UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

YAGO GUIDINI DA CUNHA

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES AMBIENTAIS DO LIXIVIADO DE OBRAS GEOTÉCNICAS MELHORADAS COM COPRODUTOS SIDERÚRGICOS

VITÓRIA

2020

YAGO GUIDINI DA CUNHA

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES AMBIENTAIS DO LIXIVIADO DE OBRAS GEOTÉCNICAS MELHORADAS COM COPRODUTOS SIDERÚRGICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas - Geotecnia. Orientador: Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires, Coorientador: Profa. Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira

VITÓRIA

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES AMBIENTAIS DO LIXIVIADO DE OBRAS GEOTÉCNICAS MELHORADAS COM COPRODUTOS SIDERÚRGICOS

Yago Guidini da Cunha

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas - Geotecnia.

Aprovado em: 08/05/2020.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires (Orientador)

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

_____

Profa. Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira (Coorientadora)
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

_____

Dra. Natália de Aquino Portela Moncioso (Examinador externo)
Instituto Federal do Espírito Santo (IFES)

_____

Profa. Dra. Karla Maria Wingler Rebelo (Examinador interno)
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

_____

Prof. Dr. Ronaldo Pilar (Examinador interno)
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

Cunha, Yago Guidini da, 1994-
C972a Avaliação das propriedades ambientais do lixiviado e da massa bruta de solos melhorados com coprodutos siderúrgicos obtidos em laboratório por meio de ensaio de coluna / Yago Guidini da Cunha. - 2020.
116 f. : il.

Orientador: Patrício José Moreira Pires.
Coorientadora: Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Avaliação de riscos ambientais. 2. Estabilização dos solos. 3. Coproduto de aciaria. 4. Ensaio de coluna. I. Pires, Patrício José Moreira. II. Teixeira, Jamilla Emi Sudo Lutif. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

AGRADECIMENTOS

“E pela lei natural dos encontros, eu deixo e recebo um tanto...”

E assim termina mais uma jornada. Deixo na universidade a minha dissertação e recebo em troca todo o conhecimento adquirido ao longo dessa pesquisa. Reconheço que jamais teria conseguido sozinho e para que isso fosse possível ao longo desses dois anos eu contei com inúmeras pessoas aos quais sou eternamente grato por toda ajuda que me deram, às vezes com um gesto, outras com simplesmente palavras ou um abraço.

Minha eterna gratidão aos meus pais por não terem medido esforços ao longo desses anos para que eu me sentisse bem durante a elaboração dessa pesquisa e por serem o meu maior tesouro ao qual carrego no coração e ao meu irmão por sempre acreditar e me impulsionar a alcançar sonhos maiores.

Agradeço aos técnicos dos laboratórios de Geotecnia e Pavimentação e de Materiais da UFES, em especial a Natália, por toda a ajuda na realização dos ensaios e nos momentos em que tudo parecia dar errado, obrigado por sempre estar disposta a me ajudar e incentivar. Também aos monitores do laboratório que sempre me auxiliaram na execução dos ensaios.

Ao meu orientador professor Dr. Patrício pela oportunidade concedida, por acreditar na pesquisa e por não medir esforços para que esse projeto fosse realizado. À minha coorientadora Ph.D Jamilla, pelas inúmeras sugestões e direcionamentos para onde seguir, confesso que, por vezes, tive medo de aparecer mais um coproduto para eu ensaiar e sobrecarregar, mas no final percebi que todas as dicas eram essenciais e necessárias.

Um agradecimento especial aqueles que, mesmo sem vínculo direto com o laboratório, sempre estiverem do meu lado me ajudando, cabe aqui um especial ao Adenis por sempre executar os projetos dos aparatos que eu precisava para desenvolver essa pesquisa.

Aos meus colegas do mestrado, Hully, Priscila, Lucas e Barbara, por fazerem essa jornada ao longo desses dois anos ser mais leve e, mesmo que as vezes com choros, ainda existia alguém para fazer a gente sorrir.

Meu muito obrigado à empresa Arcelor Mittal Tubarão, pelo incentivo financeiro e por ter acredito no meu potencial para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos meus amigos, eu deixo a minha eterna gratidão por serem tão especiais comigo, por entenderem a minha ausência em diversos eventos. Não me atrevo a citar nomes para não ser injusto. Aqueles que são especiais e foram essenciais durante esse período eu não canso de dizer e sabem que são.

“"Julgue seu sucesso pelas coisas que você teve que renunciar para conseguir".”

Dalai Lama

RESUMO

Na construção de obras geotécnicas, muitas vezes o solo local não possui características suficientes para ser utilizado com essa finalidade, sendo necessário realizar uma melhoria das suas características mecânicas e químicas. Uma das possibilidades é adicionar outros materiais para interagir com o solo. Atrelado à essa necessidade da construção civil, surge uma oportunidade nos coprodutos gerados pela indústria do aço, os quais possuem características já comprovadas para melhoramento de solos, que a cada ano tem produzido mais resíduos e, em alguns casos, não possuem utilidade. Uma vez que esses materiais possam ser utilizados, agregam valor a eles e reduzem os impactos ambientais gerados pela sua destinação final e da extração do solo em sua jazida. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da incorporação de coprodutos siderúrgicos ao solo, nas proporções de 30% para os coprodutos KR (*Kanbara Reactor*), Revsol®, Revsol Plus II®, escória de alto forno resfriada ao ar (EFRA), escória granulada de alto forno (EGAF) e de 6% para o FGD (*Flue Gas Desulfurization)*, em termos de massa seca. A fim de poder comparar com outros agentes estabilizantes, realizou-se misturas dos solos com cimento Portland. Para isso, verificou-se as possíveis mudanças nas propriedades do solo e do efluente percolado por meio do ensaio de coluna de percolação. Também foi avaliado o risco dos coprodutos ao meio ambiente por meio de avaliações toxicológicas e ecotoxicológicas. Os resultados mostraram que a incorporação dos resíduos siderúrgicos ao solo modifica as propriedades de efluente e do solo, mas em quase sua totalidade esses parâmetros ainda permanecem de acordo com as recomendações utilizadas como referência, CONAMA 420, 430 e Padrão de Potabilidade Resolução nº 5, mostrando que o uso do coproduto em misturas de solos, nas proporções estudadas, não oferecem risco ao meio ambiente e a saúde humana, exceto o efluente da amostra contendo o Revsol Plus II® em que o parâmetro Nitrito ficou acima do permitido para ser considerado potável ao ser humano.

Palavras-chave: Avaliação ambiental, Ensaio de coluna, Coproduto siderúrgico.

ABSTRACT

In the construction of geotechnical works, the local soil often does not have sufficient characteristics to be used for this purpose, making it necessary to improve its mechanical and chemical characteristics. One of the possibilities is to add other materials to interact with the soil. Linked to this need for civil construction, there is an opportunity to use co-products generated by the steel industry. These have proven characteristics for soil improvement. Once these materials can be used, they add value to them and reduce the environmental impacts generated by their final destination and soil extraction in their deposit. However, questions about the soil-co-product interaction and leaching products of these mixtures are still recurrent by several environmental agencies.Thus, the objective of this work was to evaluate the effects of incorporating steel byproducts into the soil in environmental control parameters. Soil-co-product mixtures were investigated in the proportions of 30% for KR (Kanbara Reactor), steel slag (LD), air-cooled blast furnace slag (ACBFS or EFRA), granulated blast furnace slag (EGAF) and 6% for Flue Gas Desulfurization (FGD), in terms of dry mass. In order to be able to compare with other stabilizing agents typically employed as soil improvers, soils were mixed with Portland cement. The possible changes in the properties of the soil and the percolating effluent were verified through the percolation column test. The risk of co-products to the environment was also assessed through toxicological and ecotoxicological assessments.The results showed that the incorporation of steel residues into the soil modifies the efluente and soil properties, but in almost all these parameters still remain in accordance with the recommendations used as a reference, CONAMA 420, 430 and Potability Standard of Resolution No. 5.Thus, it was found that the use of co-products in soil mixtures, in the proportions studied, does not pose a risk to the environment and human health, except for the sample effluent containing a mixture with LD, in which the nitrite parameter was above the allowed to be considered drinkable to human beings.

Keywords: Environmental Evaluation; Soil Improvement; Columns Test, Steel Co-products.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de fabricação do aço 18
Figura 2 - Esquema representativo do experimento de Darcy. 40
Figura 3 - Aparato do ensaio de coluna, percolação do contaminante 45
Figura 4 - Esquema construtivo da coluna utilizada nos ensaios de lixiviação 46
Figura 5 - Amostras dos materiais utilizados na pesquisa: a) Solo Puro; b) Escória bruta de alto forno; c) Escória granulada de alto forno; d) FGD; e) escória do tipo KR; f) Revsol g) Revsol Plus II; h) Cimento CPV 48
Figura 6- Esquema representativo do aparato do ensaio de coluna à esquerda e ao lado direito o aparato construído com foco na cola 54
Figura 7 - Detalhe da compactação dos corpos de prova 55
Figura 8 - Esquema representativo, não escalonado, da bancada para o ensaio de coluna 56
Figura 9 - Bancada com as amostras do ensaio de coluna em andamento..... 56
Figura 10 - Detalhe da haste de fixação 57
Figura 11 - Manômetro utilizado para coletar a pressão da água 58
Figura 12 - Entrega dos frascos para análise dos parâmetros ambientais 59
Figura 13 - Curva granulométrica do solo puro e dos coprodutos separados .. 61
Figura 14 - Curva granulométrica do solo puro e das misturas 67
Figura 15 - Curva de compactação do solo puro e das misturas 69
Figura 16 - Resultado do ensaio de difratometria das amostras 72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de escória de aciária LD estudadas por diversos autores. 24
Tabela 2 - Resumo dos resíduos gerados na fabricação do aço 26
Tabela 3 - Parâmetros potabilidade para o consumo humano 33
Tabela 4 - Parâmetros de prevenção da contaminação do solo 34
Tabela 5 - Parâmetros para os critérios de lançamentos de efluentes 35
Tabela 6 - Valores máximos para os parâmetros ambientais para as escórias serem utilizadas em obras geotécnicas no Japão 36
Tabela 7 – Valores máximos para os parâmetros ambientais para as escórias serem utilizadas em obras geotécnicas na Espanha 37
Tabela 8 - Valores máximos para os parâmetros ambientais para as escórias serem utilizadas em obras geotécnicas em Portugal 38
Tabela 9 - Valores típicos de condutividade hidráulica 42
Tabela 10 - Composição das misturas ensaiadas para os ensaios físicos 49
Tabela 11 – Resumo dos ensaios realizados na caraterização 51
Tabela 12 - Ensaios realizados na avaliação de riscos 52
Tabela 13 - Parâmetros verificados na análise ambiental 60
Tabela 14 - Resumo do ensaio de caracterização do solo puro e dos coprodutos 62
Tabela 15 - Resultado do ensaio de lixiviação segundo a NBR 10005 63
Tabela 16 - Resultado do ensaio de solubilização segundo a NBR 10006 64
Tabela 17 - Resultado dos Ensaios de Ecotoxicologia Terrestre 65
Tabela 18 - Resultado dos Ensaio Ecotoxicologia Aquática 65
Tabela 19 - Resultado dos Ensaios Toxicológicos e Genotoxicológicos 66
Tabela 20 - Resumo do ensaio de caracterização das misturas 68
Tabela 21 - Parâmetros de compactação do solo puro e das misturas ..... **Erro! Indicador não definido.**
Tabela 22 - Análise quantitativa de óxidos presentes nas amostras 71
Tabela 23 - Compostos das amostras pelo ensaio de difratometria de raio-x . 72
Tabela 24 -Resultado da condutividade hidráulica das amostras 73
Tabela 25 - Resultado do pH do lixiviado das amostras 74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SIGLA	DESCRIÇÃO
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
IABr	Instituto Aço Brasil
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
FGD	*Flue Gas Desulfurization*
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
EUROSLAG	*European Slag Conference*
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EFRA	Escória de alto forno resfriada ao ar
LD	Linz-Donawitz
pH	Potencial Hidrogeniônico
ISC	Índice de Suporte Califórnia
CBR	Índice de Suporte Califórnia
BOF	*Basic Oxygen Furnace*
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
DRX	Difração de Raios x
FRX	Fluorescência de Raios X
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
KR	*Kambara Reactor*
EFRA	Escória de alto forno resfriada ao ar
EGAF	Escória granulada de alto forno
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA 14
1.2 OBJETIVO 15
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18
2.1 INDÚSTRIA SIDERÚRGICA E SEUS COPRODUTOS 18
2.1.1 Coqueria e o resíduo do processo de dessulfuração de efluentes gasosos 20
2.1.2 Escória de alto forno 21
2.1.3 Escória de Aciaria 24
2.2 ESTABILIZAÇÃO E MELHORAMENTO DE SOLOS 26
2.2.1 Estabilização Mecânica 27
2.2.2 Estabilização Química 28
2.3 ASPECTOS AMBIENTAIS 29
2.3.1 Especificações técnicas para utilização de agregados siderúrgicos em obras geotécnicas no Brasil 30
2.3.2 Especificações técnicas para utilização de agregados siderúrgicos em obras geotécnicas à nível mundial 35
2.4 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA 39
2.4.1 Fatores que influenciam a condutividade hidráulica 41
2.4.2 Ensaios de condutividade hidráulica em laboratórios 43
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL 46
3.1 MATERIAIS 46
3.2 ENSAIOS 48
3.2.1 Metodologia utilizada na dosagem das misturas 48
3.2.2 Etapa I – Caracterização física, mecânica, química, mineralógica e toxicologia ambiental 50
3.2.3 Etapa II - Ensaio de Coluna 53
3.2.4 Etapa III – Análise Ambiental 58
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 61
4.1 Etapa I – Caracterização física, mecânica e química 61
4.1.1.1 Ensaio de compactação 69
4.1.1.2 Ensaio de FRX 70
4.1.1.3 Ensaio de DRX 71
4.1.2 Etapa II – Ensaio de Coluna 73

4.1.3 Etapa III – Análise Ambiental 74
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 86
5.1 CONCLUSÃO 86
5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS 87
REFERÊNCIAS 88

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA

Em construções de obras geotécnicas o ideal é utilizar o próprio solo local para essa construção, entretanto muitas vezes os solos locais não atendem as características geotécnicas adequadas para essa utilização. Quando isso acontece, é feito o uso de aditivos para melhorar as suas características, geralmente é o índice de plasticidade, expansão e a permeabilidade do solo.

Realizar o melhoramento de um solo tem se tornado uma opção viável para a construção de obras geotécnicas, como base e sub-base de obras viárias, e base de aterros sanitários devido aos quesitos econômicos, ambientais e de viabilidade técnica.

Sabendo que o Brasil é um grande produtor de aço e, consequentemente, um grande gerador de coprodutos siderúrgicos, há a necessidade de reutilizar, reciclar ou reaproveitar esses materiais. Diante dessa oportunidade, esses agregados podem ser adicionados aos solos locais para suprir essa demanda, além da possibilidade dessas misturas de solos com coprodutos causar uma melhoria nas características.

Pode-se citar em âmbito nacional as pesquisas de Ramos (2017) que avaliou o uso do coproduto KR como estabilizante químico para solos de baixa consistência e Oliveira (2018) que avaliou o uso do mesmo coproduto mas como agente estabilizante de solos para fins de pavimentação, e internacional os estudos de Jiang *et al*. (2011) que relataram pesquisas colaborativas realizadas na China e nos Estados Unidos que identificam usos práticos do FGD como construções de rodovias, e Autelitano e Giuliani (2016), que estudaram escórias misturadas com cimento para utilização como camadas de pavimentos de base e sub-base. Silva *et al.* (2002) relatam o que desde o início do século XX já se faz o aproveitamento de escórias de aciaria em geral por

vários países, como a Inglaterra, Alemanha, Polônia, França e Japão, para diversas finalidades.

Adicionar os agregados siderúrgicos em solos torna-se uma alternativa possivelmente viável, uma vez que é positivo reduzir os impactos da extração de agregados naturais que são recursos não renováveis. Todavia é preciso verificar as características técnicas como, por exemplo, o potencial expansivo e os possíveis impactos ambientais.

Entretanto, observa-se na literatura poucos estudos que visam os aspectos geotécnicos e químicos das misturas desses resíduos com solos tropicais voltados às características ambientais. Havendo a necessidade de, além dos aspectos técnicos, estudar a viabilidade do ponto de vista ambiental.

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral deste projeto de pesquisa é estudar a influência nos parâmetros ambientais da adição de coprodutos siderúrgicos em um solo para uso de obras geotécnicas por meio de ensaios de coluna.

Para alcançar o objetivo geral, constituem os objetivos específicos desta pesquisa:

- Avaliar o efeito dos agregados no que diz respeito as mudanças nas características e propriedade do solo e, consequentemente, na possível melhoria das propriedades hidráulicas;

- Avaliar o risco dos coprodutos KR, Revsol® e EFRA ao meio ambiente por meio de avaliações toxicológicas e ecotoxicológicas;

- Avaliar ambientalmente, conforme as normas vigentes, todas os materiais e efluentes e comparar a performance ambiental dos coprodutos frente dos materiais convencionais

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho se subdividiu em 5 capítulos divididos em duas partes. A primeira parte, contendo os capítulos 1 e 2, fará uma abordagem teórica, enquanto a segunda parte, capítulos 3 a 5, será uma apresentação e análise dos resultados que foram obtidos em laboratório.

Capítulo 1: É apenas um capítulo introdutório. Primeiramente é necessário fazer uma breve justificativa da motivação dessa pesquisa. Esse capítulo conta com os objetivos e a estrutura da pesquisa.

Capítulo 2: Conta com uma revisão bibliográfica sobre os tópicos mais importantes e os conceitos abordados. Apresenta um estudo referente ao panorama nacional e internacional da produção de escória e resíduos siderúrgicos e aborda, também, os conceitos sobre melhoramento do solo e os fatores que alteram a condutividade hidráulica, além de abordar as especificações técnicas e os documentos existentes no país e no mundo a respeito do uso de agregados siderúrgicos em obras geotécnicas.

Capítulo 3: É apresentada a metodologia adotada para caracterização laboratorial dos materiais de estudo, com uma breve descrição dos procedimentos que foram utilizados e, finalmente, apresenta as propriedades químicas, ambientais, mineralógicas, granulométricas, físicas e mecânicas que foram obtidas por meios de ensaios realizados em laboratório.

Capítulo 4: Capítulo de apresentação e comparação dos resultados obtidos com os ensaios realizados durante a pesquisa.

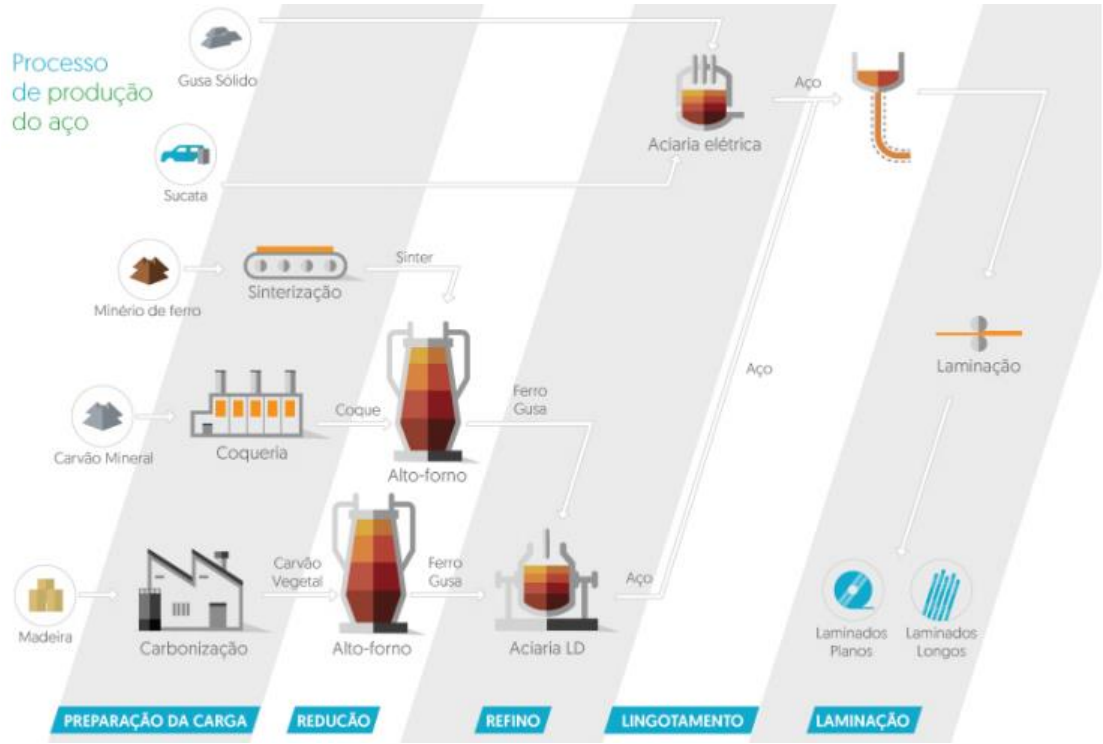
Capítulo 5: Neste último capítulo foram apresentadas as principais conclusões da pesquisa e algumas propostas para desenvolvimento de pesquisas futuras acerca do mesmo tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INDÚSTRIA SIDERÚRGICA E SEUS COPRODUTOS

Carvalho, Mesquita e Araújo (2015) explicam que o processo produtivo do aço, conforme Figura 1, pode ser dividido basicamente em três etapas: redução, refino e conformação mecânica. Na primeira etapa, o minério de ferro é transformado em ferro metálico, também conhecido como ferro-gusa e, em seguida, na etapa de refino, após a remoção das impurezas da liga metálica e a redução do teor de carbono, se obtém o aço propriamente dito. Por fim, na etapa de conformação mecânica, o produto ainda semiacabado, obtido na solidificação do aço (lingotamento), é laminado em forma de barras, tubos, chapas, fios, entre outros.

Figura 1 - Processo de fabricação do aço



Fonte: Instituto do Aço Brasil (2018).

Souza (2007) esclarece que durante alguns estágios do processo siderúrgico como, por exemplo, no alto forno ou na aciaria, são gerados alguns resíduos também conhecidos como escórias e que, devido ao emprego de altas

temperaturas, em torno de 1500 – 1600ºC, essas escórias não possuem nenhum tipo de substância orgânica.

Segundo o Relatório de Sustentabilidade do Instituto do Aço Brasil – IABr (2019), no país apenas 9 estados produzem o aço, sendo a maior concentração na região Sudeste, onde o estado do Espírito Santo, em 2018, foi responsável por 20,6% da produção nacional de aço bruto. Nesse mesmo ano, foram produzidas 34,4 milhões de toneladas no país e a cada tonelada de aço foi gerado cerca de 670kg de resíduos e coprodutos direto (pós, lamas, escórias, carepas, refratários, etc). A nível mundial, durante o ano de 2018 o país representou 2,0% da produção enquanto a nível da América Latina se manteve como o maior produtor de aço, gerando cerca de 54% dessa região.

De todo o resíduo gerado na produção do aço no ano de 2018, 40% desse volume foi de coprodutos de alto-forno, enquanto 27% representa a produção de escória de aciaria e o restante da produção é referente aos finos, pós, lamas, entre outros. Da produção de agregado, 85% foram reaproveitados, 12% foram estocados nos pátios das empresas e 3% feita a disposição final (IABr, 2019).

Segundo Li e Guo (2014), na China o uso da escória varia de acordo com o seu tipo e basicamente é empregado em tijolos, construções de rodovias, na composição do cimento, do concreto e em aterros. O último levantamento realizado pela Euroslag (2018), apontou que no ano de 2016, além do uso descrito anteriormente, a escória é utilizada como fertilizante e na engenharia hidráulica, além do uso dentro dos próprios processos metalúrgicos.

Em alguns países, como por exemplo, Austrália, Nova Zelândia, Indonésia e Malásia o uso da escória tem ido além, sendo aplicado em drenos para tratamento de águas subterrâneas e em geopolímeros (AUSTRALASIAN, 2010).

No Japão, as escórias têm sido utilizadas conforme a aplicação dos outros países já mencionados, como na melhoria do solo, agregados para concreto,

rodovias, entre outras aplicações. É interessante destacar que dentre os seus usos, a utilização em rodovias no ano de 2017 equivaleu a aproximadamente 35% de toda a produção de escória (NIPPON SLAG ASSOCIATION, 2017).

2.1.1 Coqueria e o resíduo do processo de dessulfuração de efluentes gasosos

Durante o processo de produção do aço é necessário se obter o coque, que é um combustível sólido e uma fonte de carbono capaz de fundir e reduzir o minério de ferro. Nesse processo, o carvão coqueificável é aquecido a altas temperaturas, até cerca de 1100º C, em ausência de ar que gera uma decomposição térmica e o material amolece, aglomera e solidifica-se formando um sólido poroso, rico em carbono e de alta resistência mecânica, denominado coque, são gerados também alguns produtos voláteis (ABM, 2008).

A queima de combustíveis fósseis, como o carvão mineral, gera além das cinzas de fundo e das cinzas volantes os gases exaustos da combustão que são compostos por dióxido de carbono (CO_2), dióxido de enxofre (SO_2) e óxidos de nitrogênio (NOx) que, dependente da dose, podem ser contaminantes e nocivos à saúde humana (TISSOT e MISSEL, 2011).

You e Xu (2010) esclarece que o SO_2, principal contaminante, além de, quando inalado por humanos e dependendo da concentração, ser considerado tóxico, provoca chuvas ácidas pois reage com a água e o oxigênio presente na atmosfera produzindo o ácido sulfúrico (H_2SO_4), que pode causar danos à vegetação, águas e bem materiais, como as construções. Por isso, as autoridades vêm tornando o padrão de emissão deste gás mais restritivo. Existem algumas alternativas para realizar o controle da concentração de emissões de SO_2 na natureza como, por exemplo, unidades de dessulfurizarão de gases, *Flue Gas Desulfurization* (FGD).

Santos (2007) esclarece que nesse processo, por exposição ou por contato com um absorvente ou adsorvente, o SO_2 é separado de uma corrente gasosa.

Esses materiais podem ser injetados na caldeira de combustão de forma direta por um duto na saída da caldeira ou uma unidade que é projetada para esta finalidade.

A Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (CIENTEC) realizou um levantamento em que se estima a geração anual de 400.000 toneladas de resíduo FGD nas usinas termelétricas da região Sul e Nordeste (ROHDE; MACHADO, 2016). No estado do Espírito Santo no ano de 2014 foram geradas cerca de 25 mil toneladas de resíduo FGD provenientes da produção do coque, para fabricação do ferro-gusa e do aço na industrial siderúrgica (SUNCOKE ENERGY, 2015).

O resíduo FGD tem sido utilizado em diversos setores ao redor do mundo como, por exemplo, em concreto e argamassa, fabricação de cimento, preenchimento estruturais, aplicações em mineração, agricultura, entre outros. (CAAA, 2014).

Já é possível perceber na literatura estudos voltados a construção de bases e sub-bases estabilizadas com o resíduo FGD na China (Jiang et al. 2011; Su et al., 2015) e no Estados Unidos da América (Jackson et al., 2009).

2.1.2 Escória de alto forno

No alto-forno, o coque e o sínter, produzido a partir do processo de sinterização do minério de ferro, ou seja, pela aglomeração dos finos, além dos fundentes são misturados. Nesse processo é produzido o ferro gusa que é o metal líquido obtido a partir da redução do minério de ferro. Inevitavelmente além do ferro gusa é produzido a escória de alto-forno que podem ser classificadas de dois tipos a depender do seu processo de resfriamento.

Moreira (2006) comenta que o alto forno tem como função principal a remoção do oxigênio do minério de ferro, tornando-o ferro metálico e o separando das partes não metálicas, a escória. Todos os constituintes indesejáveis são

incorporados na escória, que se torna um líquido menos denso e fica separado do ferro gusa que, posteriormente, será solidificada.

A atividade hidráulica das escórias de alto forno está ligada, entre outros fatores, ao processo de resfriamento. Basicamente pode-se classificar esse processo diretamente ao tempo de resfriamento, sendo rápido ou lento. No caso do resfriamento lento, as escórias são resfriadas ao ar (EFRA) depositadas em pátios da própria indústria e recebem o nome de escória bruta de alto forno, Air-*Cooled Blast Furnace Slag* (ACBFS), mas também conhecida como Dry-Pit (ARRIVABENI, 2000). Já o resfriamento rápido é realizado por jatos de água em alta pressão que são lançados diretamente na saída da escória, gerando a escória granulada de alto forno (EGAF) (MASSUCATO, 2005).

Özbay et al. (2016) esclarecem que as escórias bruta de alto forno são um sólido que é estável e composto de silicatos cristalizados, enquanto na formação das escórias granulada de alto forno, que são resfriadas de forma brusca por jatos de água, o solido é gerado com forma granular e amorfa, de silicatos Ca-Mg-Al e que podem ser utilizadas na fabricação de cimento, depois de serem moídas com uma finura pré-estabelecida.

A escória de alto forno tem como principais componentes, óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO), o dióxido de silício (SiO_2) e óxido de magnésio (MgO), que representam 95% da composição da escória (SILVA, 2016).

Pesquisas têm sido desenvolvidas nos últimos anos para verificar novas possibilidades de utilização das escórias de alto forno. Sant'Ana (2003), por exemplo, avaliou a resistência mecânica de misturas solo e EGAF moída seguindo os teores de 5, 10 e 15% em relação a massa seca de solo e ativada com cal hidratada, a fim de utilizar como camada de pavimentos de estradas florestais. Os autores observaram o aumento significativo da resistência mecânica das misturas com os agregados de acordo com o aumento do teor de escória utilizada.

Na empresa ArcelorMittal Tubarão a escória granulada de alto-forno tem como maior mercado a Construção Civil para o processo de fabricação de cimento. A escória substitui parte do clínquer consumido, o que reduz a quantidade de CO_2 emitido para a atmosfera durante o processo de produção e a exploração de reservas naturais de calcário e argila, matérias-primas do clínquer.

Os dados do IABr (2019) apontaram que quase todos agregados siderúrgicos de alto-forno que foram reaproveitados no ano de 2016 e 2017 (98%) foram vendidos para a produção de cimento. No Brasil, existem algumas normas que permitem o uso da escória de alto-forno em pavimentação elaboradas pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), sendo:

- DNER EM 260/94. Escórias de alto forno para pavimentos rodoviários – especificação de material

- DNER EM 261/94. Escórias de alto forno para pavimentos rodoviários – procedimento.

Em casos de aplicação em pavimentos, a escória granulada pode ser utilizada, desde que seja misturada com brita e cal, já a escória bruta pode ser utilizada apenas com a adição de cal (SENÇO, 2001).

Kirmse (2006) explica que, em alguns casos, pode ser realizado o tratamento do gusa a fim de diminuir a quantidade de enxofre, antes de ser adicionado nos convertedores, utilizando o processo de dessulfuração pelo reator Kambara (KR) consequentemente, além do gusa tratado, é gerada a escória do tipo KR.

Essa escória, além da elevada quantidade de ferro, também pode conter cerca de 40 a 60% de CaO (TONG *et al.,* 2015). SHENG *et al.* (2014) detalham os principais componentes químicos da escória do tipo KR: CaO, Fe, SiO_2, MgO, Al_2O_3, S, P, e C.

2.1.3 Escória de Aciaria

Freitas (2018) esclarece que nas aciarias, o processo de refino pode ser realizado por diversas formas, entre elas pelo forno Siemens-Martin (Open Heart – OH), pelo conversor a oxigênio que pode ser do tipo Linz Donawitiz (LD) ou Basic Oxygen Furnace (BOF) que é usado no processo integrado, e pelo Forno Elétrico a Arco (Eletric Arc Furnace), usado em usinas semi integradas. Sendo assim, esse processo pode gerar dois tipos distintos de escórias de aciaria. Na Tabela 1 é possível verificar a composição química das escórias de aciaria LD que foram estudadas por diversos autores.

Tabela 1 - Composição química de escória de aciária LD estudadas por diversos autores.

Autor	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	MnO	Fe	S	P_2O_5
Murphy et al., 1997	35	11,5	3,6	18	6,5	-	-	-
Motz; Geiseler, 2001	45-55	<3	<3	12-18	<5	18	-	<2
Geiseler, 1999	48-54	1-4	1-4	11-18	1-4	14-19	-	-
George; sorrentino, 1980	47	6	1	13	5	25	<0,1	2
Filev, 2002	44,3	6,4	1,5	13,8	5,3	17,5	0,07	-
Little; setepla, 1999	36-46	5,5-12,5	0,8-2,4	11-15,5	-	14-22	-	-

Fonte: Rodrigues (2007).

Uma das características das escórias de aciaria que pode limitar o seu uso em algumas aplicações é a propriedade expansiva. Freitas (2018) esclarece que a expansão pode diminuir por um processo de cura onde a água e o ar atmosférico reagem com os óxidos de cálcio e magnésio livres, e os transforma em hidratos estáveis. A própria estocagem das escórias, que muitas vezes é feita em pátios abertos, se torna necessária para que esse processo de cura ocorra.

Mesmo com esse fator, algumas pesquisas têm sido desenvolvidas nos últimos anos a fim de demonstrarem o possível uso da escória de aciaria em bases de obras geotécnicas. (TARAZONA, 2016; SOUZA, 2007; PARENTE *et al.*,(2003); ROHDE, 2002). Parente et al*.,* (2003) avaliaram a escória de aciaria nas porcentagens de 50 e 70%, em termos de massa seca, adicionada a um solo com o objetivo de utilizar o material na construção de bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente. Como resultado, verificaram que o valor de Índice de Suporte California (ISC ou CBR) para a mistura solo-escória foi, em média, 3 vezes maior que o do solo puro.

Oliveira (2018) avaliou o uso de coproduto de dessulfuração de Reator Kambara como agente estabilizante de solos para fins de pavimentação nas proporções de 10, 20 e 30% e verificou que em relação aos parâmetros mecânicos o coproduto apresenta desempenho comparável, senão superior, ao do cimento Portland.

Pode-se citar como aplicações para a escória de aciaria LD como sendo em base e sub-base rodoviária, cimento, gabiões, drenos rodoviários, lastro ferroviário, entre outros (ARCELORMITTAL BRASIL, 2015).

A empresa ArcelorMittal Tubarão produz os coprodutos Revsol® e Revsol Plus II® que são obtidos por meio do beneficiamento da escória de aciaria LD em planta de britagem, peneiramento e retirada da fração metálica. Esses coprodutos têm como principal aplicação o revestimento primário de vias, pátios e aterros.

O Revsol Plus® é produzido em 4 tipos diferentes, seguindo a seguinte composição:

- Revsol Plus I® – 50% Escória de Aciaria LD + 50% Escória KR. Utilizado em revestimento primário, cobertura de pátios e elevação de cota sob camadas de argila.

- Revsol Plus II® – 33% Escória de Aciaria LD + 33% Escória KR + 33% de Escória Granulada. Utilizado em base e sub-base de pavimentos com asfalto ou intertravado.

- Revsol Plus III® – 70% Escória Granulada de alto forno + 30% de Escória KR. Utilizado em base e sub-base de pavimentos de concreto ou intertravado.

- Revsol Plus IV® – 25% Escória Granulada de alto forno + 25% de Escória KR + 25% de LD + 25% de lama de alto forno. Utilizado em base e sub-base de pavimentos com asfalto ou intertravado.

A Tabela 2 apresenta uma quadro-resumo dos resíduos gerados na fabricação de aço e que foram abordados aqui nesta pesquisa.

Tabela 2 - Resumo dos resíduos gerados na fabricação do aço

	Escória de alto Forno	**FGD**	**Escória de Aciaria**
Resíduo gerado no brasil (2016-2017)	42%	-	27%
Principais componentes	SiO_2, CaO, Al_2O_3	SiO_2, CaO, SO_3	SiO_2, CaO, FeO
Destinação/Uso	Bases de estrada, Asfalto, Aterro / Terraplanagem, Agregado para concreto, Cimento	Concreto, argamassa, fabricação de cimento, estabilização de resíduos, agricultura	Base e sub-base rodoviária, cimento, gabiões, drenos rodoviários

Fonte: Autor (2019).

2.2 ESTABILIZAÇÃO E MELHORAMENTO DE SOLOS

Solos locais, que não possuem os requisitos mínimos necessários para serem destinados a função ao qual se deseja, têm como umas das possíveis soluções a alteração das características a fim de enquadrá-lo dentro das especificações técnicas para o seu uso, fazendo com que sejam capazes de atender de forma

satisfatória esses requisitos, ou seja, realizando a estabilização ou o melhoramento deste solo.

A escolha por substituir o solo local por outros ou realizar a melhoria dele tem como função direta o custo para o transporte do novo material e a retirada do solo local, a finalidade da obra ao qual se destina e as propriedade técnicas ao qual se deseja. É comum encontrar na literatura a distinção entre melhoramento, estabilização e reforço de solos de acordo com a quantidade e o tipo de material que será utilizado, bem como a alteração que será provocada nas suas propriedades.

Guimarães (2002) divide a estabilização em dois grupos: a mecânica e a que emprega agentes químicos. A estabilização mecânica trata-se de uma correção de granulometria por adição ou subtração de uma fração do material, a fim de atender aos parâmetros exigidos por norma, enquanto a estabilização química utiliza aditivos, orgânicos ou não, como por exemplo, resinas, cal, cimento, entre outros. Bueno (2003) caracteriza o reforço de solos como o método pela utilização de determinados tipos de fibras, sejam elas orgânicas ou inorgânicas.

Medina e Motta (2004) explicam que ao realizar a estabilização de um solo, independentemente do método que está sendo aplicado, seja mecânico ou químico, têm-se como função melhorar pelo menos uma de três características: a permeabilidade, fazendo com que o solo modificado tenha uma maior ou menor permeabilidade; a compressibilidade, a fim de tornar o solo menos compressível; e a resistência ao cisalhamento, para que ela seja compatível com as cargas que estão sendo projetadas para a estrutura do projeto.

2.2.1 Estabilização Mecânica

Para Lima *et al.* (2003) a estabilização mecânica pode ser resumida em dois métodos para realizar a alteração das propriedades dos solos: o rearranjo das partículas dos sólidos por compactação e a adição ou subtração das partículas para realizar a correção granulométrica.

A estabilização granulométrica é baseada no uso de um ou mais materiais em uma mistura com o solo ao qual se deseja melhorar, a fim de obter uma distribuição granulométrica que faça essa mistura se enquadrar dentro das especificações, assim a resistência será garantida pelo contato entre as partículas maiores e aqueles vazios que serão preenchidos pelas partículas de granulometria mais fina, fazendo com a permeabilidade seja menor e a densidade, por sua vez, seja maior (GONDIM, 2008).

Trindade (2008) expõe que a estabilização mecânica por meio da compactação pode ser definida como um processo da ação mecânica que é transferida ao solo sob um esforço de compressão, fazendo com que haja a redução do índice de vazios, ocasionado pela expulsão de ar contido no solo.

Macedo (2004) atenta para o fato da necessidade de se definir qual será o grau de compactação a ser atingido no campo, independente do material utilizado em qualquer tipo de estabilização.

2.2.2 Estabilização Química

Silva (2011) chama a atenção para os casos em que é feita a aplicação dos métodos de melhoramento de solos por compactação. Segundo o autor, muitas vezes esses métodos são inadequados para a estabilização de solos superficiais ou aqueles solos que podem vir a ter contato com a água e que são sensíveis a esse contato, uma vez que, a resistência é aumentada, mas a suscetibilidade dos solos à variação de umidade não é afetada.

Diante desse cenário, os métodos de estabilização química se tornam uma opção bastante viável para o melhoramento de solos superficiais ou que possam ter reações na presença de água, uma vez que esse método tem efeito positivo sobre vastas propriedades geotécnicas, como por exemplo, a expansibilidade.

Almeida (2016) esclarece que esse tipo de estabilização é originado pelas reações químicas que envolvem um certo número de processos entre os agentes estabilizantes, a água e as partículas dos solos, obtendo uma mistura com características melhores do que o solo puro.

Segundo Dias (2016), os principais aspectos que são influenciados com a estabilização química são cimentação, o preenchimento de vazios com consequente diminuição da permeabilidade, reações de troca catiônica e revestimento com um consequente ligamento das partículas do solo.

Nos últimos anos a técnica de estabilização química tem sido usada em diversos setores da construção civil como a construção de aeroportos, revestimentos de canal, construção de estradas e bases de obras geotécnicas. Puppala (2016) explica que a melhoria das propriedades do solo geralmente ocorre devido à uma redução das características de afinidade com a água além da formação química de uma espécie de gel e das ligações entre as partículas do solo.

2.3 ASPECTOS AMBIENTAIS

A princípio, o uso de coprodutos industriais utilizados em substituição ou melhoramento dos agregados naturais pode minimizar os impactos ambientais referentes à necessidade de se obter materiais de empréstimos, pois tais materiais muitas vezes são oriundos de jazidas ou até mesmo de britagem, ou seja, desmonte e fracionamento de rochas.

Entretanto, deve-se atentar aos possíveis impactos ambientais causados pelo uso desses resíduos ao meio ambiente. Esses impactos acontecem principalmente pelo fluxo d’água, e podem ocorrer durante e após a compactação da obra.

A qualidade da água é uma característica que requer muita atenção, uma vez que pode afetar a fauna, flora e a qualidade de vida humana, por isso, existem algumas leis voltadas a ela.

2.3.1 Especificações técnicas para utilização de agregados siderúrgicos em obras geotécnicas no Brasil

O uso de resíduos e coprodutos industriais aplicados na estabilização de solos utilizados em base de obras geotécnicas pode reduzir o custo da construção, porém é necessário se atentar aos fatores ambientais relativos ao potencial de contaminação ao meio ambiente por parte desses materiais e das misturas solo/resíduos.

Diante dessa possibilidade de contaminação, torna-se de grande importância os estudos de impactos ambientais voltados aos possíveis risco de contaminação nos ecossistemas em torno da aplicação dos resíduos, principalmente relacionados ao fluxo de água.

Para se realizar a classificação de um solo, é preciso compreender os aspectos do seu processo, as características de cada componente e realizar uma comparação de cada componente em relação a resíduos e substâncias que já se conhece o impacto ao meio ambiente e à saúde humana.

A norma responsável por regulamentar a classificação dos resíduos no Brasil é a NBR 10004 que divide os resíduos em duas classes, I e II. Os resíduos de classe I são classificados como perigoso, enquanto o da classe II são resíduos não perigosos e são subdivididos em duas classes: Classe II A, resíduos não inertes; e a classe II B são os resíduos inertes.

A norma supracitada divide os resíduos sólidos de acordo com o seu processo de origem, a fim de classificar os riscos à saúde e ao meio ambiente. Tal classificação se dá por:

- Resíduos classe I – Perigosos - Resíduos ou misturas que contenham o material que, em função da sua inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxidade e patogenicidade, podem apresentar risco à saúde humana e ao meio ambiente.

- Resíduos classe II A – Não inertes – Resíduos que não se encontram nas classificações de classe I e classe II B e que podem possuir propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

- Resíduos classe II B – Inertes – Resíduos que, quando submetidos ao teste de solubilidade, não apresentam nenhum constituinte solubilizado em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Devido a crescente preocupação com às questões ambientais e ao tempo em que a norma ficou sem ter uma revisão, a ABNT instituiu a Comissão de Estudo Especial Temporária de Resíduos Sólidos (CEET-00.01.34) que publicou posteriormente a norma que está em vigor. Mesmo com essa atualização, ainda existem muitos questionamentos quanto a interpretação dela. Por isso, em 2016 a ABNT expediu uma Nota Técnica. O objetivo dessa nota foi de esclarecer quanto à finalidade da norma NBR 10004 que é apenas de classificar os resíduos quanto aos seus possíveis riscos ao meio ambiente e à saúde pública, instruindo os setores que os gerenciam. A Nota ainda esclarece que essa classificação não impede o uso dos resíduos em outras atividades alternativas (KAMINSKI, 2007).

A Lei 9.605, criada em 1998 e modificada ao longo dos últimos anos, dispõe sobre as sanções penais e administrativas oriunda de atividades ou condutas que lesam o meio ambiente, enquanto o Decreto 6.514, de 2008, trata sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente e estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações, como por exemplo, no artigo 61 é citada a multa que varia de R$ 5.000,00 (cinco mil reais) a R$ 50.000.000,00 (cinquenta milhões de reais) para as atividades que causem

poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana.

Para que o estado tenha o conhecimento da situação em que os resíduos sólidos gerados pela atividade industrial se encontram, e possa cumprir seu papel na elaboração de diretrizes para o controle e gerenciamento dos resíduos industriais no país, foi desenvolvido um formulário para a coleta de informações por meio da Resolução Nº 313 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

Tal resolução dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais e caracteriza-os como todo resíduo proveniente de atividades industriais que esteja no estado sólido, semissólido, bem como os gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam, para isso, soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Pereira (2005) explica que a reciclagem ou o reaproveitamento dos resíduos podem ser realizados de três maneiras: uso do resíduo dentro do próprio processo industrial; reaproveitamento interno, por meio de um novo processo; e o reaproveitamento externo, vendendo ou doando os resíduos para que ele seja utilizado como matéria prima em outro processo industrial.

Além do custo com o transporte, em casos de reaproveitamento externo, outro fator é bastante considerado quando utilizado esse tipo de reciclagem, que é a responsabilidade sobre esses resíduos, uma vez que é de responsabilidade do gerador garantir a total reutilização do resíduo doado ou vendido.

No país, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) foi responsável por normatizar a utilização da escória de aciaria e da escória de alto forno em pavimentos rodoviários. O uso da escória de aciaria é definido pela especificação DNER EM 262/94, enquanto da escória de alto forno pela especificação DNER EM 260/94. Essas duas normas especificam os critérios

técnicos que cada material, entre eles a composição granulométrica, absorção de água, massa específica, durabilidade ao sulfato de sódio e desgaste por abrasão por meio do ensaio de Los Angeles.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) permite o uso das escórias em sub-base estabilizada granulometricamente para pavimentos flexíveis por meio da DNIT 1041/2009 desde que atenda aos requisitos técnicos dessa norma como, por exemplo, expansibilidade e CBR. Além disso, existem outras normas relacionadas às escórias, como a DNIT 113, 114 e 115/209 e a DNIT 406 e 407/2017.

Sobre os quesitos ambientais voltados à água subterrânea e superficial, o Ministério da Saúde por meio da Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, estabelece alguns procedimentos e responsabilidade relativo ao controle e a vigilância da qualidade da água para o consumo humano e o padrão de potabilidade, sendo indiferente se a fonte é um resíduo ou não, dessa forma, os critérios de valores máximos permitidos para cada elemento estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros potabilidade para o consumo humano

Elemento	**Limite máximo (mg/L)**
Arsênio	0,01
Bário	0,7
Cádmio	0,005
Cobre	2
Mercúrio	0,001
Selênio	0,01

Fonte: Portaria de Consolidação Nº 5/2017. (2017)

Nota: Dados adaptados pelo autor.

Durante e após a construção da base do aterro, a chuva pode ocasionar carregamentos de partículas dos resíduos ou da mistura solo/resíduo, carregando substâncias químicas para as águas superficiais e para os lençóis freáticos, alterando suas propriedades.

O pH indica a alcalinidade, a acidez ou a neutralidade, pelas concentrações dos H^+ e OH^- presente no meio, e é usado para a avaliação da qualidade da água. A Portaria citada anteriormente, além dos parâmetros expostos na Tabela 3, utiliza o pH como padrão de potabilidade, em casos para abastecimento público, por exemplo, o meio deve apresentar valores entre 6,0 e 9,5.

Em 2009, o Conselho Nacional do Meio Ambiente elaborou a Resolução nº 420 a fim de atender à necessidade de estabelecer os critérios e os valores orientadores, nesse caso, voltados à prevenção da contaminação do solo e as diretrizes para gerenciamento de áreas contaminadas, consequentemente, proteção da qualidade das águas superficiais e subterrâneas estão inclusas nessa resolução. Na Tabela 4 estão expostos alguns desses parâmetros.

Tabela 4 - Parâmetros de prevenção da contaminação do solo

Elemento	**Limite máximo(mg/L)**
Alumínio	3,5
Antimônio	0,005
Arsênio	0,1
Bário	0,7
Cádmio	0,005
Cobre	2
Ferro	2,45
Mercúrio	0,001
Molibdênio	0,07
Níquel	0,02
Selênio	0,01
Fenol	0,14

Fonte: CONAMA- Resolução nº 420 (2009)

Nota: Dados adaptados pelo autor.

É importante destacar que, ainda se tratando sobre as questões ambientais relacionadas a água subterrânea e superficial, o CONAMA em 2011 publicou a Resolução nº 430 que trata sobre as condições, parâmetros, padrões e

diretrizes para gestão de lançamento de efluentes em corpos de águas receptores. As condições contemplam a temperatura, a vazão máxima, os materiais sedimentares e o pH desse efluente. Assim como a resolução anterior, existem valores máximos para cada parâmetro predefinido por essa resolução. Na Tabela 5 estão expostos alguns dos parâmetros inorgânicos desta resolução.

Tabela 5 - Parâmetros para os critérios de lançamentos de efluentes

Elemento	Limite máximo no extrato (mg/L)
Arsênio	0,5
Bário	5
Cádmio	0,2
Cobre	1
Ferro	15
Mercúrio	0,01
Níquel	2
Selênio	0,3
Sulfeto	1

Fonte: CONAMA- Resolução nº 430 (2011)

Nota: Dados adaptados pelo autor.

2.3.2 Especificações técnicas para utilização de agregados siderúrgicos em obras geotécnicas à nível mundial

A utilização de materiais alternativos, como as escórias, nas construções de obras geotécnicas e infraestruturas de transportes possuem especificações técnicas ligadas diretamente às características do material natural, fazendo com que os materiais alternativos se adequem aos mesmos requisitos do material natural (ROQUE et al., 2010).

Entretanto, foi possível constatar pelo Projeto Europeu I&D ALT-MAT (1999) que os ensaios empíricos e as correlações que são desenvolvidas entre os materiais alternativos e os materiais naturais não são adequadas, pois não é

possível prever, de fato, o comportamento desses materiais quando são empregados em campo.

No Japão, por meio da Japonese Industrial Standard (JIS) o uso das escórias de aciaria é normalizado desde 1979. Hoje, a norma em vigor é a JIS A-5015, elaborada em 1992 e, devido aos avanços das pesquisas sobre esse coproduto, houve a necessidade de ser atualizada em 2015.

A norma prescreve as características mecânicas do material para utilização em construções de pavimentos como, por exemplo, o limite para expansibilidade que precisa ser menor do que 1,5% ao final dos 10 dias, tal ensaio é realizado de acordo com os procedimentos do próprio país. No caso do CBR, o material precisa obter um valor superior a 80% para uso em camadas de base e superior a 30% para utilização em camadas de sub-base.

No que diz respeito às características ambientais, foco dessa pesquisa, as escórias precisam estar de acordo com os limites que são estabelecidos pelo ministério do meio ambiente do país. Na Tabela 6 estão condensados os valores máximos para cada elemento encontrado na escória.

Tabela 6 - Valores máximos para os parâmetros ambientais para as escórias serem utilizadas em obras geotécnicas no Japão

Elemento	**Limite máximo no extrato (mg/L)**
Arsênio	0,01
Benzeno	1
Cádmio	0,01
Chumbo	0,01
Crómio VI	0,05
Flúor	0,08
Mercúrio	0,0005
Selênio	0,01

Fonte: Sasaki (2015).

Já na Espanha, o uso da escória é assegurado pelo conjunto de normas *Pliego De Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes*

também conhecido como PG-3 que foi atualizado em 2017. O PG-3 traz uma série de requisitos para que as escórias de aciaria possam ser utilizadas como materiais granulares de pavimentos, porém não específica os valores de referência quanto aos aspectos ambientais.

Na Comunidade Autónoma do País Basco, Espanha, a Sociedade Pública de Gestão Ambiental, IHOBE, S.A, a fim de determinar um critério ambiental para o uso da escória de aciaria como agregados em bases, sub-bases, leitos de pavimento e aterros, realizou um estudo (IHOBE, 2002), em que foi constatado que, do ponto de vista ambiental, somente 73% da escória de aciaria produzida por esta comunidade poderia ser utilizada para esta finalidade.

Os elementos que se encontravam acima do permitido e que ofereciam riscos ao meio ambiente na maioria das escórias estudadas eram os elementos como o bário, o crómio, o vanádio, o flúor e os sulfatos. Por fim, o estudo recomenda que seja feito o ensaio de lixiviação, nesse caso de acordo com a norma vigente do país, EN 12457 (procedimento C). Para que a escória possa ser utilizada como base e sub-base, os resultados obtidos no ensaio de lixiviação devem ser menores do que os valores expostos na
Tabela 7.

Tabela 7 – Valores máximos para os parâmetros ambientais para as escórias serem utilizadas em obras geotécnicas na Espanha

Elemento	**Limite máximo (mg/L)**
Bário	17
Cádmio	0,009
Chumbo	0,8
Crômio	2,6
Flúor	18
Molibdênio	1,3
Níquel	0,8
Selênio	0,007
Sulfatos	377
Vanádio	1,3
Zinco	1,2

Fonte: IHOBE (2002).

Caso estejam dentro desses valores, a escória poderá ser utilizada como base de obras geotécnicas pelos seus quesitos ambientais. É importante destacar que também é necessário verificar os aspectos técnicos e econômicos.

Em Portugal não existia uma normativa com critérios específicos para o uso de escórias em obras geotécnicas. Em 2009, o Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional de Portugal publicou o Decreto-Lei nº 183/2009 que em seu artigo 2º autoriza o uso de resíduos inertes para o efeito em obras de reconstrução ou restauro e enchimento ou para fins de construção nos aterros, ou seja, são resíduos que não oferecem risco ao meio ambiente ou à saúde pública.

Para o resíduo ser classificado como inerte, é preciso que ele esteja dentro dos valores limites do ensaio de lixiviação, nesse caso realizado conforme as normas europeias EN 12457-2 ou EN 2457-4, que depende da dimensão da partícula a ser ensaiada. Na Tabela 8 estão expostos os valores limites para cada parâmetro de acordo com o Decreto-Lei nº 183/2009.

Tabela 8 - Valores máximos para os parâmetros ambientais para as escórias serem utilizadas em obras geotécnicas em Portugal

Elemento	**Limite máximo no extrato (mg/L)**
Arsénico	0,5
Bário	20
Cádmio	0,04
Crómio total	0,5
Cobre	2
Mercúrio	0,01
Molibdênio	0,5
Níquel	0,4
Chumbo	0,5
Antimônio	0,06
Selênio	0,1
Zinco	4
Flúor	800
Sulfato	1000
Índice de Fenol	1

Fonte: Decreto-Lei nº 183/200, Portugal (2009).

De fato, é possível perceber que, por meio de legislações, os países entendem que o desenvolvimento sustentável e, consequentemente, a diminuição dos resíduos é de suma importância para o planeta, além da responsabilidade com as futuras gerações, tendo cuidado com a possível contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas. É importante destacar, que todas as legislações apresentadas por diversos países são apenas referências, visto que cada norma pode utilizar de uma metodologia de análise específica e, muitas vezes, diferente entre si. Portanto, não se pode aplicar os valores máximos de cada país para as análises brasileiras. Além disso, o processo de formação dos solos pode dar características que, eventualmente, destoam dos limites que são estabelecidos como referência pelas normas.

2.4 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Em estudos que envolvem a aplicação de resíduos, a caracterização dos condicionantes geológicos e hidrogeológicos do meio se fazem necessários, uma vez que esses resíduos podem ocasionar a migração dos contaminantes no solo. Por isso, a condutividade hidráulica do meio é um dos parâmetros que podem ser destacados como de grande importância para esses estudos. Ou seja, é necessário se conhecer a facilidade com que o fluído atravessará o meio poroso e o que isso poderá acarretar ao meio ambiente.

Das (2011) elucida que a permeabilidade dos solos é função de diversos fatores, tanto do solo quanto do fluído que está sendo submetido a esse solo, dentre eles a viscosidade do fluído, a distribuição granulométrica, o índice de vazios, a rugosidade das partículas minerais e o grau de saturação do solo.

Para Almeida e Schalch (2008), quanto menor for a condutividade hidráulica do solo, menor será a velocidade de migração do contaminante, portanto, menor será o volume contaminado.

Darcy, por meio dos seus estudos com um experimento ilustrado na Figura 2, descreveu a condutividade hidráulica como sendo um coeficiente proveniente de uma lei originada pelos seus estudos, conhecida como Lei de Darcy, que pode ser expressa por:

Onde:

Q = vazão constante que passa pelo meio poroso, medida em L^3/T;

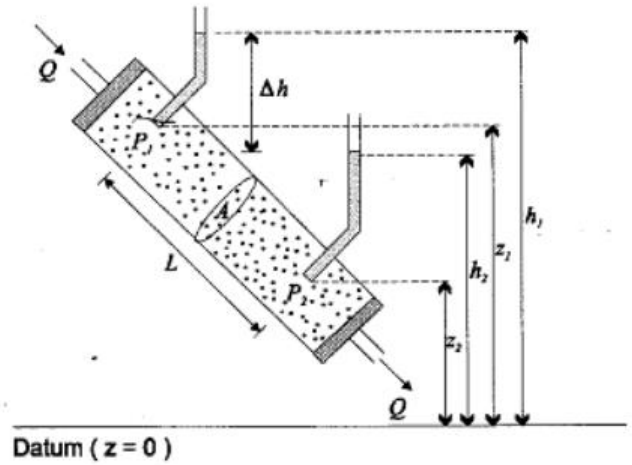
A = área da seção transversal através da qual a água flui em L^2;

L = distância que o fluído percorre (L);

h1 e h2, cargas hidráulicas (L) nos pontos 1 e 2 respectivamente;

K = coeficiente de permeabilidade.

Figura 2 - Esquema representativo do experimento de Darcy.



Fonte: Feitosa & Filho (2000).

Feitosa e Filho (2000) esclarecem que a razão entre (h1 - h2) e o comprimento L é denominada gradiente hidráulico i que representa a taxa de perda de carga por unidade de comprimento.

A Lei de Darcy é válida somente para fluxo em estado laminar através de um meio poroso. Portanto, a velocidade da água pode ser expressa como:

Sendo:
v = é a velocidade de descarga de um fluido
k = coeficiente de permeabilidade
i = gradiente hidráulico

Lukiantchuki (2007) acrescenta que a condutividade hidráulica é diretamente ligada ao fluido percolante e as características do meio poroso, ou seja, em casos em que um fluido com densidade e viscosidade distintas, percolado por um mesmo meio poroso, o valor obtido para K será diferente nos dois casos. E, ainda que o fluído seja o mesmo, quando percolado em um meio poroso diferente, os valores da condutividade hidráulica também serão diferentes para cada meio.

2.4.1 Fatores que influenciam a condutividade hidráulica

Para Fernandes (2006), a granulometria é o que mais impacta na permeabilidade. Para solos sedimentares alguns valores típicos de coeficiente de condutividade hidráulica são apresentados conforme mostra a Tabela 9, porém Mesquita e Moraes (2004) atentam que, não é possível prever a condutividade hidráulica a partir da textura de um solo, uma vez que a mineralogia, a estrutura e a porosidade são fatores que também influenciam os valores de K.

Tabela 9 - Valores típicos de condutividade hidráulica

Solos sedimentares	Valores de K (m/s)
Argilas	$< 10^{-9}$
Siltes	$10^{-6} < a < 10^{-9}$
Areais argilosas	$< 10^{-7}$
Areias finas	$< 10^{-5}$
Areais médias	$< 10^{-4}$
Areias grossas	$< 10^{-3}$

Fonte: Pinto (2000).

No que diz respeito à estrutura do solo, deve-se atentar à umidade com que é feita a compactação. Sobre esse aspecto, pode-se citar os estudos de Lambe e Whitman (1969) que investigaram a influência do teor de umidade em amostras de argilas siltosas.

Como resultado, os autores constataram que em casos em que a compactação acontecia acima da umidade ótima ocorria a situação de uma estrutura dispersa, em que as partículas se orientavam de forma paralela, dificultando a passagem do fluxo e, consequentemente a condutividade hidráulica.

Em contrapartida, nos casos em que a compactação é feita abaixo da umidade ótima, as partículas se orientam conforme uma estrutura floculada, fazendo com que haja a facilidade de passagem do fluído, aumentando a condutividade hidráulica.

Outro fator importante que afeta diretamente a condutividade hidráulica de um meio é o seu grau de saturação. Poehls e Smith (2009) clarificaram que dentro da zona saturada, a condutividade hidráulica é maior do que na zona de aeração, uma vez que o excesso de água pode fluir livremente, pois como há muito água nos poros as propriedades de adesão e coesão são sustentadas.

Diante de todos esses fatores que podem influenciar de forma ativa a condutividade hidráulica, nota-se a importância de se ter cuidado ao correlacionar o valor de K bem como fazer uma generalização para o

comportamento de um solo de uma determinada região, sendo necessário ensaios que visam determinar o valor de K, seja em laboratório ou *in situ*.

2.4.2 Ensaios de condutividade hidráulica em laboratórios

A fim de encontrar um método que seja melhor do ponto de vista econômico e de representatividade dos resultados, diversos ensaios para a determinação da condutividade hidráulica têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados ao longo dos últimos anos. Segundo Lisboa (2006), a maioria desses ensaios são realizados em condições de saturação por meio de permeâmetros.

Os ensaios podem ser realizados em campo ou em laboratório. Agab (2005) esclarece que os ensaio realizados em campo possuem a vantagem no efeito escala e se torna mais representativo, enquanto os ensaios de laboratório possuem como vantagem a possibilidade do controle do grau de saturação, o sentido do fluxo, o gradiente hidráulico e um custo reduzido quando comparado ao ensaio de campo.

Na prática, a condutividade hidráulica em ensaios realizados em campo pode ser feita em furos de sondagem que são submetidos à carga constante e variável. Lisboa (2006) complementa elucidando que, além dos furos de sondagens, a determinação da condutividade em campo pode ser feita em poços ou cavas, ou por meio de infiltrômetros, que são equipamentos e arranjos especiais.

Em ensaios para a determinação de K em laboratório, os ensaios são divididos em aparatos de parede rígida e flexível, com gradientes hidráulicos constantes, utilizados em amostras que são bastante permeáveis onde o fluxo é mensurável e constante em um período curto, ou variável, em casos de amostras argilosas.

No ensaio por meio do permeâmetro de parede rígida, o corpo de prova é contido em uma caixa ou um tubo rígido, tendo o fluído sendo percolado ao

longo do seu eixo e as laterais entre o corpo de prova e o tubo devidamente preenchidas com material para selamento. É recomendado que esse tipo de ensaios seja realizado em materiais porosos, com condutividade hidráulica igual ou inferior a 10^{-3} cm/s. Como vantagem para esse ensaio, pode-se citar a facilidade do seu uso, entretanto, não é possível realizar a saturação total das amostras ensaiadas e realizar a saturação por contrapressão, além da possibilidade de acontecer fluxo lateral pelas paredes do tubo do permeâmetro, acarretando um valor de permeabilidade diferente da situação real.

Nos ensaios de condutividade hidráulica por permeâmetros de parede flexível, Farnezi (2006) explica que a amostra é confinada por materiais porosos, tanto na extremidade superior quanto na inferior, e a porção lateral é confinada por uma membrana flexível. Esse selamento proporcionado pela membrana faz com que este ensaio seja mais confiável. O autor esclarece que, apesar das diferenças e das desvantagens de cada ensaio, os dois tipos podem proporcionar bons resultados e a escolha por qual ensaio realizar depende de alguns fatores, como o tempo de execução, custo e a disponibilidade dos equipamentos para realização dos ensaios, entre outros.

O ensaio de coluna tem sido utilizado muitas vezes paralelamente ao ensaio de condutividade hidráulica a fim de se avaliar os efeitos químicos, físicos e biológicos no transporte de contaminantes em meios porosos. Esse ensaio possui a metodologia semelhante ao ensaio de permeabilidade a carga constante e consiste na passagem de fluxo de soluções que contenham constituintes químicos de interesse através de um permeâmetro com amostra de algum tipo de solo que se deseja estudar ou ainda a passagem de um liquidado qualquer para avaliar a possui contaminação desse liquido pela lixiviação do solo.

Meneguete (2018), por exemplo, realizou o ensaio de coluna na mesma amostra e no mesmo equipamento do ensaio de permeabilidade a fim de coletar o liquidado percolado e identificar as concentrações de sulfeto/sulfato.

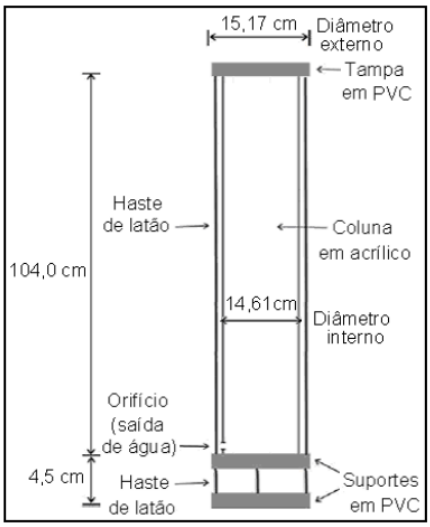
Demuelenaere (2004) em seu estudo de caracterização de propriedades de transporte de metais pesados em solos residuais do Rio de Janeiro realizou o ensaio de coluna, para determinar o fator de retardamento além da verificação de uma possível lixiviação dos contaminantes que eram compostos por soluções de cádmio e zinco. Na Figura 3 é exibido o aparato do ensaio de coluna realizado pelo autor.

Figura 3 - Aparato do ensaio de coluna, percolação do contaminante

Fonte: Demuelenaere (2004).

Salviano e Leite (2014) investigaram a possibilidade de aplicação da escória de aciaria do tipo LD para a elaboração de coberturas secas reativas em pilhas de estéril com rochas ácidas. A Figura 4 mostra o esquema construtivo das colunas utilizadas nos ensaios de lixiviação em que foram analisados do lixiviado os metais, sulfato, acidez, potencial hidrogeniônico e ΔpH, condutividade elétrica e potencial de Oxi-redução.

Figura 4 - Esquema construtivo da coluna utilizada nos ensaios de lixiviação



Fonte: Salviano e Leite (2004).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este projeto de pesquisa tem como base a realização de ensaios em laboratórios para alcançar os objetivos específicos. Como objetivo para esse programa experimental, pode-se citar a avaliação do comportamento hidráulico e ambiental de misturas realizadas com solo e coprodutos industriais. Todas as misturas foram submetidas aos mesmos procedimentos de ensaios, para que possam ser eliminadas outras variáveis do processo.

3.1 MATERIAIS

O solo utilizado nesta pesquisa é predominantemente argiloso e possui sua formação tropical laterítica. Foi coletado na região do município de Anchieta no estado do Espírito Santo, por volta do Km 368 da rodovia da BR 101, por meio de amostras deformadas e transportadas ao laboratório de Geotecnia e Pavimentação da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

O cimento Portland utilizado nessa pesquisa foi adquirido em comércio local. E trata-se do cimento de alta resistência inicial, comercializado como CP V – Ari,

que não contém adições de escórias em sua composição, sendo constituído de 0 a 5% de material carbonático e 95 a 100% de clínquer e sulfatos de cálcio, conforme NBR 5733 (ABNT, 1991). Sendo assim, a mistura contendo o CPV fica diferenciada das demais misturas, uma vez que não possui a interferência das escórias utilizadas nessa pesquisa.

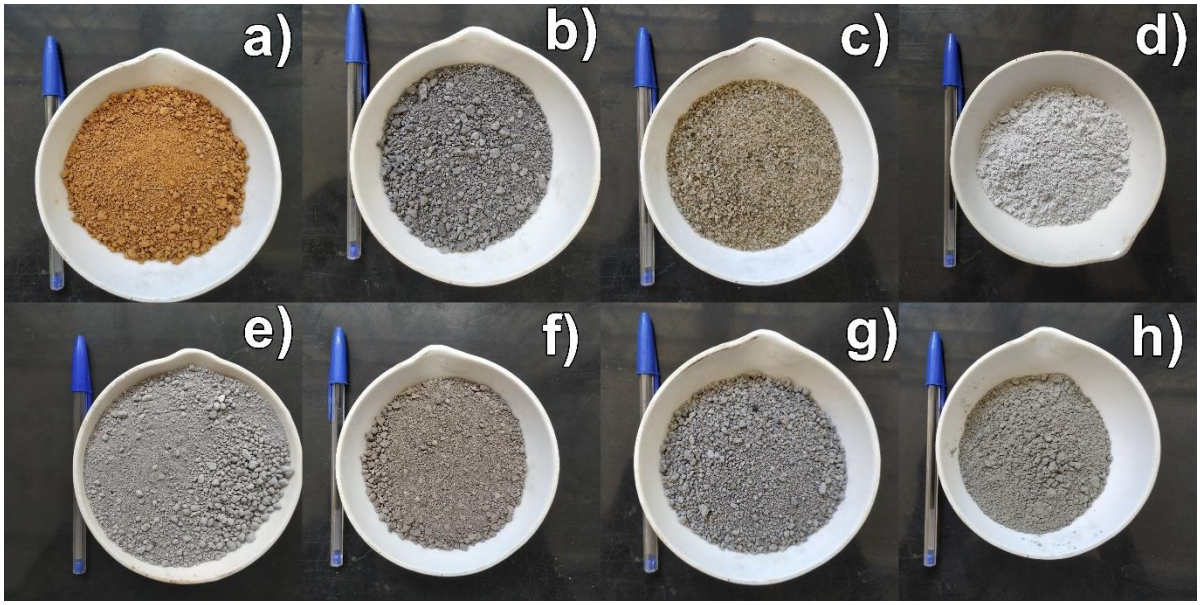
A amostra da escória LD utilizada nessa pesquisa e comercializada como Revsol® pela empresa doadora possui um CBR maior do que 80% e não é promovida a redução da expansão desse coproduto. A empresa recomenda a aplicação do Revsol® em misturas com argila, pois geralmente não apresenta plasticidade. Esse material é comumente utilizado em revestimento primário, elevação de cota sob camadas de argila e cobertura de pátios.

A amostra de Revsol Plus II® é composta de cerca de 33% escória de Aciaria LD, 33% escória KR e 33% de escória granulada de alto forno. Possui um CBR superior a 80% e a expansão menor do que 3%. Normalmente utilizado em base e sub-base de pavimentos com asfalto ou intertravado.

Os coprodutos Revsol® e Revsol Plus II® são obtidos por meio do beneficiamento da escória de aciaria em planta de britagem, peneiramento e retirada da fração metálica e a sua principal aplicação é como revestimento primário de vias, pátios e aterros quando se apresenta na granulometria de 0 a 19 mm.

Todos os coprodutos foram gentilmente doados pela empresa ArcelorMittal Tubarão localizada na região da Grande Vitória no Estado do Espírito Santo, na granulometria de 0 a 19 mm, com exceção do FGD que é foi enviado em forma de pó. As amostras do solo, coprodutos e do cimento estão expostas na Figura 5.

Figura 5 - Amostras dos materiais utilizados na pesquisa: a) Solo Puro; b) Escória bruta de alto forno; c) Escória granulada de alto forno; d) FGD; e) escória do tipo KR; f) Revsol g) Revsol Plus II; h) Cimento CPV



Fonte: Autor (2020).

3.2 ENSAIOS

Esse programa experimental foi dividido em três etapas: Etapa I, de caracterização dos materiais; Etapa II referente ao ensaio de coluna; e Etapa III, que se concentra na análise ambiental, em verificar se o líquido percolado pelas amostras ensaiadas e o solo estão de acordo com as normas vigentes.

3.2.1 Metodologia utilizada na dosagem das misturas

A mistura de solo compactado com os agregados foi baseada nas proporções já publicadas na literatura e que se mostraram favoráveis ao uso dos agregados como base de obras geotécnicas, cita-se como exemplo Ramos (2017) que avaliou o uso do coproduto KR como estabilizante químico para solos de baixa consistência nas proporções com cerca de 30% e chegou à conclusão que o coproduto foi capaz de promover aumento na resistência não drenada do solo, já Oliveira (2018) trabalhou com o mesmo coproduto, porém nas proporções de 10, 20, 30% a fim de avaliar seu potencial como agente

estabilizante de solos para pavimentação, observando que o desempenho do coproduto foi comparável senão superior ao do cimento Portland.

Portanto, definiu-se que a proporção de solo/agregados ideal seria de 30% em termos de massa seca, porém as misturas contendo FGD e o cimento CPV era inviável realizar nessas proporções, umas vez que relação é calculada em termos de massa e, consequentemente por serem materiais leves, o volume era desproporcional, por isso, após alguns ensaio, optou-se por fazer com apenas 6% de coproduto. O teor de CPV ainda é o normalmente utilizado para misturas de solo cimento, dessa forma pode reduzir incerteza pelo uso excessivo de CPV nas misturas.

A composição dos teores de cada amostra, bem como a nomenclatura adotada para essa pesquisa estão expostas na Tabela 10. Quanto à granulometria, será utilizado somente o material passante na peneira de 4,8 mm, todos os materiais que foram recebidos acima dessa granulometria, foram quarteados e peneirados a fim de encaixá-los nessa faixa.

Tabela 10 - Composição das misturas ensaiadas para os ensaios físicos

Amostra	**Sigla Adotada**	**Porcentagem de Material**							
		Solo Puro	**EFRA**	**EGAF**	**FGD**	**KR**	**REV**	**RevPlusII**	**CPV**
I	Solo Puro	100	-	-	-	-	-	-	-
II	EFRA	-	100	-	-	-	-	-	-
III	EGAF	-	-	100	-	-	-	-	-
IV	FGD	-	-	-	100	-	-	-	-
V	KR	-	-	-	-	100	-	-	-
VI	Rev	-	-	-	-	-	100	-	-
VII	RevPlusII	-	-	-	-	-	-	100	-
VIII	CPV	-	-	-	-	-	-	-	100
IX	SEFRA	70	30	-	-	-	-	-	-
X	SEGAF	70	-	30	-	-	-	-	-
XI	SFGD	94	-	-	6	-	-	-	-
XII	SKR	70	-	-	-	30	-	-	-
XIII	SREV	70	-	-	-	-	30	-	-
XIV	SRevPlusII	70	-	-	-	-	-	30	-
XV	SCPV	94	-	-	-	-	-	-	6

Fonte: Autor (2020).

3.2.2 Etapa I Caracterização física, mecânica, química, mineralógica e toxicologia ambiental

Para realizar a caracterização física dos materiais utilizados e das misturas, compreenderam os ensaios de granulometria completa, limites de consistência e ensaio de massa específica real dos grãos.

O ensaio para determinação da granulometria, por peneiramento e por sedimentação, foi realizado conforme NBR 7181:2016, Solo - Análise Granulométrica. Os limites de consistência, também conhecidos como Limites de Atterberg realizados com base nas normas NBR 6459:2016 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez e NBR 7180:2016 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.

Foi necessário se determinar a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo dos materiais, uma vez que as amostras dos corpos de prova para o ensaio de coluna foram moldadas de acordo com essa umidade ótima, para isso foi realizado o ensaio conforme a norma pela NBR 7182:2016, Solo - Ensaio de Compactação, compreendendo a caracterização mecânica.

No processo de caracterização química as amostras foram submetidas a ensaios para determinar condicionantes como o pH, teor de matéria orgânica (somente para o solo) e a Capacidade de Troca de Catiônica (CTC).

A fim de se realizar uma determinação qualitativa para caracterização estrutural de substâncias cristalinas as amostras passaram pelo ensaio de difração de raios-X (DRX) e, para análise quantitativa ao ensaio de fluorescência de raio-X (FRX). A Tabela 11 consolida todos os ensaios realizados de acordo com o seu tipo de caracterização.

Tabela 11 – Resumo dos ensaios realizados na caraterização

Etapa I	Solo Puro	EFRA	EGAF	FGD	KR	REV	RevPlus II	CPV	Misturas
Granulometria Completa	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Limites de Liquidez	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Limites de Plasticidade	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Massa específica	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Teor de matéria orgânica	x	x	x	x	x	x	x	x	
Classificação SUCS	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Curva de Compactação	x								x
pH	x	x	x	x	x	x	x	x	
CTC	x	x	x	x	x	x	x	x	
Espectrometria por Fluorescência de Raios X (FRX)	x	x	x	x	x	x	x	x	
Difratometria de Raios X (DRX)	x	x	x	x	x	x	x	x	

Fonte: Autor (2020).

Além desses ensaios, também foram realizadas avaliações toxicológicas e ecotoxicológicas das amostras de KR, Revsol® e EFRA, para verificar a segurança ambiental de suas aplicações.

A avaliação de ecotoxicidade é dividida entre terrestre e marinha, enquanto a avaliação toxicológica contempla também os ensaios genotoxicológicos apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Ensaios realizados na avaliação de riscos

	Ensaios	Norma de Referência
Ecotoxicológicos	Toxicidade Aguda com Minhocas (Eisenia foetida)	ABNT NBR 15537
	Toxicidade Aguda com Microcrustáceos (Daphnia similis)	ABNT NBR 12713
	Toxicidade Crônica com Microcrustáceos (Ceriodaphnia dúbia)	ABNT NBR 13373
	Toxicidade Aguda com Peixes (Danio rerio)	ABNT NBR 15088
	Toxicidade Crônica com Algas (Pseudokirchneriella subcapitata)	ABNT NBR 12648
Toxicológicos	Toxicidade Cutânea Aguda para Ratos (Rattus norvegicus)	OECD 402
	Toxicidade Inalatória Aguda para Ratos (Rattus norvegicus)	OECD 403
	Toxicidade Oral Aguda para Ratos (Rattus norvegicus)	OECD 423 ISO 10993:11
	Irritação Cutânea à Curto Prazo em Coelhos (Oryctolagus cuniculus)	ISO 10993:10 GHS
	Irritação Ocular à Curto Prazo em Coelhos (Oryctolagus cuniculus)	OECD 405 GHS
	Sensibilização Dérmica em Cobaias (Cavia porcellus)	OECD 406
Genotoxicológicos	Teste de Mutação Gênica Reserva (Teste de Ames)	OECD 471
	Micronúcleo em Medula Óssea de Camundongo (Mus musculus)	OECD 474

Fonte: Autor (2020).

Nesta pesquisa, os testes ecotoxicológicos se resumiram a algumas amostras de coprodutos, mas Crouyau e Moïa (2006) relata que a utilização de testes ecotoxicológicos a fim de se avaliar a possível contaminação de solos já é reconhecida internacionalmente com uma ferramenta que complementa a análise química. Isso porque a análise química apenas se propõe a quantificar as substâncias que estão presentes numa amostra de forma isoladas,

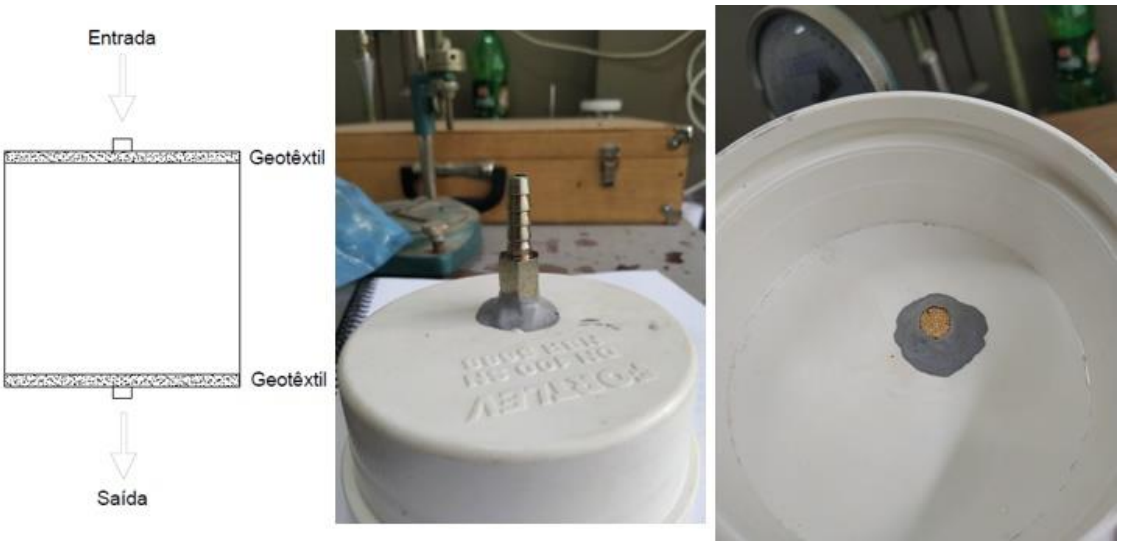
enquanto a análise ecotoxicológica considera como um todo e faz a avaliação dos efeitos de forma combinada dos diferentes componentes da amostra.

3.2.3 Etapa II - Ensaio de Coluna

No ensaio de coluna, ensaio fundamental para essa pesquisa, foi possível determinar indiretamente a condutividade hidráulica dos corpos de prova ensaiados e toda a água percolada foi coletada para as análises ambientais dos percentuais de concentração dos elementos inorgânicos. Esses resultados serão comparados com as normas brasileiras referente à classificação de resíduos, as condições, parâmetros, padrões de lançamento de efluentes e potabilidade.

Diante da confecção da cédula para esse ensaio, foram encontradas dificuldades em relação ao vazamento de água. Após várias tentativas, as colunas foram constituídas de um cilindro com aproximadamente 10 cm de altura (h) e 10 cm de diâmetro (d) interno. Em cada uma de suas extremidades foram acopladas uma base e uma tampa que possuem o’rings de borracha, que garantem o ajuste e a vedação das tampas, impedindo perda de líquido, o que poderia causar superestimativas das leituras. Foi utilizado como filtro um tecido geotêxtil para evitar a perda de solo que poderia ser carreado com o fluxo d’água. Além disso, também foi preciso utilizar uma cola do tipo massa epóxi para fixar o tubo de entrada e saída de água e evitar que houvesse vazamento. O aparato está representado na Figura 6.

Figura 6- Esquema representativo do aparato do ensaio de coluna à esquerda e ao lado direito o aparato construído com foco na cola



Fonte: Autor (2020).

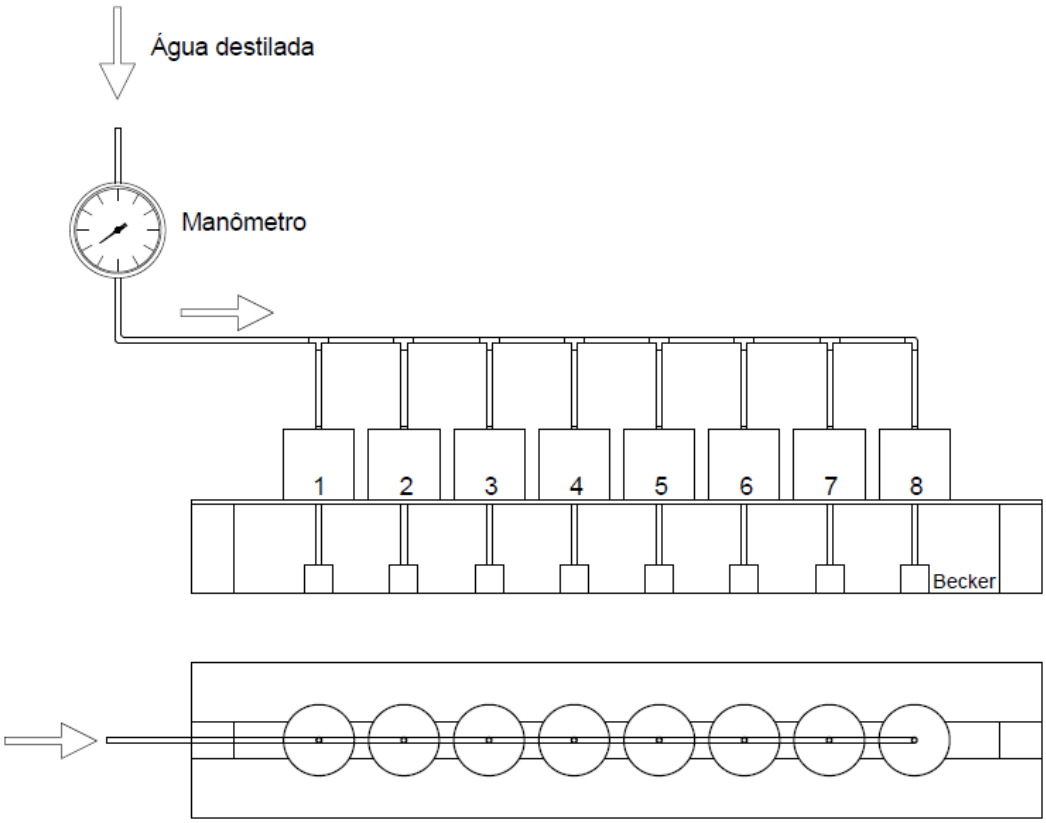
Optou-se por moldar os corpos de prova na própria célula para evitar caminhos preferenciais de percolação entre a amostra e a parede da célula (coluna). Durante a compactação dos corpos de prova, uma das preocupações era de não romper ou deformar o aparato feito de PVC e a peça de entrada e saída de água. Para isso, o aparato foi posicionado de forma que o impacto não atingisse essa peça e, além disso, também foi necessário o uso de uma espécie de colarinho de metal para evitar a deformação da amostra, conforme exibido na Figura 7.

Figura 7 - Detalhe da compactação dos corpos de prova

Fonte: Autor (2020).

As Figura 8 e Figura 9 retratam o esquema projetado para a bancada do ensaio de coluna e a bancada após a montagem já no momento da execução do ensaio respectivamente.

Figura 8 - Esquema representativo, não escalonado, da bancada para o ensaio de coluna



Fonte: Autor (2020).

Figura 9 - Bancada com as amostras do ensaio de coluna em andamento

Fonte: Autor (2020).

Para que houvesse fluxo nas amostras ensaiadas, foram realizados alguns testes e chegou-se à conclusão de que somente a pressão atmosférica não era possível, sendo necessário subir a uma carga de aproximadamente 7 metros de coluna d'água. Diante do ensaio com amostras testes, foi observado que a pressão de água ora era muito baixa e não suficiente para percolação, ora era alta e a tampa superior (cap) era empurrado para cima. Para conter esse problema, foi necessário criar esse pórtico ao qual o aparato era preso e fixado a fim de não haver movimentação vertical das tampas, conforme Figura 10.

Figura 10 - Detalhe da haste de fixação

Fonte: Autor (2020).

Para avaliar a pressão e conseguir medir o coeficiente de permeabilidade, optou-se por passar toda o líquido por um manômetro, como visto na Figura 11.

Figura 11 - Manômetro utilizado para coletar a pressão da água

Fonte: Autor (2020).

3.2.4 Etapa III Análise Ambiental

Os ensaios para os parâmetros inorgânicos foram realizados pelo laboratório Tommasi Ambiental, localizado na Serra, que é certificado pelo Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Inea) e pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro). As amostras do líquido percolado, bem como do solo, foram coletadas, rotuladas e guardadas até o envio para o laboratório que fez a análise de suas concentrações.

Para que não houvesse contaminação foi realizado uma lavagem com uma mistura preparada com solução de água destilada e 2% de ácido clorídrico. Assim, todas as mangueiras, peças, potes e recipientes que eram do laboratório foram lavados com essa substância. Os frascos que foram armazenados o líquido e o solo sob refrigeração não foi necessário realizar a limpeza, uma vez que eram esterilizados pelo laboratório que forneceu e

realizou os ensaios dos parâmetros ambientais. Os frascos que foram utilizados estão exibidos na Figura 12.

Figura 12 - Entrega dos frascos para análise dos parâmetros ambientais

Fonte: Autor (2020).

No Brasil, ainda faltam normas específicas para aceitação do reuso de resíduos, dessa forma, nessa pesquisa foram analisados todos os parâmetros inorgânicos que estão dispostos na Resolução do Conama Nº420 e Nº 430, além da Portaria de Consolidação nº 5, do Ministério da Saúde.

Todos os parâmetros estão separados conforme as normas e representados na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros verificados na análise ambiental

Resolução CONAMA Nº 430 - Efluente	**Resolução CONAMA Nº 420 - Solo**	**Portaria de Consolidação N°5**
Parâmetro	**Parâmetro**	**Parâmetro**
Arsênio Total	Alumínio Total	Antimônio Total
Bário Total	Antimônio Total	Arsênio Total
Boro Total	Arsênio Total	Bário Total
Cádmio Total	Bário Total	Cádmio Total
Chumbo Total	Boro Total	Chumbo Total
Cianeto Livre	Cádmio Total	Cianeto Total
Cianeto Total	Chumbo Total	Cobre Total
Cobre Dissolvido	Cobalto Total	Cromo Total
Cromo Hexavalente	Cobre Total	Fluoreto Total
Cromo Trivalente	Cromo Total	Mercúrio Total
Estanho Total	Ferro Total	Níquel Total
Ferro Dissolvido	Manganês Total	Nitrato
Fluoreto Total	Mercúrio Total	Nitrito
Manganês Dissolvido	Molibdênio Total	Selênio Total
Mercúrio Total	Níquel Total	Urânio Total
Níquel Total	Nitrato	
Nitrogênio Amoniacal Total	Prata Total	
Prata Total	Selênio Total	
Selênio Total	Vanádio Total	
Sulfeto Total	Zinco Total	
Zinco Total		

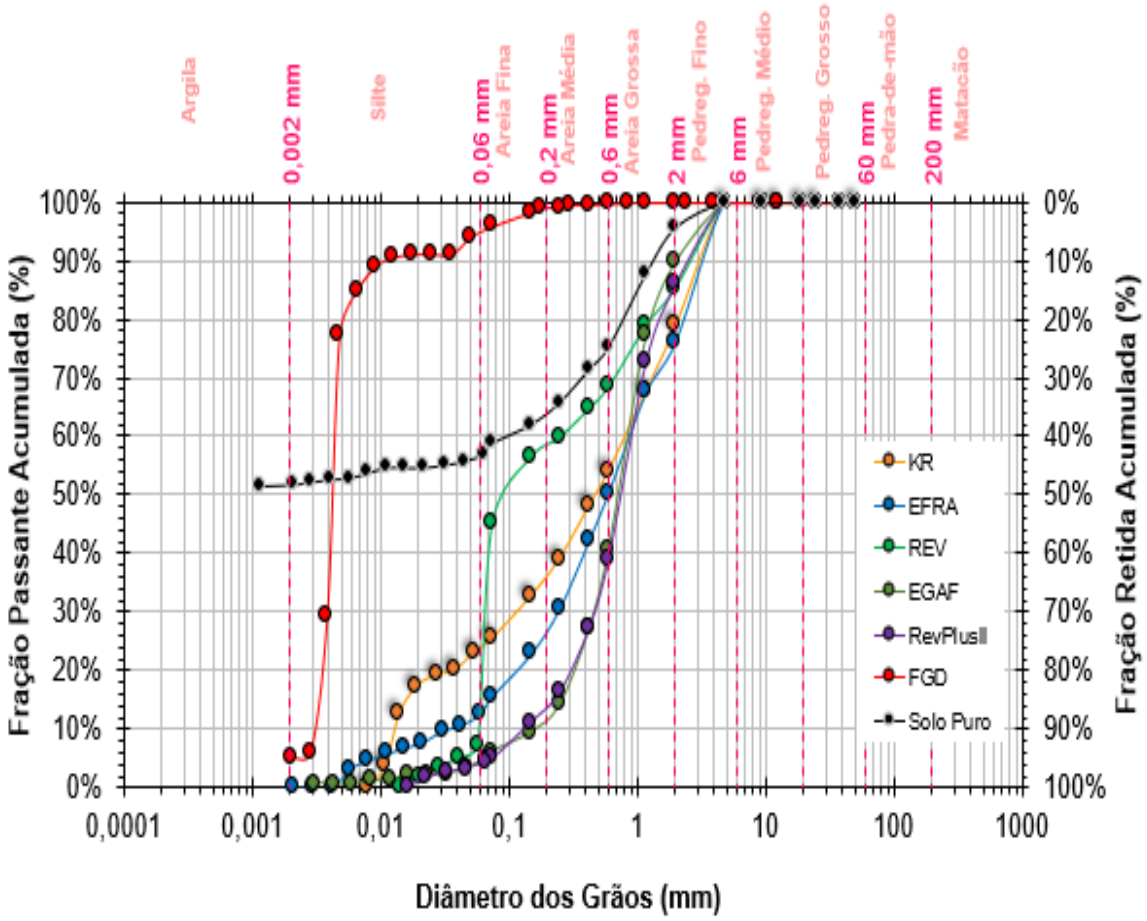
Fonte: Autor (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Etapa I – Caracterização física, mecânica e química

A Figura 13 mostra as curvas granulométricas dos ensaios realizados com as amostras dos coprodutos separados e da amostra de solo, enquanto a Tabela 14 apresenta o resumo dos ensaios de caraterização dessas amostras

Figura 13 - Curva granulométrica do solo puro e dos coprodutos separados



Fonte: Autor (2020).

Tabela 14 - Resumo do ensaio de caracterização do solo puro e dos coprodutos

Propriedade		Amostra							
		Solo Puro	**EFRA**	**EGAF**	**FGD**	**KR**	**REV**	**RevPlusII**	**CPV**
Massa específica real dos grãos (g/cm^3)		2,67	2,75	2,94	2,75	3,21	3,47	2,91	3,09
Limite de Liquidez (%)		49	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL
Limite de Plasticidade (%)		35	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Índice de Plasticidade		14	-	-	-	-	-	-	-
Teor de Matéria Orgânica (%)		8,9	0	0	0	0	0	0	0
pH		4,6	10,7	9,6	12,1	12,2	12,3	12,2	-
CTC efetiva (cmol c/dm_3)		1,9	64,3	6,5	97	47,1	37,5	27,3	63,7
CTC a pH 7,0 (cmol c/dm_3)		5,9	64,3	6,8	97	47,1	37,5	27,3	63,7
Fração Passante (%)	4,8mm (#4)	100	100	100	100	100	100	100	-
	2,0mm (#10)	95,6	89,9	76,2	100	78,8	85,4	85,9	-
	0,42mm (#40)	71,5	27,1	42,3	99,6	48,2	64,7	27,3	-
	0,075 mm (#200)	58,8	6,1	15,7	95,9	25,5	45,1	4,9	-
Classificação de solos	SUCS	ML	GP-GM	SM	CL	SM	SM	SM	-
ABNT NBR 10004:2004		-	II B-Inerte	II B-Inerte	II A-Não Inerte	II A-Não Inerte	II B-Inerte	II B-Inerte	-

Fonte: Autor (2020).

O solo puro, dada a sua caracterização, foi classificado pelo Sistema Unificado de Classificação (SUCS) como uma silte inorgânico (ML), contendo um teor de matéria orgânica de 8,9%. Com os resultados apresentados pela análise química do solo puro, é possível verificar que ele apresentou CTC a pH 7,0 de 5,9 cmol c/dm^3, considerado um médio teor de cátions trocáveis, enquanto o seu pH foi de 4,6.

Todos os coprodutos foram considerados como não líquidos e não plásticos, após a execução dos ensaios de Limites de Atterberg, como era esperado devido ao processo de fabricação que gera os coprodutos, todos apresentaram nenhum teor de matéria orgânica.

No que diz respeito à classificação dos resíduos segundo a NBR 10004, a empresa doadora dos coprodutos realizou a classificação desses materiais. O resultado dos dados obtidos pelo ensaio de lixiviação para os parâmetros inorgânicos, conforme a NBR 10005, está expresso na Tabela 15 enquanto do ensaio de solubilização, pela NBR 10006, encontra-se na Tabela 16.

Tabela 15 - Resultado do ensaio de lixiviação segundo a NBR 10005

	Identificação da amostra					
Parâmetros	**EFRA**	**EGAF**	**KR**	**FGD**	**REV**	**VMP**
Arsênio	< 0,01	< 0,01	< 0,0010	<0,5	0,01	1,0
Bário	1,09	1,31	1,116	0,21	0,01	70
Cádmio	< 0,001	< 0,001	< 0,0010	<0,01	0,001	0,5
Chumbo	< 0,01	< 0,01	< 0,010	<0,05	0,01	1,0
Cromo	< 0,01	< 0,01	< 0,010	0,02	0,01	5,0
Fluoreto	1,8	< 0,1	1,4	4,0	0,1	150
Mercúrio	< 0,00008	< 0,00008	< 0,0010	<0,05	0,00008	0,1
Prata	< 0,01	< 0,01	< 0,010	<0,02	0,01	5,0
Selênio	< 0,008	< 0,008	< 0,010	<0,5	0,008	1,0

VMP* = Valores Máximos Permitidos pela Norma ABNT NBR 10004:2004.

Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2015).

Tabela 16 - Resultado do ensaio de solubilização segundo a NBR 10006

	Identificação da amostra					
Parâmetros (mg/L)	**EFRA**	**EGAF**	**KR**	**FGD**	**REV**	**VMP**
Alumínio	0,0717	0,116	1,078	<0,01	0,183	0,2
Arsênio	< 0,01	< 0,01	< 0,0010	<0,01	< 0,01	0,01
Bário	0,491	0,0997	0,555	0,15	0,238	0,7
Cádmio	< 0,001	< 0,001	< 0,005	<0,005	< 0,001	0,005
Chumbo	< 0,01	< 0,01	< 0,0010	**0,03**	< 0,01	0,01
Cianeto	< 0,05	< 0,05	< 0,010	<0,012	< 0,05	0,07
Cloreto	18,1	38	110	**1550**	10,1	250
Cobre	< 0,005	< 0,005	0,0026	<0,005	< 0,005	2,0
Cromo	< 0,01	< 0,01	<0,010	<0,01	< 0,01	0,05
Ferro	< 0,01	0,0203	**0,345**	<0,01	< 0,01	0,3
Fluoreto	0,37	0,77	0,4	**2,9**	< 1	1,5
Índice de Fenóis	< 0,01	< 0,01	<0,003	<0,01	< 0,01	0,01
Manganês	< 0,01	< 0,01	0,038	<0,01	< 0,01	0,1
Mercúrio	< 0,00008	< 0,00008	<0,00010	<0,001	< 0,00008	0,001
Nitrato	< 0,5	< 0,1	0,33	**20**	< 2	10,0
Prata	< 0,01	< 0,01	<0,00010	<0,005	< 0,01	0,05
Selênio	< 0,008	< 0,008	<0,010	**0,03**	< 0,008	0,01
Sódio	9,83	11,7	16,76	17	11,8	200,0
Sulfato	90,9	53	< 2,0	**1045**	< 10	250
Surfactantes	0,12	< 0,1	< 0,10	0,5	< 0,1	0,5
Zinco	< 0,01	0,0133	0,024	<0,02	< 0,01	5,0

VMP = Valores Máximos Permitidos pela Norma ABNT NBR 10004:2004.

Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2015).

Comparando-se os resultados obtidos do ensaio de lixiviação com os valores máximos permitidos pela NBR 10004:2004 - Anexo F, é possível afirmar que os parâmetros satisfazem os limites permitidos para todas as amostras ensaiadas.

No ensaio de solubilização, ao se comparar os resultados com os valores máximos permitidos pela NBR 10004:2004 – Anexo G, é possível afirmar que as amostras de EFRA, EGAF e REV satisfazem os limites permitidos e, em função desses resultados, são classificadas como Classe II B - Resíduo Inerte.

Na amostra de escória KR, o parâmetro ferro no material solubilizado encontra-se acima do valor legislado, o que enquadra este resíduo como Resíduo Classe II A – Resíduo não inerte, não perigoso.

Já na amostra de FGD, é possível perceber nos resultados apresentados que os parâmetros Chumbo, Fluoreto, Selênio, Cloreto, Nitrato e Sulfato no material solubilizado do resíduo estão acima do valor legislado, o que enquadraria este resíduo também como Resíduo Classe II A - Resíduo Não Inerte, não perigoso.

Os resultados para ensaios de Ecotoxicologia são exibidos na Tabela 17 para os ensaios terrestres e na Tabela 18 para os ensaios aquáticos.

Tabela 17 - Resultado dos Ensaios de Ecotoxicologia Terrestre

Ensaio	**Expressão do Resultado**	**EFRA**	**REV**	**KR**
		Resultado em % Elutriato no Solo		
Toxicidade Aguda com Minhocas	CL50; 14d	> 30,00%	> 33,17%	> 33,17%

CL50; 14d = Concentração letal mediana após 14 dias de exposição

Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2019).

Tabela 18 - Resultado dos Ensaio Ecotoxicologia Aquática

Ensaio	**Expressão do Resultado**	**EFRA**		**REV**		**KR**	
		% Elutriato	mg/L	% Elutriato	mg/L	% Elutriato	mg/L
Toxicidade Aguda com Microcrustáceos	CE(I)50; 48h	51,76	103.520	3,59	7.180	3,59	7.180
Toxicidade Crônica com Microcrustáceos	CENO	0,40	800	0,10	200	1,60	3.200
Toxicidade Aguda com Peixes	CL(I)50; 96h	35,36	70.720	4,42	8.840	4,42	8.840
Toxicidade Crônica com Algas	CI(I)50; 72h	8,73	17.460	2,18	4.360	2,07	4.140

$CE(I)_{50}$; 48h = Concentração efetiva inicial mediana após 48 horas de exposição;
CENO = Concentração de efeito não observado (NOEC em inglês);
$CL(I)_{50}$; 96h = Concentração letal inicial mediana após 96 horas de exposição;
$CI(I)_{50}$; 72h = Concentração inibitória inicial mediana após 72 horas de exposição.
Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2019).

Os resultados apresentados para os ensaios toxicológicos apontaram que os três coprodutos, mesmo em concentrações máximas testadas, não se

mostraram perigosos ao meio terrestre e ao meio aquático, ou seja, por esses ensaios podem ser seguros à saúde e ao meio ambiente.

Os resultados da avaliação toxicológica estão resumidos na Tabela 19. Por meio do teste de irritação ocular, as amostras dos agregados REV e LD, foram classificados como materiais corrosivos aos olhos. É importante destacar que isso não impossibilita o uso desses materiais, apenas atenta à necessidade do uso de equipamentos de proteção individual (EPI's), como os óculos de proteção contra poeira, que já são utilizados nas obras em produtos comumente utilizados, como o cimento.

Em relação aos demais testes, todas as amostras se mostraram seguras a sua utilização em relação à saúde humana, uma vez que não foram observados efeitos toxicológicos ou genotoxicológicos.

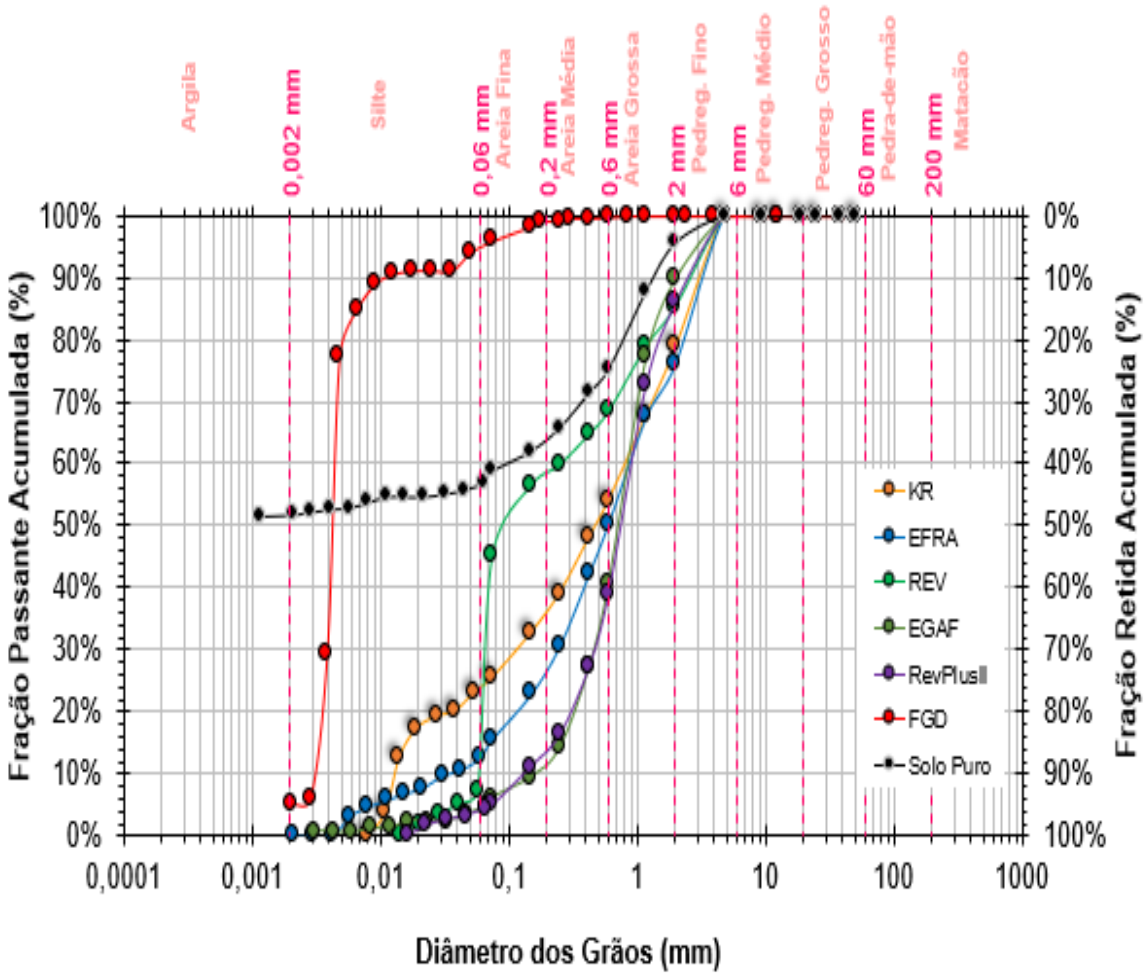
Tabela 19 - Resultado dos Ensaios Toxicológicos e Genotoxicológicos

Ensaio	**Expressão do Resultado**	**EFRA**	**REV**	**KR**
Toxicidade Cutânea Aguda para Ratos	DL_{50}	> 2.000 mg/kg pc	> 2.000 mg/kg pc	> 2.000 mg/kg pc
Toxicidade Inalatória Aguda para Ratos	CL_{50}	> 1,216 mg/L	> 0,448 mg/L	> 0,501 mg/L
Toxicidade Oral Aguda para Ratos	DL_{50}	> 2.000 mg/kg pc	Ausente	Ausente
Irritação Cutânea à Curto Prazo em Coelhos	-	Não irritante	Não irritante	Não irritante
Irritação Ocular à Curto Prazo em Coelhos	-	Não irritante	Corrosivo	Corrosivo
Sensibilização Dérmica em Cobaias	-	Não sensibilizante	Não sensibilizante	Não sensibilizante
Teste de Mutação Gênica Reserva (Ames)	-	Não mutagênico	Não mutagênico	Não mutagênico
Micronúcleo em Medula Óssea de Camundongo	-	Não genotóxico	Não genotóxico	Não genotóxico

CL_{50} = Concentração Letal Mediana
DL_{50} = Dose Letal Mediana
Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2019).

Assim como realizado os ensaios de caracterização para o solo puro e os coprodutos de forma isolada, também foram realizados ensaios para as misturas a fim de verificar as interferências que isso propiciou ao solo. Na Figura 14 estão expostas as curvas das misturas e, novamente, a curva do solo puro para comparação. O quadro resumo dos ensaios de caraterização das misturas está exposto na Tabela 20.

Figura 14 - Curva granulométrica do solo puro e das misturas



Fonte: Autor (2020).

Tabela 20 - Resumo do ensaio de caracterização das misturas

Propriedade		Amostra						
		SEFRA	**SEGAF**	**SFGD**	**SKR**	**SLD**	**SRevPlusII**	**SCPV**
Massa específica real dos grãos (g/cm^3)		2,69	2,75	2,69	2,81	2,87	2,74	2,69
Limite de Liquidez (%)		49	46	NL	52	NL	NL	NL
Limite de Plasticidade (%)		26	27	NP	33	NP	NP	NP
Índice de Plasticidade		23	19	-	19	-	-	-
Fração Passante (%)	4,8 mm (#4)	100	100	100	100	100	100	-
	2,0 mm (#10)	93,93	89,82	95,91	90,61	95,28	92,74	-
	0,42 mm (#40)	58,21	62,75	73,21	64,51	69,48	58,24	-
	0,075 mm (#200)	43,05	45,92	61,33	48,86	54,74	42,69	-
Classificação (SUCS)		CL	CL	ML	MH	ML	SM	-

Fonte: Autor (2020).

Com os resultados da classificação das misturas, é possível perceber que ao adicionar os coprodutos FGD e Revsol®, não houve alteração da classificação, ela permaneceu sendo um silte inorgânico. A mudança ocorreu quando foi adicionada as escórias granulada e bruta de alto forno, fazendo com que o solo se classificasse como uma areia Argilosa, aumentando o teor da fração grossa. Já nas misturas contendo o KR e o Revsol Plus II®, também houve diminuição da fração fina e foram classificadas como Areia Siltosa.

Nas misturas contendo a escória EFRA, EGAF, KR e o Revsol® houve um aumento do IP que tem relação direta com a diminuição do Limite de Plasticidade, visto que o Limite de Liquidez teve uma variação quase nula, ou baixíssima nas amostras.

4.1.1.1 Ensaio de compactação

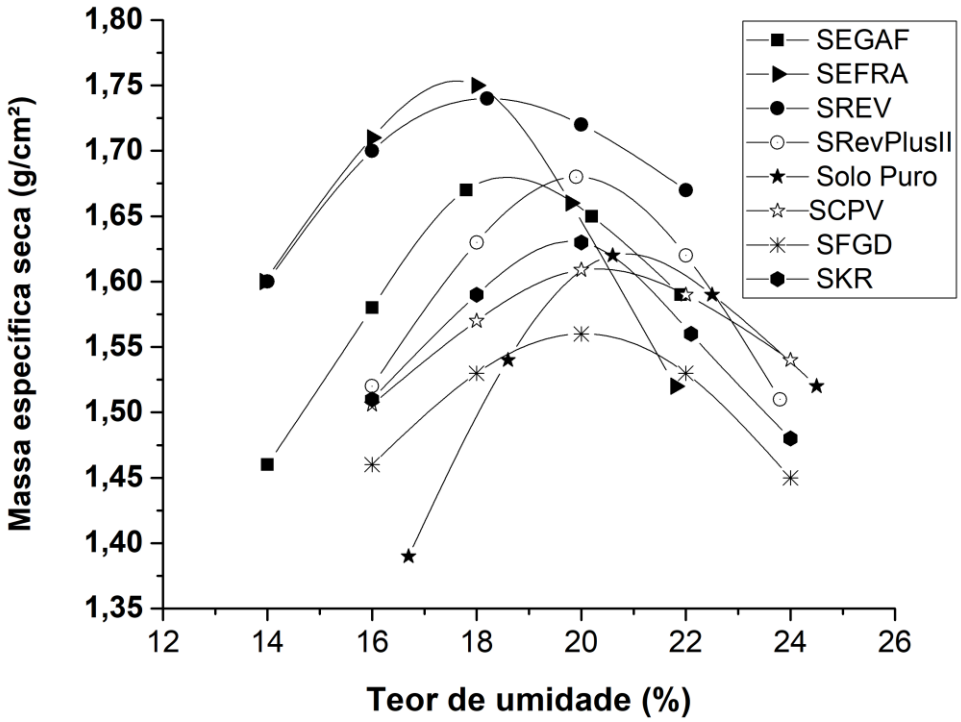
Na Figura 15 onde são apresentadas as curvas de compactação das amostras de solo puro e das misturas, enquanto a Tabela 21 apresenta os resultados dos parâmetros do ensaio de compactação que serviram como base para a moldagem dos corpos de prova do ensaio de coluna.

Tabela 21 - Parâmetros de compactação do solo puro e das misturas

Amostra	**Propriedade**	
	wótima (%)	Massa específica máxima (g/cm^3)
Solo Puro	21	1,62
SEFRA	18,8	1,67
SEGAF	17,5	1,76
SFGD	20,1	1,56
SKR	19,8	1,64
SRev	18,1	1,74
SRevPlusII	20	1,62
SCPV	20,4	1,61

Fonte: Autor (2020).

Figura 15 - Curva de compactação do solo puro e das misturas



Fonte: Autor (2020).

Conforme era previsto, devido a diminuição do teor de finos com a adição das escórias, foi constatado que na compactação das misturas ocorreu um aumento da massa específica máxima com incremento dos coprodutos em relação ao solo puro, com exceção da amostra contendo o Revsol Plus II®, em que manteve o mesmo valor do solo puro, e das amostras contendo FGD e cimento em que a massa específica máxima foi reduzida. De modo geral a adição de coprodutos provocou uma redução da umidade ótima das misturas comparadas com o solo.

4.1.1.2 Ensaio de FRX

As amostras de coprodutos e do Solo Puro foram submetidas ao ensaio de fluorescência de raios-x. A Preparação física das amostras constou com a secagem a 105 ºC, redução à fração menor que 2,00 mm, homogeneização, quarteamento, e pulverização em moinho de panelas carbeto de tungstênio até

que 95% da amostra fosse menor do que 75µm. O resultado dos elementos presentes nas amostras está expresso, na forma de óxidos, na Tabela 22.

Tabela 22 - Análise quantitativa de óxidos presentes nas amostras

Óxidos	Teor na Amostra (%)							
	Solo Puro	EFRA	EGAF	FGD	KR	REV	RevPlusII	CPV
Al_2O_3	35,00	6,02	10,12	< 0,1	3,69	1,64	3,74	4,64
CaO	0,03	33,01	41,90	56,40	51,01	44,90	39,47	60,89
Cr_2O_3	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,14	0,03	< 0,01
Fe_2O_3	11,47	12,30	0,57	0,12	6,91	19,74	17,45	2,91
K_2O	0,09	0,19	0,34	0,04	< 0,01	0,07	0,06	0,40
MgO	0,11	4,54	6,89	0,55	1,94	8,57	3,79	1,81
MnO	< 0,01	0,50	0,41	< 0,01	0,24	2,09	0,59	0,11
Na_2O	0,21	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,25
P_2O_5	0,08	0,07	0,01	0,17	0,09	1,17	0,20	0,08
SiO_2	33,95	21,32	37,49	0,38	10,48	8,65	11,90	18,97
TiO_2	1,61	0,36	0,57	< 0,01	0,20	0,32	0,22	0,25
ZrO_2	0,10	-	-	-	-	-	-	-

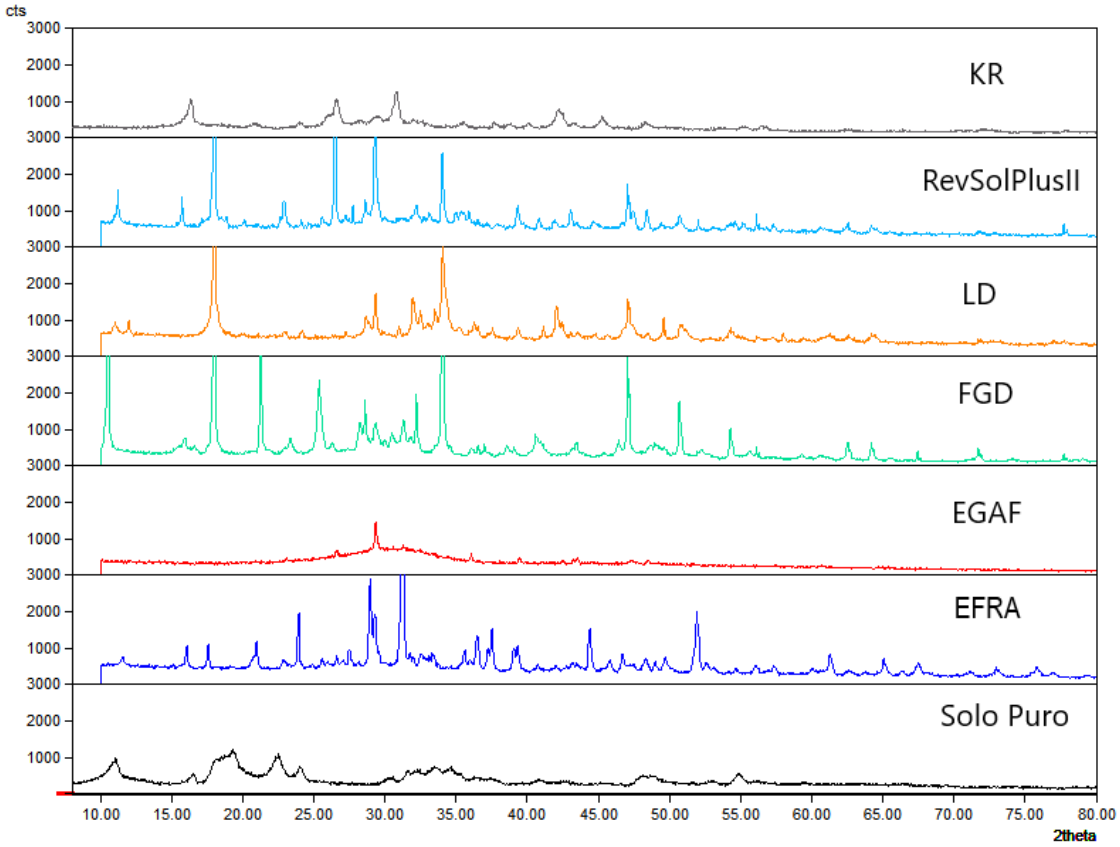
Fonte: Autor (2020).

A quantidade de óxidos de alumínio (Al_2O_3) presente no solo é a maior da sua composição, enquanto nas amostras de coprodutos e do cimento aparece como sendo baixa. Já a quantidade de componentes com ferro e a cal se mostrou bastante presente nas misturas de coproduto em que, ao longo da produção do aço, eles são adicionados.

4.1.1.3 Ensaio de DRX

Para o ensaio de difração de raio-x, foram utilizadas as condições experimentais: faixa de varredura 2θ de 10,0 a 90,0, tamanho e tempo do passo de 0,033 e 50 segundos, fendas DS igual 1/2, máscara de 10mm e fenda AS de 6,6mm. As amostras foram enviadas até o laboratório particular *Nanobusiness* que realizou a análise.

Figura 16 - Resultado do ensaio de difratometria das amostras



Fonte: Autor (2020).

Tabela 23 - Compostos das amostras pelo ensaio de difratometria de raio-x

Amostra	Fases minerais identificadas
Solo Puro	Caulinita, Nacrita, Anatase
EFRA	Åkermanita, Calcita, Pseudovolastonita, Quartzo, Gipsita
EGAF	Calcita
FGD	Portlandita, Anidrita, Cordierita, Hannebachite,
KR	Gipsita, Sulfato Ferroso, Portlandita, Calcita, Magnetita
REV	Portlandita, Calcita, Brownmillerita, Larnita
RevPlusII	Calcita, Portlandita, Hematita, Etringita

Fonte: Autor (2020).

O carbonato de cálcio, também conhecido como mineral calcita, é formado pela reação do óxido de cálcio (cal virgem) com dióxido de carbono: $CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3$. Devido à presença elevada do óxido de cálcio, apresentado no ensaio de FRX, era esperado que a calcita se mostrasse presente nas amostras dos coprodutos, diferente da amostra de solo que teve apenas 0,03% da presença desse óxido.

A grande presença de sílica (SiO_2), óxido de silício, e do óxido de alumínio (Al_2O_3), presente no solo puro, justifica a presença de Caulinita (Al_2O_3 .2SiO_2, 2H_2O) mostrada no ensaio de DRX.

Destaca-se com os resultados, a presença de portlandita na maioria das amostras de coprodutos, apontando para uma possível capacidade pozolânica, desde que os minerais estejam na sua forma amorfa.

4.1.2 Etapa II Ensaio de Coluna

Embora tenha sido determinada a permeabilidade, não foi objetivo alterar essa variável, nem para aumentar nem para reduzir. Trabalhos futuros podem estudar a variação desse parâmetro como, por exemplo, em inserção de argila para preenchimento de finos afim de modificá-lo. Os resultados estão expostos na Tabela 24 .

Tabela 24 -Resultado da condutividade hidráulica das amostras

	Propriedade	
Amostra	**Massa específica (g/cm^3)**	**Permeabilidade (cm/s)**
Solo Puro	1,52	2,53E-05
SEFRA	1,58	1,92E-05
SEGAF	1,71	1,45E-06
SFGD	1,64	4,85E-05
SKR	1,62	8,83E-06
SRev	1,71	4,28E-05
SRevPlusII	1,59	1,27E-06
SCPV	1,52	4,81E-05

Fonte: Autor (2020).

É de conhecimento que a percolação inicial no solo que não esteja saturado apresenta resultados inferiores devido à dificuldade que o percolado enfrente em atravessar os vazios ocupados pelo ar. Assim, de acordo com que ocorre a saturação do meio, esse parâmetro vai aumentando até que ocorra a completa saturação. Sabendo disso, os valores somente foram obtidos após coletar toda

a água necessária para o ensaio de análise ambiental, a fim de que, com o tempo, as amostras alcançassem a saturação ou chegasse muito próxima dela,

Pelos resultados da tabela anterior, é possível observar que não houve variação significativa da condutividade hidráulica ao se acrescentar os coprodutos, ficando em torno de 10^{-5} cm/s, exceto ao adicionar a escória granulada de alto-forno, a escória KR e o Revsol Plus II®, que ocasionou uma diminuição da permeabilidade na grandeza de 10^{-6} cm/s

4.1.3 Etapa III Análise Ambiental

Junto ao ensaio de coluna em que foi possível obter a condutividade hidráulica, paralelamente foi realizado o ensaio de lixiviação ao qual as amostras do líquido percolado foram submetidas ao ensaio de pH. O resultado está exposto na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultado do pH do lixiviado das amostras

Amostra	Solo Puro	EFRA	EGAF	FGD	KR	REV	RevPlusII	CPV	Água Destilada
pH	7,6	9,4	7,8	10,8	11,2	11,9	8,2	11,5	7,5

Fonte: Autor (2020).

Com esses resultados, foi possível concluir que as misturas propiciaram um aumento do pH quando comparado a amostra de solo puro. Pelo Resolução CONAMA 430/2011, em casos de efluentes que são lançados em corpos de água, é preciso que esse parâmetro esteja entre 5 e 9, portanto, somente as amostras de Solo Puro e as misturas com escória granulada de alto forno e a RevSol Plus II® alcançaram aos níveis estabelecidos pelas legislações.

Murta (2006) construiu colunas de lixiviação, parecidas com a dessa pesquisa, a fim de se avaliar medidas de remediação passiva para a drenagem ácida de uma das pilhas de estéril de uma mina localizada em Caldas, MG. Para isso, foi utilizado misturas contendo bentonita, cal hidratada e dolomita em pequenas

proporções ao topo das colunas a fim de simular sistemas de cobertura. A autora avaliou pH do percolado em diversas idades, em dias, e percebeu que para algumas amostras o pH se elevava com o passar do tempo e para outras o inverso acontecia, ou seja, não havia uma relação direta entre o aumento ou a diminuição do pH com tempo.

O coproduto KR e o cimento CPV ARI foram os que mais alteraram o parâmetro pH do solo. A quantidade de cimento em termos de massa é cinco vezes menor do que a quantidade de KR e teve um aumento expressivo na variação do pH e que também não estaria apto a ser utilizado, mesmo um melhorador de solos comumente utilizado em rodovias. Ou seja, é questionável a não aceitação do coproduto KR somente em relação a esse parâmetro.

Nesta pesquisa as amostras do lixiviado submetidas ao ensaio de pH foram colhidas no último dia do ensaio, portanto, ao longo dos dias o pH pode ter sido alterado, não sendo, assim, um parâmetro decisivo para indicar se a amostra está apta.

Os resultados dos parâmetros inorgânicos encontrados em cada amostra de lixiviado e solo estão expostos nos relatórios analíticos das próximas 9 páginas.

Universidade Federal do Espírito Santo
Laboratório de Geotecnia e Pavimentação

Relatório Analítico

Amostra: Solo Puro

Resolução CONAMA Nº 420 -Solo

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Alumínio Total	NA	32713.00
Antimônio Total	25	1.12
Arsênio Total	150	< 0,050
Bário Total	750	35.07
Boro Total	NA	< 0,50
Cádmio Total	20	1.812
Chumbo Total	900	4.78
Cobalto Total	90	< 0,50
Cobre Total	600	4.467
Cromo Total	400	62.61
Ferro Total	NA	47987.00
Manganês Total	NA	24.80
Mercúrio Total	70	< 0,050
Molibdênio Total	120	< 0,50
Níquel Total	130	4.03
Nitrato	NA	<1,0
Prata Total	100	< 0,50
Selênio Total	NA	< 0,50
Vanádio Total	1.000	107.59
Zinco Total	2.000	13.99

Portaria de Consolidação n°5

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Antimônio Total	0,005	< 0,0010
Arsênio Total	0,01	< 0,0010
Bário Total	0,7	< 0,010
Cádmio Total	0,005	< 0,0010
Chumbo Total	0,01	< 0,010
Cianeto Total	0,07	< 0,002
Cobre Total	2	< 0,0010
Cromo Total	0,05	< 0,010
Fluoreto Total	1,5	< 0,4
Mercúrio Total	0,001	< 0,00010
Níquel Total	0,07	< 0,010
Nitrato	10	0.50
Nitrito	1	< 0,015
Selênio Total	0,01	< 0,010
Urânio Total	0,03	< 0,010

Resolução CONAMA Nº 430 -Efluente

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Arsênio Total	0,5	0.0010
Bário Total	5	0.015
Boro Total	5	0.026
Cádmio Total	0,2	< 0,0010
Chumbo Total	0,5	< 0,010
Cianeto Livre	0,2	<0,010
Cianeto Total	1	0.12
Cobre Dissolvido	1	0.0018
Cromo Hexavalente	0,1	<0,01
Cromo Trivalente	1	<0,01
Estanho Total	4	< 0,010
Ferro Dissolvido	15	0.110
Fluoreto Total	10	< 0,4
Manganês Dissolvido	1	0.105
Mercúrio Total	0,01	< 0,00010
Níquel Total	2	< 0,010
Nitrogênio Amoniacal Total	20	0.360
Prata Total	0,1	< 0,0010
Selênio Total	0	< 0,010
Sulfeto Total	1	< 0,002
Zinco Total	5	0.388

pH:	7,6
Temperatura Ambiente no momento da Coleta	25
Temperatura da amostra na entrega ao laboratório:	23
Condições Climáticas no Momento da Coleta	Nublado
Tipo de Coleta:	Simples
Classificação SUCS	ML
Coeficiente de Permeabilidade	2,53E-05

A presente amostra atende aos padrões estabelecidos para as três resoluções.

Universidade Federal do Espírito Santo
Laboratório de Geotecnia e Pavimentação

Relatório Analítico

Amostra: 70% Solo e 30% de Escória Bruta de Alto Forno

Resolução CONAMA Nº 420 - Solo

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Alumínio Total	NA	51227.00
Antimônio Total	25	0.52
Arsênio Total	150	< 0,050
Bário Total	750	168.05
Boro Total	NA	3.19
Cádmio Total	20	1.541
Chumbo Total	900	14.58
Cobalto Total	90	< 0,50
Cobre Total	600	2.583
Cromo Total	400	30.88
Ferro Total	NA	36984.00
Manganês Total	NA	750.79
Mercúrio Total	70	< 0,050
Molibdênio Total	120	< 0,50
Níquel Total	130	2.80
Nitrato	NA	<1,0
Prata Total	100	< 0,50
Selênio Total	NA	< 0,50
Vanádio Total	1.000	77.57
Zinco Total	2.000	104.64

Portaria de Consolidação n°5

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Antimônio Total	0,005	< 0,0010
Arsênio Total	0,01	< 0,0010
Bário Total	0,7	0.067
Cádmio Total	0,005	< 0,0010
Chumbo Total	0,01	< 0,010
Cianeto Total	0,07	0.057
Cobre Total	2	0.0019
Cromo Total	0,05	< 0,010
Fluoreto Total	1,5	1.5
Mercúrio Total	0,001	< 0,00010
Níquel Total	0,07	< 0,010
Nitrato	10	0.40
Nitrito	1	< 0,015
Selênio Total	0,01	< 0,010
Urânio Total	0,03	< 0,010

Resolução CONAMA Nº 430

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Arsênio Total	0,5	0.0184
Bário Total	5	0.032
Boro Total	5	0.213
Cádmio Total	0,2	< 0,0010
Chumbo Total	0,5	< 0,010
Cianeto Livre	0,2	<0,010
Cianeto Total	1	< 0,05
Cobre Dissolvido	1	0.0042
Cromo Hexavalente	0,1	<0,01
Cromo Trivalente	1	<0,01
Estanho Total	4	< 0,010
Ferro Dissolvido	15	0.052
Fluoreto Total	10	1.9
Manganês Dissolvido	1	< 0,010
Mercúrio Total	0,01	< 0,00010
Níquel Total	2	< 0,010
Nitrogênio Amoniacal Total	20	0.170
Prata Total	0,1	< 0,0010
Selênio Total	0	0.046
Sulfeto Total	1	0.010
Zinco Total	5	0.054

pH:	9,4
Temperatura Ambiente no momento da Coleta	25
Temperatura da amostra na entrega ao laboratório:	23
Condições Climáticas no Momento da Coleta	Nublado
Tipo de Coleta:	Simples
Classificação SUCS	GP-GM
Coeficiente de Permeabilidade	1,92E-05

A presente amostra atende aos padrões estabelecidos para as três resoluções.

Universidade Federal do Espírito Santo
Laboratório de Geotecnia e Pavimentação

Relatório Analítico

Amostra: 70% Solo e 30% Escória Granulada de Alto Forno

Resolução CONAMA Nº 420 - Solo

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Alumínio Total	NA	38904.00
Antimônio Total	25	< 0,50
Arsênio Total	150	< 0,050
Bário Total	750	135.83
Boro Total	NA	5.01
Cádmio Total	20	1.340
Chumbo Total	900	5.58
Cobalto Total	90	< 0,50
Cobre Total	600	4.070
Cromo Total	400	48.72
Ferro Total	NA	34378.00
Manganês Total	NA	592.42
Mercúrio Total	70	< 0,050
Molibdênio Total	120	< 0,50
Níquel Total	130	4.11
Nitrato	NA	<1,0
Prata Total	100	< 0,50
Selênio Total	NA	< 0,50
Vanádio Total	1.000	83.46
Zinco Total	2.000	14.55

Portaria de Consolidação n°5

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Antimônio Total	0,005	< 0,0010
Arsênio Total	0,01	< 0,0010
Bário Total	0,7	0.010
Cádmio Total	0,005	< 0,0010
Chumbo Total	0,01	< 0,010
Cianeto Total	0,07	< 0,002
Cobre Total	2	< 0,0010
Cromo Total	0,05	< 0,010
Fluoreto Total	1,5	< 0,4
Mercúrio Total	0,001	< 0,00010
Níquel Total	0,07	< 0,010
Nitrato	10	0.34
Nitrito	1	< 0,015
Selênio Total	0,01	< 0,010
Urânio Total	0,03	< 0,010

Resolução CONAMA Nº 430 - Efluente

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Arsênio Total	0,5	0.0088
Bário Total	5	0.063
Boro Total	5	0.034
Cádmio Total	0,2	< 0,0010
Chumbo Total	0,5	< 0,010
Cianeto Livre	0,2	<0,010
Cianeto Total	1	< 0,05
Cobre Dissolvido	1	0.0016
Cromo Hexavalente	0,1	<0,01
Cromo Trivalente	1	<0,01
Estanho Total	4	< 0,010
Ferro Dissolvido	15	0.061
Fluoreto Total	10	0.9
Manganês Dissolvido	1	0.068
Mercúrio Total	0,01	< 0,00010
Níquel Total	2	< 0,010
Nitrogênio Amoniacal Total	20	0.200
Prata Total	0,1	< 0,0010
Selênio Total	0	0.034
Sulfeto Total	1	0.010
Zinco Total	5	0.017

pH:	7,8
Temperatura Ambiente no momento da Coleta	25
Temperatura da amostra na entrega ao laboratório:	23
Condições Climáticas no Momento da Coleta	Nublado
Tipo de Coleta:	Simples
Classificação SUCS	SM
Coeficiente de Permeabilidade	1,45E-06

A presente amostra atende aos padrões estabelecidos para as três resoluções.

Universidade Federal do Espírito Santo
Laboratório de Geotecnia e Pavimentação

Relatório Analítico

Amostra: 94% Solo e 6% de FGD

Resolução CONAMA Nº 420 - Solo

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Alumínio Total	NA	48525.00
Antimônio Total	25	0.89
Arsênio Total	150	< 0,050
Bário Total	750	5.90
Boro Total	NA	< 0,50
Cádmio Total	20	1.704
Chumbo Total	900	5.09
Cobalto Total	90	< 0,50
Cobre Total	600	3.077
Cromo Total	400	31.33
Ferro Total	NA	42805.00
Manganês Total	NA	22.04
Mercúrio Total	70	< 0,050
Molibdênio Total	120	< 0,50
Níquel Total	130	3.27
Nitrato	NA	1.1
Prata Total	100	< 0,50
Selênio Total	NA	< 0,50
Vanádio Total	1.000	95.86
Zinco Total	2.000	24.87

Portaria de Consolidação n°5

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Antimônio Total	0,005	< 0,0010
Arsênio Total	0,01	0.0069
Bário Total	0,7	< 0,010
Cádmio Total	0,005	< 0,0010
Chumbo Total	0,01	< 0,010
Cianeto Total	0,07	< 0,002
Cobre Total	2	0.0054
Cromo Total	0,05	< 0,010
Fluoreto Total	1,5	1.0
Mercúrio Total	0,001	< 0,00010
Níquel Total	0,07	< 0,010
Nitrato	10	0.67
Nitrito	1	0.057
Selênio Total	0,01	< 0,010
Urânio Total	0,03	< 0,010

Resolução CONAMA Nº 430 - Efluente

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Arsênio Total	0,5	0.0519
Bário Total	5	< 0,010
Boro Total	5	< 0,010
Cádmio Total	0,2	< 0,0010
Chumbo Total	0,5	< 0,010
Cianeto Livre	0,2	<0,010
Cianeto Total	1	< 0,05
Cobre Dissolvido	1	0.0236
Cromo Hexavalente	0,1	<0,01
Cromo Trivalente	1	<0,01
Estanho Total	4	< 0,010
Ferro Dissolvido	15	0.011
Fluoreto Total	10	1.2
Manganês Dissolvido	1	< 0,010
Mercúrio Total	0,01	< 0,00010
Níquel Total	2	< 0,010
Nitrogênio Amoniacal Total	20	0.350
Prata Total	0,1	< 0,0010
Selênio Total	0	0.033
Sulfeto Total	1	< 0,002
Zinco Total	5	0.067

pH:	10,8
Temperatura Ambiente no momento da Coleta	25
Temperatura da amostra na entrega ao laboratório:	23
Condições Climáticas no Momento da Coleta	Nublado
Tipo de Coleta:	Simples
Classificação SUCS	CL
Coeficiente de Permeabilidade	4,85E-05

A presente amostra atende aos padrões estabelecidos para as três resoluções.

Universidade Federal do Espírito Santo
Laboratório de Geotecnia e Pavimentação

Relatório Analítico

Amostra: 70% Solo e 30% de Escória KR

Resolução CONAMA Nº 420 - Solo

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Alumínio Total	NA	56066.00
Antimônio Total	25	1.09
Arsênio Total	150	< 0,050
Bário Total	750	35.90
Boro Total	NA	< 0,50
Cádmio Total	20	2.147
Chumbo Total	900	4.67
Cobalto Total	90	0.90
Cobre Total	600	7.427
Cromo Total	400	47.26
Ferro Total	NA	56364.00
Manganês Total	NA	551.93
Mercúrio Total	70	< 0,050
Molibdênio Total	120	< 0,50
Níquel Total	130	5.50
Nitrato	NA	<1,0
Prata Total	100	< 0,50
Selênio Total	NA	< 0,50
Vanádio Total	1.000	84.69
Zinco Total	2.000	20.13

Portaria de Consolidação n°5

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Antimônio Total	0,005	< 0,0010
Arsênio Total	0,01	< 0,0010
Bário Total	0,7	0.027
Cádmio Total	0,005	< 0,0010
Chumbo Total	0,01	< 0,010
Cianeto Total	0,07	< 0,002
Cobre Total	2	0.030
Cromo Total	0,05	< 0,010
Fluoreto Total	1,5	1.0
Mercúrio Total	0,001	< 0,00010
Níquel Total	0,07	< 0,010
Nitrato	10	0.35
Nitrito	1	< 0,015
Selênio Total	0,01	< 0,010

Resolução CONAMA Nº 430 - Efluente

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Arsênio Total	0,5	0.0191
Bário Total	5	0.020
Boro Total	5	< 0,010
Cádmio Total	0,2	< 0,0010
Chumbo Total	0,5	< 0,010
Cianeto Livre	0,2	<0,010
Cianeto Total	1	< 0,05
Cobre Dissolvido	1	0.0113
Cromo Hexavalente	0,1	<0,01
Cromo Trivalente	1	<0,01
Estanho Total	4	< 0,010
Ferro Dissolvido	15	< 0,010
Fluoreto Total	10	1.4
Manganês Dissolvido	1	< 0,010
Mercúrio Total	0,01	< 0,00010
Níquel Total	2	< 0,010
Nitrogênio Amoniacal Total	20	0.400
Prata Total	0,1	< 0,0010
Selênio Total	0	< 0,010
Sulfeto Total	1	0.020
Zinco Total	5	0.024

pH:	11,2
Temperatura Ambiente no momento da Coleta	25
Temperatura da amostra na entrega ao laboratório:	23
Condições Climáticas no Momento da Coleta	Nublado
Tipo de Coleta:	Simples
Classificação SUCS	SM
Coeficiente de Permeabilidade	8,83E-06

A presente amostra atende aos padrões estabelecidos para as três resoluções.

Universidade Federal do Espírito Santo
Laboratório de Geotecnia e Pavimentação

Relatório Analítico

Amostra: 70% Solo e 30% Revsol

Resolução CONAMA Nº 420 - Solo

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Alumínio Total	NA	50641.00
Antimônio Total	25	2.68
Arsênio Total	150	< 0,050
Bário Total	750	29.40
Boro Total	NA	< 0,50
Cádmio Total	20	2.650
Chumbo Total	900	8.57
Cobalto Total	90	0.80
Cobre Total	600	3.333
Cromo Total	400	306.71
Ferro Total	NA	69176.00
Manganês Total	NA	4010.50
Mercúrio Total	70	< 0,050
Molibdênio Total	120	0.54
Níquel Total	130	3.43
Nitrato	NA	<5,0
Prata Total	100	< 0,50
Selênio Total	NA	< 0,50
Vanádio Total	1.000	251.10
Zinco Total	2.000	33.02

Portaria de Consolidação n°5

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Antimônio Total	0,005	< 0,0010
Arsênio Total	0,01	< 0,0010
Bário Total	0,7	< 0,010
Cádmio Total	0,005	< 0,0010
Chumbo Total	0,01	< 0,010
Cianeto Total	0,07	< 0,002
Cobre Total	2	0.0018
Cromo Total	0,05	< 0,010
Fluoreto Total	1,5	0.8
Mercúrio Total	0,001	< 0,00010
Níquel Total	0,07	< 0,010
Nitrato	10	0.33
Nitrito	1	< 0,015
Selênio Total	0,01	< 0,010
Urânio Total	0,03	< 0,010

Resolução CONAMA Nº 430 - Efluente

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Arsênio Total	0,5	0.0328
Bário Total	5	< 0,010
Boro Total	5	< 0,010
Cádmio Total	0,2	< 0,0010
Chumbo Total	0,5	< 0,010
Cianeto Livre	0,2	<0,010
Cianeto Total	1	< 0,05
Cobre Dissolvido	1	0.0057
Cromo Hexavalente	0,1	<0,01
Cromo Trivalente	1	<0,01
Estanho Total	4	< 0,010
Ferro Dissolvido	15	0.012
Fluoreto Total	10	1.2
Manganês Dissolvido	1	< 0,010
Mercúrio Total	0,01	< 0,00010
Níquel Total	2	< 0,010
Nitrogênio Amoniacal Total	20	0.300
Prata Total	0,1	< 0,0010
Selênio Total	0	< 0,010
Sulfeto Total	1	< 0,002
Zinco Total	5	0.088

pH:	11,9
Temperatura Ambiente no momento da Coleta	25
Temperatura da amostra na entrega ao laboratório:	23
Condições Climáticas no Momento da Coleta	Nublado
Tipo de Coleta:	Simples
Classificação SUCS	SM
Coeficiente de Permeabilidade	4,28E-05

A presente amostra atende aos padrões estabelecidos para as três resoluções.

Universidade Federal do Espírito Santo
Laboratório de Geotecnia e Pavimentação

Relatório Analítico

Amostra: 70% Solo e 30% de Revsol Plus II

Resolução CONAMA Nº 420 - Solo

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Alumínio Total	NA	32456.00
Antimônio Total	25	< 0,50
Arsênio Total	150	< 0,050
Bário Total	750	91.66
Boro Total	NA	< 0,50
Cádmio Total	20	1.821
Chumbo Total	900	8.42
Cobalto Total	90	0.69
Cobre Total	600	5.023
Cromo Total	400	64.89
Ferro Total	NA	48290.00
Manganês Total	NA	526.16
Mercúrio Total	70	< 0,050
Molibdênio Total	120	0.83
Níquel Total	130	3.25
Nitrato	NA	<2,0
Prata Total	100	< 0,50
Selênio Total	NA	< 0,50
Vanádio Total	1.000	100.45
Zinco Total	2.000	12.75

Portaria de Consolidação n°5

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Antimônio Total	0,005	< 0,0010
Arsênio Total	0,01	< 0,0010
Bário Total	0,7	0.010
Cádmio Total	0,005	< 0,0010
Chumbo Total	0,01	< 0,010
Cianeto Total	0,07	0.043
Cobre Total	2	0.0011
Cromo Total	0,05	< 0,010
Fluoreto Total	1,5	1.0
Mercúrio Total	0,001	< 0,00010
Níquel Total	0,07	< 0,010
Nitrato	10	1.10
Nitrito	1	1.3
Selênio Total	0,01	< 0,010
Urânio Total	0,03	< 0,010

Resolução CONAMA Nº 430 - Efluente

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Arsênio Total	0,5	0.0505
Bário Total	5	0.011
Boro Total	5	< 0,010
Cádmio Total	0,2	< 0,0010
Chumbo Total	0,5	< 0,010
Cianeto Livre	0,2	<0,010
Cianeto Total	1	< 0,05
Cobre Dissolvido	1	< 0,0010
Cromo Hexavalente	0,1	<0,01
Cromo Trivalente	1	<0,01
Estanho Total	4	< 0,010
Ferro Dissolvido	15	0.023
Fluoreto Total	10	1.7
Manganês Dissolvido	1	< 0,010
Mercúrio Total	0,01	< 0,00010
Níquel Total	2	< 0,010
Nitrogênio Amoniacal Total	20	0.240
Prata Total	0,1	< 0,0010
Selênio Total	0	0.015
Sulfeto Total	1	0.030
Zinco Total	5	0.048

pH:	8,2
Temperatura Ambiente no momento da Coleta	25
Temperatura da amostra na entrega ao laboratório:	23
Condições Climáticas no Momento da Coleta	Nublado
Tipo de Coleta:	Simples
Classificação SUCS	SM
Coeficiente de Permeabilidade	1,27E-06

A presente amostra não atende aos padrões estabelecidos para Portaria de Consolidação n°5, parâmetro Nitrato. Demais resoluções são atendidas.

Universidade Federal do Espírito Santo
Laboratório de Geotecnia e Pavimentação

Relatório Analítico

Amostra: 94% Solo e 6% Cimento

Resolução CONAMA Nº 420 - Solo

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Alumínio Total	NA	< 0,50
Antimônio Total	25	< 0,050
Arsênio Total	150	10.64
Bário Total	750	1.556
Boro Total	NA	40124.00
Cádmio Total	20	2.89
Chumbo Total	900	< 0,50
Cobalto Total	90	2.285
Cobre Total	600	31.35
Cromo Total	400	< 0,050
Ferro Total	NA	44.78
Manganês Total	NA	<6,0
Mercúrio Total	70	< 0,50
Molibdênio Total	120	4.64
Níquel Total	130	< 0,50
Nitrato	NA	< 0,50
Prata Total	100	91.00
Selênio Total	NA	< 0,50
Vanádio Total	1.000	28.33
Zinco Total	2.000	28.33

Portaria de Consolidação n°5

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Antimônio Total	0,005	< 0,0010
Arsênio Total	0,01	< 0,0010
Bário Total	0,7	< 0,010
Cádmio Total	0,005	< 0,0010
Chumbo Total	0,01	< 0,010
Cianeto Total	0,07	< 0,002
Cobre Total	2	0.0067
Cromo Total	0,05	0.031
Fluoreto Total	1,5	1.1
Mercúrio Total	0,001	< 0,00010
Níquel Total	0,07	< 0,010
Nitrato	10	0.51
Nitrito	1	< 0,015
Selênio Total	0,01	< 0,010
Urânio Total	0,03	< 0,010

Resolução CONAMA Nº 430 - Efluente

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Arsênio Total	0,5	0.0575
Bário Total	5	0.016
Boro Total	5	< 0,010
Cádmio Total	0,2	< 0,0010
Chumbo Total	0,5	< 0,010
Cianeto Livre	0,2	<0,010
Cianeto Total	1	< 0,05
Cobre Dissolvido	1	0.0130
Cromo Hexavalente	0,1	<0,01
Cromo Trivalente	1	<0,01
Estanho Total	4	< 0,010
Ferro Dissolvido	15	0.050
Fluoreto Total	10	0.9
Manganês Dissolvido	1	< 0,010
Mercúrio Total	0,01	< 0,00010
Níquel Total	2	0.020
Nitrogênio Amoniacal Total	20	0.300
Prata Total	0,1	< 0,0010
Selênio Total	0	< 0,010
Sulfeto Total	1	0.010
Zinco Total	5	0.082

pH:	11,5
Temperatura Ambiente no momento da Coleta	25
Temperatura da amostra na entrega ao laboratório:	23
Condições Climáticas no Momento da Coleta	Nublado
Tipo de Coleta:	Simples
Classificação SUCS	-
Coeficiente de Permeabilidade	4,81E-05

A presente amostra atende aos padrões estabelecidos para as três resoluções.

Universidade Federal do Espírito Santo
Laboratório de Geotecnia e Pavimentação

Relatório Analítico

Amostra: Água Destilada

Portaria de Consolidação n°5

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Antimônio Total	0,005	< 0,0010
Arsênio Total	0,01	0.0012
Bário Total	0,7	< 0,010
Cádmio Total	0,005	< 0,0010
Chumbo Total	0,01	< 0,010
Cianeto Total	0,07	< 0,002
Cobre Total	2	0.0034
Cromo Total	0,05	< 0,010
Fluoreto Total	1,5	< 0,4
Mercúrio Total	0,001	< 0,00010
Níquel Total	0,07	< 0,010
Nitrato	10	0.30
Nitrito	1	< 0,015
Selênio Total	0,01	< 0,010
Urânio Total	0,03	< 0,010

Resolução CONAMA Nº 430 - Efluente

Parâmetro	VMP (mg/kg)	Resultado (mg/kg)
Arsênio Total	0,5	< 0,0010
Bário Total	5	< 0,010
Boro Total	5	< 0,010
Cádmio Total	0,2	< 0,0010
Chumbo Total	0,5	< 0,010
Cianeto Livre	0,2	<0,010
Cianeto Total	1	< 0,05
Cobre Dissolvido	1	0.0562
Cromo Hexavalente	0,1	<0,01
Cromo Trivalente	1	<0,01
Estanho Total	4	< 0,010
Ferro Dissolvido	15	0.025
Fluoreto Total	10	< 0,4
Manganês Dissolvido	1	< 0,010
Mercúrio Total	0,01	< 0,00010
Níquel Total	2	< 0,010
Nitrogênio Amoniacal Total	20	0.400
Prata Total	0,1	< 0,0010
Selênio Total	0	< 0,010
Sulfeto Total	1	< 0,002
Zinco Total	5	0.087

pH:	7,5
Temperatura Ambiente no momento da Coleta	25
Temperatura da amostra na entrega ao laboratório:	23
Condições Climáticas no Momento da Coleta	Nublado
Tipo de Coleta:	Simples

A presente amostra atende aos padrões estabelecidos para as duas resoluções.

Diante dos resultados apresentados pela análise ambiental dos parâmetros inorgânicos, é possível concluir que, para as misturas de solos estudadas, todas estão aptas a serem utilizadas como base de obra geotécnicas, seguindo a resolução Nº 420 do CONAMA. Da mesma forma, os resultados dos ensaios feitos no lixiviado também está de acordo com os parâmetros inorgânicos da resolução Nº 430 do CONAMA que trata sobre o despejo do efluente Industrial.

Já em relação à Portaria nº 5 do Ministério da Saúde que normatiza os parâmetros necessários para verificar o padrão de potabilidade para consumo humano, conclui-se que ao adicionar os coprodutos ao solo, apesar das modificações realizadas no lixiviado, as amostras foram consideradas potáveis ao ser humano, exceto ao se adicionar o coproduto Revsol Plus II® ao solo em que observou-se um aumento do parâmetro inorgânico nitrito ficando aproximadamente 30% acima do valor máximo permitido por essa portaria, tornando não potável ao consumo humano.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

Ainda que em escala reduzida é possível concluir que o parâmetro pH do lixiviado foi alterado ao se acrescentar os coprodutos fazendo com que, na maioria dos casos, ficasse acima do permitido segundo as condições e padrões de lançamento de efluentes pelo CONAMA Nº 430. Ainda que seja superior, é necessário destacar que o uso do cimento CP V- ARI foi o que mais elevou esse parâmetro. O cimento Portland é um melhorador de solos comumente utilizado em rodovias, ou seja, por mais que a escória tenha elevado o pH, ainda assim permanece inferior a um aditivo já utilizado em obras. Outro ponto importante a ser destacado, é que essa resolução é referente aos efluentes industriais e aqui foi utilizada apenas como base, uma vez que o fluxo de água que iria ser percolado em uma obra geotécnica não é caracterizado como efluente industrial.

Quanto ao solo, foi possível perceber a mudança nas suas características físicas, mecânicas, químicas e mineralógicas, podendo as escórias serem utilizados como estabilizantes. Todas as misturas contendo os coprodutos, inclusive o cimento, asseguraram qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas segundo o a Resolução Nº430 do CONAMA.

Por fim, diante dos principais resultados apresentados verifica-se que a incorporação dos resíduos siderúrgicos ao solo modifica as propriedades de efluente e do solo, mas em quase sua totalidade esses parâmetros ainda permanecem de acordo com as recomendações utilizadas como referência, CONAMA Nº 420, Nº 430 e Padrão de Potabilidade Resolução nº 5, exceto o parâmetro Nitrito da amostra contendo o Revsol Plus II que ficou acima do permitido, segundo o padrão de potabilidade.

5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Após o estudo da revisão bibliográfico, foi possível observar o quão complexo é a magnitude dos estudos sobre as misturas alternativas para uso em construção de obras geotécnicas. Diante da crescente produção dos resíduos industriais, da dificuldade em descartes dos coprodutos e dificuldade de se obter solos locais aptos a serem utilizados de acordo com as normas vigentes, fica claro a necessidade de se desenvolver novas pesquisas experimentas para que se conheça cada vez mais sobre esse assunto abordado. Após a pesquisa, sugere-se os seguintes temas para as pesquisas futuras:

I. Avaliar o efeito do tempo seja na possível cimentação dessas misturas e se esse fator alteraria as características ambientais, seja a condutividade hidráulica, alterando com o passar do tempo a permeabilidade dessas misturas.

II. Investigar o comportamento hidráulico das misturas quando submetidas a percolação por outros líquidos como, por exemplo, utilização de lixiviado proveniente de aterros sanitários industriais, quando a mistura fosse destinada a essa finalidade. Assim, poderia se analisar a possível interação química do fluído.

III. Verificar outros percentuais maiores de coprodutos a fim de utilizar a maior quantidade possível de coprodutos, a fim de se utilizar a menor quantidade possível de solos locais e agregar valor aos coprodutos, diminuindo também o seu descarte.

IV. Além dos parâmetros ambientais, investigar também o que diz respeito à resistência mecânica dos materiais, por meio do ensaio de resistência à compressão simples, Índice de Suporte California, entre outros, para verificar se as misturas atingiriam os padrões descritos em normas para cada utilização.

REFERÊNCIAS

ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, **Gestão de Coprodutos: Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico,** (Nota Técnica), Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília, 2008.

AGAB, A.F. **Hydraulic and Thermal Conductivities of Soils**. University of Newcastle. pp.19, 2015.

ALT-MAT (1999). **Alternative materials in road construction**. Project Founded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme.

ALMEIDA, G. B. O. **Incorporação de escória de cobre pós-jateada a um solo areno-argiloso de Sergipe para aplicação em base de pavimentos.** Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2016.

ALMEIDA, T. L.; SCHALCH, V. **Avaliação da contaminação de líquidos contaminantes percolados nos poros do solo em locais de disposição de resíduos sólidos**. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Natal. Anais eletrônicos... São Paulo: ABAS, 2008.

American Coal Ash Association. (2014). Coal combustion product (CCP) production and use survey report.

ARRIVABENE, L. F. **Uma contribuição ao estudo de utilização da escória bruta e granulada de alto forno para a produção de concretos**. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2000.

AUSTRALASIAN. **Australasian (Iron and Steel) Slag Association** – Benchmarking Report. 2010.

AUTELITANO, F.; GIULIANI, F. **Electric arc furnace slags in cement-treated materials for road construction: Mechanical and durability properties**. Construction and Building Materials, v. 113, p. 280-289, 2016.

BALTAZAR, R. P. **Caracterização do Fator de Expansão de uma Escória de Aciaria em Diferentes Processos de Cura para Uso em Pavimentação.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais. 2001.

BRASIL, Ministério da Saúde. Portaria n. 518, de 25 de março de 2004. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil,** Brasília, DF, n. 59, 26 mar. 2004. Seção 1, p. 266.

BUENO, B. S. **Uso de fibras plásticas para reforço de solos compactados. Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. **Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade**. BNDES Setorial, v. 41, p. 181-236, 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **RESOLUÇÃO Nº 313**. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. 2002

_____. **RESOLUÇÃO N° 420**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. 2009

_____. **RESOLUÇÃO N° 430**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. 2011.

CROUAU, Y.; MOÏA, C. **relative sensitivity of growth and reproduction in the springtail, Folsomia candida, exposed to xenobiotics in the laboratory:**

An indicator of soil toxicity Ecotoxicology and Environmental Safety, New York, v.64, , p.115-121, 2016.

DAS, B.M. **Fundamentos de engenharia geotécnia**. 6 ed. Tradução All Tasks; revisão técnica Pérsio Leister de Almeida Barros. São Paulo: Thomson Learning, 2011.

DEMUELENAERE, R. S. **Caracterização de Propriedades de Transporte de metais Pesados em Solos Residuais do Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro. 2014.

DIAS, B. F. P. B. S. **Caracterização de diferentes Solos e análise prospetiva com vista à respectiva estabilização**. Dissertação de mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2016.

DNER EM 262/94 (1994**). Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

EN 12457-2 (2002). Characterisation of waste – Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges: One stage batch test at liquid to solid ratio of 10l/kg for materials with particle size below 4mm (without or with size reduction).

EN 12457-4:2002. Characterisation of waste – Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges: One stage batch test at liquid to solid ratio of 10l/kg for materials with particle size below 10mm (without or with size reduction).

EUROSLAG. **Statistics 2016**. Disponível em <**https://www.euroslag.com/products/statistics/statistics-2016/**>. Acesso em 28/12/2018.

FARNEZI, M. K. **Alternativa de melhoramento técnico de solos tropicais para uso em sistemas basais de selagem, através da aplicação de**

bentonita. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

FEITOSA, F. A .C.; FILHO, J. M. (Coords.). 2 ed. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 2000.

FERNANDES, M. M. **Mecânica dos Solos - Conceitos e Princípios Fundamentais.** Porto: FEUP, 2006.

FREITAS, S. M. A. C. **Escória de aciaria: caminhos para uma gestão sustentável**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil.** Associação Brasileira dos Produtores de Cal, São Paulo. 2002.

GONDIM, L. M. **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará**. Dissertação, 171 Gooding, D.E, 2008.

IHOBE – **Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones: Escorias de acerías. Sociedad Pública Gestión Ambiental**, País Basco, Espanha, 127 p., 2002.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2018**. Disponível em: < http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/assets/pdfs/A%C3%A7o%20Brasil%20%C2%BB%20Completo.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2018.

Jackson, N. M., Schultz, S., Sander, P., & Schopp, L. **Beneficial use of CFB ash in pavement construction applications.** Fuel, 88(7), 1210–1215, 2009.

Jiang, Y., Wu, M. C. M., Su, Q., Lu, M., & Lin, C. **Dry CFB-FGD by-product utilization international**. 2011.

JIS A 5015. **Iron and steel slags for road constructi.** 1992.

KAMINSKI, F. H.C. **Análise crítica da norma ABNT NBR 10004:2004 Resíduos sólidos-Classificação**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2007

KIRMSE, O. J., **or** Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

LAMBE, W; WHITMAN, R.V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1969.

LI, G.; GUO, M. **Current Development of Slag Valorisation in China**. Wuhan University of Science and Technology. China. 2014.

LIMA, D.C. et al**. A experiência da UFV no emprego de estabilizantes químicos em estradas florestais**. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON HARVESTING AND WOOD TRANSPORT, 6. 2003. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 2003. p. 69-117.

LISBOA, R. L. L. **Determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos residuais com o permeâmetro Guelph e ensaios de laboratório.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2006

LUKIANTCHUKI, J.A. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante***.* Dissertação de mestrado, EESC/USP. 2007.

MACEDO. M. M. **Solos modificados com cimento efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos.** Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Pernambuco. CT. 2004.

MASSUCATO, C. J. Utilização de escória de alto forno a carvão vegetal como adição no concreto. 2005. 122p. Dissertação (Mestrado em engenharia), Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo/ EUC, 2005.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G., **Apostila de estabilização de solos**. Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MENEGUETE, D. S. **- sulfetado/sulfatado com incorporação de escória de dessulfuração**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2018.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. **A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo**. Ciência Rural, Santa Maria, v.34, n.3, p.963-969, 2004.

MOREIRA, C. C. **Características e desempenho da escória de alto forno como agregado para utilização em camadas granulares de pavimentos**. In: 37ª Reunião anual de pavimentação e 11º Encontro nacional de conservação Rodoviária. Goiânia, 2006.

MURTA, R. S. **Ensaios de colunas para a avaliação de remediação passiva de drenagem ácida na mina Osamu Utsumi (INB), Caldas/MG**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2006.

Nippon Slag Association. **Characteristics and applications of iron and steel slag**. Disponível em: http://www.slg.jp/e/slag/usage.html. Acesso em 04/01/2019

OLIVEIRA, F. O. **Uso de coproduto de dessulfuração de reator kambara como agente estabilizante de solos para fins de pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2018.

ÖZBAY, E.; ERDEMIR, M.; DURMUS, H. I. **Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties** – A review. Construction and Building Materials v. 105, p. 423-434, 2016.

PARENTE, E. B.; BOAVISTA, A. H.; SOARES, J. B. **Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas de Solo e Escória de Aciaria para Aplicação na Construção Rodoviária na Região Metropolitana de Fortaleza**. XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET. 2003

POEHLS, D.; SMITH, G. **Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology.** Boston: Academic Press/Elsevier, 2009.

PEREIRA, R. S. **Viabilidade técnica do emprego de resíduos da indústria de celulose para construção de estradas florestais.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2005.

PUPPALA, A.J. **Advances in ground modification with chemical additives: from theory to practice**. Transportation Geotechnics, v. 9, 2016.

RAMOS, L. B. S. **Uso de resíduo de escória KR para melhoramento de solos argilosos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2017.

RODRIGUES, G. L. C. **Caracterização e Avaliação da Expansabilidade de Escórias de Aciaria LD Não Tratadas e Tratadas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2007.

ROHDE, G. M.; MACHADO, C. S. **Quantificação das cinzas de carvão fóssil produzidas no Brasil**. Boletim Técnico nº 36. Porto Alegre: CIENTEC, 2016. 44 p.

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos estudo laboratorial.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 118p. 2002.

ROQUE A. J., GOMES CORREIA A., CASTRO F., SILVA S. E CAVALHEIRO A. **Laboratory and field leaching tests for predicting the environmental impact of Portuguese steel slag**. *Sixth International Congress on Environmental Geotechnics*. New Delhi, India, 2010.

SALVIANO, A. B.; LEITE, A. L. **Coberturas secas com escória de aciaria visando a neutralização de drenagem ácida de rochas: ensaios de coluna**. Geociências*,* São Paulo, v.33, n.3, p.492-505, 2014.

SANT'ANA A. P. **Caracterização tecnológica de misturas solo - escória de alto-forno granulada moída para fins rodoviários**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2003.

SANTOS, F. B. F. **Dissolução do calcário no processo de dessulfurização de gases de combustão Abordagem experimental e numérica**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2007.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: PINI,1997. v. 1.

_____. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: PINI, 2001. v. 2.

SHENG, G.; HUANG, P.; WANG, S.; CHEN, G. **Potential reuse of slag from the kambara reactor desulfurization process of iron in an acidic mine drainage treatment.** J. Environ. Eng., 140,7, pp.1-6, 2014.

SILVA, E. A. da, MENDONÇA, R., L de. e DOBELE, C., H., M. **Utilização da escória de aciaria em todas as camadas do pavimento**. 16º Encontro de Asfalto. Rio de Janeiro. 2002.

SILVA, M. C. A. **Melhoramento de um solo argiloso com recurso à ativação alcalina de resíduos para aplicação em infraestruturas de transporte**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Portugal, 2016.

SILVA, M. V. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água**. Dissertação de Mestrado, na Universidade de São Paulo, Brasil, 2001.

SOUZA, E. B. D. O. E. **Escórias de Aciaria e Resíduos de Concretos Refratários em Componentes de Pavimentação**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

SU, Q., ROBL, T. L., JEWELL, R. B., WOLFE, W. E., BUTALIA, T. S., ZHAO, Z. (2015). Development of key technologies for dry FGD by-product resource comprehensive utilization: a project history. In 2015 World of coal ash (WOCA) conference, Nashville, TN, May 5–7.

SUNCOKE ENERGY. **Inventário de Resíduos SOL Coqueria Tubarão S/A**. Cond. Nº. 09, LO nº 276/2013. Biênio 2014/2015. Instituto Estadual de Meio Ambiente do Estado do Espírito Santo. 2015.

TARAZONA, N. **Aplicabilidade agregado siderúrgico açobrita misturado com solo em camadas de pavimentos rodoviários**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-270/16, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

TISSOT, R. C. M.; MISSEL, R. L. **Tratamento Dos Efluentes Atmosféricos Da Ute Charqueadas**. p. 1–9, 2011.

TONG, Z; *et al*. **Characterization and Valorization of Kanbara Reactor Desulfurization Waste Slag of Hot Metal Pretreatment.** In.: Waste Biomass Valorization. n. 7, p 1-8. 2015.

TRINDADE, T.P.; et. al. **Compactação de solos: fundamentos teóricos e práticos**. Viçosa: Editora UFV, 2008.

YOU, C. F.; XU, X. C. **Coal combustion and its pollution control in China**. Energy, v.35, n. 11, p. 4467–4472, 2010.