dispositivos, para a realização dos ensaios mecânicos (RCS e RT). O ensaio de permeabilidade saturada (K_{sat}) foi realizado no decorrer do ensaio de percolação em coluna, em que os volumes percolados eram lidos diariamente ao longo dos 122 dias de ensaio.

O critério para encerrar os ensaios de percolação do contaminante multiespécie aos 122 dias foi determinado com base na necessidade de alcançar um período suficiente de exposição de um *liner* composto por solo-resíduos siderúrgicos aos metais pesados. Este período foi considerado adequado para observar efeitos substanciais nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos *liners*, conforme demonstrado por estudos anteriores que indicaram alterações significativas nessas propriedades após exposições de prazo semelhante (Silva *et al.*, 2020; Garg *et al.*, 2020; Kumar; Kumari, 2024). Os resultados obtidos foram satisfatórios para evidenciar os impactos dos metais pesados, destacando mudanças na estrutura interna dos *liners* e seus efeitos na funcionalidade como barreiras hidráulicas em aplicações de engenharia civil.

4.3.2 Caracterização morfológica

Para a caracterização morfológica das amostras de mistura ideal após a percolação da solução contaminante multiespécie por 122 dias, foi utilizada a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Foram consideradas as condições sem cura e com curas de 7 dias e 28 dias. As imagens foram obtidas utilizando o equipamento JEOL JSM-6010LA (resolução de 4 nm, feixe a 20 kV, magnificação de 8X a 300.000X e voltagem de aceleração de 500 V a 20 kV), com amostras de mistura ideal metalizadas em ouro.

4.3.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Os ensaios realizados para a obtenção da Resistência à Compressão Simples (RCS) para a mistura ideal foram conduzidos de acordo com as exigências da NBR 12025 (ABNT, 2012), com corpos de prova oriundos dos ensaios de percolação em coluna com contaminante multiespécie. Foram considerados, previamente à percolação contaminante, os períodos de cura em câmara úmida de 7 dias e 28 dias, além da condição sem cura (0 dia). Após a finalização dos ensaios de percolação em coluna (122 dias), os corpos de prova foram retirados dos respectivos cilindros e levados à ruptura em compressão não confinada, na velocidade de carregamento de 1,0 mm/min. Foram ensaiados 3 corpos de prova, sendo, portanto, determinada a RCS

por meio da média aritmética das tensões de ruptura, com coeficiente de variação máximo admissível de 10%.

4.3.4 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os ensaios realizados para a obtenção da Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) para a mistura ideal foram conduzidos de acordo com a metodologia descrita em ME 181 (DNER, 1994c), com corpos de prova oriundos dos ensaios de percolação em coluna com contaminante multiespécie. Foram considerados, previamente à percolação contaminante, os períodos de cura em câmara úmida de 7 dias e 28 dias, além da condição sem cura (0 dia). Após a finalização dos ensaios de percolação em coluna (122 dias), os corpos de prova foram retirados dos respectivos cilindros e levados à ruptura em compressão diametral, na velocidade de carregamento de 1,0 mm/min. Foram ensaiados 3 corpos de prova, sendo, portanto, determinada a RT por meio da média aritmética das tensões de ruptura, com coeficiente de variação máximo admissível de 10%.

4.3.5 Ensaio de Permeabilidade saturada

Para a realização dos ensaios de Permeabilidade saturada (K_{sat}), foi utilizado o equipamento exposto no estudo de Caneschi (2012) e foram consultadas as normas NBR 14545 (ABNT, 2021a) e NBR 13292 (ABNT, 2021b). Esse equipamento promoveu o fluxo de solução contaminante multiespécie nos corpos de prova compactados previamente saturados, durante o período de 122 dias. Foram considerados, previamente à percolação contaminante, os períodos de cura em câmara úmida de 7 dias e 28 dias, além da condição sem cura (0 dia). O gradiente hidráulico aplicado foi de 30 (pressão hidráulica de aproximadamente 40kPa), definido conforme as recomendações da ASTM D 5084 (ASTM, 2016) e de Caneschi (2012). Foram ensaiados 3 corpos de prova, sendo, portanto, determinada a K_{sat} por meio da média aritmética das determinações de ensaio, com coeficiente de variação máximo admissível de 10%.

4.4. Resultados e discussões

4.4.1 Caracterização morfológica

As Figuras 34, 35 e 36 mostram, respectivamente, as micrografias da mistura ideal após a percolação com a solução contaminante multiespécie (122 dias), para as condições iniciais (anteriores à percolação) sem cura (0 dia), após 7 dias de cura e após 28 dias de cura. Em todos os cenários, é possível constatar a formação de compostos cimentícios (C-S-H, C-A-H, C-S-A-H) resultantes da hidratação das escórias de aciaria (EAEP e EAES) componentes da mistura ideal. É importante destacar que, mesmo para a condição em que a percolação contaminante multiespécie se deu sobre corpos de prova não previamente curados (Figura 34), houve a formação destes compostos cimentícios, indicando que a solução contaminante multiespécie não constituiu um agente de restrição química das reações de hidratação responsáveis pelo desenvolvimento destes compostos.

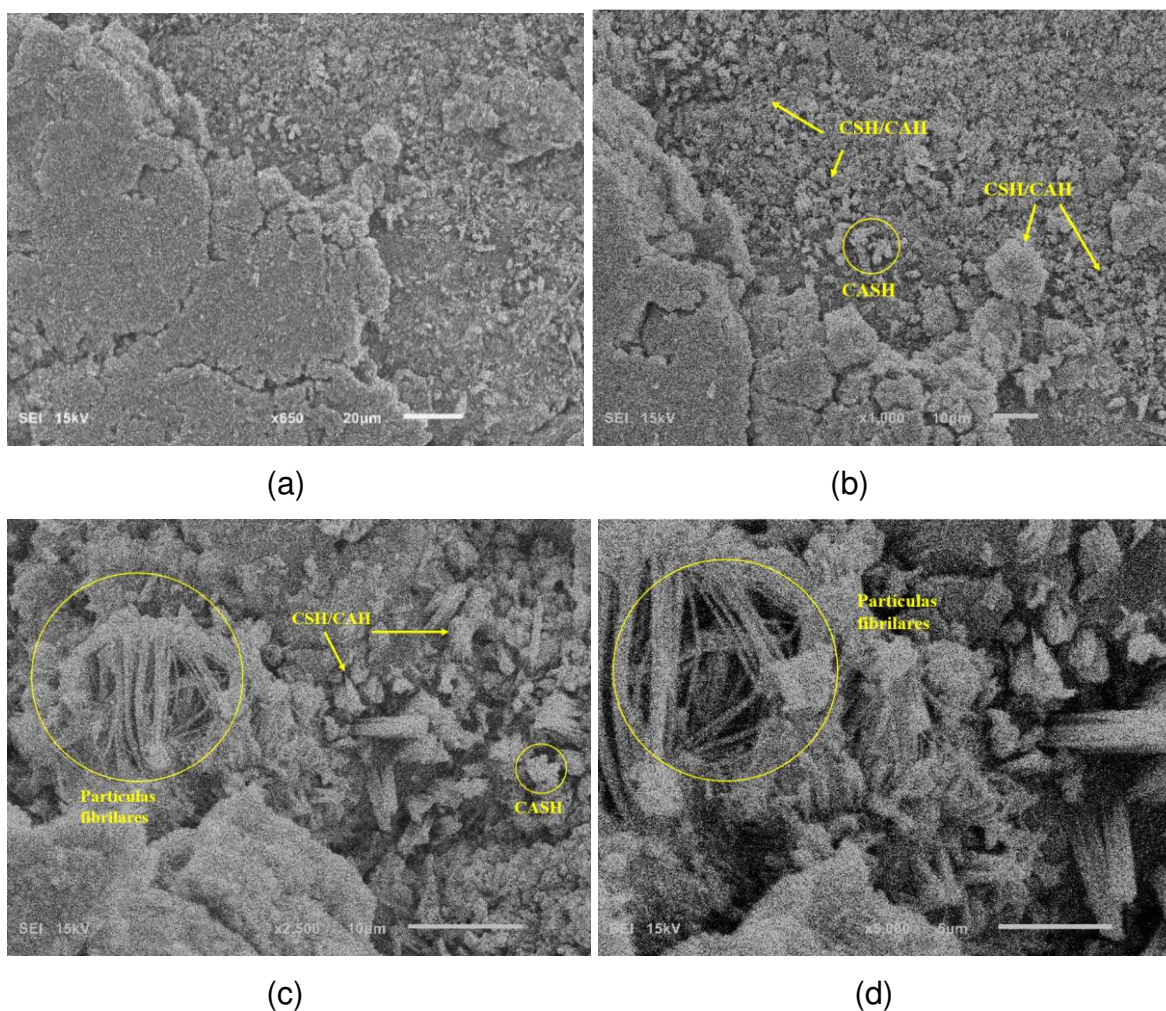
A despeito da adsorção dos metais pesados desta solução contaminante pela superfície externa das partículas do sistema solo-escória de aciaria (Capítulo 5), supõe-se que tais metais adsorvidos não tenham impedido as reações químicas de hidratação das moléculas de água sobre os componentes cimentícios das escórias de aciaria elétrica. Para os corpos de prova cuja percolação contaminante se deu após a cura prévia de 7 dias (Figura 35) e 28 dias (Figura 36), tais compostos cimentícios também foram formados, o que já era previsível, visto que tal processo se deu sob condições ideais de hidratação dos componentes cimentícios das escórias de aciaria elétrica (previamente à percolação contaminante).

Foram identificadas partículas fibrilares em todas as amostras ensaiadas (Figuras 34, 35 e 36). Tratam-se de estruturas alongadas e finas que podem ser observadas em materiais cimentícios. Quimicamente, essas partículas são frequentemente compostas de produtos de hidratação de cimento, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H) (Zhang *et al.*, 2022). No contexto de uma mistura de solo argiloso e escória de aciaria, essas partículas fibrilares desempenham um papel crucial na microestrutura do material. Sua presença contribui para o desenvolvimento da resistência mecânica e durabilidade da matriz cimentícia, uma vez que elas podem criar uma rede interligada que melhora a

coesão e a capacidade de suporte de carga do material (Zhang *et al.*, 2022; Jing *et al.*, 2020).

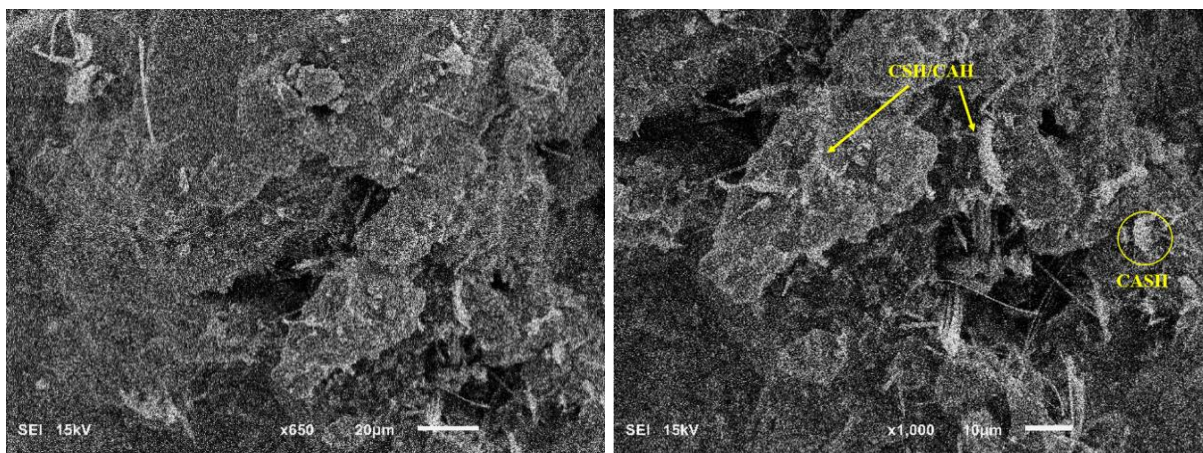
Por meio do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), essas partículas foram identificadas, revelando sua morfologia característica e sua distribuição na matriz da mistura solo-escória. Em composições contendo escória de aciaria, as partículas fibrilares podem estar associadas a produtos de reação pozolânica entre o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do cimento e os componentes reativos da escória, como silicatos e aluminatos. A identificação dessas partículas é essencial para entender a evolução das propriedades mecânicas e hidráulicas da mistura de solo e escória, bem como para otimizar seu desempenho como *liner* em aterros sanitários (Jing *et al.*, 2020; Shi *et al.*, 2022).

Figura 34 - Micrografias da amostra da mistura ideal sem cura obtidas por MEV: (a) x650; (b) x1000; (c) x2500 e (d) x5000



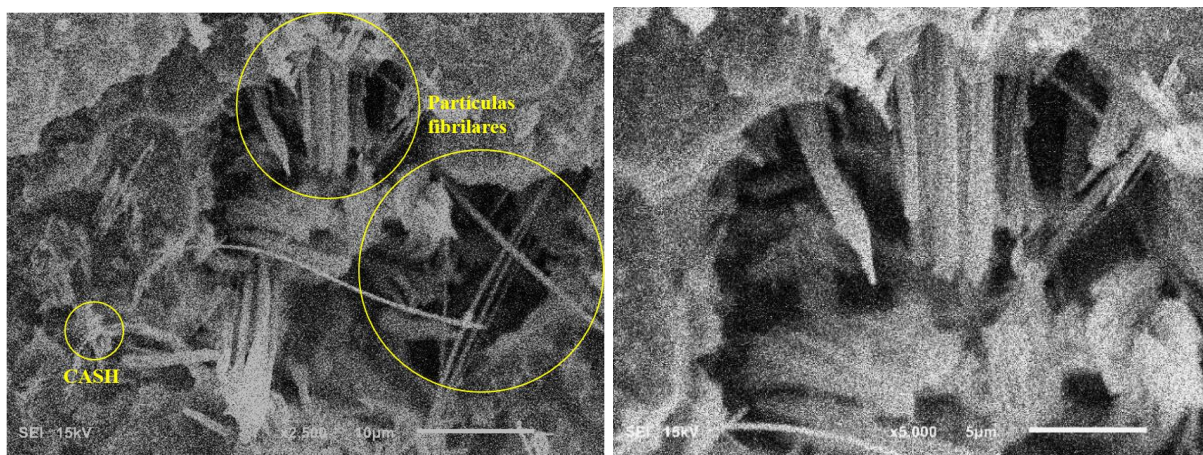
Fonte: Resultado da pesquisa

Figura 35 - Micrografias da amostra da mistura ideal com cura de 7 dias obtidas por MEV: (a) x650; (b) x1000; (c) x2500 e (d) x5000



(a)

(b)

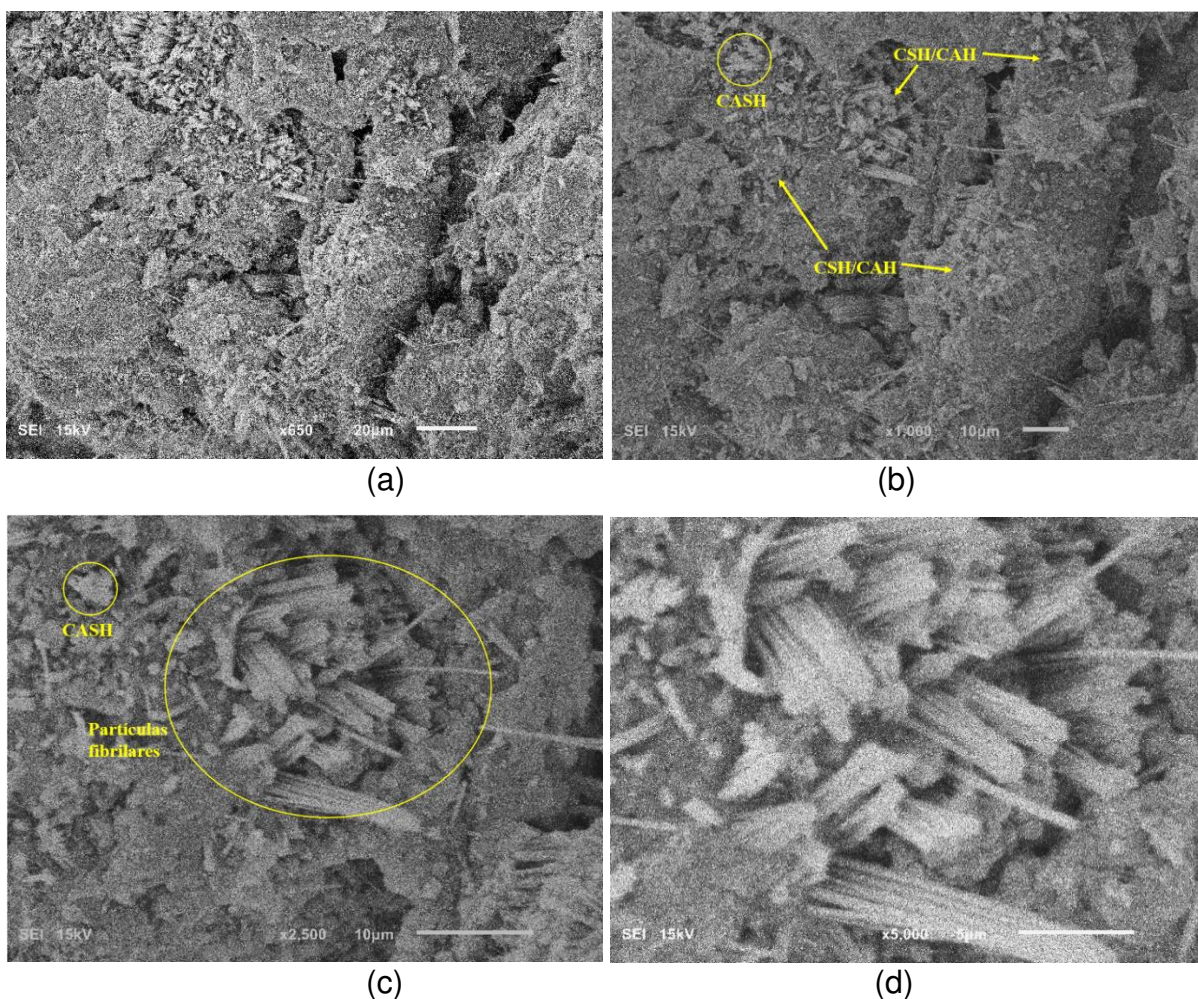


(c)

(d)

Fonte: Resultado da pesquisa

Figura 36 - Micrografias da amostra da mistura ideal com cura de 28 dias obtidas por MEV: (a) x650; (b) x1000; (c) x2500 e (d) x5000



Fonte: Resultado da pesquisa

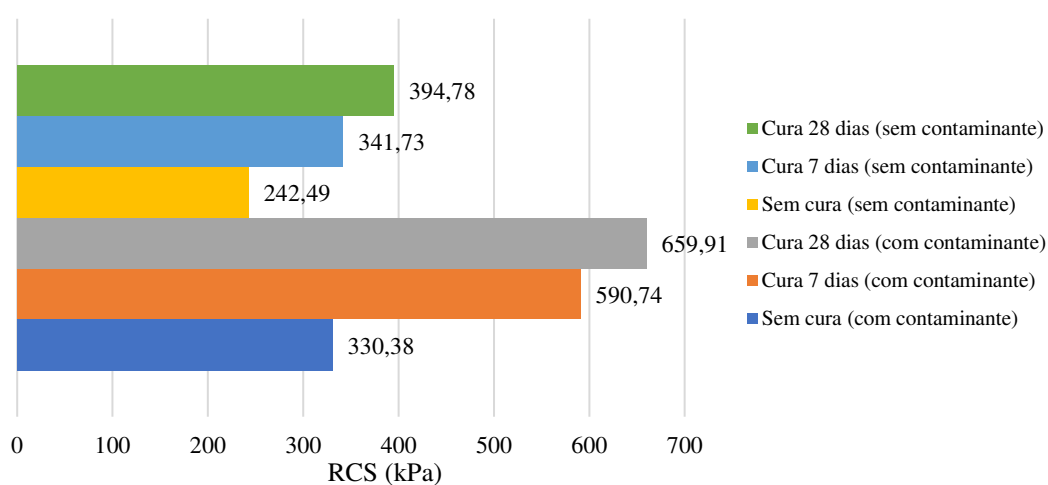
4.4.2 Ensaios mecânicos: RCS e RT

A Tabela 28 e a Figura 37 mostram os resultados obtidos para o ensaio de RCS após a percolação dos corpos de prova da mistura ideal pela solução contaminante multiespécie. São mostrados também, a título de comparação, os resultados obtidos para corpos de prova da mistura ideal percolados por água (sem contaminante). Para esses ensaios, foram consideradas as mesmas condições iniciais (prévias à percolação) sem cura (0 dia) e com curas de 7 dias e 28 dias.

Tabela 28 - Resultados do ensaio de RCS (em kPa) para a mistura ideal previamente percolada com e sem contaminante (sem cura e com curas de 7 dias e 28 dias)

Condição prévia de percolação	Sem cura (0 dia)	Cura de 7 dias	Cura de 28 dias	Varição de 0 dia para 7 dias de cura	Varição de 7 dias para 28 dias de cura
Com contaminante	330,38	590,74	659,91	78,81%	11,71%
Sem contaminante	242,49	341,73	394,78	40,93%	15,52%

Figura 37 - Gráfico comparativo dos resultados do ensaio de RCS sob diferentes condições prévias de cura e de percolação (com e sem contaminante)



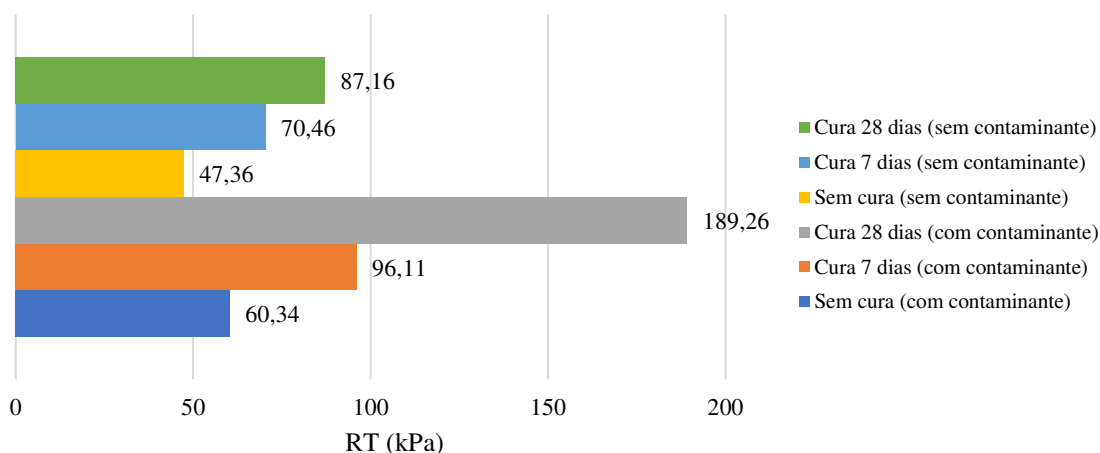
Fonte: Resultado da pesquisa

A Tabela 29 e a Figura 38 mostram os resultados obtidos para o ensaio de RT após a percolação dos corpos de prova da mistura ideal pela solução contaminante multiespécie. São mostrados também, a título de comparação, os resultados obtidos para corpos de prova da mistura ideal percolados por água (sem contaminante). Para esses ensaios, foram consideradas as condições iniciais (prévias à percolação) sem cura (0 dia) e com curas de 7 dias e 28 dias.

Tabela 29 - Resultados do ensaio de RT (em kPa) para a mistura ideal previamente percolada com e sem contaminante (sem cura e com curas de 7 dias e 28 dias)

Condição prévia de percolação	Sem cura (0 dia)	Cura de 7 dias	Cura de 28 dias	Varição de 0 dia para 7 dias de cura	Varição de 7 dias para 28 dias de cura
Com contaminante	60,34	96,11	189,26	59,28%	96,92%
Sem contaminante	47,36	70,46	87,16	48,77%	23,70%

Figura 38 - Gráfico comparativo dos resultados do ensaio de RT sob diferentes condições prévias de cura e de percolação (com e sem contaminante)



Fonte: Resultado da pesquisa

Destaca-se o fato que, ao ser percolado pela solução multiespécie, o *liner* correspondente à mistura ideal continua atendendo ao critério de $RCS > 200 \text{ kPa}$. No que concerne à RT, após a percolação pelo contaminante, constata-se experimentalmente que os valores estipulados pelo critério $20 \text{ kPa} \leq RT \leq 90 \text{ kPa}$ foram superados. Percebe-se que houve um incremento nos resultados de RCS e RT obtidos ao promover a percolação da solução contaminante multiespécie nas amostras, o que também foi observado no estudo de Devarangadi e M (2020), em que foi utilizada uma mistura de solo-resíduos siderúrgicos submetida à percolação de metais pesados. Para esses autores, a interação química entre os metais pesados presentes na solução contaminante e a estrutura do solo ou da mistura de solo com escória de aciaria pode resultar na melhoria das propriedades mecânicas. Isso ocorre devido a vários mecanismos químicos e físicos que promovem a estabilização e o reforço da matriz do material.

Quando metais pesados entram em contato com a mistura de solo e escória de aciaria, eles podem ser adsorvidos na superfície das partículas da escória, formando complexos estáveis. A escória de aciaria contém óxidos e silicatos que possuem alta capacidade de adsorção para cátions metálicos. Esse processo de adsorção pode preencher espaços porosos e microfissuras na estrutura do material, reduzindo a porosidade e aumentando a densidade, o que leva a uma maior resistência mecânica (Yang *et al.*, 2018; Devarangadi; M, 2020).

Pesquisas, como a de Gou *et al.* (2022), demonstraram que a incorporação de metais pesados pode induzir a formação de novas fases minerais e precipitados dentro da matriz cimentícia, contribuindo para a coesão interna. Por exemplo, a formação de hidróxidos e carbonatos metálicos pode ocorrer, proporcionando um efeito cimentante adicional que aumenta a resistência à compressão e à tração do material.

Além disso, estudos como o de Chi *et al.* (2022) indicam que a presença de metais pesados pode promover reações pozolânicas mais intensas, devido à alteração do pH e à disponibilidade de íons, o que resulta na formação de produtos de hidratação adicionais, como C-S-H. Esses produtos são responsáveis por um aumento significativo na resistência mecânica da matriz.

Metais pesados, como chumbo, cádmio e zinco, quando presentes na solução contaminante, podem interagir com as partículas de solo e escória de aciaria através de processos de adsorção, troca iônica e precipitação. A escória de aciaria, rica em óxidos de cálcio, silício, alumínio e magnésio, possui uma alta capacidade de adsorção para cátions metálicos. Esses cátions podem ser adsorvidos na superfície das partículas de escória, preenchendo microfissuras e poros, o que contribui para a densificação da matriz e, conseqüentemente, para a melhoria das propriedades mecânicas (Ning *et al.*, 2016).

Li *et al.* (2016) exploraram a interação de metais pesados com solos tratados com escória de aciaria, concluindo que a adsorção de metais pesados promoveu a formação de uma rede cimentante mais densa e coesa. Wang *et al.* (2018) também observaram que a presença de cátions metálicos aumentou a produção de gel de C-S-H, melhorando significativamente a resistência mecânica das misturas solo-escória.

Segundo Pacheco e Silva (2005), a interação química entre os íons de uma solução contaminante e os íons de um *liner* argiloso promove alterações na espessura da dupla camada elétrica, das quais resultam mudanças na estrutura do solo, traduzidas pela redução do volume de vazios, aumento da densidade e aumento da rigidez da amostra contaminada.

Estudos que utilizaram escórias de aciaria elétrica em misturas com solo evidenciam um aumento significativo das propriedades mecânicas devido à formação de estruturas de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) e sílico-aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H), estruturas estas que geram uma

matriz mais densa do que a do solo em sua condição natural. A presença de metais pesados nessas misturas intensificou a formação desses compostos cimentícios (Al-Amoudi *et al.*, 2017; Amini; Ghasemi, 2019). Xu e Yi (2020) concluíram que os compostos SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, NaOH , KOH , TiO_2 , P_2O_5 e CaCO_3 podem se dissociar em contato com metais pesados, elevando o pH do meio e formando hidróxidos metálicos. Esta elevação no pH favorece as reações pozolânicas entre a sílica ativa e o hidróxido de cálcio, promovendo a formação de C-S-H.

Além disso, Dal Bosco *et al.* (2006) destacam que a remoção de metais pesados de efluentes aquosos é frequentemente realizada por precipitação com CaO , um composto presente em grandes concentrações na escória de aciaria. A precipitação de hidróxidos metálicos, combinada com a alta concentração de CaO , promove a formação de novos produtos de hidratação, como C-A-H e C-A-S-H, que atuam como agentes cimentantes adicionais. Esses compostos cimentícios, resultantes das reações intensificadas pela presença de metais pesados, aumentam a coesão e a densidade da matriz, melhorando significativamente as propriedades mecânicas da mistura. Assim, existe uma relação de causa e consequência entre a dissociação de compostos em presença de metais pesados e a intensificação da formação de agentes cimentantes, o que explica a melhoria das propriedades mecânicas das misturas de solo e escória de aciaria expostas a contaminantes metálicos (Zhang *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2023).

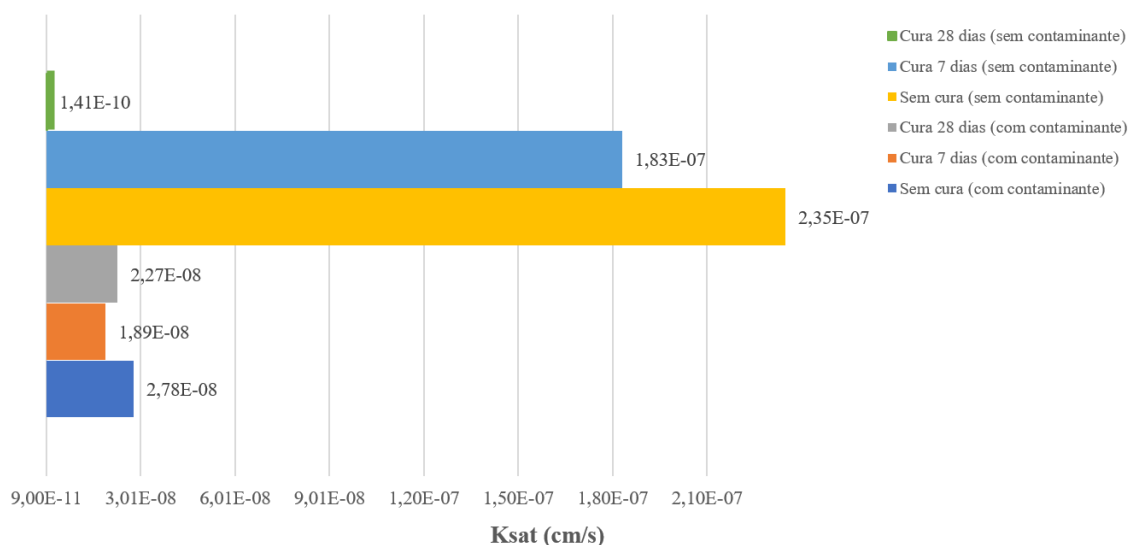
4.4.3 Ensaio hidráulico: K_{sat}

A Tabela 30 e a Figura 39 mostram os resultados obtidos para o ensaio de K_{sat} após a percolação dos corpos de prova da mistura ideal pela solução contaminante multiespécie. São mostrados também, a título de comparação, os resultados obtidos para corpos de prova da mistura ideal percolados por água (sem contaminante). Para esses ensaios, foram consideradas as condições iniciais (prévias à percolação) sem cura (0 dia) e com curas de 7 dias e 28 dias.

Tabela 30 - Resultados do ensaio de K_{sat} (em cm/s) para a mistura ideal previamente percolada com e sem contaminante (sem cura e com curas de 7 dias e 28 dias)

Condição de percolação	Sem cura (0 dia)	Cura de 7 dias	Cura de 28 dias	Varição de 0 dia para 7 dias de cura	Varição de 7 dias para 28 dias de cura
Com contaminante	2,78E-08	1,89E-08	2,27E-08	-32,01%	20,11%
Sem contaminante	2,35E-07	1,83E-07	1,41E-10	-26,63%	-81,56%

Figura 39 - Gráfico comparativo dos resultados do ensaio de K_{sat} sob diferentes condições prévias de cura e de percolação (com e sem contaminante)



Fonte: Resultado da pesquisa

Percebe-se, de maneira geral, que houve uma redução da permeabilidade saturada, em relação aos corpos de prova percolados com água, ao submeter a mistura ideal à percolação de metais pesados. Ainda que, para os corpos de prova submetidos à cura prévia de 28 dias, o K_{sat} da condição percolada por contaminante tenha sido maior que o da condição percolada sem contaminante, a ordem de grandeza do K_{sat} (10^{-8} cm/s) ainda se encontra dentro dos limites estabelecidos por órgãos, como a CETESB (10^{-7} cm/s), ou seja, o *liner* correspondente à mistura ideal mostra-se capaz de atender às exigências de condutividade hidráulica estabelecidas por órgãos normativos, evidenciando, assim, a sua viabilidade técnica quanto aos requisitos hidráulicos relacionados ao fluxo advectivo.

Sugere-se que ocorreu uma interação química dos íons presentes no contaminante e os íons da mistura ideal (solo+escória de aciaria), provocando o aumento da espessura da dupla camada elétrica. Essa condição pode promover a dispersão, responsável pela expansão das partículas, e, conseqüentemente, diminuir o volume de vazios da mistura. Essa mudança na estrutura interna da mistura pode ser responsável pela redução na condutividade hidráulica (K_{sat}) (Pacheco; Silva, 2005).

A interação entre a mistura ideal de solo-escória de aciaria e contaminantes metálicos pesados exerce uma influência significativa sobre a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) dessa mistura. A literatura indica que essa interação química pode resultar tanto na redução quanto na manutenção da K_{sat} em níveis aceitáveis devido a diversos mecanismos físico-químicos (Ganiyu *et al.*, 2019).

Metais pesados presentes na solução contaminante tendem a ser adsorvidos na superfície das partículas da escória de aciaria. Esse processo de adsorção e troca iônica leva à neutralização das cargas superficiais e à formação de complexos estáveis, o que pode diminuir a porosidade e aumentar a coesão interna do material (Bosco, 1997). Estudos, como os realizados por Wang *et al.* (2024) e Luo *et al.* (2021), comprovam o que foi apresentado anteriormente, demonstrando que essa adsorção contribui para a redução da K_{sat} ao promover a densificação da matriz do material e minimizar os espaços vazios que facilitam o fluxo de água.

As trocas catiônicas no ambiente geoquímico envolvendo solo, escória de aciaria e metais pesados são processos cruciais que influenciam a estrutura interna do material e sua condutividade hidráulica. Nesse contexto, a escória de aciaria, composta por óxidos e hidróxidos de cálcio, magnésio, alumínio e ferro, desempenha um papel significativo na adsorção e troca de cátions. Metais pesados, como Pb^{2+} , Cu^{2+} e Zn^{2+} , são atraídos para as superfícies carregadas negativamente das partículas da escória e do solo, onde ocorrem trocas catiônicas com os cátions existentes, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ (Jiang *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2023).

Além disso, a interação química pode resultar na precipitação de hidróxidos e carbonatos metálicos quando os metais pesados reagem com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação da escória. Esses compostos cimentantes adicionais fortalecem a estrutura da mistura, reduzindo ainda mais a condutividade hidráulica. Pesquisas de Yang *et al.* (2018) e Mahedi *et al.* (2019) corroboram o que foi

apresentado anteriormente, ou seja, a premissa de que precipitação de compostos estabilizantes e a formação de complexos catiônicos ajudam a criar uma matriz mais coesa e menos permeável, impedindo aumentos significativos na condutividade hidráulica, mesmo em presença de contaminantes. Assim, a estrutura interna do solo-escória é fortalecida e estabilizada, resultando em melhorias nas propriedades hidráulicas.

Reações pozolânicas também são intensificadas pela presença de metais pesados, que podem alterar o pH do sistema, favorecendo a formação de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), aluminatos de cálcio hidratado (C-A-H) e sílico-aluminatos de cálcio hidratado (C-A-S-H). Estes compostos, conforme destacado por Nag e Shimaoka (2022) e Akula e Little (2020), são cruciais para a coesão e a densidade da mistura, contribuindo para a redução da K_{sat} .

Portanto, estudos apontam que, mesmo com a presença de contaminantes, os mecanismos físico-químicos que ocorrem na interação entre solo e escória de aciaria são eficazes em manter a integridade estrutural e a performance hidráulica do material. As interações complexas entre os metais pesados e os componentes da mistura levam à formação de estruturas estabilizantes que evitam aumentos indesejados na condutividade hidráulica (Francisca; Glatstein, 2019; Liu *et al.*, 2020).

4.5 Conclusões

A partir dos resultados obtidos nesse capítulo, percebeu-se que, mesmo que a mistura ideal seja submetida à percolação de metais pesados, o *liner* correspondente à mistura continua atendendo ao critério de $RCS > 200 \text{ kPa}$. Diferentemente da RT, a qual, após a percolação pelo contaminante, superou os valores do critério $20 \text{ kPa} \leq RT \leq 90 \text{ kPa}$. No ensaio de permeabilidade os valores de permeabilidade saturada (K_{sat}) satisfazem o critério exigido ($K_{sat} < 10^{-7} \text{ cm/s}$) dos aterros sanitários após permeação contínua com solução contaminante.

Foram identificadas partículas fibrilares em todas as amostras ensaiadas (sem cura, cura 7 dias e cura 28 dias). Quimicamente, essas partículas são frequentemente compostas de produtos de hidratação de cimento, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e os aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H). Essas partículas fibrilares desempenham um papel crucial na microestrutura do material. Sua presença contribui

para o desenvolvimento da resistência mecânica e durabilidade da matriz cimentícia, uma vez que elas podem criar uma rede interligada que melhora a coesão e a capacidade de suporte de carga do material.

Observou-se que os metais pesados da solução contaminante podem interagir com as partículas de solo e escória de aciaria através de processos de adsorção, troca iônica e precipitação. A escória de aciaria, rica em óxidos de cálcio, silício, alumínio e magnésio, possui uma alta capacidade de adsorção para cátions metálicos. Esses cátions podem ser adsorvidos na superfície das partículas de escória, preenchendo microfissuras e poros, o que contribui para a densificação da matriz e, conseqüentemente, para a melhoria das propriedades mecânicas e hidráulicas.

A presença de metais pesados na mistura ideal intensificou a formação de compostos cimentícios. Por meio dos resultados obtidos, foi possível perceber um aumento significativo das propriedades mecânicas, podendo estar associado à formação de estruturas de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) e sílico-aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H), estruturas estas que geram uma matriz mais densa do que a do solo em sua condição natural.

As trocas catiônicas no ambiente geoquímico envolvendo solo, escória de aciaria e metais pesados são processos cruciais que influenciam a estrutura interna do material e sua condutividade hidráulica. Percebe-se que, mesmo com a presença de contaminantes, os mecanismos físico-químicos que ocorrem na interação entre solo e escória de aciaria foram eficazes em manter a integridade estrutural e a performance hidráulica do material. As interações complexas entre os metais pesados e os componentes da mistura levaram à formação de estruturas estabilizantes que evitaram aumentos indesejados na condutividade hidráulica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKULA, P.; LITTLE, D. N. Analytical tests to evaluate pozzolanic reaction in lime stabilized soils. **Methods X**. Volume 7, 2020, 100928.
- AL-AMOUDI, O. S. B.; AL-HOMIDY, A. A.; MASLEHUDDIN, M.; SALEH, T. A. Method and Mechanisms of Soil Stabilization Using Electric Arc Furnace Dust. **Scientific Reports**, volume 7, n. 1, p. 46676, 2017.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5084**: Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. 2003, USA.
- AMINI, O.; GHASEMI, M. Laboratory study of the effects of using magnesium slag on the geotechnical properties of cement stabilized soil. **Construction and Building Materials**, 223, p. 409-420, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12025**: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio. 2012, Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14545**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. 2021a, Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13292**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. 2021b, Rio de Janeiro.
- ALONSO, T. P. **Condutividade hidráulica de solos compactados em ensaios com permeâmetro de parede flexível**. Dissertação de mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo, 120 p., 2005.
- BALALI, A.; GHOLAMI, S.; JAVANMARDI, M.; VALIPOUR, A.; YUNUSA-KALTUNGO, A. Assessment of heavy metal pollution in the soil of a construction and demolition waste landfill. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**. Volume 20, December 2023.
- BOSCOV, M.E.G. **Contribuição ao Projeto de Sistemas de Contenção de Resíduos Perigosos Utilizando Solos Lateríticos**. São Paulo: Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado – Escola Politécnica. 259p, 1997.
- BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 5ª ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 647p., 1989.
- CANESCHI, F. P. **Estudos geoambientais em solos modificados quimicamente**. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-

- Graduação em Engenharia Civil, Doutorado. Viçosa – MG, 2012.
- Companhia de tecnologia e de saneamento ambiental de São Paulo - CETESB. **Resíduos sólidos industriais**. São Paulo/SP, 1993.
- CHAKRABORTY, M.; RAHAT, M. M. R.; CHOUDHURY, T. R.; NIGAR, R.; LIU, G.; HABIB, A. Heavy metal contamination and health risk assessment of road dust from landfills in Dhaka-Narayanganj, Bangladesh. **Emerging Contaminants**, volume 10, 2024.
- CHEN, Y.; LIANG, W.; LI, Y.; WU, Y.; CHEN, Y.; XIAO, W.; ZHAO, L.; ZHANG, J.; LI, H. Modification, application and reaction mechanisms of nano-sized iron sulfide particles for pollutant removal from soil and water: a review. **Chem. Eng. J.**, 362, pp. 144-159, 2019.
- CHENG, Q.; TANG, C.; CHEN, Z.; EL-MAARRY, M. R.; ZENG, H.; SHI, B. Tensile behavior of clayey soils during desiccation cracking process. **Engineering Geology**, volume 279, 2020.
- CHI, L.; LU, S.; LI, Z.; HUANG, C.; JIANG, H.; PENG, B. Recycling of ferronickel slag tailing in cementitious materials: Activation and performance. **The Science of the total environment**. 2022.
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente: Resolução nº 430 (complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005). Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil n. 62, Seção 1, p. 89-91, 2011.
- COSTA, C. M. C. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos**. Tese de doutorado em geotecnia, Universidade de Brasília, 2015.
- DAL BOSCO, S. M.; JIMENEZ, R. S.; VIGNADO, C.; FONTANA, J.; GERALDO, B.; FIGUEIREDO, F. C. A.; MANDELLI, D.; CARVALHO, W. A. Removal of Mn(II) and Cd(II) from wastewaters by natural and modified clays. **Adsorption**, Volume 12, pages 133-146, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 181: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral**. (1994c). Rio de Janeiro.

- DEVARANGADI, M.; M, U. S. Correlation studies on geotechnical properties of various industrial byproducts generated from thermal power plants, iron and steel industries as liners in a landfill- a detailed review. **Journal of Cleaner Production**, Volume 261, 2020.
- DEVARANGADI, M. e M, U. S. Effect on engineering properties of ground granulated blast furnace slag admixed with laterite soil, cement and bentonite mixtures as a liner in landfill. **Journal of Cleaner Production**, Volume 329, 2021.
- DU, C.; LI, Z. Contamination and health risks of heavy metals in the soil of a historical landfill in northern China. **Chemosphere**, Volume 313, 2023.
- MOZEJKO, C. A.; FRANCISCA, F. M. Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 239, 117901, 2020.
- FRANCISCA, F. M.; GLATSTEIN, D. A. Environmental application of basic oxygen furnace slag for the removal of heavy metals from leachates. **Journal of Hazardous Materials**, 121294, 2019.
- GANIYU, S. A.; ATOYEBI, M. K.; ARE, K. S.; OLURIN, O. T.; BADMUS, B. S. Soil physicochemical and hydraulic properties of petroleum-derived and vegetable oil-contaminated Haplic Lixisol and Rhodic Nitisol in southwest Nigeria. **Environmental monitoring and assessment**. 2019.
- GARG, A.; REDDY, N. G.; HUANG, H.; BURAGOHAIN, P.; KUSHVAHA, V. Modelling contaminant transport in fly ash–bentonite composite landfill liner: mechanism of different types of ions. **Scientific Reports**, volume 10, Article number: 11330, 2020.
- GOU, W.; MO, X.; REN, C.; WANG, H.; LI, W. Formation of crystalline multimetallic layered double hydroxide precipitates during uptake of Co, Ni, and Zn onto γ -alumina: Evidence from EXAFS, XRD, and TEM. **Chemosphere**. 2022.
- JAYASUNDARA, R. B. C. D.; UDAYAGEE, K. P. P.; KARUNARATHNA, A. K.; MANAGE, P. M.; NUGARA, R. N.; ABHAYAPALA, K. M. R. D. Permeable Reactive Barriers as an In Situ Groundwater Remediation Technique for Open Solid Waste Dumpsites: a Review and Prospect. **Water, Air, & Soil Pollution**.

Volume 234, article number 50, 2023.

- JING, W.; JIANG, J.; DING, S.; DUAN, P. Hydration and microstructure of steel slag as cementitious material and fine aggregate in mortar. **Molecules**, volume 25, 4456, 2020.
- JIANG, S.; HUANG, L.; NGUYEN, T. A.; OK, Y. S.; RUDOLPH, V.; YANG, H.; ZHANG, D. Copper and zinc adsorption by softwood and hardwood biochars under elevated sulphate-induced salinity and acidic pH conditions. **Chemosphere**. 2015.
- JONES, A. B.; BROWN, N. L. Chemical interactions of metals with polymer geosynthetic barriers. **Journal of Environmental Engineering**, volume 143 (Issue 10), 04017053, 2017.
- HE, Y.; HU, G.; WU, D.; ZHU, K.; ZHANG, K. Contaminant migration and the retention behavior of a laterite–bentonite mixture engineered barrier in a landfill. **Journal of Environmental Management**, Volume 304, 15 February 2022.
- KUMAR, R.; KUMARI, S. Exploring the geotechnical and microstructural properties of composite mixtures for landfill liner materials: an experimental investigation. **Environmental Science and Pollution Research International**, Volume 31 (Issue 22): 33011-3302926, Apr 2024.
- LANGE, L. C.; SIMÕES, G. F.; FERREIRA, C. F. A.; COELHO, H. M. G. Estudo do transporte de contaminantes em meios porosos aplicado a aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos. In: Armando Borges de Castilhos Jr.; Liséte Celina Lange; Luciana Paulo Gomes; Neide Pessin. (Org.). **Alternativas de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos para Pequenas Comunidades**. Rio de Janeiro: RIMa/ABES, volume 1, p. 85-92, 2002.
- LI, X.; POON, C. S.; SUN, H. Sustainable construction materials: Recycling of industrial waste for production of building materials. **Journal of Cleaner Production**, volume 129, pages 274-284, 2016.
- LIU, W.; LI, H.; ZHU, H.; XU, P. Effects of Steel-Slag Components on Interfacial-Reaction Characteristics of Permeable Steel-Slag-Bitumen Mixture. **Materials**. Basel, Switzerland. 2020.

- LOPES, E. C. **Avaliação tecnológica de coprodutos siderúrgicos visando o melhoramento de propriedades de engenharia de solos tropicais.** Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, tese de doutorado, 2021.
- LUO, X.; ZHANG, J. B.; HE, L.; YANG, X. J.; LÜ, P. Y. Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag. **Huan jing ke xue = Huanjing kexue.** Volume 42 (Issue 5): pages 2324-2333, 2021.
- MA, W.; TAI, L.; QIAO, Z.; ZHONG, L.; WANG, Z.; FU, K.; CHEN, G. Contamination source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil around municipal solid waste incinerator: A case study in North China. **Science of The Total Environment**, Volumes 631–632, Pages 348-357, 2018.
- 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**, New York, 2019.
- MARINHO, A. P. F.; NASCIMENTO, C. W. A.; CUNHA, K. P. V. Soil degradation and Cu, Cr, Ni, Pb and Zn contamination in dumpsites of humid and semiarid tropical regions in northeastern Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, Volume 194, article number 459, 2022.
- NAG, M.; SHIMAOKA, T. A novel and sustainable technique to immobilize lead and zinc in MSW incineration fly ash by using pozzolanic bottom ash. **Journal of environmental management.** Article number 117036, volume 329, 2022.
- NING, D.; LIANG, Y.; SONG, A.; DUAN, A.; LIU, Z. In situ stabilization of heavy metals in multiple-metal contaminated paddy soil using different steel slag-based silicon fertilizer. **Environmental science and pollution research international.** Volume 23, Issue 23, 2016.
- ÖZÇOBAN, M. S.; ACARER, S.; TÜFEKCI, N. Effect of solid waste landfill leachate contaminants on hydraulic conductivity of landfill liners. **Water Science & Technology**, Volume 85 (Issue 5): 1581–1599, 2022.
- PACHECO e SILVA, D. **Influência da contaminação por cloreto de cobre na resistência ao cisalhamento de solos utilizados em liners.** Dissertação, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2005.

- PENTEADO, J. O.; BRUM, R. L.; RAMIRES, P. F.; GARCIA, E. M.; SANTOS M.; JÚNIOR F. M. R. S. Health risk assessment in urban parks soils contaminated by metals, Rio Grande city (Brazil) case study. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Volume 208, 2021.
- ROSIN-PAUMIER, S.; TOUZE-FOLTZ, N.; PANTET, A. Impact of a synthetic leachate on permittivity of GCLs measured by filter press and oedopermeameter tests. **Geotextiles and Geomembranes**, volume 29 (Issue 3), p. 211-221, 2011.
- SAADATLU, E. A.; BARZINPOUR, F.; YAGHOUBI, S. A sustainable model for municipal solid waste system considering global warming potential impact: A case study. **Computers & Industrial Engineering**, Volume 169, 2022.
- SELIM, H. M.; AMACHER, M. C. **Reactivity and Transport of Heavy Metals in Soils**. Boca Raton, New York, London, Tokyo: Lewis Publishers, 1997. ISBN: 0-87371-473-3.
- SHI, J.; WANG, S.; CAO, W.; SU, J. Mechanical Properties and Strengthening Mechanism of Dredged Silty Clay Stabilized by Cement and Steel Slag. **Materials**, Volume 15 (Issue 11): 3823, 2022.
- SILVA, T. A.; et al. Evaluation of mechanical behavior and stability of geosynthetic clay liners using steel slag as a component of bentonite. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Volume 32 (Issue 10), 04020309, 2020.
- SOUTO, G. D'A. B.; POVINELLI, J. **Características do lixiviado de aterros sanitários no Brasil**. In: 24^º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte, MG, 2007. p. 16.
- SOUZA, V. B.; HOLLAS, C. E. H.; BORTOLI, M.; MANOSSO, F. C.; SOUZA, D. Z. Heavy metal contamination in soils of a decommissioned landfill southern Brazil: Ecological and health risk assessment. **Chemosphere**, Volume 339, 2023.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Code of Federal Regulations** (2012). Washington.
- XU, B.; YI, Y. Use of ladle furnace slag containing heavy metals as a binding material in civil engineering. **The Science of the total environment**, Volume 705, 135854,

February 2020.

- XU, Z.; MA, Y.; WANG, J.; SHEN, X. Propriedades de preparação e hidratação de materiais cimentícios compósitos à base de escória de aço com alta resistência. **Materiais**, (Basel, Suíça). 2023.
- WANG, J.; BAI, Z.; LU, Y. Stabilization/solidification of heavy metal-contaminated soil using waste steel slag. **Waste Management**, volume 78, pages 693-702, 2018.
- WANG, A.; WU, M.; LI, Z.; ZHOU, Y.; ZHU, F.; HUANG, Z. Utilizing different types of biomass materials to modify steel slag for the preparation of composite materials used in the adsorption and solidification of Pb in solutions and soil. **The Science of the total environment**. 2024.
- WANG, C.; LIU, G. Hydraulic properties of GCLs under chemical exposure. **Geosynthetics International**, volume 23 (Issue 2), pages 91-102, 2016.
- WANG, Q.; CHEN, J.; LIU, J.; YU, M.; GENG, W.; WANG, P.; WU, Z. Relationships between shear strength parameters and microstructure of alkaline-contaminated red clay. **Environmental science and pollution research international**. Volume 27 (Issue 1): pages 1-15, 2020.
- WILLIAMS, P. T. Waste Treatment and Disposal. **Jhon Wiley & Sons**, Ltd, 2nd edition. ISBN: 0-470-84912-6, 2005.
- WU, Q.; LEUNG, J. Y. S.; GENG, X.; CHEN, S.; HUANG, X.; LI, H.; HUANG, Z.; ZHU, L.; CHEN, J.; LU, Y. Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: Implications for dissemination of heavy metals. **Science of The Total Environment**, Volumes 506–507, Pages 217-225, 2015.
- YANG, A. P.; WANG, X. Y.; XIAO, X. Y.; WANG, Q. R.; HU, J. H.; GUO, Z. H.; PENG, C. Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile. **Huan jing ke xue= Huanjing kexue**. 2023.
- YANG, L.; WEN, T.; WANG, L.; MIKI, T.; BAI, H.; LU, X.; YU, H. Nagasaka T The stability of the compounds formed in the process of removal Pb(II), Cu(II) and Cd(II) by steelmaking slag in an acidic aqueous solution. **Journal of environmental management**. 2018.

YONG, R. N. **Geoenvironmental engineering: contaminated soils, pollutant fate and mitigation**. Boca Raton, London, New York, Washington, D. C.: CRC Press, 2001. ISBN: 0-8493-8289-0.

ZHANG, F.; LI, Y.; ZHANG, J.; GUI, X.; ZHU, X.; ZHAO, C. Effects of slag-based cementitious material on the mechanical behavior and heavy metal immobilization of mine tailings based cemented paste backfill, **Heliyon**, volume 8, Issue 9, 2022.

ZHANG, H.; et al. Surface roughness characterization and its influence on the hydraulic performance of textured geomembranes. **Geotextiles and Geomembranes**, Volume 49 (Issue 3), pages 421-430, 2021.

CAPÍTULO 5. Avaliação do potencial de adsorção de metais pesados por *liner* de solo-resíduos siderúrgicos

5.1. Introdução

A produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), especialmente oriundos de setores industriais e urbanos, tem crescido de forma contínua. Esses resíduos precisam ser encaminhados para destinos finais apropriados para minimizar seus impactos ambientais. As áreas onde esses resíduos são dispostos estão fortemente associadas a riscos de contaminação ambiental, particularmente em relação à poluição do solo por metais pesados, como As, Ag, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Sn e Zn (Yong, 2001). Metais pesados tornam-se prejudiciais à saúde humana, bem como à flora e fauna, quando presentes em concentrações superiores às necessárias para o funcionamento adequado dos organismos. Além disso, esses metais possuem a capacidade de se acumular nos organismos, não sendo eliminados e frequentemente causando distúrbios fisiológicos (Chakraborty, 2024).

Para garantir um descarte apropriado dos resíduos sólidos urbanos (RSU), é essencial utilizar barreiras impermeáveis, ou *liners*, que devem possuir características funcionais específicas, incluindo baixa condutividade hidráulica, alta resistência mecânica e capacidade de adsorção. Além disso, essas barreiras devem ser resilientes às condições climáticas adversas e manter suas propriedades ao longo de todo o período de projeto (Devarangadi; M, 2021). Quanto aos materiais de construção que as compõem, podem ser utilizados materiais naturais, como o solo, e artificiais, como os geossintéticos (geomembranas e GCLs), e até mesmo a combinação desses materiais (Alonso, 2005).

Liners de argila compactada têm sido amplamente estudados devido à sua baixa permeabilidade e alta capacidade de adsorção de contaminantes. Estudos como o de González-Costa (2017) demonstram que a argila compactada pode efetivamente retardar o transporte de metais pesados, como chumbo (Pb) e cádmio (Cd), devido à sua estrutura lamelar e capacidade de troca catiônica. No entanto, a heterogeneidade das argilas e a susceptibilidade à fissuração representam desafios significativos para sua eficácia em longo prazo.

Em busca de alternativas mais eficazes, pesquisadores têm investigado *liners* compostos por misturas de solo-bentonita e solo-cal. A bentonita, uma argila com alta capacidade de expansão e troca catiônica, tem se mostrado eficiente na retenção de contaminantes devido à sua estrutura de poros fechados (Zhu *et al.*, 2024). Zhu *et al.* (2024) evidenciaram que os *liners* de solo-bentonita apresentam uma capacidade de adsorção significativamente superior aos *liners* de argila compactada, embora sejam mais caros e menos disponíveis. Por outro lado, a adição de cal ao solo melhora suas propriedades mecânicas e reduz a permeabilidade, conforme demonstrado por Ojuri e Oluwatuyi (2018), embora o impacto em longo prazo e em condições de alta concentração de contaminantes ainda necessite de mais estudos.

No que diz respeito aos *liners* de argila-escória, a literatura é ainda escassa, indicando a originalidade e a relevância dessa pesquisa. A utilização de escória de aciaria em misturas de solo para *liners* oferece uma solução sustentável, ao reutilizar resíduos industriais e potencialmente melhorar as propriedades mecânicas e hidráulicas do *liner* (Marques *et al.*, 2024).

Alguns estudos, como os de Aswathy e Sunil (2024), Zhan *et al.* (2024) e Zhan *et al.* (2022), indicam que a escória de aciaria pode aumentar a resistência à compressão e reduzir a permeabilidade do solo, além de potencialmente aumentar a capacidade de adsorção de metais pesados devido à presença de óxidos metálicos em sua composição. No entanto, as lacunas existentes na literatura destacam a necessidade de pesquisas adicionais para avaliar de forma sistemática o desempenho desses materiais individualmente sem a presença de aditivos, como bentonita ou cimento, de forma a entender melhor os mecanismos de adsorção específicos envolvidos.

A utilização de resíduos siderúrgicos em misturas de solo para *liners* em aterros sanitários tem sido explorada como uma solução sustentável e eficiente capaz de minimizar a migração de contaminantes para o solo e as águas subterrâneas. Pesquisas indicam que a adição de escórias de aciaria ao solo pode melhorar suas propriedades mecânicas, como aumento da resistência à compressão, e hidráulicas, como redução da permeabilidade, além de aumentar a capacidade de adsorção de metais pesados (Francisca; Glatstein, 2019; Özçoban *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2023; Fadugba *et al.*, 2024).

A adsorção desempenha um papel crucial no processo de transporte de contaminantes, influenciando diretamente o controle do potencial de contaminação de um meio. Esse fenômeno físico-químico envolve a retenção de íons ou moléculas na superfície de sólidos, reduzindo a mobilidade dos contaminantes e, conseqüentemente, seu impacto ambiental. A eficácia da adsorção depende das propriedades do adsorvente e dos contaminantes, bem como das condições ambientais, como pH e concentração de íons (Smith *et al.*, 2018; Rajendran *et al.*, 2022).

Salomons (1995) explica que o fenômeno da adsorção ocorre quando partículas fornecem superfícies disponíveis para que aconteçam reações com o soluto. Boscov (2008) relata que este fato ocorre devido a existência de forças (físicas ou químicas) que atraem o adsorvato à superfície do sólido. As forças físicas implicam na adsorção física, que ocorre em decorrência de forças eletrostáticas, ou seja, ligação de hidrogênio, forças de Van der Waals, atração e repulsão eletrostática segundo a Lei de Coulomb e interações dipolo-dipolo.

Segundo Buschle *et al.* (2010), o entendimento da cinética de liberação de metais para o meio é crucial na investigação e qualificação de áreas contaminadas pelos metais pesados. Tendo conhecimento dos mecanismos de transporte do contaminante no solo, é possível prever não só os teores acumulados, bem como a taxa de dessorção da substância para a solução do solo. O movimento de contaminantes em um meio determina a quantidade de poluentes transportados e a extensão atingida (Zuquette *et al.*, 2008).

O ensaio em coluna é fundamental para correlacionar a capacidade de adsorção de um *liner* com a migração de contaminantes em condições controladas de laboratório. Este ensaio permite compreender a dinâmica de contaminação no meio poroso. Ao percolar uma solução contaminante através da coluna, é possível observar a interação entre os contaminantes e a matriz do material que compõe o *liner*, avaliando a eficiência do *liner* em adsorver substâncias nocivas, como metais pesados (Schackelford, 1995; Zhang *et al.*, 2016; Xie *et al.*, 2022).

O ensaio de equilíbrio em lote também é essencial para a determinação da capacidade de adsorção de materiais utilizados em *liners* de aterros sanitários. Nesse ensaio, uma quantidade conhecida de material adsorvente, como argila compactada ou misturas de solo-escória de aciaria, é agitada em uma solução contendo

contaminantes até atingir o equilíbrio. A concentração dos contaminantes remanescentes na solução é então medida, permitindo a construção de isotermas de sorção, que representam a relação entre a quantidade de contaminante adsorvida pelo material e sua concentração em solução em equilíbrio (Gupt *et al.*, 2020; Daramola *et al.*, 2024).

Essas isotermas são fundamentais para entender os mecanismos de adsorção e quantificar a capacidade máxima de retenção de contaminantes pelo *liner*. No contexto de *liners* de aterros sanitários, os resultados do ensaio de equilíbrio em lote fornecem dados cruciais para avaliar a eficácia do *liner* em prevenir a migração de contaminantes para o solo e as águas subterrâneas, ajudando a otimizar a composição do *liner* para maximizar sua performance adsortiva e garantir a proteção ambiental (Salomons, 1995; Daramola *et al.*, 2024).

Existem muitos tipos de isotermas, sendo as mais utilizadas as do tipo Linear, de Freundlich (potencial), de Temkin (logarítmica) e a de Langmuir (Chiron *et al.*, 2003; Pereira; Arruda, 2003). Os modelos de Langmuir e Freundlich são os mais comumente empregados quando se trata de adsorção de metais (Linhares *et al.*, 2010; Vega *et al.*, 2011). Usados em conjunto, os diferentes modelos físico-químicos podem fornecer dados que possibilitam uma maior compreensão da interação entre metais pesados e solos.

No caso de metais pesados, os modelos de isoterma, como os de Langmuir e Freundlich, são amplamente utilizados para descrever a sorção em superfícies sólidas, proporcionando parâmetros críticos para a modelagem preditiva do transporte desses poluentes. Na literatura sobre o transporte de contaminantes em *liners* de aterros sanitários, os modelos de isoterma são frequentemente aplicados para avaliar a eficácia de diferentes materiais de *liner*, incluindo argila compactada e misturas com resíduos industriais, como escórias de aciaria (Francisca *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2021). Estudos demonstram que a aplicação desses modelos permite otimizar a composição e a espessura dos *liners*, melhorando a capacidade de contenção de metais pesados e contribuindo para a proteção das águas subterrâneas e do solo adjacente (Shackelford, 1995; Adedeji; Jahan, 2023).

Neste contexto, é fundamental determinar a capacidade de adsorção dos metais potencialmente tóxicos provenientes de resíduos sanitários. Na presente pesquisa, foram realizados ensaios de equilíbrio em lote (*Batch Equilibrium Tests*) e

de percolação em coluna com a mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal (Capítulo 3), visando avaliar a sua capacidade de adsorção em relação aos metais pesados chumbo (Pb), cádmio (Cd), manganês (Mn), zinco (Zn) e cobre (Cu). Essa pesquisa explora a viabilidade de um material alternativo e sustentável. Essa abordagem promove a reutilização de resíduos siderúrgicos, reduzindo o impacto ambiental da indústria. Além disso, oferece uma nova perspectiva sobre o mecanismo adsorptivo dos *liners*, potencialmente aumentando a capacidade de retenção de metais pesados em comparação com os materiais convencionais, procurando entender melhor os mecanismos de adsorção específicos envolvidos, baseando-se na caracterização desses resíduos siderúrgicos. Ao investigar a interação entre a escória de aciaria e os contaminantes, esta pesquisa contribui para o desenvolvimento de soluções inovadoras e mais eficientes para a gestão de resíduos sólidos e a proteção ambiental.

5.2. Materiais

5.2.1 Solo

Foi utilizada, nessa pesquisa, uma amostra de solo residual argiloso proveniente do intemperismo de rochas gnáissicas (Lopes, 2021), aqui denominado “Solo BR 120”. A jazida na qual foi coletada a amostra de solo situa-se na microrregião de Viçosa, na Zona da Mata Norte do Estado de Minas Gerais, no local de coordenadas 725.040,90 m E e 7.699.555,09 m S.

5.2.2 Escórias de aciaria elétrica

As escórias de aciaria utilizadas foram cedidas por uma empresa siderúrgica, proveniente do forno elétrico à arco (escória oxidante primária - EAEP) e do forno panela (escória redutora secundária - EAES), coletadas no pátio de estocagem à céu aberto da referida empresa.

5.2.3 Mistura solo-resíduos siderúrgicos

A mistura solo-resíduos siderúrgico investigada correspondeu à mistura ideal determinada segundo o protocolo de dosagem apresentado no Capítulo 3. Trata-se, portanto, da mistura contendo 64% da amostra de solo residual argiloso, 34,1% de

escória de aciaria elétrica primária (EAEP) e 1,9% de escória de aciaria elétrica secundária (EAES).

5.2.4 Solução contaminante multiespécie

A solução contaminante multiespécie utilizada nos ensaios de percolação em coluna correspondeu à mesma empregada nos estudos do Capítulo 4, apresentando as seguintes concentrações (em mg/L), respectivamente, para os metais Cd, Mn, Cu, Pb e Zn: 0,9; 101,2; 14,9; 10,1 e 35,6.

Já para o ensaio de equilíbrio em lote, foram adotadas 10 concentrações diferentes de solução contaminante de modo a englobar os valores esperados no campo (Tabela 31). Foi preparada uma solução de maior concentração, para cada metal, e as outras a partir de diluições desta.

Tabela 31 - Valores de concentração adotados para cada um dos metais pesados

Metal pesado	Concentrações utilizadas no ensaio (mg/L)									
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Cd	0,11	0,23	0,45	0,90	1,35	1,80	2,25	2,70	3,15	3,60
Mn	12,65	25,30	50,60	101,2	151,80	202,40	253,00	303,60	354,20	404,80
Cu	1,25	2,50	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00
Pb	1,26	2,53	5,05	10,10	15,15	20,20	25,25	30,30	35,35	40,40
Zn	4,45	8,90	17,80	25,60	53,40	71,20	89,00	106,80	124,60	142,40

5.3. Métodos

5.3.1 Ensaio de equilíbrio em lote

O ensaio de equilíbrio em lote teve por objetivo analisar o comportamento sorcivo da mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal em relação às soluções contaminantes com diferentes concentrações (C1 a C10), normalizada pela relação da massa de mistura ideal e a concentração de equilíbrio. O procedimento de ensaio foi baseado na norma D 4646 (ASTM, 2023).

Para a mistura solo-resíduos siderúrgicos, foi considerado o período de cura em câmara úmida de 7 dias, sendo adotado apenas um período de cura de maneira a reduzir o volume de ensaios e pelo fato desse tempo de cura representar o período em que pesquisadores associam a intensificação das reações pozolânicas em

materiais cimentícios com ganhos significativos de resistência mecânica (Jo *et al.*, 2015; Rocha, 2018).

O ensaio consistiu em realizar a junção de uma solução contaminante com concentração e composição conhecidas em uma determinada massa da mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal (4g de massa seca solta), por um período de tempo de 24h, até que se atingisse o equilíbrio químico, ou seja, para que a ocorrência de concentrações de soluto na fase líquida (massa de soluto dividida por volume de solução) e na fase sólida (massa de soluto adsorvido dividido por massa seca de adsorvente) permanecesse constante ao longo do tempo. Foi utilizada uma proporção mistura (solo-resíduos siderúrgicos):solução contaminante de 1:10.

Dessa forma, no início do ensaio, a concentração adsorvida aumentou com o tempo, e a concentração dissolvida na fase líquida decresceu, até atingir a constância de distribuição nas fases sólida e líquida. No ensaio, considerou-se que o tempo de equilíbrio químico era atingido quando uma diferença igual ou inferior a 5% na concentração da fase líquida fosse verificada após intervalos de tempo pré-estabelecidos (USEPA, 1992). No caso dessa pesquisa, este intervalo foi de 24 horas. Em seguida, as fases líquida e sólida foram separadas por centrifugação e analisadas quimicamente para a determinação da mudança de concentração de soluto. Esse procedimento foi repetido, à mesma temperatura, para diversos valores de concentração inicial do soluto (item 5.2.4).

Os frascos utilizados para a mistura foram tubos de centrífuga com capacidade para 50 mL, graduados e com tampa. A massa da mistura ideal utilizada foi de 4 g de material seco, corrigida em função da umidade higroscópica das amostras, e o volume da solução contaminante foi de 40 mL.

O tempo de agitação adotado foi de 24 horas. Foram realizados 3 repetições e um branco para cada solução contaminante. O branco é um tubo de centrífuga contendo apenas a solução contaminante, sem adição de mistura ideal, e que, também, é colocado para agitar, sendo utilizado para verificar a quantidade de metal que fica aderida ao frasco. A USEPA (2012) recomenda uma diferença menor do que 3% entre a concentração inicial da solução e a concentração final do frasco branco.

As amostras de mistura ideal-solução contaminante foram preparadas e colocadas no agitador sob 100 oscilações/minuto e temperatura média de 20°C. Decorrido o tempo pré-determinado para a agitação, as amostras foram centrifugadas

a 3000 rpm por 10 minutos. O sobrenadante foi filtrado em papel filtro rápido e recolhido em frasco plástico, sendo armazenado em geladeira até a leitura dos metais por espectrofotometria de absorção atômica.

Os testes de adsorção seguiram as recomendações do documento técnico da USEPA (2012) e D4646 (ASTM, 2023), sendo executados com soluções produzidas sinteticamente (Roy *et al.*, 1992).

A concentração dos contaminantes remanescentes na solução foi então medida, permitindo a construção de isotermas de sorção, que representam a relação entre a quantidade de contaminante adsorvida pelo material e sua concentração em solução em equilíbrio. Essas isotermas são fundamentais para entender os mecanismos de adsorção e a capacidade máxima de retenção de contaminantes pelo *liner*. Os modelos de Langmuir e Freundlich são os mais comumente empregados quando se trata de adsorção de metais. Usados em conjunto, os diferentes modelos físico-químicos podem fornecer dados que possibilitam uma maior compreensão da interação entre metais pesados e solos (Linhares *et al.*, 2010; Vega *et al.*, 2011).

5.3.2 Percolação em coluna

Para o ensaio de percolação em coluna foram considerados dois cenários diferentes: amostras percoladas com água e amostras percoladas com solução multiespécie. Além disso, foram estudados períodos de cura em câmara úmida de 7 dias e 28 dias, além da condição sem cura (0 dia).

A metodologia seguida neste tipo de ensaio é semelhante àquela empregada no ensaio de permeabilidade saturada, diferindo, entretanto, no que se refere à necessidade de medir a concentração química no efluente. O procedimento adotado foi semelhante ao apresentado por Caneschi (2012). Esse ensaio teve a duração de 122 dias.

O critério para encerrar os ensaios de percolação do contaminante multiespécie aos 122 dias foi determinado com base na necessidade de alcançar um período suficiente de exposição de um *liner* composto por solo-resíduos siderúrgicos aos metais pesados. Este período foi considerado adequado para observar efeitos substanciais nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos *liners*, conforme

demonstrado por estudos anteriores que indicaram alterações significativas nessas propriedades após exposições de prazo semelhante (Silva *et al.*, 2020; Garg *et al.*, 2020; Kumar; Kumari, 2024). Os resultados obtidos foram satisfatórios para evidenciar os impactos dos metais pesados, destacando mudanças na estrutura interna dos *liners* e seus efeitos na funcionalidade como barreiras hidráulicas em aplicações de engenharia civil (Sharma *et al.*, 2022; Özçoban *et al.*, 2022).

Os corpos de prova foram saturados antes da percolação com a solução contaminante. Para saturar as amostras, foi percolada água destilada nos corpos de prova até ser atingida uma vazão de saída constante (regime de fluxo permanente). O fluxo, por ser ascendente, auxilia no processo de saturação, facilitando a expulsão de bolhas de ar. Segundo Scarpedas (1994) *apud* Boscov (1997), recomenda-se uma saturação maior do que 90% em ensaios em coluna. Os corpos de prova foram saturados com água por 30 dias para que se pudesse observar quaisquer variações na vazão de saída e, desta forma, tentar garantir o valor recomendado de saturação. Os volumes de água percolados nas amostras foram coletados nas buretas. Após a estabilização da vazão, a água foi substituída pela solução contaminante. Os efluentes foram coletados nas buretas.

Esta solução migrou através da amostra impulsionada pelo gradiente hidráulico imposto. O gradiente hidráulico aplicado foi definido conforme as recomendações da D 5084 (ASTM, 2016). Adotou-se o gradiente hidráulico de 30, sendo mais representativo em relação aos coeficientes de permeabilidade característicos do material estudado.

O sistema de percolação consistiu, basicamente, em um conjunto de alimentação automática, estrutura de acondicionamento das colunas e recipientes de coletas de efluentes. As colunas de mistura ideal foram montadas em um permeâmetro de paredes flexíveis e carga hidráulica constante, com dimensões similares ao do cilindro Proctor Normal.

As amostras efluentes foram coletadas em frascos de plástico. Realizadas as coletas, os frascos foram acondicionados em geladeira até a ocasião da determinação da concentração dos metais por espectrofotometria de absorção atômica, no Laboratório de Absorção Atômica do Departamento de Solos da UFV. Determinadas as concentrações dos metais nos efluentes, foram traçadas curvas (Concentração

relativa *versus* Tempo de percolação) para os metais da solução contaminante (Zn, Cu, Pb, Cd e Mn).

5.4. Resultados e discussões

5.4.1 Ensaio de equilíbrio em lote

Nas Figuras 40 a 43, são apresentadas, para cada metal pesado, as respectivas linearizações segundo os modelos de Freundlich e Langmuir, bem como as isotermas de adsorção de Freundlich que apresentaram os melhores ajustes, em comparação com as isotermas de Langmuir. Nestas Figuras, S é a concentração do material adsorvido e C_e é a concentração no sobrenadante, após agitação. As isotermas de adsorção foram obtidas por meio de ajustes lineares.

Verificou-se que, para os metais Cu, Mn, Cd e Zn, a isoterma que melhor se ajustou aos dados experimentais foi a de Freundlich. Em relação ao Pb, verificou-se que esse metal foi altamente adsorvido, tendo somente dois pontos de leitura nas maiores concentrações consideradas, e nas demais, a concentração C_e foi igual a zero, motivo pelo qual não foi possível obter a correspondente isoterma de sorção. Isso demonstra a eficiência da mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal em adsorver esse metal (Bosco, 2008).

De forma geral, os coeficientes de determinação mostrados nas linearizações apresentaram valores superiores a 0,77 para o modelo de Freundlich, conforme mostram as Figuras 40 a 43. Isso demonstra uma boa correlação entre esse modelo de ajuste e os dados experimentais. Por esse motivo, foram evidenciadas somente as curvas de adsorção de Freundlich. Segundo Mukaka (2012), o R^2 não indica se um modelo de regressão é adequado. É possível ter um valor baixo de R^2 para um bom modelo. Em algumas áreas, é esperado que seus valores de R^2 sejam baixos em virtude da heterogeneidade do material que está sendo estudado. Para este autor, valores de R^2 entre 0,9 a 1,0 indicam uma correlação muito forte, de 0,7 a 0,9 indicam uma correlação forte, e de 0,5 a 0,7 indicam uma correlação moderada.

A partir da análise dos coeficientes de correlação obtidos por meio das curvas de adsorção de Freundlich, percebe-se que há grande afinidade entre os íons metálicos e os sítios de adsorção existentes no material estudado, visto que todos os

coeficientes foram maiores que 0,9 (Figuras 40 a 43). Ou seja, sugere-se que a afinidade dos metais pela mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal pode ter ocorrido em virtude da diversidade da composição do material, que apresenta várias frações simultâneas para retenção dos metais (Gutierrez, 2006).

Os parâmetros estimados pelo modelo matemático de Freundlich para os metais pesados são apresentados na Tabela 32. O coeficiente de adsorção de Freundlich (K_F) pode sugerir a adsorção do metal pelo material, enquanto N (coeficiente exponencial de Freundlich) indica qualitativamente a reatividade dos sítios de ligação no material (Sodré *et al.*, 2001; Linhares *et al.*, 2008).

No modelo de Freundlich, ocorre uma importante relação quantitativa entre a distribuição dos sítios energéticos na fração dispersa dos coloides da mistura ideal e o parâmetro N . Portanto, se $N > 1$, a sorção é dita favorável (Rodríguez, 2013; Marques, 2013). Desta forma, segundo o coeficiente exponencial de Freundlich, todos os metais analisados apresentaram sorção favorável.

O parâmetro K_F , por sua vez, sugere a adsorção dos metais pesados pela mistura ideal. Neste contexto, pode-se afirmar que a mistura ideal apresentou adsorção elevada para o manganês ($K_F = 60,26 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$), sendo que o menor valor do coeficiente de Freundlich foi obtido para o metal cádmio ($K_F = 1,02 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$).

O comportamento das isotermas permite inferir quanto a um processo favorável de remoção dos metais pesados pela mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal. Esse comportamento ocorre porque os metais apresentaram expressiva afinidade por determinados grupos funcionais de superfície, formando moléculas estáveis, correspondente a uma adsorção específica, que resultou na baixa mobilidade dos metais na mistura ideal (Lopes, 2017).

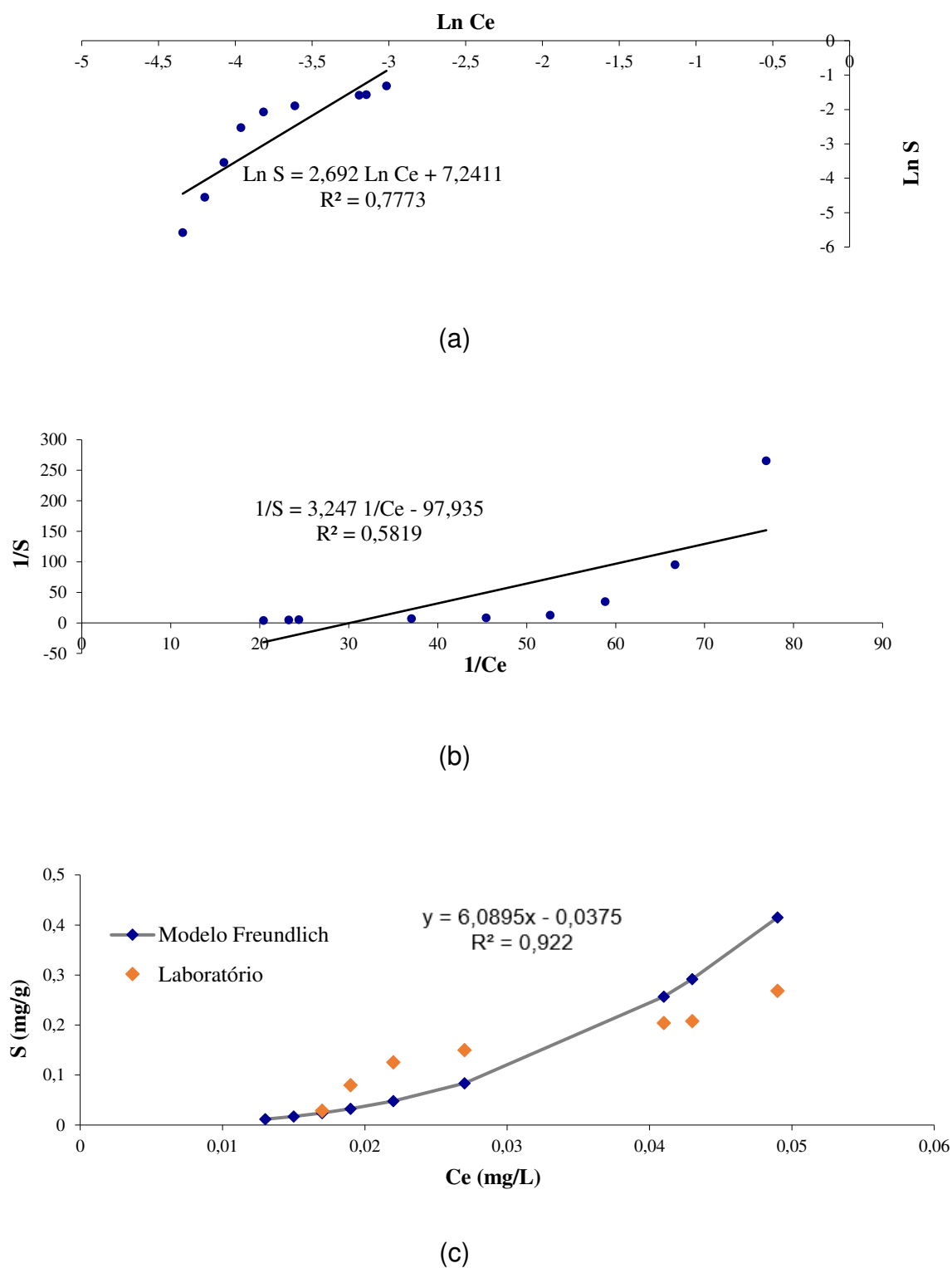
A adsorção é um processo considerado particularmente eficiente e competitivo para a remoção de metais pesados. Argilas, óxidos de ferro e, até mesmo, carvão ativado são materiais sólidos capazes de adsorverem metais pesados (Khraisheh *et al.*, 2004). Em vista disso, percebe-se que a junção da escória de aciaria (presença de óxido de ferro) com o solo argiloso (presença de argilominerais) também contribuiu na adsorção dos metais pesados (conforme mostrado no Capítulo 2).

Vale ressaltar que as concentrações utilizadas dos metais pesados no ensaio foram muito superiores às que se encontram comumente em lixiviados de aterros sanitários, conforme CONAMA (2011), e ainda assim a mistura ideal foi favorável à

remoção dos metais pesados. Os resultados demonstraram uma melhor proporcionalidade entre a concentração de equilíbrio (C_e) e a concentração de soluto (S) na parte sólida, provocando o aumento do coeficiente de correlação (R^2), evidenciando, com isso, a eficiência do processo de adsorção.

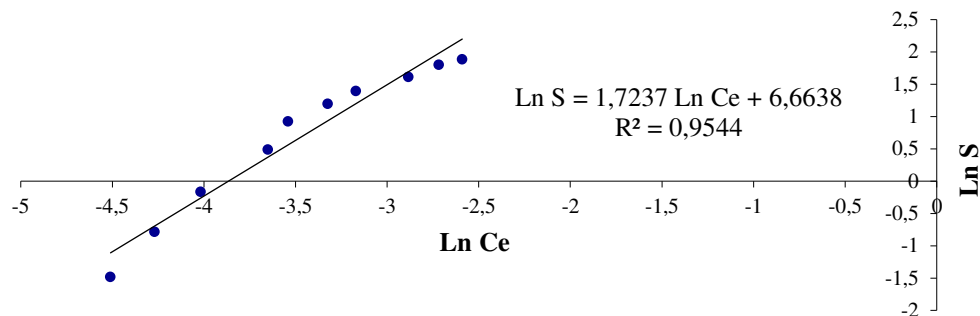
Cabe salientar que a análise dos resultados dos ajustes pelos modelos de Langmuir e Freundlich utilizou o mesmo processo feito por Silveira e Alleoni (2003) e Nascimento e Fontes (2004), que usaram a linearização dos dados e, na sequência, ajuste ao modelo não-linear. Os resultados indicaram que estes modelos se ajustam de forma satisfatória pela forma não linear das isotermas, indicando, com isso, uma adsorção satisfatória dos metais pesados ao material estudado. A isoterma de Freundlich é uma evolução do modelo linear, permitindo uma melhor caracterização de processos sorcivos que se apresentem curvilíneos (Fagundes; Zuquete, 2009).

Figura 40 - Linearização Freundlich (a), Linearização Langmuir (b) e Isoterma de adsorção de Freundlich (c) para o Cobre

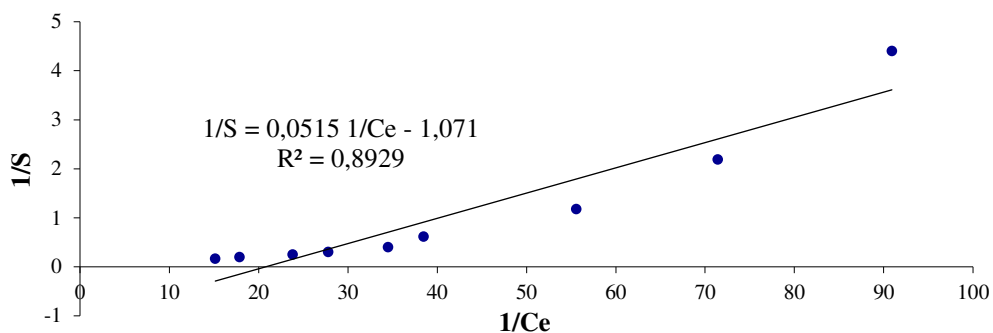


Fonte: Resultado da pesquisa

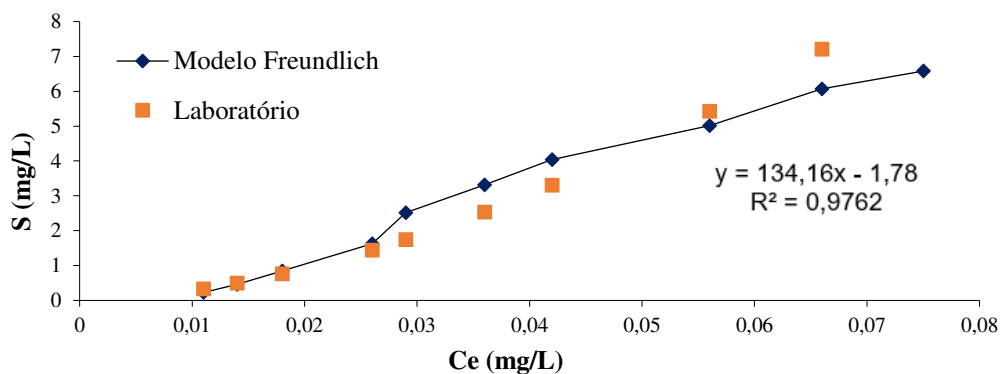
Figura 41 - Linearização Freundlich (a), Linearização Langmuir (b) e Isoterma de adsorção de Freundlich (c) para o Manganês



(a)



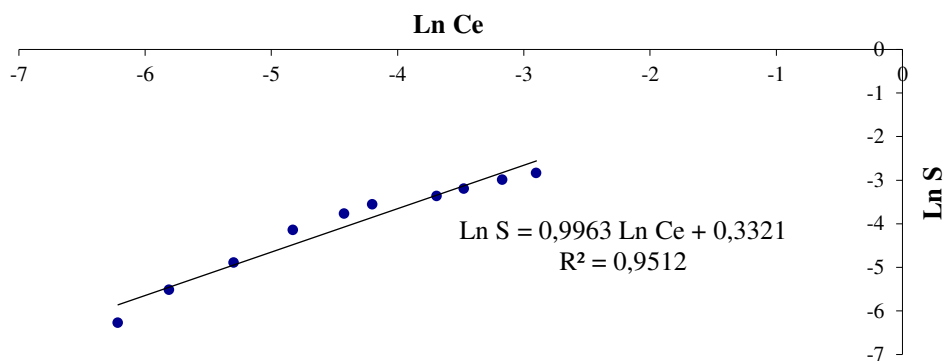
(b)



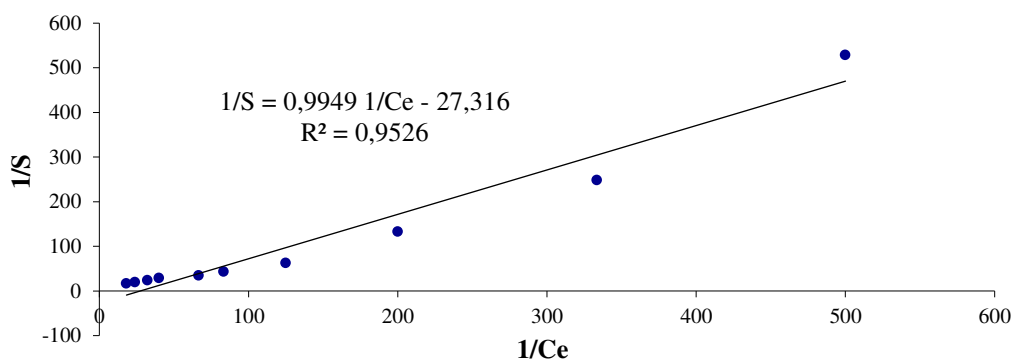
(c)

Fonte: Resultado da pesquisa

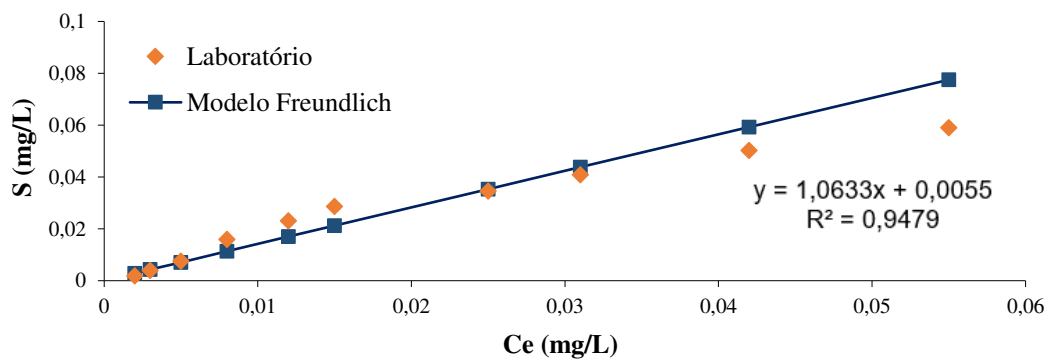
Figura 42 - Linearização Freundlich (a), Linearização Langmuir (b) e Isoterma de adsorção de Freundlich (c) para o Cádmi



(a)



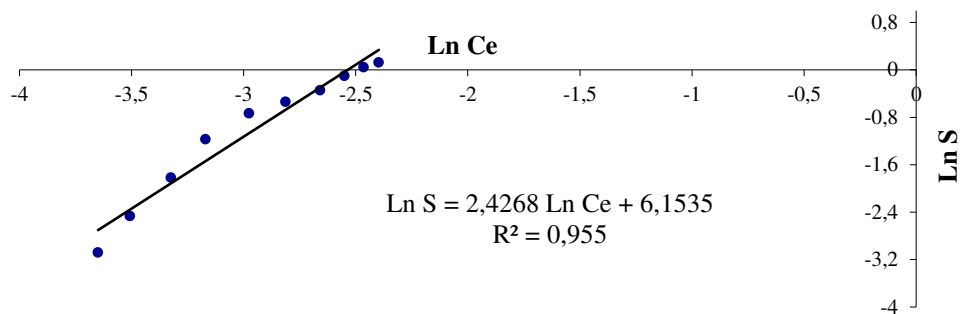
(b)



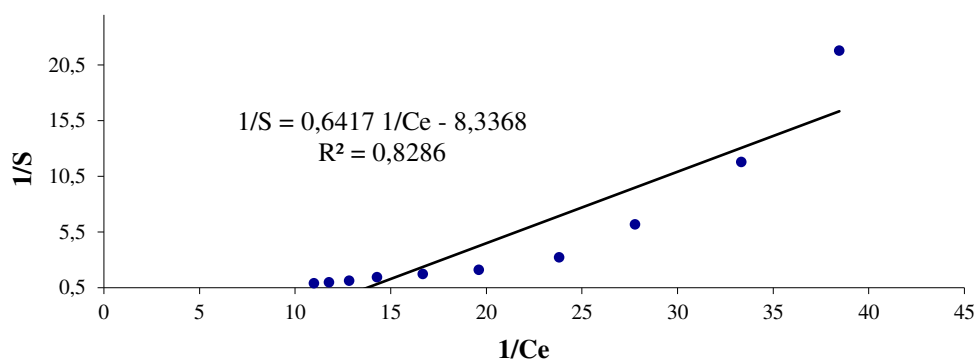
(c)

Fonte: Resultado da pesquisa

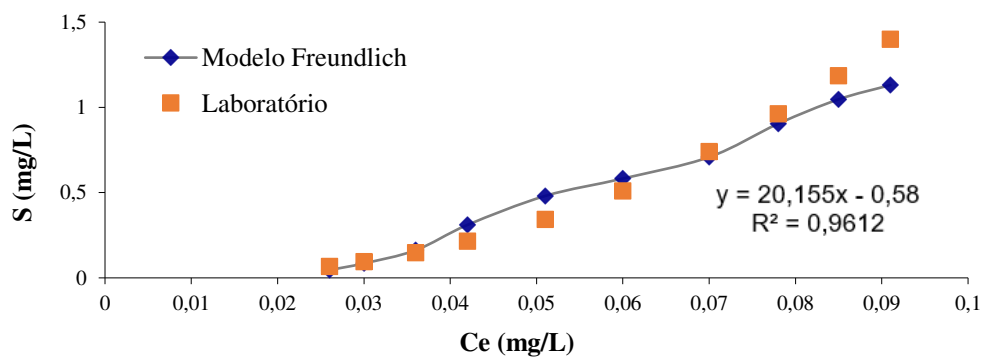
Figura 43 - Linearização Freundlich (a), Linearização Langmuir (b) e Isoterma de adsorção de Freundlich (c) para o Zinco



(a)



(b)



(c)

Fonte: Resultado da pesquisa

Tabela 32 - Parâmetros estimados através das isotermas de sorção de Freundlich para os metais pesados Cu, Mn, Cd e Zn

Metal pesado	Freundlich			Equação
	R ²	K _F (cm ³ .g ⁻¹)	N	
Cu	0,92	1,10	6,09	y = 6,09x - 0,04
Mn	0,98	60,26	134,16	y = 134,16x - 1,78
Cd	0,95	1,02	1,06	y = 1,06x + 0,01
Zn	0,96	3,80	20,16	y = 20,16x - 0,58

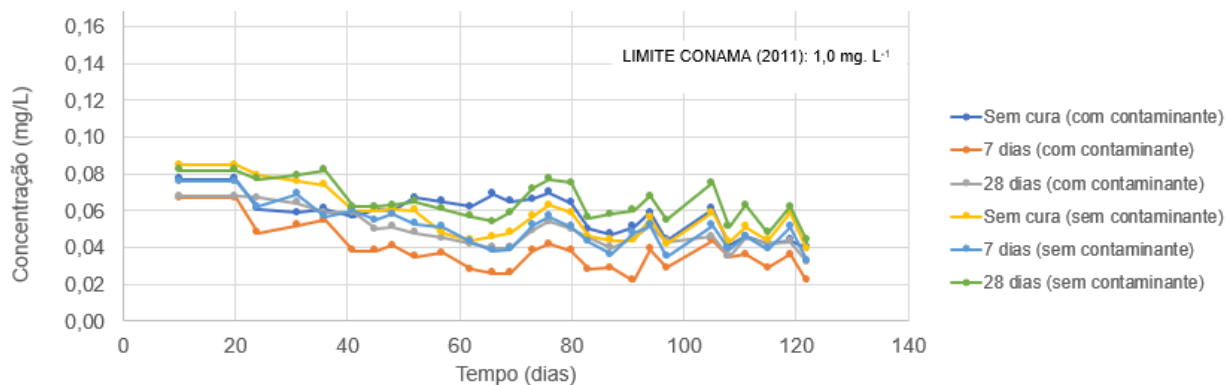
Kennedy e Arias-Paic (2020) afirmam que, em estudos anteriores de adsorção de equilíbrio em lote, a escória de aciaria mostrou ser um adsorvente eficaz para remover vários metais catiônicos divalentes da solução, como o cádmio (Cd), cobre (Cu), chumbo (Pb), níquel (Ni) e zinco (Zn).

Estudos mostraram que a eficiência da escória de aciaria na remoção dos metais pesados pode estar associada tanto com a adsorção quanto com a precipitação. A precipitação com cal (CaO) foi considerada um dos métodos mais eficazes para o tratamento de soluções extremamente contaminadas por metais pesados, principalmente na capacidade de remoção de chumbo e cádmio (Kim *et al.*, 2008). A interação entre o contaminante e os elementos químicos existentes no ambiente geoquímico do qual a escória de aciaria faz parte forma uma nova substância insolúvel, que se precipita. Tal fenômeno pode ocorrer tanto na superfície dos sólidos da mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal quanto nos seus poros preenchidos com água (Pacheco e Silva, 2005).

5.4.2 Percolação em coluna

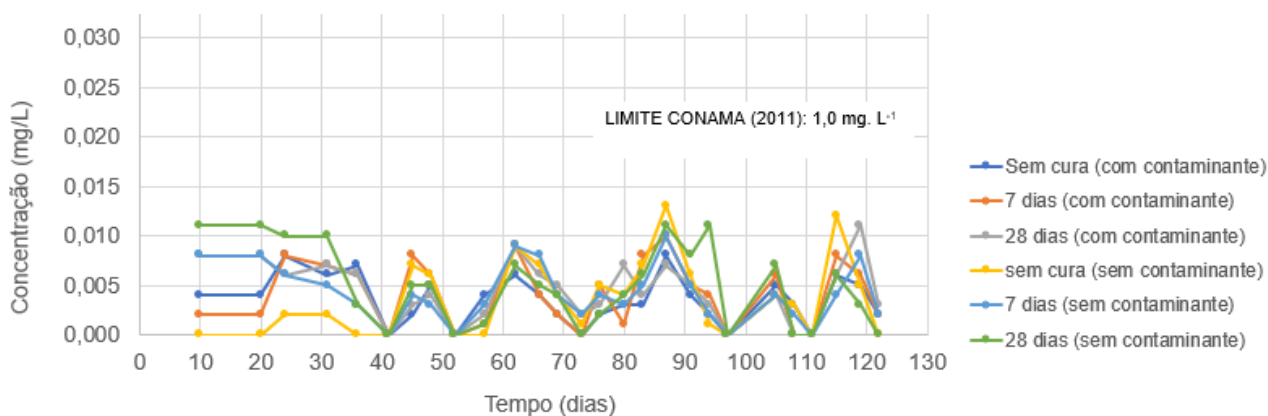
O ensaio em coluna teve por objetivo fornecer a concentração dos metais pesados na solução efluente, evidenciando indiretamente a adsorção dos metais pesados na mistura ideal. Nesse ensaio, é possível observar a migração dos componentes individuais da solução multiespécie, através de um meio poroso, em condições controladas de laboratório. Nas Figuras 44 a 48, são apresentadas as curvas de concentração dos metais pesados na solução efluente *versus* tempo de percolação e as condições padrão para lançamento de efluentes dissolvidos em corpos receptores, segundo o CONAMA (2011).

Figura 44 - Curvas de concentração do metal pesado Cu (Cobre) na solução efluente *versus* tempo de percolação



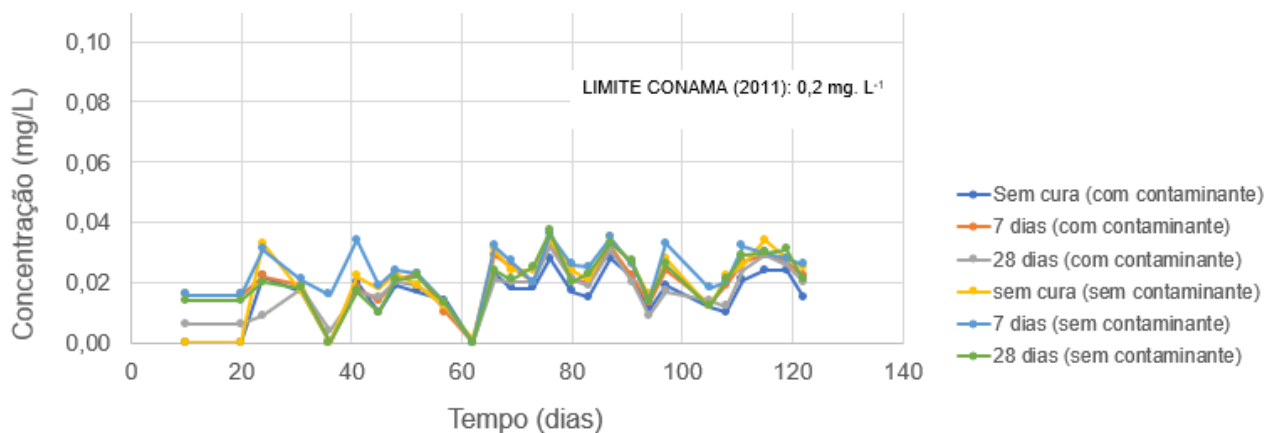
Fonte: Resultado da pesquisa

Figura 45 - Curvas de concentração do metal pesado Mn (Manganês) na solução efluente *versus* tempo de percolação



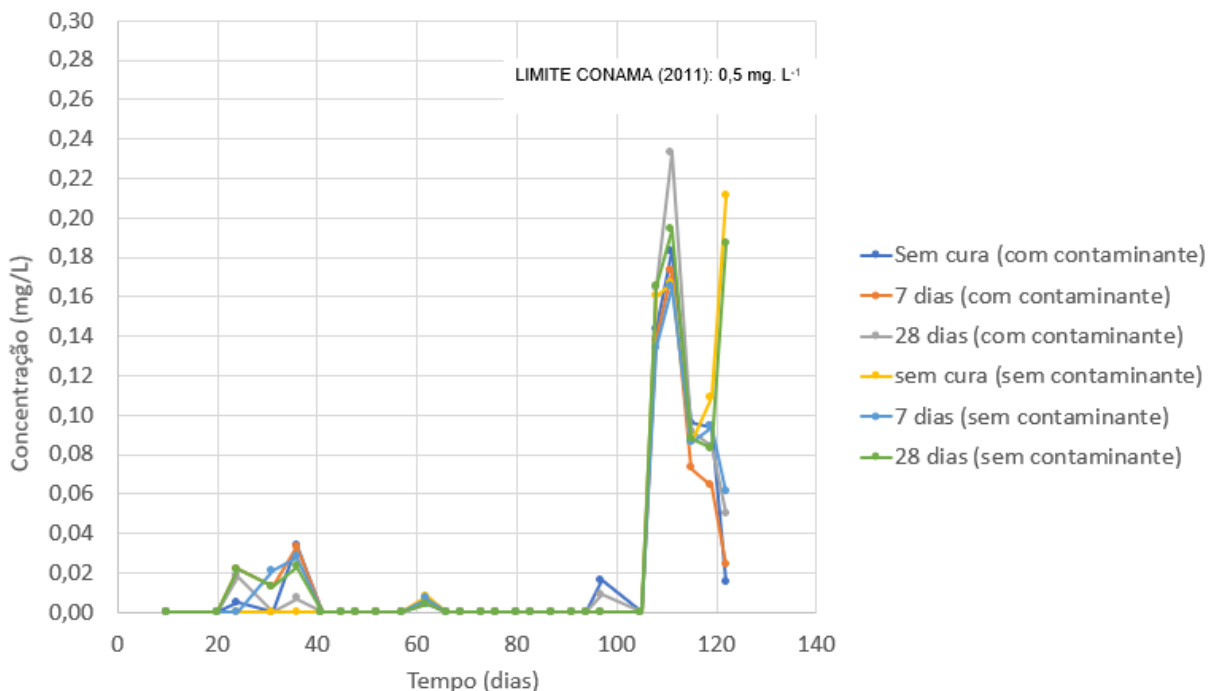
Fonte: Resultado da pesquisa

Figura 46 - Curvas de concentração do metal pesado Cd (Cádmio) na solução efluente *versus* tempo de percolação



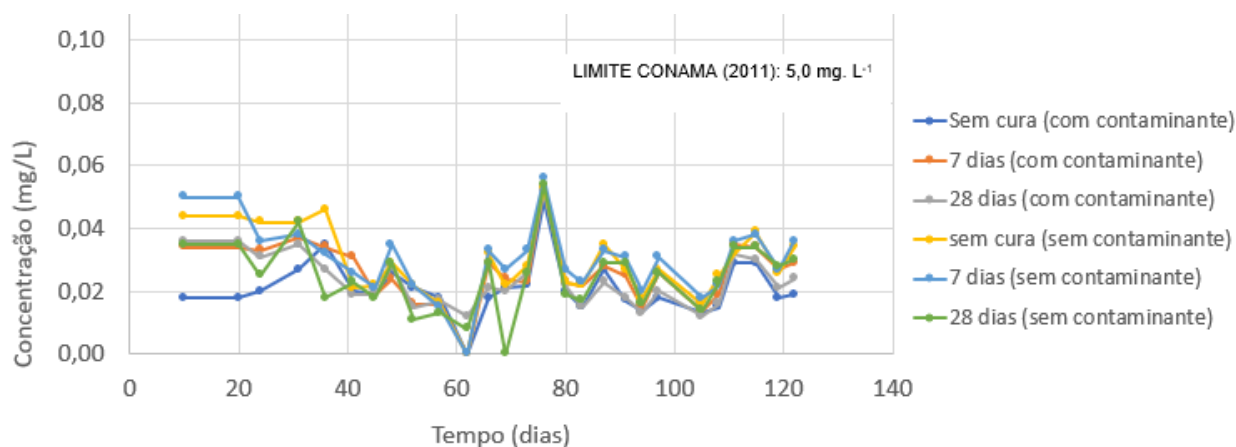
Fonte: Resultado da pesquisa

Figura 47 - Curvas da concentração do metal pesado Pb (Chumbo) na solução efluente *versus* tempo de percolação



Fonte: Resultado da pesquisa

Figura 48 - Curvas da concentração do metal pesado Zn (zinco) na solução efluente *versus* tempo de percolação adsorção



Fonte: Resultado da pesquisa

De acordo com a Resolução Nº 430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2011), as condições padrão para lançamento de efluentes em corpos receptores dos metais Cu, Mn, Cd, Pb e Zn são, no máximo, de 1,0 mg/L, 1,0 mg/L, 0,2 mg/L, 0,5 mg/L e 5,0 mg/L, respectivamente. Diante disso, é possível afirmar que, para todos os metais analisados nessa pesquisa, a

concentração do percolado coletado nas buretas está abaixo do máximo permitido por norma. Ressalta-se a importância em se avaliar a mobilidade desses metais em barreiras selantes da mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal compactada, podendo-se inferir que barreiras construídas desse material não iriam causar a contaminação do solo adjacente e das águas subterrâneas em níveis superiores aos admissíveis. Os referidos elementos químicos presentes na solução contaminante multiespécie foram eficazmente retidos na mistura ideal (Uddh *et al.*, 2019).

Estudos sobre o comportamento de metais pesados no solo têm concluído que a retenção desses elementos nesse meio depende da natureza da fase sólida e da proporção de seus constituintes, de propriedades da fase líquida e das espécies metálicas presentes na solução do solo (Sposito, 1989; Yuan; Lavkulich, 1997; Naidu *et al.*, 1998; Nascentes, 2006).

Os solos têm, em geral, uma grande variedade de sítios de adsorção, com diferentes propriedades de ligações, e contêm grande quantidade de complexos aquosos iônicos e não iônicos capazes de participar da adsorção e, possivelmente, dos processos de precipitação dos metais. São consideradas superfícies de adsorção os óxidos de Fe, Ca, Mn, Al, os aluminossilicatos não-cristalinos e mesmo as arestas quebradas de argilominerais, que apresentam um tipo similar de sítio de adsorção (Forbes *et al.*, 1976). Diante disso, pressupõe-se que a junção do solo argiloso (presença de argilominerais, óxido de Al e aluminossilicatos) mais a escória de aciaria (presença de óxidos de Fe, óxido de Al, óxido de Ca) resulta na existência dessas superfícies de adsorção, conforme as caracterizações química e mineralógica desses materiais (Capítulo 2 - itens 2.2.3 e 2.2.4).

A precipitação dos cátions na forma de hidróxidos ou sais diversos pode ocorrer em condições de pH elevado, representando um outro importante mecanismo de retenção de metais pesados. Os ânions mais comuns, capazes de formar compostos com os metais pesados, são o carbonato, sulfato, fosfato e silicato (Lindsay, 1979; Nascentes, 2006). A concentração desses ânions em solos altamente intemperizados é baixa, mas em contrapartida as escórias de aciaria apresentam na sua composição alta concentração desses ânions. Além disso, o pH básico da escória contribui significativamente na possibilidade de retenção dos metais por precipitação (Yang *et al.*, 2018). Em vista disso, pressupõe-se que as escórias contribuíram positivamente nessa precipitação, uma vez que apresentam essas características mencionadas

anteriormente, podendo ser confirmadas pelos dados de suas caracterizações mineralógica e química (Capítulo 2 – item 2.2.4).

Segundo Francisca e Glatstein (2019), a escória do forno de oxigênio básico (BOF) possui alta capacidade de remover metais pesados da solução dada a sua alta alcalinidade. Esses autores examinaram os efeitos da precipitação no transporte de íons metálicos através de misturas que tinham esse material na sua composição, objetivando construir barreiras sanitárias. A escória BOF trata com sucesso os lixiviados, aumentando o pH, o que promove a precipitação de íons metálicos e, portanto, retarda seu deslocamento. A adição de escória BOF em revestimentos de aterros sanitários aumenta significativamente o tempo de percolação de íons metálicos através da barreira. Isto pode ser usado para o projeto de barreiras mais seguras contra possíveis cenários indesejáveis, como aumentos no gradiente hidráulico (por exemplo, devido ao acúmulo de lixiviados sobre o revestimento) e condutividade hidráulica (por exemplo, devido à má compactação).

Uma vez que a escória BOF apresenta composições química e mineralógica semelhantes às das escórias de aciaria utilizadas nessa pesquisa, sugere-se que esse mesmo comportamento observado por Francisca e Glatstein (2019) tenha ocorrido. Segundo a literatura, as escórias BOF e de aciaria são predominantemente compostas por óxidos de cálcio (CaO) e silício (SiO₂), estando também presentes em quantidades significativas os óxidos de magnésio (MgO) e ferro (FeO e Fe₂O₃), conforme mostrado no Capítulo 2 – itens 2.2.3 e 2.2.4. Esses dados indicam que, apesar das variações nos processos de fabricação, as características materiais das escórias BOF e de aciaria são notavelmente similares, facilitando práticas comuns de reciclagem e gestão ambiental (Xue *et al.*, 2013; Chandel *et al.*, 2023).

5.5. Conclusões

De forma geral, os valores dos coeficientes de determinação mostrados no ensaio de equilíbrio em lote apresentaram magnitudes superiores a 0,77, demonstrando uma boa correlação entre o modelo de ajuste e os dados experimentais. O comportamento das isotermas permitiu inferir quanto a um processo favorável de remoção dos metais pesados pela mistura ideal. Esse comportamento ocorre porque os metais apresentaram expressiva afinidade por determinados grupos funcionais de

superfície, formando moléculas estáveis, correspondente a uma adsorção específica, que resultou na baixa mobilidade dos metais na mistura ideal.

Verificou-se que, para os metais Cu, Mn, Cd e Zn, a isoterma que melhor se ajustou aos dados experimentais foi a de Freundlich. Em relação ao Pb, verificou-se que esse metal foi altamente adsorvido, tendo somente dois pontos de leitura nas maiores concentrações consideradas, e nas demais a concentração C_e foi igual a zero, motivo pelo qual não foi possível obter a correspondente isoterma de sorção. Isso demonstra a eficiência da mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal em adsorver esse metal.

A partir da análise dos coeficientes de correlação obtidos por meio das curvas de adsorção de Freundlich, percebe-se que há grande afinidade entre os íons metálicos e os sítios de adsorção existentes no material estudado, visto que todos os coeficientes foram maiores que 0,9. Ou seja, sugere-se que a afinidade dos metais pela mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal pode ter ocorrido em virtude da diversidade da composição do material, que apresenta várias frações simultâneas para retenção dos metais.

A eficiência da escória de aciaria na remoção dos metais pesados pode estar associada tanto com a adsorção quanto com a precipitação. A precipitação com cal (CaO) foi considerada um dos métodos mais eficazes para o tratamento de soluções extremamente contaminadas por metais pesados, principalmente na capacidade de remoção de chumbo e cádmio. A interação entre o contaminante e os elementos químicos existentes no ambiente geoquímico do qual a escória de aciaria faz parte forma uma nova substância insolúvel, que se precipita. Tal fenômeno pode ocorrer tanto na superfície dos sólidos da mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal quanto nos seus poros preenchidos com água.

De acordo com a Resolução N^o 430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2011), as condições padrão para lançamento de efluentes em corpos receptores dos metais Cu, Mn, Cd, Pb e Zn são, no máximo, de 1,0 mg/L, 1,0 mg/L, 0,2 mg/L, 0,5 mg/L e 5,0 mg/L, respectivamente. Diante disso, é possível afirmar que, para todos os metais analisados nessa pesquisa, a concentração do percolado coletado nas buretas está abaixo do máximo permitido por norma. Ressalta-se a importância em se avaliar a mobilidade desses metais em barreiras selantes da mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal compactada, podendo-

se inferir que barreiras construídas desse material não iriam causar a contaminação do solo adjacente e das águas subterrâneas em níveis superiores aos admissíveis. Os referidos elementos químicos presentes na solução contaminante multiespécie foram eficazmente retidos na mistura ideal.

Sugere-se que a junção do solo argiloso (presença de argilominerais, óxido de Al e aluminossilicatos) mais a escória de aciaria (presença de óxidos de Fe, óxido de Al, óxido de Ca) resulta na existência dessas superfícies de adsorção, conforme as caracterizações química e mineralógica desses materiais. Além disso, o pH básico da escória contribui significativamente na possibilidade de retenção dos metais por precipitação. Em vista disso, pressupõe-se que as escórias contribuíram positivamente nessa precipitação, podendo ser confirmadas pelos dados de suas caracterizações mineralógica e química.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADEDEJI, O. M.; JAHAN, K. Remoção de poluentes de produto aquoso de liquefação co-hidrotérmica: Estudos de adsorção e isoterma. **Chemosphere**, 2023.
- ALONSO, T. P. **Condutividade hidráulica de solos compactados em ensaios com permeâmetro de parede flexível**. Dissertação de mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo, 120 p., 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4646**: standard test method for 24-h batch-type measurement of contaminant sorption by soils and sediments: Philadelphia, 2023.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5084**: Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. 2003, USA.
- ASWATHY, C. M.; SUNIL, B. M. Improving landfill liner performance with bentonite-slag blend permeated with ammonia for a Municipal solid waste landfill, **Journal of Environmental Management**, Volume 367, September 2024, 122013.

- BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. Oficina de Textos: São Paulo. 248 p. 2008.
- BUSCHLE, B. N.; PALMEIRO, J. K.; SADE, Y. B.; MELO, V. de F.; ANDRADE, M. G. de; BATISTA, A. H. Cinética de liberação de chumbo de solos de área de mineração e metalurgia de metais pesados. 1865-1874, p. 34. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, 2010.
- CANESCHI, F. P. **Estudos geoambientais em solos modificados quimicamente**. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Doutorado. Viçosa – MG, 2012.
- CHAKRABORTY, M.; RAHAT, M. M. R.; CHOUDHURY, T. R.; NIGAR, R.; LIU, G.; HABIB, A. Heavy metal contamination and health risk assessment of road dust from landfills in Dhaka-Narayanganj, Bangladesh. **Emerging Contaminants**, volume 10, 2024.
- CHANDEL, S. S.; RANDHAWA, N. S.; SINGH, P. K. Thermodynamic and kinetic aspect of solid state reduction of Electric Arc Furnace slag through coke: An experimental study, **Materials Today: Proceedings**, volume 26, 2023.
- CHIRON, N.; GUILLET, R.; DEYDIER, E. Adsorption of Cu(II) and Pb(II) onto a grafted silica: isotherms and kinetic models. **Water Research**, volume 37, p. 3079– 3086, 2003.
- CONAMA. Resolução nº 430, 16 de maio de 2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamentos de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Diário Oficial da República Federativa do Brasil n. 62, de 16 mai. 2011, Seção 1, p. 89-91.
- DARAMOLA, S. O.; DEMLIE, M.; HINGSTON, E. D. C. Mineralogical and sorption characterization of lateritic soils from Southwestern Nigeria for use as landfill liners. **Journal of environmental management**, 2024.
- DEVARANGADI, M. e M, U. S. Effect on engineering properties of ground granulated blast furnace slag admixed with laterite soil, cement and bentonite mixtures as a liner in landfill. **Journal of Cleaner Production**, Volume 329, 2021.
- FADUGBA, O. G.; ADENIRAN, J. K.; ALANEME, G. U.; OLUYEMI-AYIBIOWU, B. D.;

- OMOMOMI, O. J.; ADETUKASI, A. O. Compaction and compressibility characteristics of snail shell ash and granulated blast furnace slag stabilized local bentonite for baseliner of landfill, **Scientific reports**, 2024.
- FAGUNDES, J. R. T.; ZUQUETTE, L. V. Capacidade de sorção de materiais inconsolidados residuais da Formação Botucatu, região de São Carlos (SP), Brasil. 494-506 p., volume 39 (Issue 3). **Revista Brasileira de Geociências**, 2009.
- FRANCISCA, F. M.; GLATSTEIN, D. A. Environmental application of basic oxygen furnace slag for the removal of heavy metals from leachates. **Journal of Hazardous Materials**, 121294, 2019.
- FORBES, E. A.; POSNER, Q. M.; QUIRK, J. P. The specific adsorption of divalent Cd, Co, Cu, Pb and Zn on goethite. **J. Soil Sci.**, volume 27: pages 154-166, 1976.
- GARG, A.; REDDY, N. G.; HUANG, H.; BURAGOHAIN, P.; KUSHVAHA, V. Modelling contaminant transport in fly ash–bentonite composite landfill liner: mechanism of different types of ions. **Scientific Reports**, volume 10, Article number: 11330, 2020.
- GONZÁLEZ-COSTA, J. J.; REIGOSA, M. J.; MATÍAS, J. M.; FERNÁNDEZ-COVELO, E. Analysis of the Importance of Oxides and Clays in Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn Adsorption and Retention with Regression Trees. **PloS one**, volume 12 (Issue 1), 2017.
- GUPT, C. B.; BORDOLOI, S.; SEKHARAN, S.; SARMAH, A. K. Adsorption characteristics of Barmer bentonite for hazardous waste containment application. **Journal of hazardous materials**. 2020.
- GUTIERREZ, K. G. **Remoção de metais pesados de percolado submetido à recirculação em células de resíduo sólido urbano**. Viçosa, MG: UFV. 87p Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2006.
- JO, B. W.; CHAKRABORTY, S.; KIM, H. Prediction of the curing time to achieve maturity of the nano cement based concrete using the Weibull distribution model. **Construction and Building Materials**, Volume 84, June 2015, Pages 307-314.

- KENNEDY, A. M.; ARIAS-PAIC, M. Application of powdered steel slag for more sustainable removal of metals from impaired waters. **Journal of Water Process Engineering**, volume 38, 2020.
- KHRAISHEH, M. A. M.; AL-DEGS, Y. S.; MCMINN, A. M. Remediations of wastewater containing heavy metals using raw and modificate diatomite. **Chemical Engineering Journal**, volume 99, 177-1845, 2004.
- KIM, D.; SHIN, M.; CHOI, H.; SEO, C.; BAEK, K. Removal mechanisms of copper using steel-making slag: adsorption and precipitation. **Desalination**, volume 223, p. 283-289, 2008.
- KUMAR, R.; KUMARI, S. Exploring the geotechnical and microstructural properties of composite mixtures for landfill liner materials: an experimental investigation. **Environmental science and pollution research international**. 2024.
- LINDSAY, W. L. Chemical equilibria in soils. John Wiley & Sons. New York. 449p, 1979. (citado por SHACKELFORD, 1995).
- LINHARES, L. A. et al. Utilização dos modelos de Langmuir e de Freundlich na adsorção de cobre e zinco em solos. Brasileiros. **Acta Agronómica**, volume 59, n. 3, p. 303- 315, 2010.
- LINHARES, L. A.; FILHO, F. B. E.; IANHEZ, R.; SANTOS, E. A. Aplicação dos modelos de Langmuir e Freundlich na adsorção de cádmio e chumbo em diferentes classes de solos brasileiros. 49-60 p. volume 17, **Revista Tecnológica**, 2008.
- LIU, J.; XIE, G.; WANG, Z.; LI, Z.; FAN, X.; JIN, H.; ZHANG, W.; XING, F.; TANG, L. Synthesis of geopolymers using municipal solid waste incineration fly ash and steel slag: Hydration properties and immobilization of heavy metals, **Journal of environmental management**, 2023.
- LOPES, A. C. P de et al. Biogas production from thermophilic anaerobic digestion of kraft pulp mill sludge. **Renew. Energ.** Volume 4, 330–344, 2017.
- LOPES, E. C. **Avaliação tecnológica de coprodutos siderúrgicos visando o melhoramento de propriedades de engenharia de solos tropicais**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, 2021.
- MARQUES, J. P. **Caracterização geológica-geotécnica de solos residuais para**

- uso em liners.** 56 p. FAPESP, 2013.
- MARQUES, J. P.; NAUERTH, I. M. R.; KASEMODEL, M. C.; RODRIGUES, V. G. S. Systematic review of alternative materials that improve retention of potentially toxic metals in soil/clay liners in waste disposal areas. **Environmental monitoring and assessment.** 2024.
- MUKAKA, M. M. (Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. **Malawai Medical Journal.** 2012.
- NAIDU, R.; SUMNER, M. E.; HARTER, R. D. Sorption of heavy metals in strongly weathered soils: an overview. **Environ. Geochem. Health.** Volume 20. n.1. p.5-9, 1998.
- NASCENTES, C. L. **Estudo da mobilidade de metais pesados em um solo residual compactado.** 174 fls. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2006.
- NASCIMENTO, C. W. A.; FONTES, R. L. F. Correlação entre características de latossolos e parâmetros de equações de adsorção de cobre e zinco. 965-971 p., volume 28, **Revista Brasileira de Ciência do solo,** 2004.
- OJURI, O. O.; OLUWATUYI, O. E. Compacted sawdust ash–lime-stabilised soil-based hydraulic barriers for waste containment, **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management,** Volume 171, Issue 2, 2018, Pages 52-60.
- ÖZÇOBAN, M. S.; ACARER, S.; TÜFEKCI, N. Effect of solid waste landfill leachate contaminants on hydraulic conductivity of landfill liners. **Water Science & Technology,** Volume 85 (Issue 5): 1581–1599, 2022.
- PACHECO e SILVA, D. **Influência da contaminação por cloreto de cobre na resistência ao cisalhamento de solos utilizados em liners.** Dissertação, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2005.
- PEREIRA, M. G.; ARRUDA, M. A. Z. Vermicompost as a natural adsorbent material: characterization and potentialities for cadmium adsorption. **Journal Braz. Chem. Soc.,** volume 14, n. 1, p. 39-47, 2003.
- RAJENDRAN, S.; PRIYA, A. K.; SENTHIL, K. P.; HOANG, T. K. A.; SEKAR, K.;

- CHONG, K. Y.; KHOO, K. S.; NG, H. S.; SHOW, P. L. A critical and recent developments on adsorption technique for removal of heavy metals from wastewater-A review, **Chemosphere**. 2022
- RAMADAN, F.; NOUR, H. E.; WAHED, N. A.; RAKHA, A.; AMUDA, A. K.; FAISAL, M. Contaminação por metais pesados e avaliação de risco ambiental: um estudo de caso de água superficial no riacho Bahr Mouse, Delta do Nilo Oriental, Egito. **Monitoramento e avaliação ambiental**, 2024.
- ROCHA, G. S. **Efeito da cal na resposta mecânica de um solo residual maduro: análise da resistência à compressão não confinada, permeabilidade, compressibilidade e efeito da cura acelerada na resistência mecânica**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2018.
- RODRÍGUEZ, J. R. **Estudo da viabilidade geológica, geotécnica e geoquímica de solos argilosos como barreiras selantes – Vale do Ribeira (SP)** 122 p. Dissertação (Programa de Pós-graduação em geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- ROY, W. R.; KRAPAC, I. G.; CHOU, S. F. J.; GRIFFIN, R. A. Project summary. Batch-type procedures for estimating soil adsorption of chemicals. 100 p. EPA **Environmental Protection Agency**. Estados Unidos, 1992.
- SALOMONS, W. Environmental impacts of metals derived from mining activities: process, predictions, prevention. 5-23 p. **Journal of Geochemical Exploration**, n. 52, 1995.
- SANTOS, G. C. **Sorção e labilidade de metais pesados em latossolos de Minas Gerais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. Tese Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas. 2001. 183 p..
- SELIM, H. M.; AMACHER, M. C. Reactivity and Transport of Heavy Metals in Soils. **Boca Raton**, New York, London, Tokyo: Lewis Publishers, 1997. ISBN: 0-87371-473-3.
- SMITH, R. M.; SAYEN, S.; NUNS, N.; BERRIER, E.; GUILLON, E. Combining sorption experiments and Time of Flight Secondary Ion Mass Spectrometry (ToF-SIMS) to study the adsorption of propranolol onto

environmental solid matrices - Influence of copper(II).
The Science of the total environment, 2018.

SODRÉ, F. F.; LENZI, E.; COSTA, A. C. S. Utilização de modelos físico-químicos de adsorção no estudo do comportamento do cobre em solos argilosos. 324-330 p.
Química Nova, volume 24 (Issue 3), 2001.

STIGLIANI, W. M. Changes in valued “capacities” of soils and sediments as indicators of nonlinear and time -delayed environmental effects. **Environ. Monit. Assess.**, volume 10. n.3. p.245-307, 1988.

SILVA, T. A.; et al. Evaluation of mechanical behavior and stability of geosynthetic clay liners using steel slag as a component of bentonite. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Volume 32 (Issue 10), 04020309, 2020.

SILVEIRA, M. L. A.; ALLEONI, L. R. F. Copper adsorption in tropical soils. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, volume 46, n.4, p.529-536, 2003.

SCARPEDAS. Dispersion test handout. Aula prática do curso de Engenharia. Newham College. Cambridge, 1994. Inglaterra (citado por BOSCOV, 1997)

SCHACKELFORD, C. D.; REDMOND, P. L. Solute breakthrough curves for processed kaolin at flow rates. **Journal of Geotechnical Engineering**. ASCE. Volume 121 (Issue 1). 1995. P. 17-32.

SPOSITO, G. Soil adsorption phenomena. In: **The chemistry of soils**. Oxford University Press, 1989.

SALOMONS, W. Environmental impacts of metals derived from mining activities: process, predictions, prevention. 5-23 p. **Journal of Geochemical Exploration**, n. 52, 1995.

UDDH, S. T.; BERGGREN, K. D.; ÅSTRÖM, M.; JARSJÖ, J.; FRÖBERG, M.; SVENSSON, A.; AUGUSTSSON, A. Metal solubility and transport at a contaminated landfill site - From the source zone into the groundwater.
The Science of the total environment, 2019.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Code of Federal Regulations** (2012). Washington.

- VEGA, M. F. A.; COVELO, E. F.; COUCE, M. L. A. Applying Freundlich, Langmuir and Temkin models in Cu and Pb soil sorption experiments. **Spanish Journal of Soil Science**, volume 1, n. 1, p. 20-37, 2011.
- XIE, H.; DING, H.; YAN, H.; YANG, D.; LOU, Z.; QIU, Z.; CHEN, Y. A semi-analytical solution to organic contaminants transport through composite liners considering a single crack in CCL. **Environmental science and pollution research international**, 2022.
- XUE, Y.; WU, S.; ZHOU, M. Adsorption characterization of Cu(II) from aqueous solution onto basic oxygen furnace slag, **Chemical Engineering Journal**, Volume 231, September 2013, Pages 355-364.
- WANG, J.; ZHANG, W. Evaluating the adsorption of Shanghai silty clay to Cd(II), Pb(II), As(V), and Cr(VI): kinetic, equilibrium, and thermodynamic studies. **Environmental monitoring and assessment**, 2021.
- YANG, L.; WEN, T.; WANG, L.; MIKI, T.; BAI, H.; LU, X.; YU, H.; NAGASAKA, T. The stability of the compounds formed in the process of removal Pb(II), Cu(II) and Cd(II) by steelmaking slag in an acidic aqueous solution. **Journal of environmental management**, 2018.
- YUAN, G.; LAVKULICH, L. M. Sorption behavior of copper, zinc and cadmium in response to simulated changes in soil properties. **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**, volume 28. n.6-8. p.571-587, 1997.
- YONG, R. N. Geoenvironmental engineering: contaminated soils, pollutant fate and mitigation. **Boca Raton**, London, New York, Washington, D. C.: CRC Press, 2001. ISBN: 0-8493-8289-0.
- ZHAN, L. T.; FENG, T.; NI, J. Q.; FENG, S. Hydrological response and crack resistance of polypropylene-fiber reinforced compacted steel slag-bentonite mixtures under wetting–drying cycles, **Waste Management**, Volume 187, 2024, Pages 252-261.
- ZHAN, L. T.; NI, J. Q.; FENG, S.; KONG, L. G.; FENG, T. Saturated hydraulic conductivity of compacted steel slag-bentonite mixtures - A potential hydraulic barrier material of landfill cover, **Waste Management**, Volume 144, 2022, Pages 349-356.

ZHANG, S.; HE, J. T.; ZHU, X. J. Simulation Experiment: Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media. **Huan jing ke xue= Huanjing kexue**, 2016.

ZHU, K.; HE, Y.; HE, Q.; LOU, W.; ZHANG, Z.; ZHANG, K. Effects of ionic strength and bentonite ratio on the migration of Cr(VI) in clayey soil-bentonite engineered barrier. **Environmental science and pollution research international**, volume 31 (Issue 32), 2024.

ZUQUETE, L. V.; SILVA, E. M.; GARCIA, A. Aspectos de sorção para os materiais inconsolidados da região de São Carlos (SP). Volume 61 (Issue 2): pages 2019-230 p. **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, 2008.

CAPÍTULO 6: Conclusões e sugestões

De acordo com as caracterizações realizadas nesse estudo, as escórias de aciaria elétrica utilizadas são compostas sobretudo por óxidos de cálcio, silício e alumínio, sendo esses os principais constituintes de aluminatos de cálcio e silicatos dicálcicos que possuem fortes propriedades de ligação cimentícia. Esses componentes fazem com que as escórias reajam com a água, formando estruturas semelhantes às do cimento endurecido. Esses resultados prévios advindos das caracterizações indicaram que as escórias apresentam características favoráveis para serem utilizadas em *liners* para aterros sanitários.

Baseado nos resultados do planejamento experimental em Simplex-centróide, foi possível determinar a composição ideal representativa das misturas solo-resíduos siderúrgicos analisadas que atendesse às exigências técnicas de projeto inerentes a barreiras impermeabilizantes, possibilitando a aplicação da maior porcentagem possível das escórias de aciaria elétrica. A composição da mistura ideal correspondeu a 64% de solo argiloso, 34,1% de escória de aciaria elétrica primária e 1,9% de escória de aciaria elétrica secundária.

Observou-se que a adição de resíduos com caráter cimentante aumentou a rigidez da mistura ideal, independente da cura considerada (28 dias, 7 dias e 0 dias), em relação às amostras de solo residual puro, o qual foi atribuído à cimentação promovida pelo mineral wustite (FeO), gerando uma estrutura mais densa nos corpos de prova. Outro fato relacionado ao aumento da rigidez foi a formação de C-S-H na presença de compostos cimentícios. As caracterizações química, mineralógica e microestrutural da mistura ideal presentes nessa pesquisa comprovaram a presença do mineral wustite (FeO), bem como a formação de C-S-H. Em decorrência disso, ficou evidente que os incrementos observados nas propriedades mecânicas e hidráulica da mistura ideal tiveram influência direta das características cimentícias desses resíduos siderúrgicos. A utilização da escória de aciaria elétrica como material de construção para barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários auxilia no incremento do ciclo de vida deste material e, ao mesmo tempo, protege o meio ambiente.

Com base nos resultados do ensaio de adensamento, percebeu-se que a adição de resíduos com caráter cimentante aumentou a rigidez da mistura, fato que ficou mais evidente nas amostras da mistura ideal, independente da cura considerada, em relação às amostras de solo residual puro. Os parâmetros C_c e C_s da mistura ideal evidenciaram tal incremento de rigidez, visto que houve uma redução considerável de suas magnitudes comparativamente ao solo natural. Esses resultados são positivos no que diz respeito a aplicação em *liners*, visto que as deformações excessivas nos materiais utilizados na construção de barreiras impermeabilizantes podem causar trincas e fissuras, o que ocasiona o comprometimento da integridade da estrutura.

Percebeu-se que, mesmo que a mistura ideal seja submetida à percolação de metais pesados, o *liner* correspondente à mistura continua atendendo ao critério de $RCS > 200 \text{ kPa}$, diferentemente da RT, a qual, após a percolação pelo contaminante, superou o critério $20 \text{ kPa} \leq RT \leq 90 \text{ kPa}$. No ensaio de permeabilidade, os valores de permeabilidade saturada (K_{sat}) satisfazem o critério exigido ($K_{sat} < 10^{-7} \text{ cm/s}$) dos aterros sanitários após permeação contínua com solução contaminante.

Através das micrografias da mistura ótima com a presença do contaminante, observou-se que as partículas apresentaram morfologia irregular de alongada a cúbica, além de apresentarem superfície rugosa. Foram identificadas, também, partículas fibrilares envolvendo as demais partículas. Essas características são um dos fatores que influenciam em uma melhor qualidade de interação e ligação com outros materiais, proporcionando um aumento de resistência da mistura e redução do índice de vazios, garantindo um menor valor de permeabilidade.

No que diz respeito à eficiência dessa mistura ideal na retenção de metais pesados, verificou-se que os valores dos coeficientes de determinação mostrados no ensaio de equilíbrio em lote apresentaram magnitudes superiores a 0,77, demonstrando uma boa correlação entre o modelo de ajuste e os dados experimentais. O comportamento das isotermas permitiu inferir quanto a um processo favorável de remoção dos metais pesados pela mistura ideal. Esse comportamento ocorre porque os metais apresentaram expressiva afinidade por determinados grupos funcionais de superfície, formando moléculas estáveis, correspondente a uma adsorção específica, que resultou na baixa mobilidade dos metais na mistura ideal.

De acordo com a Resolução N° 430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2011), as condições padrão para lançamento

de efluentes em corpos receptores dos metais Cu, Mn, Cd, Pb e Zn são, no máximo, de 1,0 mg/L, 1,0 mg/L, 0,2 mg/L, 0,5 mg/L e 5,0 mg/L, respectivamente. Diante disso, é possível afirmar que, para todos os metais analisados nessa pesquisa, a concentração do percolado coletado nas buretas está abaixo do máximo permitido por norma. Ressalta-se a importância em se avaliar a mobilidade desses metais em barreiras selantes da mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal compactada, podendo-se inferir que barreiras construídas desse material não iriam causar a contaminação do solo adjacente e das águas subterrâneas em níveis superiores aos admissíveis. Os referidos elementos químicos presentes na solução contaminante multiespécie foram eficazmente retidos na mistura ideal.

A eficiência da escória de aciaria na remoção dos metais pesados pode estar associada tanto com a adsorção quanto com a precipitação. A precipitação com cal (CaO) foi considerada um dos métodos mais eficazes para o tratamento de soluções extremamente contaminadas por metais pesados, principalmente na capacidade de remoção de chumbo e cádmio. A interação entre o contaminante e os elementos químicos existentes no ambiente geoquímico do qual a escória de aciaria faz parte forma uma nova substância insolúvel, que se precipita. Tal fenômeno pode ocorrer tanto na superfície dos sólidos da mistura solo-resíduos siderúrgicos ideal quanto nos seus poros preenchidos com água.

Sugere-se que a junção do solo argiloso (presença de argilominerais, óxido de Al e aluminossilicatos) mais a escória de aciaria (presença de óxidos de Fe, óxido de Al, óxido de Ca) resulte na existência dessas superfícies de adsorção, conforme as caracterizações química e mineralógica desses materiais. Além disso, o pH básico da escória contribui significativamente na possibilidade de retenção dos metais por precipitação. Em vista disso, pressupõe-se que as escórias contribuíram positivamente nessa precipitação, podendo ser confirmadas pelos dados de suas caracterizações mineralógica e química.

Os resultados apresentados neste estudo mostram uma possibilidade de aplicação sustentável para as escórias de aciaria elétrica (primária e secundária). Porém, é importante destacar que, para que se tenha a garantia de remoção de metais em longo prazo, seriam necessárias investigações que levassem em consideração diferentes líquidos permeantes de forma a investigar se ocorreria a decomposição dos minerais cimentados ao longo do tempo, aumentando a condutividade hidráulica e/ou

reduzindo a resistência. A verificação da estabilidade em longo prazo de alguns dos precipitados e hidratos (como os géis C-S-H/C-A-S-H) também aprimoraria este estudo, dada a natureza de desempenho de longo prazo das barreiras. Outro ponto que seria interessante explorar seria o tempo de duração do ensaio de coluna para que seja possível afirmar com mais exatidão se, ao longo do tempo, essas barreiras perdem ou não sua eficiência em decorrência da presença constante de metais pesados.