

EMERSON CORDEIRO LOPES

**AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA DE COPRODUTOS SIDERÚRGICOS VISANDO O
MELHORAMENTO DE PROPRIEDADES DE ENGENHARIA DE SOLOS
TROPICAIS**

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

Orientador: Taciano Oliveira da Silva

Coorientadores: José Maria Franco de Carvalho
Leonardo Gonçalves Pedroti

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

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

T

L864a
2021
Lopes, Emerson Cordeiro, 1987-
Avaliação tecnológica de coprodutos siderúrgicos visando o
melhoramento de propriedades de engenharia de solos tropicais /
Emerson Cordeiro Lopes. – Viçosa, MG, 2021.
134 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Taciano Oliveira da Silva.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Solos - Estabilidade. 2. Siderurgia - Eliminação de
resíduos. 3. Pavimentação. 4. Geotecnia. I. Universidade Federal
de Viçosa. Departameto de Engenharia Civil. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.151363

EMERSON CORDEIRO LOPES

**AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA DE COPRODUTOS SIDERÚRGICOS VISANDO O
MELHORAMENTO DE PROPRIEDADES DE ENGENHARIA DE SOLOS
TROPICAIS**

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

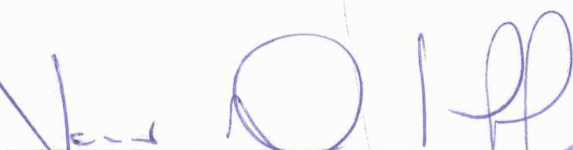
APROVADA: 25 de fevereiro de 2021.

Assentimento:



Emerson Cordeiro Lopes

Autor



Taciano Oliveira da Silva

Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus, por conceder-me o dom da vida.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Civil (DEC) pela excelência no ensino e estrutura para o desenvolvimento desta pesquisa, e pela dedicação dos professores.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao Departamento de Física (DPF) da Universidade Federal de Viçosa pelos equipamentos e estrutura concedida para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos Professores Taciano Oliveira da Silva e Heraldo Nunes Pitanga, pelo desenvolvimento científico, orientação, amizade e carinho durante todo esse tempo.

Aos Professores José Maria Franco de Carvalho e Leonardo Gonçalves Pedroti pela Coorientação, e ao professor Eduardo Nery Duarte de Araújo pelas sugestões e críticas valiosas durante a realização deste trabalho.

À FAPEMIG pelo apoio à pesquisa.

Aos amigos do Laboratório de Engenharia Civil e do Departamento de Engenharia Civil, em especial, Giovani, Eduardo, Cilene, Tiago e Klinger pelo companheirismo e pelos trabalhos realizados em equipe.

Aos meus pais, Hélio Leal Lopes e Maria Aparecida Cordeiro Lopes, pelo amor, apoio e incentivo que foi fundamental para minha formação. À minha noiva, Vanessa da Silva Duarte que conheci durante minha jornada acadêmica, tornando-se parte dos meus sonhos e realizações.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

LOPES, Emerson Cordeiro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2021. **Avaliação Tecnológica de Coprodutos Siderúrgicos Visando o Melhoramento de Propriedades de Engenharia de Solos Tropicais**. Orientador: Taciano Oliveira da Silva. Coorientadores: José Maria Franco de Carvalho e Leonardo Gonçalves Pedroti.

O aproveitamento de resíduos siderúrgicos em obras de engenharia, em especial a escória de aciaria elétrica, apresenta várias vantagens sob o ponto de vista da sustentabilidade ambiental. A preservação dos recursos naturais, a redução do consumo de energia, a falta de espaço para disposição de resíduos e a degradação ambiental tornam o aproveitamento destes materiais uma alternativa atraente. Diante do exposto, o objetivo desse trabalho de pesquisa foi realizar a caracterização tecnológica de finos de escórias de aciaria elétrica oxidante *Electric Arc Furnace* (F_{EAF}) e redutora *Ladle Furnace* (F_{LF}) em misturas com solos tropicais visando a utilização em camadas estruturais de pavimentos e obras geotécnicas. No estudo, foram coletadas amostras deformadas de dois solos do município de Viçosa-MG, e realizou-se um programa experimental de ensaios de laboratório, conforme segue: (i) ensaios de caracterização geotécnica, ensaios de compactação na energia do Proctor normal, resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, índice de suporte Califórnia (ISC ou CBR), e módulo de resiliência; (ii) ensaios de caracterização química, física, morfológica e microestrutural (iii) ensaios de compactação na energia do Proctor Normal nas misturas solo-finos (F_{EAF} e F_{LF}) com 2,5, 5, 10 e 15% de teor de coprodutos siderúrgicos em relação à massa de solo seco; (iv) ensaios de resistência à compressão simples, tração por compressão diametral, CBR e módulo de resiliência com cura em câmara úmida variando entre 7, 28 e 56 dias, nas misturas solo-finos com teores de 15% em relação a massa de solo seco. Os resultados obtidos mostraram que a adição dos finos F_{EAF} e F_{LF} as amostras de solos proporcionaram: (i) aumento no peso específico aparente seco máximo e redução na umidade ótima; (ii) ganhos de resistência mecânica evidenciados nos ensaios de resistência à compressão simples, resistência a tração por compressão diametral e CBR, os quais estão diretamente relacionados com os períodos de cura adotados; (iii) redução na expansibilidade no ensaio CBR; e (iv) aumento no valor do módulo resiliente das misturas solo-escória de aciaria elétrica em relação as amostras de solo no estado natural para um dado par de tensões. Os principais destaques foram o aumento nos valores de

CBR de 8% para 44% no solo 1 e de 7 % para 140 % no solo 2, quando em mistura com os F_{LF} . Para as misturas usando os F_{EAF} o destaque foi o aumento no modulo de resiliência, de 247 MPa para 320 MPa, no solo 1, de 242 MPa para 352 MPa, no solo 2. O ganho de resistência mecânica e as mudanças nas propriedades de engenharia dos solos após o tratamento com os finos de escória de aciaria elétrica podem ser explicados pelas reações de hidratação, onde os produtos de hidratação das amostras de solos estabilizados com os F_{LF} e F_{EAF} incluem o hidróxido de cálcio (CH), silicato de cálcio hidratado (CSH), aluminato de cálcio hidratado (CAH) e a etringita; trocas catiônicas e pela ação do efeito *filler*. Além disso, o desenvolvimento de reações pozolânicas promovidas pela presença de hidróxido de cálcio nos finos de escória de aciaria elétrica estudados, foi responsável pelo ganho de resistência dos solos em idades mais avançadas. Sendo assim, os resultados possibilitaram inferir que, a adição de finos de escórias de aciaria elétrica F_{EAF} e F_{LF} é eficaz e viável tecnicamente para a melhoria das propriedades de engenharia das amostras de solos tropicais analisadas, apontando para a possibilidade de redução dos desperdícios na siderurgia mediante a utilização desse subproduto.

Palavras-Chave: Estabilização de solos. Resíduos siderúrgicos. Pavimentação. Obras geotécnicas.

ABSTRACT

LOPES, Emerson Cordeiro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2021. **Technological Evaluation of Steel Coproducts Aiming to Improve Engineering Properties of Tropical Soils.** Advisor: Taciano Oliveira da Silva. Co-advisors: José Maria Franco de Carvalho and Leonardo Gonçalves Pedroti.

The reuse of steelmaking wastes in geotechnical works, especially steelmaking slags, presents several advantages in terms of environmental sustainability. The preservation of natural resources, the reduction of energy consumption, the lack of space for waste disposal, and the environmental degradation make the reuse of these materials an attractive alternative. Therefore, the present work aimed to develop a technological characterization of fines of electrical arc furnace oxidizing slag (F_{EAF}) and ladle furnace reducing slag (F_{LF}) mixed with tropical soils for use in structural layers of pavements and geotechnical applications. In this study, deformed samples were collected from two soils of the city of Viçosa-MG. An experimental program of different laboratory tests was developed, as follows: (i) tests of geotechnical characterization, standard Proctor compaction tests, unconfined compressive strength, tensile strength by diametral compression, California Bearing Ratio (ISC or CBR) index, and resilient modulus; (ii) tests of chemical, physical, morphological, and microstructural characterization; (iii) standard Proctor compaction tests of mixtures between soils and slag fines (F_{EAF} and F_{LF}) with steel coproduct contents of 2,5, 5, 10, and 15% (in relation to the dry soil mass); (iv) unconfined compression, diametral compression, CBR, and resilient modulus tests of mixtures between soils and a 15% content of fines, after 7, 28, and 56 days of curing in moist chamber. The results indicated that the addition of F_{EAF} and F_{LF} fines to the soil samples provided (i) an increase in the maximum dry specific weight and a reduction in the optimal moisture content; (ii) mechanical strength gains in unconfined compression, diametral compression, and CBR tests, which were directly associated with the curing periods; (iii) reductions in CBR swelling; and (iv) increases in the resilient modulus of mixtures between soil and steel slags, in comparison to soil samples in their natural state. The main highlights were the improvement in CBR index from 8% to 44% in soil 1 and 7% to 140% in soil 2, in mixtures containing F_{LF} . In F_{EAF} mixtures, some highlights were the resilient modulus increases from 247 MPa to 320 MPa in soil 1, and from 242 MPa to 352 MPa in soil 2. The improvements

of the soil engineering properties can be attributed to hydration reactions in which the main hydration products of soil samples stabilized with F_{LF} and F_{EAF} include calcium silicate hydrates (CSH), calcium aluminate hydrates (CAH), and ettringite; cation exchange reactions; and filler effect. In addition, the development of pozzolanic reactions associated with the presence of calcium hydroxide was able to provide soil strength gains in the long-term. Therefore, the results indicated that the addition of fines of F_{EAF} and F_{LF} steel slag is effective and technically feasible for improving the engineering properties of the studied tropical soils samples, which provided environmental and economic benefits for the steelmaking sector, based on the application of these products.

Keywords: Soil stabilization. Steelmaking wastes. Pavement. Geotechnical applications

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Distribuição do tamanho das partículas de F_{EAF} obtida por difração a laser.	32
Figura 2.2 - Difratoograma dos F_{EAF} estudados.	37
Figura 2.3 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra de F_{EAF} analisadas.....	39
Figura 2.4 - Curvas de compactação - Proctor Normal dos solos 1 (a) e 2 (b) em seus estados naturais e em misturas com F_{EAF}	40
Figura 2.5 - Variação do peso específico aparente seco máximo (a) e da umidade ótima (b) em função do teor de F_{EAF} nas misturas com as amostras dos solos 1 e 2.	40
Figura 2.6 - Valores de resistência à compressão simples das amostras de solo em função dos teores de F_{EAF}	42
Figura 2.7 - Variação da resistência à compressão simples (RCS) aos 7, 28 e 56 dias de cura selada, para um teor de 15% de F_{EAF} misturados com as amostras de solos.....	43
Figura 2.8 - Valores de índice CBR para 0, 7, 28 e 56 dias de cura selada para as amostras de solos e suas misturas com 15% de F_{EAF}	44
Figura 2.9 - Valores de parâmetros de Expansão CBR de corpos de prova para 0, 7, 28 e 56 dias de cura selada para as amostras de solos e suas misturas com 15% de F_{EAF}	45
Figura 2.10 - Resultados dos ensaios de MR para o modelo composto ($\sigma_d - \sigma_3$): (a) solo 1; (b) solo 1+15% F_{EAF} ; (c) solo 2; (d) solo 2+15% F_{EAF}	47
Figura 3.1-Distribuição granulométrica dos F_{LF} obtida por difração a laser.....	64
Figura 3.2 - Análise granulométrica das amostras de solo analisadas.....	65
Figura 3.3 - Esquema e parâmetros da seção transversal da estrutura do pavimento asfáltico adotado como referência (Pav1) (REZENDE et al., 2020).	69
Figura 3.4 - Esquema e parâmetros da seção transversal da estrutura do pavimento estabilizado com os F_{LF} (Pav2).....	69
Figura 3.5 - Difratoograma dos F_{LF} analisados na pesquisa.....	72
Figura 3.6 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos F_{LF} analisados.	
74	
Figura 3.7 - Curvas de compactação das amostras de solo 1 (a), solo 2 (b) e respectivas misturas com F_{LF}	75

Figura 3.8 - Variação do teor de umidade ótima (W_{ot}) e do peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) das misturas solo- F_{LF} analisadas.	75
Figura 3.9 - Valores de resistência à compressão simples (RCS_{7d}) de misturas solo- F_{LF} para diferentes teores de F_{LF}	77
Figura 3.10 - Valores de resistência à compressão simples (RCS) de corpos de prova de misturas solo-15% F_{LF} para 7, 28 e 56 dias de cura selada, em câmara úmida.	78
Figura 3.11 - Valores médios de resistência à tração por compressão diametral de amostras de solo no estado natural e misturas solo-15% F_{LF}	80
Figura 3.12 - Valores médios de índice CBR de corpos de prova de amostras de solos e misturas solo-15% F_{LF} para cura selada de 7, 28 e 56 dias, em câmara úmida.	81
Figura 3.13 - Valores médios do parâmetro Expansão CBR para corpos de prova das amostras de solos e misturas solo-15% F_{LF}	83
Figura 3.14 - Resultados de MR para o modelo composto para as seguintes amostras: (a) solo 1, (b) solo1 + 15% F_{LF} , (c) solo 2 (c) e (d) solo 2 + 15%.....	85
Figura 3.15 - Tensões verticais (σ_v) na estrutura do Pav 1(a) e Pav2 (b): $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa.....	87
Figura 3.17 - Vida de fadiga (N_f) do revestimento asfáltico sobre a estrutura do Pav1 e do Pav 2 estabilizado pelos F_{LF}	89
Figura 4.1 - Distribuições granulométricas de F_{EAF} e F_{LF} obtidas por difração a laser.	104
Figura 4.2 - Distribuições granulométricas das amostras de solos 1 e 2.	105
Figura 4.3 - Ensaio de MEV para as amostras: (a) solo 1, (b) solo 2, (c) solo 1 + 15% F_{EAF} , (d) solo 2 + 15% F_{EAF} , (e) solo 1 + 15% F_{LF} e (f) solo 2 + 15 % F_{LF} . Sendo o tempo de cura selada para as misturas de 28 dias.	111
Figura 4.4 - Difrátogramas da amostra do solo 1 (a e b) e misturas solo 1- F_{EAF} (a) e solo 1- F_{LF} (b).	113
Figura 4.5 - Difrátogramas da amostra do solo 2 (a e b) e das misturas solo 2 + F_{EAF} (a) e solo2+ F_{LF} (b).	113
Figura 4.6 - Espectros Raman registrados nas pastas de finos de escórias de aciaria elétrica – (a) F_{EAF} e (b) F_{LF}	115
Figura 4.7 - Análises TG e DTG de pastas de finos de escória de aciaria elétrica - (a) F_{EAF} e (b) F_{LF}	116

Figura 4.9 - Valores de resistência à compressão simples (RCS) de corpos de prova de amostras de solos e misturas com (a) F_{EAF} e (b) F_{LF} . CBR (c) e expansão CBR (b) para misturas solo-finos de escórias de aciaria elétrica, com teores 5% de F_{EAF} + 10% de F_{LF} 119

Figura 4.10 - Resultados de MR aos 28 dias de cura para o modelo composto ($\sigma_d - \sigma_3$): solo 1 (a); solo 1+10% F_{LF} +5% F_{EAF} (b); solo 2 (c); solo 2+10% F_{LF} +5% F_{EAF} (d). 122

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Caracterização geotécnica dos solos.....	33
Tabela 2.2 - Caracterização química dos F_{EAF}	36
Tabela 2.3 - Valores de parâmetros para o modelo composto ($\sigma_d-\sigma_3$), com os respectivos valores de R^2 para as amostras de solos e suas misturas com 15% de F_{EAF}	47
Tabela 3.1 - Limites de <i>Atterberg</i> e peso específico dos grãos das amostras de solos analisadas. 65	
Tabela 3.2 - Caracterização química dos F_{LF}	71
Tabela 3.3 - Valores médios dos parâmetros para o modelo composto ($\sigma_d-\sigma_3$), com os respectivos valores de R^2 para as amostras de solo no estado natural e misturas solo-15% F_{LF} . 84	
Tabela 4.1 - Características físicas da escória de aciaria elétrica F_{EAF} e F_{LF}	104
Tabela 4.2 - Limites de <i>Atterberg</i> e peso específico dos grãos das amostras de solos. 105 Amostras de Solo.....	105
Tabela 4.3 - Caracterização química das amostras de solo 1 e 2.	109
Tabela 4.4 - Caracterização química dos finos das escórias de aciaria elétrica - F_{EAF} e F_{LF} . 110	
Tabela 4.5 - Valores dos parâmetros para o modelo composto ($\sigma_d-\sigma_3$), com os respectivos valores de R^2 para os solos e misturas aos 28 dias de cura.....	121

LISTA DE ABREVIACOES, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento <i>Portland</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CH	Hidróxido de Cálcio
CSH	Silicato Hidratado de Cálcio
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DTG	Termogravimetria Derivada
EAF	<i>Electric Arc Furnace</i> (Escória oxidante de forno de arco elétrico)
ES	Especificação de Serviço
F _{EAE}	Finos de escória de aciaria elétrica oxidante EAF
F _{LF}	Finos de escória de aciaria elétrica redutora LF
IG	ndice de Grupo
IP	ndice de Plasticidade
ISC	ndice de Suporte Califórnia
k ₁ , k ₂ e k ₃	Constantes experimentais
LA'	Solo laterítico, areias argilosas e argilas arenosas
LF	<i>Ladle Furnace</i> (Escória redutora de forno de panela)
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MCV	<i>Moisture Condition Value</i>
ME	Método de ensaio
<i>me-PADS</i>	Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MR	Módulo de resiliência

NA'	Misturas de areias quartzosas, com finos de comportamento não laterítico
NBR	Norma Brasileira
N_f	Vida de fadiga
P	Pressão de enchimento dos pneus
Pav1	Pavimento de referência
Pav2	Pavimento estabilizado com os F_{LF}
pH	Potencial hidrogeniônico
Q	Carga no eixo
R^2	Coefficiente de determinação
RSC	Resistência à compressão simples
RSC ₇	Resistência à compressão simples para 7 dias de cura
RTCD	Resistência à tração por compressão diametral
RTCD _{7d}	Resistência à tração por compressão diametral para 7 dias de cura
TGA	Análise Termogravimétrica
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
USCS	<i>Unified Soil Classification System</i>
γ_d	Peso específico aparente seco
γ_{dmax}	Peso específico aparente seco máximo
γ_s	Peso específico dos grãos sólidos
W(%)	Teor de umidade
W _{ot}	Umidade ótima
σ_3	Tensão confinante
σ_d	Tensão desvio
σ_h	Tensão horizontal
σ_v	Tensão vertical
$\Delta\sigma$	Diferença entre a tensão horizontal de tração e a tensão vertical de compressão
Φ	Diâmetro
#	Abertura de malha da peneira em mm

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	17
1.1 Contextualização do objeto de pesquisa.....	17
1.2 Objetivos.....	21
1.3 Organização do trabalho	22
Referências bibliográficas	23
2. AVALIAÇÃO DE FINOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA EAF COMO AGENTE ESTABILIZANTE DE SOLOS TROPICAIS	27
2.1 Introdução.....	29
2.2 Materiais e métodos.....	31
2.2.1 Coleta e preparação de amostras	31
2.2.1.1 Escória de aciaria EAF.....	31
2.2.1.2 Solos.....	32
2.2.2 Caracterização física dos F_{EAF}	32
2.2.3 Caracterização e classificação geotécnica dos solos	33
2.2.4 Caracterização química, mineralógica e morfológica dos F_{EAF}	34
2.2.5 Ensaio de compactação	34
2.2.6 Ensaio de compressão simples.....	35
2.2.7 Ensaio CBR.....	35
2.2.8 Ensaio de módulo de resiliência.....	35
2.3 Resultados e Discussão.....	36
2.3.1 Caracterização química, mineralógica e morfológica dos F_{EAF}	36
2.3.2 Ensaio de compactação	39
2.3.3 Ensaio de compressão simples.....	41
2.3.4 Ensaio CBR.....	44
2.3.5 Ensaio de módulo de resiliência.....	46
2.4 Conclusões.....	49
Referências Bibliográficas.....	51
3. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS COM FINOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA REDUTORA <i>LADLE FURNACE</i> PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO E OBRAS GEOTÉCNICAS.....	59

3.1	Introdução.....	61
3.2	Materiais e métodos.....	63
3.2.1	Beneficiamento e caracterização física da amostra de escória de aciaria LF.....	63
3.2.2	Amostra de Solos.....	64
3.2.3	Ensaio de caracterizações química, mineralógica e morfológica dos F _{LF}	66
3.2.4	Ensaio de compactação.....	66
3.2.5	Ensaio de compressão simples.....	67
3.2.6	Ensaio de tração por compressão diametral.....	67
3.2.7	Ensaio CBR.....	67
3.2.8	Ensaio de módulo de resiliência.....	68
3.2.9	Análise de fadiga.....	68
3.3	Resultados e Discussão.....	71
3.3.1	Ensaio de caracterização química, mineralógica e morfológica dos F _{LF}	71
3.3.2	Ensaio de compactação.....	74
3.3.3	Ensaio de compressão simples.....	76
3.3.4	Ensaio de tração por compressão diametral.....	79
3.3.5	Ensaio CBR.....	81
3.3.6	Ensaio de módulo de resiliência.....	84
3.3.7	Análise de fadiga.....	86
3.4	Conclusões.....	90
	Referências bibliográficas.....	91
4.	ANÁLISE QUÍMICA E MICROESTRUTURAL DA INTERAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS E FINOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA E SUA INTERFERÊNCIA NAS PROPRIEDADES DE ENGENHARIA DOS MATERIAIS ESTABILIZADOS.	99
4.1	Introdução.....	101
4.2	Materiais e métodos.....	103
4.2.1	Coleta, preparação e caracterização física.....	103
4.2.1.1	Escórias de aciaria EAF e LF.....	103
4.2.1.2	Solos.....	104
4.2.2	Ensaio de compactação.....	106
4.2.3	Ensaio para caracterizações química, mineralógica e microestrutural.	106

4.2.4	Ensaio de compressão simples.....	107
4.2.5	Ensaio CBR.....	108
4.2.6	Ensaio de módulo de resiliência.....	108
4.3	Resultados e Discussão.....	108
4.3.1	Caracterizações química, mineralógica e microestrutural.....	108
4.3.2	Ensaio de compactação.....	116
4.3.3	Ensaio de compressão simples e CBR.....	118
4.3.4	Ensaio de módulo de resiliência.....	121
4.4	Conclusões.....	123
	Referências Bibliográficas.....	125
5.	CONCLUSÕES GERAIS.....	133

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Contextualização do objeto de pesquisa

Os resíduos siderúrgicos representam cerca de 61% dos resíduos e co-produtos do setor siderúrgico no Brasil, os quais, em 2017, correspondiam a aproximadamente 20,8 milhões de toneladas. Em seguida, respondendo por 5% do total, destacam-se os finos e os materiais pulverulentos (cerca de 1,04 milhões de toneladas), seguidos das lamas e outros tipos de resíduos e co-produtos que representam, juntos, aproximadamente 26% do total (IAB, 2020).

Dois tipos de escória são produzidos no processo de produção de aço: a de Forno de Arco Elétrico - *Electric Arc Furnace* (EAF) e a de Forno de Panela - *Ladle Furnace* (LF). Esta última é conhecida como escória básica ou escória branca. A escória LF é produzida no processo de metalurgia secundária ou de refino, para gerar aços de alta qualidade. Neste sistema, o aço líquido passa primeiro por um processo de desfosforilação ácida (EAF). Em seguida, o aço é descarregado em um forno de concha ou panela, onde é desoxidado, dessulfurado e ligado sob a proteção da escória LF (SÁEZ-DE-GUINOA et al., 2015). A cal e a dolomita são adicionados no processo para fixar elementos indesejáveis na escória, como fósforo, monóxido de carbono gasoso e silício, e para proteger o revestimento refratário do forno. A separação densimétrica é usada para remover a escória do aço no final do processo (SHATNAWI et al., 2008; MAHIEUX; AUBERT; ESCADEILLAS, 2009; BELHADJ; DILIBERTO; LECOMTE, 2012; KAMBOLE et al., 2017).

Devido à baixa utilização para o ramo siderúrgico, as escórias de aciaria são descartadas em aterros, e vastas áreas são degradadas pela necessidade de deposição desses resíduos. O armazenamento de escória de aciaria está ganhando importância crescente devido à grande

quantidade de resíduos de aço produzidos a cada ano (YAN; MI; WANG, 2014; SANTAMARIA et al., 2018;). Tal fato implica em um processo contínuo de degradação ambiental, fazendo-se necessários, então, estudos de práticas sustentáveis capazes de gerar um destino adequado a esse resíduo siderúrgico. Entre as destinações mais frequentes, portanto, pode-se citar: aplicação em lastro de ferrovias, utilização como agregados de base e sub-base de rodovias, agregados de sistemas de drenagem, materiais cimentícios suplementares, agregados finos em concretos e argamassas, entre outros (YILDIRIM; PREZZI, 2011; DA SILVA et al., 2016; BORGES MARINHO et al., 2017; DINIZ et al., 2017; KAMBOLE et al., 2017; SKAF et al., 2017).

A escória de aciaria elétrica vem sendo estudada e ganhando destaque como material cimentante suplementar, ou seja, material utilizados em substituição parcial do clínquer diretamente na produção de cimentos ou adicionado na produção de concretos e argamassas (JUENGER; SIDDIQUE, 2015). Os materiais suplementares podem ser classificados em três grupos de acordo com a ação físicoquímica que exercem, sendo eles: materiais pozolânicos, materiais cimentantes e *fillers* (DAYIOGLU; CETIN; NAM, 2017).

Alguns materiais já vêm sendo adicionados em substituição parcial do clínquer há algum tempo pela indústria cimenteira, sendo que, algumas dessas adições são rejeitos industriais como escória de alto-forno e cinzas volantes. Estes materiais são bem conhecidos por terem um efeito na redução da permeabilidade do concreto quando devidamente curados, característica desejável para a produção de concretos duráveis. Os materiais suplementares também podem ser usados para reduzir a geração de calor associada à hidratação do cimento e reduzir o potencial de rachaduras térmicas em elementos estruturais maciços (ELCHALAKANI; BASARIR; KARRECH, 2017). Sendo assim, o aproveitamento destes materiais apresenta sobretudo, além dos benefícios ambientais, melhorias substanciais nas propriedades de engenharia dos materiais (EVANGELISTA; ROSADO; PENTEADO, 2018).

As principais características estudadas para avaliação dos materiais suplementares para a devida aplicação são: físicas (distribuição granulométrica, área superficial, forma); químicas (composição de óxidos) e mineralógicas (fases e conteúdo de material amorfo) (JUENGER; SIDDIQUE, 2015).

As propriedades químicas e físicas das escórias de aciaria elétrica podem variar de acordo com as características específicas do processo de fabricação do aço, geralmente sua aparência visual é semelhante à de agregados naturais, especialmente devido à cor cinza escuro. Arribas et al. (2015) destaca que a composição química das escórias de aciaria elétrica é composta por 80% em peso de óxidos de cálcio, ferro e silício, e os restantes 20% de óxidos de alumínio, magnésio, manganês e fósforo. O teor de óxidos de ferro aumenta a dureza e a densidade das escórias de aciaria elétrica. Segundo Manso et al. (2006), a alta densidade é útil quando a escória de aciaria é incorporada ao concreto para uso em blocos de contenção, fundações, paredes de escoramento e barreiras acústicas. Além disso, as escórias de aciaria elétrica em geral são materiais que não apresentam riscos de lixiviação de substância perigosas para o meio ambiente (FALESCHINI; DE MARZI; PELLEGRINO, 2014; SANTAMARIA et al., 2018).

Muitos estudos indicam que a escória de aciaria elétrica pode ser usada para melhorar a plasticidade, resistência mecânica e a drenagem dos solos (POH; GHATAORA; GHAZIREH, 2006; MALASAVAGE et al., 2012; AKINWUMI, 2014). A troca catiônica entre os solos e os finos de escória é responsável pela mudança nas propriedades de engenharia desses materiais, reduzindo a dupla camada difusa, levando à aglomeração das partículas de argila nas misturas solo-escória (AKINWUMI, 2014). Além da troca catiônica, verificaram-se atividades pozolânicas e cimentantes, indicando um potencial para uso das escórias de aciaria elétrica como agentes estabilizantes de solos (MANSO et al., 2006; GOODARZI; SALIMI, 2015).

A utilização da escória de aciaria elétrica como estabilizante de solos para aplicação em pavimentação e obras de terra, torna-se uma boa alternativa, devido à grande quantidade de rodovias não pavimentadas no Brasil, que constituem 78,45% da malha rodoviária, segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2019), viabilizando o emprego de grandes volumes de escória de aciaria e conseqüente redução do descarte inapropriado. Outros benefícios relacionados à sua utilização englobam a rentabilidade econômica e a diminuição da extração de matérias-primas não renováveis (GÖKALP et al., 2018).

A estabilização do solo é uma técnica para refinar e melhorar as propriedades de engenharia do solo, tais como: resistência mecânica, permeabilidade, compressibilidade, durabilidade e plasticidade. É uma técnica amplamente utilizada na engenharia civil, para construção de camadas de base e sub-base, melhoria de subleitos de pavimentos, fundações, aterros e obras

de contenção (ABU-FARSAKH; DHAKAL; CHEN, 2015; ARULRAJAH et al., 2017; BEHNOOD, 2018).

A melhoria de solos moles em obras geotécnicas é uma técnica frequentemente utilizada, pois em alguns casos os solos locais podem ser de baixa resistência, ou seja, não possui rigidez suficiente para suportar a carga exigida pelo projeto. A substituição desses solos por um de melhor qualidade, em alguns casos, pode não ser viável, especialmente na construção de pavimentos, devido aos custos adicionais associados à escavação e ao transporte dos materiais. Sendo assim, o uso de materiais cimentícios para estabilização de solos moles é uma prática amplamente aceita na engenharia geotécnica, que pode contornar os problemas relacionados ao transporte e substituição desses materiais (MANSO et al., 2013; ABU-FARSAKH; DHAKAL; CHEN, 2015; PUPPALA, 2016; ARDAH; CHEN; ABU-FARSAKH, 2017; DAYIOGLU; CETIN; NAM, 2017).

Os agentes de estabilização de solo incluem uma ampla gama de materiais como cal, cimento *Portland*, cinzas volantes, polímeros, fibras, pneus e vidros triturados, emulsão asfáltica, alcatrão e betumes. Entre os materiais de estabilização, a cal e o cimento são os mais utilizados. No entanto, esses agentes de estabilização possuem limitações de custos econômico e ambiental, como os impactos em termos de emissão de CO₂, consumo de energia e custo de produção (BEHNOOD, 2018).

As propriedades dos solos estabilizados com materiais cimentícios dependem das características do solo, do tipo e da quantidade do agente estabilizante. As características do solo que afetam a eficiência da estabilização incluem a distribuição granulométrica das partículas, composição química e mineralógica, plasticidade, conteúdo de matéria orgânica, presença de sal, capacidade de troca catiônica, pH e superfície específica. Além disso, o tipo e a duração da condição de cura, bem como o método e a qualidade da compactação podem afetar as propriedades de engenharia adquiridas pelos solos estabilizados (ABU-FARSAKH; DHAKAL; CHEN, 2015; ARDAH; CHEN; ABU-FARSAKH, 2017; BEHNOOD, 2018).

Sendo assim, a fim de estabelecer e complementar o conhecimento sobre o uso de estabilizantes alternativos e suas interações com os diferentes tipos de solos, foi desenvolvido um estudo contendo uma análise comparativa da influência de diferentes teores de finos de escória de

aciaria elétrica em amostras de solos tropicais arenoso e argiloso. Essa análise visa elucidar os principais mecanismos químicos, físicos, mecânicos e microestruturais envolvidos no processo de estabilização e melhorias desses materiais com os coprodutos supracitados.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste estudo foi o desenvolvimento e adaptações de tecnologias para caracterização tecnológica de coprodutos siderúrgicos: escória de aciaria elétrica oxidante *Electric Arc Furnace* (EAF) e redutora *Ladle Furnace* (LF), para o melhoramento de propriedades de engenharia de solos tropicais.

Os objetivos específicos, visando atendimento ao objetivo geral foram os seguintes:

- Determinação e análise das características físico-químicas e mineralógicas de amostras de escória de aciaria elétrica oxidante-EAF e redutora-LF moídas e de solos tropicais;
- Determinação e análise das características microestruturais de amostras de escória de aciaria elétrica oxidante-EAF e redutora-LF moídas, de solos tropicais e misturas solo-escória de aciaria elétrica oxidante-EAF ou redutora-LF moídas;
- Análise da interferência da adição de diferentes percentagens de escória de aciaria elétrica oxidante-EAF e/ou redutora-LF nas propriedades de engenharia de amostras de solos tropicais;
- Análise da interferência do tempo de cura em câmara úmida de corpos de prova de misturas solo-escória de aciaria elétrica oxidante-EAF e/ou redutora-LF na mobilização das propriedades de engenharia das amostras de solos tropicais; e

- Modelagem composta de resultados de ensaios de módulo de resiliência para as amostras de solos tropicais no estado natural e de misturas solo-escória de aciaria elétrica.

1.3 Organização do trabalho

A estrutura deste trabalho de pesquisa, com uma síntese do que trata cada capítulo, será dividida em 5 capítulos, a saber:

No capítulo 1, abordou-se a contextualização dos problemas dos estudos desenvolvidos no trabalho de pesquisa;

No capítulo 2, desenvolveu-se um estudo para avaliar experimentalmente a influência do uso de finos de escória de aciaria elétrica oxidante-EAF como estabilizante de solos tropicais, visando o uso em estruturas de pavimentos flexíveis e obras de terra.

No capítulo 3, foi proposto os métodos de ensaio realizados no estudo desenvolvido no capítulo anterior, no entanto, a escória de aciaria usada foi substituída pela escoria produzida em fornos de panela LF, além disso, foi realizado uma avaliação da vida de fadiga de um revestimento asfáltico inserido sobre uma estrutura estabilizada pelos finos de escória de aciaria elétrica redutora-LF.

No capítulo 4, foi realizado a avaliação microestrutural de interações físicas e químicas entre as amostras de solos tropicais analisadas e finos de escória de aciaria elétrica oxidante-EAF e redutora-LF, em função de combinação de quatro diferentes técnicas: microscopia eletrônica de varredora, difração de raios X, espectroscopia Raman e análise termogravimétrica

No capítulo 5, CONCLUSÕES GERAIS, são apresentadas, a partir dos resultados alcançados, as conclusões gerais da pesquisa, uma vez que as conclusões específicas para cada estudo estão descritas nos capítulos correspondentes.

Referências bibliográficas

ABU-FARSAKH, M.; DHAKAL, S.; CHEN, Q. Laboratory characterization of cementitiously treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading. **Soils and Foundations**, v. 55, n. 3, p. 504–516, jun. 2015.

AKINWUMI, I. Soil Modification by the Application of Steel Slag. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, v. 58, n. 4, p. 371–377, 2014.

ARDAH, A.; CHEN, Q.; ABU-FARSAKH, M. Evaluating the performance of very weak subgrade soils treated/stabilized with cementitious materials for sustainable pavements. **Transportation Geotechnics**, v. 11, p. 107–119, jun. 2017.

ARRIBAS, I. et al. Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. **Construction and Building Materials**, v. 90, p. 68–79, ago. 2015.

ARULRAJAH, A. et al. Cement kiln dust and fly ash blends as an alternative binder for the stabilization of demolition aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 218–225, ago. 2017.

BEHNOOD, A. Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. **Transportation Geotechnics**, v. 17, p. 14–32, dez. 2018.

BELHADJ, E.; DILIBERTO, C.; LECOMTE, A. Characterization and activation of Basic Oxygen Furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 1, p. 34–40, jan. 2012.

BORGES MARINHO, A. L. et al. Ladle Furnace Slag as Binder for Cement-Based Composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 11, p. 04017207, nov. 2017.

DA SILVA, M. J. et al. Feasibility Study of Steel Slag Aggregates in Precast Concrete Pavers. **ACI Materials Journal**, v. 113, n. 4, ago. 2016.

DAYIOGLU, M.; CETIN, B.; NAM, S. Stabilization of expansive Belle Fourche shale clay with different chemical additives. **Applied Clay Science**, v. 146, p. 56–69, set. 2017.

DINIZ, D. H. et al. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical Soil Stabilizer for Use in Roads. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 9, p. 04017118, set. 2017.

ELCHALAKANI, M.; BASARIR, H.; KARRECH, A. Green Concrete with High-Volume Fly Ash and Slag with Recycled Aggregate and Recycled Water to Build Future Sustainable Cities. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 2, p. 04016219, fev. 2017.

EVANGELISTA, B. L.; ROSADO, L. P.; PENTEADO, C. S. G. Life cycle assessment of concrete paving blocks using electric arc furnace slag as natural coarse aggregate substitute. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 176–185, mar. 2018.

FALESCHINI, F.; DE MARZI, P.; PELLEGRINO, C. Recycled concrete containing EAF slag: environmental assessment through LCA. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 18, n. 9, p. 1009–1024, 21 out. 2014.

GÖKALP, İ. et al. Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications. **Transportation Geotechnics**, v. 14, p. 61–69, mar. 2018.

GOODARZI, A. R.; SALIMI, M. Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag. **Applied Clay Science**, v. 108, p. 61–69, maio 2015.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 71–80, dez. 2015.

KAMBOLE, C. et al. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 618–631, set. 2017.

MAHIEUX, P.-Y.; AUBERT, J.-E.; ESCADEILLAS, G. Utilization of weathered basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic road binders. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 742–747, fev. 2009.

MALASAVAGE, N. E. et al. Geotechnical Performance of Dredged Material—Steel Slag Fines Blends: Laboratory and Field Evaluation. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 138, n. 8, p. 981–991, ago. 2012.

MANSO, J. M. et al. Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 6, p. 528–534, jul. 2006.

MANSO, J. M. et al. The use of ladle furnace slag in soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 126–134, mar. 2013.

POH, H. Y.; GHATAORA, G. S.; GHAZIREH, N. Soil Stabilization Using Basic Oxygen Steel Slag Fines. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 18, n. 2, p. 229–240, abr. 2006.

PUPPALA, A. J. Advances in ground modification with chemical additives: From theory to practice. **Transportation Geotechnics**, v. 9, p. 123–138, dez. 2016.

IAB-INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2018**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: 15 de nov. de 2020.

SÁEZ-DE-GUINOA VILAPLANA, A. et al. Utilization of Ladle Furnace slag from a steelwork for laboratory scale production of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 837–843, set. 2015.

SANTAMARIA, A. et al. Dimensional stability of electric arc furnace slag in civil engineering applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 205, p. 599–609, dez. 2018.

SHATNAWI, A. S. et al. Jordan journal of civil engineering. **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 2, n. 3, p. 197–207, 2008.

SKAF, M. et al. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 120, p. 176–185, maio 2017.

YAN, P.; MI, G.; WANG, Q. A comparison of early hydration properties of cement–steel slag binder and cement–limestone powder binder. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 115, n. 1, p. 193–200, 15 jan. 2014.

YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag. **Advances in Civil Engineering**, v. 2011, p. 1–13, 2011

2. AVALIAÇÃO DE FINOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA EAF COMO AGENTE ESTABILIZANTE DE SOLOS TROPICAIS

Resumo: Resíduos siderúrgicos, como a escória de aciaria elétrica, têm sido reaproveitados pela construção civil com o intuito principal de reduzir suas áreas de disposição e, conseqüentemente, os danos ambientais causados. Existem ainda poucos estudos sobre a estabilização de solos tropicais utilizando-se finos da escória de aciaria elétrica moída oxidante - EAF (F_{EAF}). Sendo assim, este trabalho de pesquisa avaliou a viabilidade técnica de utilização de F_{EAF} como um agente estabilizante de amostras de solos tropicais, visando atender as exigências de projeto de pavimentos flexíveis. O programa experimental foi composto pelos seguintes ensaios de laboratório: (i) ensaios para caracterização geotécnica de solos; (ii) ensaios de caracterização química, física e morfológica dos F_{EAF} ; (iii) compactação na energia do Proctor Normal de amostras de solos no estado natural e de misturas solo- F_{EAF} ; (iv) ensaios de compressão simples, índice CBR e módulo de resiliência (MR) de amostras de solos no estado natural e de misturas solo- F_{EAF} . Foi verificado experimentalmente que os F_{EAF} estabilizaram com sucesso ambas as amostras de solos analisadas, o MR das amostras de solo argiloso e arenoso para um dado par de tensões teve um aumento de 30% e 42% respectivamente em relação as amostras de solo no estado natural. Esse aumento deveu-se, possivelmente, às ações de *filler* e de cimentação promovidas pela presença da cal e dos silicatos e aluminatos de cálcio identificados nas amostras de F_{EAF} pelo ensaio de DRX. A mistura de F_{EAF} nas amostras de solos analisadas implicou na geração de produtos mais resistentes à compressão e ao puncionamento, mais estáveis volumetricamente e mais resilientes sob a ação de carregamento dinâmico, tornando sua utilização viável em projetos de pavimentação e obras de terra.

Palavras-chave: Estabilização de solos. Solos tropicais. Aproveitamento de resíduos. Escória de aciaria elétrica EAF. Ensaio mecânicos.

Abstract: Steelmaking wastes such as steel slags have been reused in civil construction with the aim of reducing their disposal areas and, consequently, decreasing their environmental damages. There are few studies on soil stabilization with fines of oxidizing EAF steel slag (F_{EAF}). Therefore, this research work evaluated the technical viability of using F_{EAF} as stabilizing agents of tropical soil samples, in order to meet design requirements of flexible pavements. The experimental program consisted of the following laboratory tests: (i) tests for geotechnical characterization of soils; (ii) tests for chemical, physical and morphological characterization of F_{EAF} ; (iii) standard Proctor compaction tests of soil samples in natural state and soil- F_{EAF} mixtures; (iv) unconfined compression, CBR index, and resilient modulus (MR) tests of soils samples in natural state and soil- F_{EAF} mixtures. The experiments indicated that the F_{EAF} successfully stabilized both of the analyzed soil samples. The resilient modulus of the clayey and sandy soils increased in 30% and 42%, respectively, for a given stress state, in relation to the soil samples in natural state. This increase is probably attributed to filler effects and cementitious reactions provided by the presence of lime, calcium silicates, and calcium aluminates identified in F_{EAF} samples through a DRX test. The incorporation of F_{EAF} in the soil samples provided products with higher compressive and puncture strength, higher volumetric stability, and enhanced resilience under dynamic loads, which makes viable their use in pavement design and earthworks.

Keywords: Soil stabilization. Tropical soils. Recycling of wastes. EAF steel slag. Mechanical tests.

2.1 Introdução

A indústria siderúrgica consome grandes quantidades de matérias-primas e de energia, além de produzir, como consequência, uma grande quantidade de resíduos, dentre os quais as escórias de aciaria são os mais abundantes (SANTAMARIA et al., 2018). A geração anual de escórias de aço é de cerca de 14 milhões de toneladas no Japão, 21 milhões de toneladas na Europa, 20,8 milhões de toneladas no Brasil e mais de 100 milhões de toneladas na China (JIANG et al., 2018).

Atualmente, o armazenamento de escória de aciaria em pátios de estocagem está ganhando importância crescente devido à grande quantidade de resíduos de aço gerados a cada ano. A reutilização de escória de aciaria em obras civis está se tornando um negócio intensivo, garantindo vários benefícios relacionados a aspectos ambientais em termos de preservação de recursos naturais, evitando processos onerosos de extração de matérias primas e promovendo a redução da necessidade de armazenamento e de descarte de resíduos (SANTAMARÍA et al., 2020).

A necessidade de expansão contínua da malha rodoviária existente provoca, inevitavelmente, a contínua demanda por recursos naturais e torna o consumo dos resíduos siderúrgicos produzidos em todo o mundo uma excelente alternativa para o atendimento da mesma (WANG; WANG; GAO, 2010; KAMBOLE et al., 2017; SKAF et al., 2017). Nesse cenário, uma das possibilidades técnicas seria de seu uso na estabilização de solos para fins de obras rodoviárias.

Tradicionalmente, a estabilização do solo visando o seu emprego em engenharia de infraestrutura rodoviária é realizada mediante misturas deste com algum tipo de estabilizante à base de cálcio, processo que apresenta diversos benefícios, tais como incremento das propriedades de resistência ao cisalhamento e à compressão, mitigação e redução da instabilidade volumétrica, redução do índice de plasticidade, redução da permeabilidade, redução da compressibilidade e deformação, melhoria do módulo resiliente e aumento da

durabilidade para resistir a condições ambientais desfavoráveis, como ciclos de congelamento, erosão e intemperismo (BEHNOOD, 2018).

A eficiência do uso de escórias de alto forno e aciaria elétrica para melhorar as propriedades de engenharia de materiais usados na construção civil foi amplamente discutida em estudos anteriores (ÖZBAY; ERDEMİR; DURMUŞ, 2016; JIANG et al., 2018). Comparado com o uso generalizado da escória de alto forno, a escória de aciaria elétrica sofre menos atualização, devido a algumas limitações tecnológicas relacionadas aos compostos expansivos em sua composição química (PAN et al., 2016). Consequentemente, a maioria das investigações anteriores sobre a aplicação de escória em pavimentos rodoviários e estabilização de solo focaram na escória de alto forno (VELTEN et al., 2006; NIDZAM; KINUTHIA, 2010; HASAN et al., 2016; AL-KHAFAJI et al., 2017; FASIHNIKOUTALAB et al., 2019; CORRÊA-SILVA et al., 2020;).

Muitos estudos já investigaram a aplicação de escória aciaria elétrica EAF em misturas asfálticas com o objetivos de melhorar o comportamento mecânico (PASETTO; BALDO, 2011; SOFILIC; MLADENOVIC; SOFILIC, 2011; PATIL; BACHHAV; KSHIRSAGAR, 2016; SKAF et al., 2017). O uso de escória EAF como camada granular para substituir a britada graduada também foi investigado em alguns estudos anteriores (ROHDE; NUNEZ; CERATTI, 2003; ROHDE; PERES NÚÑEZ; AUGUSTO, 2003). A combinação de escória de aciaria elétrica EAF e cinza volante para aplicação em subleito e construção de aterro (YILDIRIM; PREZZI, 2011), estradas florestais (PITANGA et al., 2016) e pavimentação urbana (SILVA et al., 2019) também foi investigado.

Ainda foi pouco discutido na literatura técnica, estudos que aborde o uso apenas de escórias de aciaria elétrica EAF como estabilizantes de solos tropicais. Foi encontrado apenas um trabalho (AKINWUMI, 2014), que investigou a influência da escória de aciaria elétrica na plasticidade, resistência mecânica e permeabilidade de um solo laterítico. Este trabalho não avaliou influência da escória de aciaria elétrica sobre as propriedades geotécnicas de diferentes tipos de solo, ou após alguns períodos de cura. Além disso, não foi encontrado uma investigação anterior do módulo de resiliência de solos estabilizados com escórias EAF, embora esta propriedade seja muito importante para a caracterização de materiais em projetos de pavimentação (NG et al., 2013; ZUMRAWI; AWAD, 2017).

A revisão de literatura mostrou que estudos sobre o uso de escória de aciaria elétrica EAF como agente estabilizante de solos são recentes e escassos (MOZEJKO; FRANCISCA, 2020).

Sendo assim, este estudo teve como objetivo apresentar e avaliar o uso de escória de aciaria elétrica EAF processada como agente estabilizante de solos tropicais. As contribuições científicas deste estudo são as seguintes: (i) a análise comparativa da influência da escória de aciaria elétrica EAF moída como agente estabilizante de diferentes tipos de solo (argiloso e arenoso); (ii) avaliação da influência da escória de aciaria elétrica EAF moída nos valores de módulo de resiliência de amostras de solos quando estabilizados com esse material e (iii) a avaliação sistemática da influência de diferentes períodos de cura nas propriedades de engenharia dos solos tropicais, quando estabilizados com escória de aciaria elétrica EAF moída.

2.2 Materiais e métodos

2.2.1 Coleta e preparação de amostras

2.2.1.1 Escória de aciaria EAF

No programa experimental desse estudo, foi utilizada uma amostra de escória de aciaria elétrica moída na granulometria de aproximadamente 0,15 mm de diâmetro. As coletas para amostragem da escória de aciaria elétrica EAF no estado bruto, foram realizadas em pilhas de resíduos no pátio de estocagem da empresa Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil (VSB), situada no município de Jeceaba, no estado de Minas Gerais, Brasil, atendendo às exigências da ABNT NBR 10007/2004.

Posteriormente, as amostras de escória de aciaria elétrica EAF foram moídas em aparelho de Abrasão *Los Angeles* até que todo o material passasse na peneira n° 100 (# 0,15 mm), procedimento que visou diminuir a granulometria e aumentar a superfície específica do material estabilizante, também denominado finos de escória de aciaria elétrica EAF (F_{EAF}).

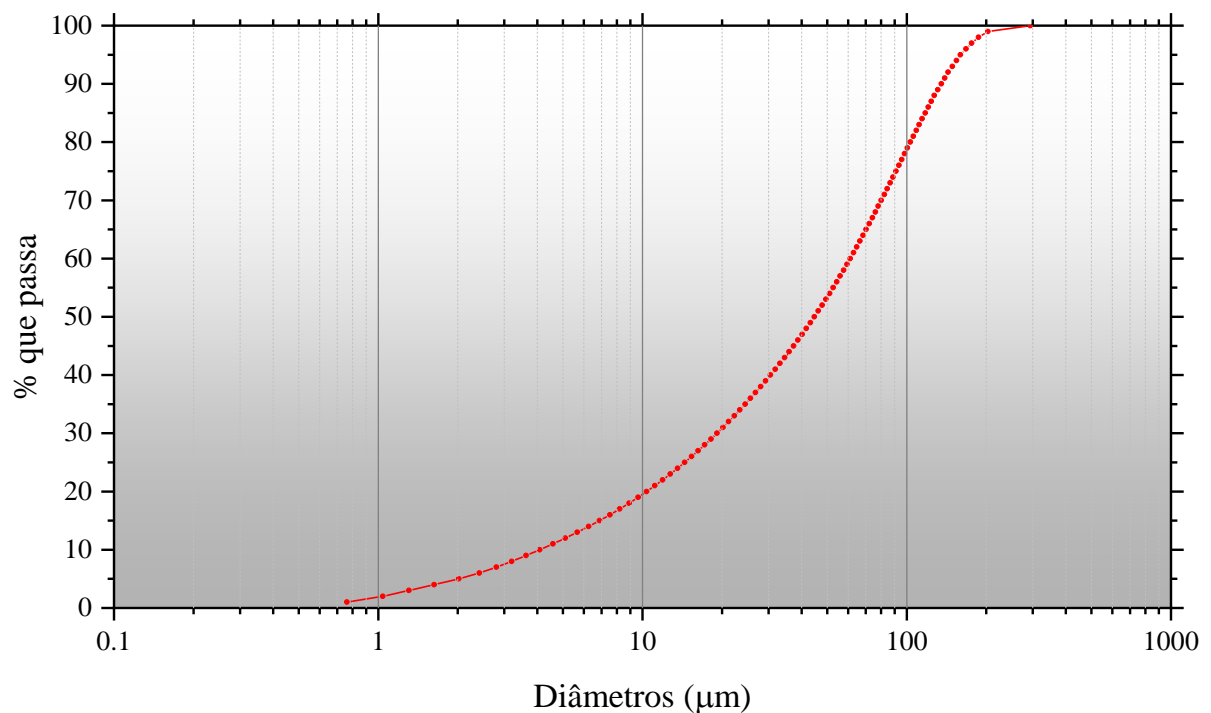
2.2.1.2 Solos

As amostras de solos tropicais residuais provenientes de rochas gnáissicas, coletadas no município de Viçosa, estado de Minas Gerais, Brasil, sendo uma com textura de característica argilosa (solo 1) e outra arenosa (solo 2). A amostragem foi realizada atendendo as exigências da norma técnica DNER PRO 003/1994a.

2.2.2 Caracterização física dos F_{EAF}

Na Figura 2.1 é apresentada a distribuição granulométrica dos F_{EAF} .

Figura 2.1 - Distribuição do tamanho das partículas de F_{EAF} obtida por difração a laser.



A curva granulométrica dos F_{EAF} revelou que aproximadamente 7% de suas partículas encontram-se dentro do intervalo correspondente a agregados miúdos ($150 < \emptyset \leq 4760 \mu\text{m}$) e

os demais 93% no intervalo correspondente a materiais finos ($\varnothing \leq 150 \mu\text{m}$), em uma distribuição contínua segundo a ABNT NBR 7211/2009.

Os resultados dos ensaios para determinação da massa específica dos sólidos, superfície específica e finura dos F_{EAF} foram, respectivamente, $3,70\text{g/cm}^3$, $0,26\text{m}^2/\text{g}$ e $18,00\%$.

Devido ao processo de moagem e peneiramento usando a peneira n° 100, o resultado da finura para os F_{EAF} foi de $18,00\%$, valor considerado alto para materiais cimentantes, como o cimento *Portland*, segundo a ABNT NBR 11579/2012a. No entanto, a superfície específica apresentou valor de $0,26 \text{m}^2/\text{g}$, sendo esse considerado próximo aos valores normalmente encontrados para o cimento *Portland*, que devem ser maiores que $0,24 \text{m}^2/\text{g}$ (DINIZ et al., 2017).

2.2.3 Caracterização e classificação geotécnica dos solos

A caracterização geotécnica (Tabela 2.1) foi realizada por meio da determinação da granulometria (ABNT NBR 7181/2016a), massa específica dos sólidos (ASTM D854/2014 ou DNER-ME 093/94b), limite de liquidez (ABNT NBR 6459/2016b) e plasticidade (ABNT NBR 7180/2016c). A fração granulométrica fora definida conforme ABNT NBR 6502/1995.

Tabela 2.1 – Caracterização geotécnica dos solos.

Características físicas/consistência	solo 1	solo 2
Argila(%)	61	15
Silte(%)	8	11
Areia fina(%)	14	9
Areia média(%)	14	27
Areia grossa(%)	3	24
Pedregulho (%)	0	14
LL (%)	70	38
LP (%)	42	23
IP (%)	28	15
γ_s (kN/m ³)	27,15	26,19

Notas: LL = Limite de Liquidez; LP = Limite de plasticidade; IP = Índice de plasticidade; γ_s = Peso específico dos grãos.

As amostras de solo 1 foram classificadas como argila de alta compressibilidade (CH) pelo sistemas *Unified Soil Classification System* (USCS), de acordo com a norma técnica ASTM D 2487/2017, ao subgrupo A-7-5(19) pelo sistema *Transportation Research Board* (TRB), de

acordo com a norma técnica AASHTO M 145-91/2017 e ao grupo LA' pela metodologia MCT (*Miniatura Compactado Tropical*), de acordo com (NOGAMI et al., 2009). A outra amostra com predomínio de areia, solo 2, foi classificada como uma areia argilosa (SC) pelo USCS, ao subgrupo A-2-7(0) pelo sistema TRB e ao grupo NA' pela metodologia MCT.

2.2.4 Caracterização química, mineralógica e morfológica dos F_{EAF}

A caracterização mineralógica dos F_{EAF} foi realizada utilizando a técnica de Difração de Raios-X (DRX). O equipamento utilizado foi um Bruker D2 Phaser 2ª geração, com as seguintes configurações: radiação $CuK\alpha$, tensão de 40kV, intensidade de corrente de 40mA, faixa de varredura 2θ de 10-100°, tamanho de passo de 0,05° e velocidade igual a 1°/min.

A avaliação química qualitativa desse material foi realizada pela técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), usando equipamento PANalytical Epsilon3x. A análise FRX foi realizada em amostras com tamanho de partícula inferior a 0,075 mm, obtidas por cominuição usando um moinho de bolas planetárias Retsch PM 100 de alta eficiência.

Para a análise morfológica das partículas dos F_{EAF} , foram feitas imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) usando um microscópio Leo-1430VP do Núcleo de Microscopia e Microanálise da Universidade Federal de Viçosa. As amostras foram fixadas com a fita adesiva de carbono sobre o porta amostra de alumínio e recobertas com ouro (material condutor).

2.2.5 Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação, realizados conforme a norma técnica ABNT NBR 7182/2016d, foram executados em corpos de prova de solo no estado natural e de mistura solo- F_{EAF} , estes últimos com teores de escória de aciaria elétrica moída na ordem de 2,5%, 5,0%, 10,0% e 15,0%, em relação à massa seca das amostras de solos. Essas porcentagens foram baseadas na norma ABNT NBR 12253/2012b, na literatura técnica (ABCP, 2004) e na especificação de serviço DNIT ES142/2018a, por se tratarem de teores de aglomerante normalmente utilizados em ensaios de dosagem de misturas solo-cimento, para a definição do teor de projeto ótimo.

As moldagens dos corpos de prova foram realizadas utilizando-se a energia de compactação do Proctor Normal, de acordo com a norma técnica NBR 12023 (ABNT, 2012c) para mistura solo-cimento. A partir dos dados obtidos, foi possível, construir a curva de compactação para os solos naturais e suas respectivas misturas com F_{EAF} .

2.2.6 Ensaios de compressão simples

Os ensaios de compressão simples (RCS), executados segundo as especificações da NBR 12025 (ABNT, 2012d), foram realizados em 5 corpos de prova para as amostras de solos no estado natural e para as misturas solo- F_{EAF} , com teores de F_{EAF} correspondentes a 2,5%, 5,0%, 10% e 15% da massa seca das amostras de solos analisadas.

Os referidos corpos de prova foram moldados na energia de compactação do Proctor Normal, em suas respectivas umidades ótimas (W_{ot}), e em seguida, condicionados em filme plástico para a realização da cura em câmara úmida por um período de 7 dias.

Para as misturas solo- F_{EAF} com teor de 15 % de F_{EAF} registrou-se o maior valor de resistência a compressão simples aos 7 dias (RCS_7) de cura em câmara úmida, por isso foram realizadas avaliações adicionais para 28 e 56 dias de cura.

2.2.7 Ensaios CBR

Corpos de prova de solo natural e de misturas com percentagem de 15 % de F_{EAF} , a qual apresentou os melhores resultados para a RCS_7 , foram compactados nos respectivos pontos de ótimo da energia Proctor Normal, para a realização dos ensaios CBR (California Bearing Ratio), segundo a norma DNIT ME 172/2016. Para cada tratamento e tempo de cura foram moldados 3 corpos de prova, o tempo de cura em câmara úmida foi de 7, 28 e 56 dias.

2.2.8 Ensaios de módulo de resiliência

Os ensaios de módulos de resiliência (MR) em corpos de prova de solos no estado natural e de misturas de solo- F_{EAF} , com teor de F_{EAF} de 15%, a qual apresentou os melhores resultados para o ensaio de RCS_7 , foram realizados segundo a norma técnica DNIT ME 134/ 2018b como um

tempo de cura de 28 dias, em câmara úmida, sendo utilizado três repetições para cada tratamento. Os corpos de prova foram moldados por processo dinâmico em 10 camadas iguais, considerando os seguintes limites fixados na preparação das amostras: altura, $20 \pm 0,2$ cm; diâmetro, $10 \pm 0,2$ cm; umidade, teor ótimo $\pm 0,5\%$; grau de compactação, $100 \pm 0,5\%$.

O modelo matemático utilizado nesta pesquisa para a representação do MR foi o modelo composto ou combinado, proposto por Pezo et al. (1992), que relaciona o MR com a tensão confinante (σ_3) e a tensão desvio (σ_d), sendo os coeficientes k_1 , k_2 e k_3 constantes experimentais (Equação 1).

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad \text{Equação 2.1}$$

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Caracterização química, mineralógica e morfológica dos F_{EAF}

Os principais constituintes químicos dos F_{EAF} observados na análise de FRX (em óxidos) foram: CaO, Fe_2O_3 e SiO_2 . Teores consideráveis de MgO, MnO e Al_2O_3 também foram observados na análise FRX, conforme apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Caracterização química dos F_{EAF} .

Óxidos	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	MnO	TiO_2	SO_3	Cl	Cr_2O_3
(%)	40,62	11,76	3,66	32,17	2,76	6,25	0,58	0,21	0,04	1,57

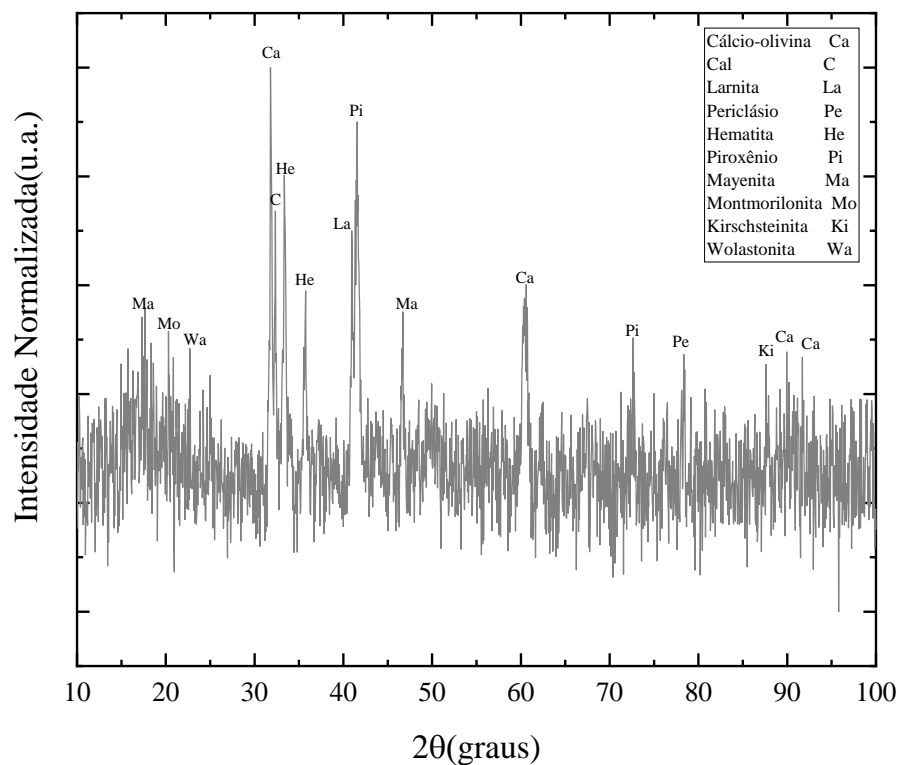
Os óxidos e seus respectivos valores estão em concordância com a literatura (YILDIRIM; PREZZI, 2011; SILVA et al., 2016; SANTAMARIA et al., 2018; SILVA et al., 2019;) e são compatíveis com materiais que apresentaram características cimentantes.

Com estes teores, seu índice de hidraulicidade $[(SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3)/(CaO+MgO)]$ é igual a 1,10, classificando os F_{EAF} como aglomerante de alta hidraulicidade, segundo Borges Marinho

et al. (2017). Sua propriedade aglomerante é relatada em vários trabalhos (ADEGOLOYE et al., 2015; DINIZ et al., 2017; JIANG et al., 2018; SILVA et al., 2019), a presença de ferro (Fe) metálico e óxidos MgO e CaO demandam atenção e provocam restrições no seu uso como material cimentante, uma vez que esses elementos são instáveis na presença de água, sendo os produtos da oxidação do Fe e da hidratação dos óxidos expansivos (YILDIRIM; PREZZI, 2011; PITANGA et al., 2016; BORGES MARINHO et al., 2017; DINIZ et al., 2017).

O difratograma com a análise mineralógica dos F_{EAF} pela técnica de DRX é apresentado na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Difratograma dos F_{EAF} estudados.



Os resultados obtidos desta análise assemelham-se com os resultados obtidos por Yildirim e Prezzi (2011), Adegoloye et al. (2015), Gökalp et al. (2018) e Silva et al. (2019), os quais envolveram estudos utilizando escória de aciaria do tipo EAF.

O difratograma observado na Figura 2.2 segundo Yildirim e Prezzi (2011) é representativo de amostras de escórias de aciaria ferrosas, devido ao seu rápido resfriamento no processo de fundição, e, por este motivo, há presença de fases cristalinas dispersas na matriz amorfa, tornando difícil a identificação dessas fases presentes no material.

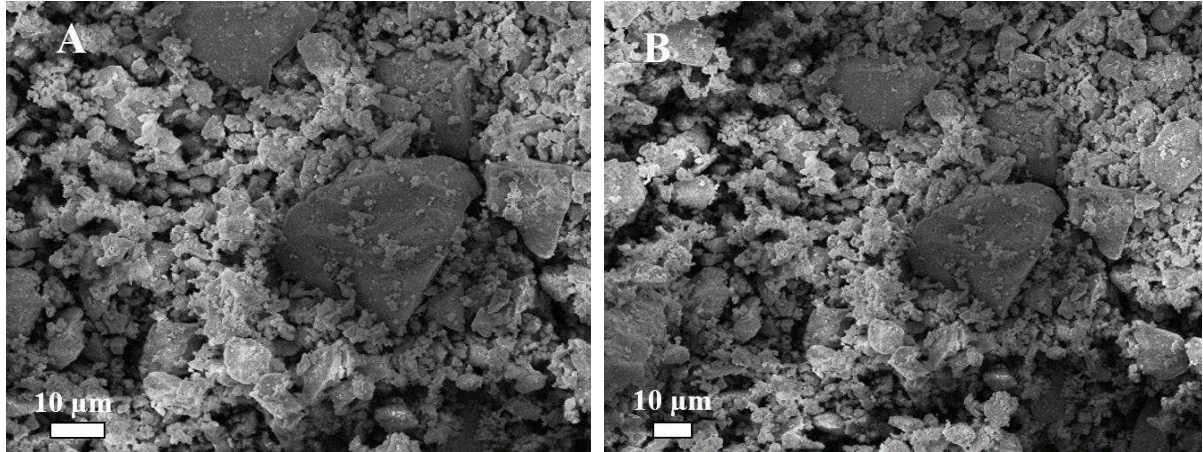
Nos F_{EAF} , foi possível identificar compostos capazes de se hidratar, como a belita (Iarnita), que corresponde à forma β - C_2S , e possui alta reatividade e capacidade de hidratação (KACIMI et al., 2009). No entanto, a presença desse composto apresenta como desvantagem um ganho de resistência consideravelmente lento, principalmente se comparado com a alita (C_3S) (LONDONO-ZULUAGA et al., 2017).

Outro silicato identificado foi a wollastonita (Ca_3SiO_5), que pode ser sintetizada usando fontes locais de minerais contendo cálcio e sílica a uma temperatura de 900 a 1200 °C. Devido às propriedades hidráulicas e ao desenvolvimento espontâneo de resistência mecânica ao entrar em contato com a água, juntamente com a sua disponibilidade, existe um interesse crescente em utilizar essa fase tanto em ligantes alternativos como no sistema convencional de produção de cimento *Portland* (KHAN; ASHRAF, 2019).

A mayenita ($Ca_{12}Al_{14}O_{33}$), único aluminato de cálcio encontrado, é comumente identificada em cimentos cálcio-aluminosos (BENSTED, 2002), mas pode ocorrer como um constituinte adicional em cimentos com elevado conteúdo de alumina, sendo considerada a fase mais reativa dentre todos os tipos de aluminatos de cálcio (POLLMANN, 2002).

A análise morfológica das partículas dos F_{EAF} foi realizada com auxílio das micrografias obtidas utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura, com aumentos de 2000 (A) e 1000 (B) vezes em um mesmo ponto de foco, conforme apresentado na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra de F_{EAF} analisadas.

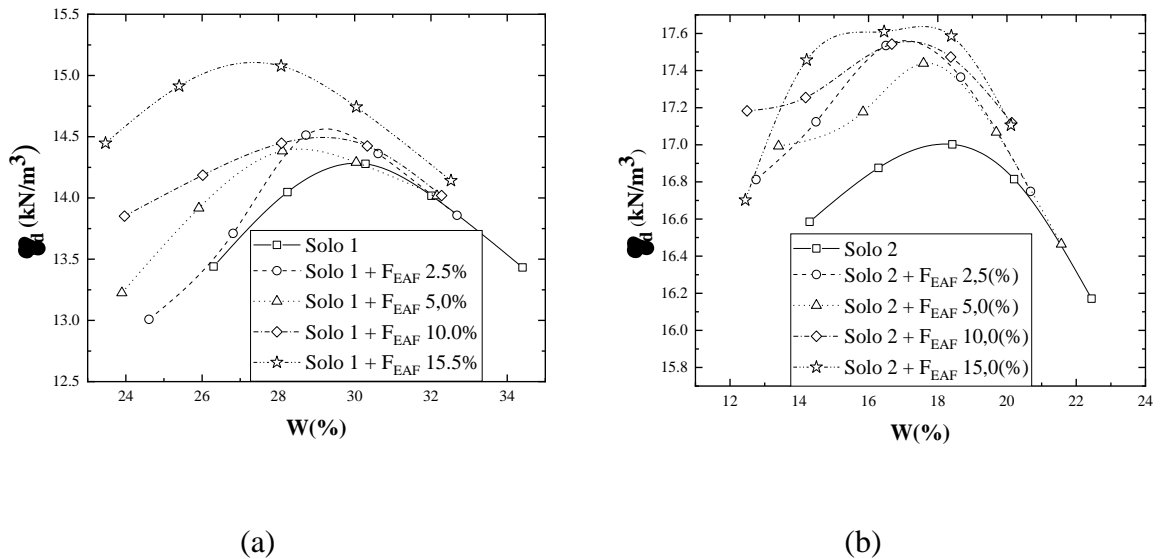


Através das micrografias dos F_{EAF} , observou-se a presença de partículas com textura rugosa superficial, morfologia levemente irregular que, segundo Carvalho et al. (2017), foi gerada devido à baixa friabilidade do material cristalino. Estas características morfológicas podem melhorar a trabalhabilidade em pastas de cimento. Além disso, quando em mistura com solo, essa morfologia pode aumentar o grau de interação entre as partículas presentes no sistema solo- F_{EAF} , proporcionando uma melhoria nas propriedades mecânicas (SAN-JOSÉ et al., 2014; BORGES MARINHO et al., 2017; CARVALHO et al., 2017; SILVA et al., 2019;)

2.3.2 Ensaio de compactação

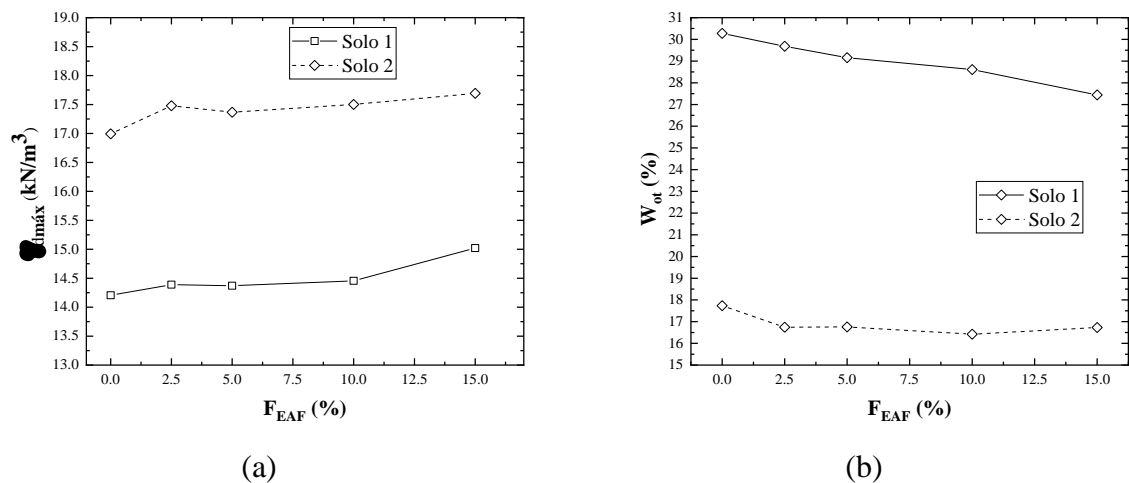
A Figura 2.4 apresenta os resultados dos ensaios de compactação na energia do Proctor Normal para as amostras de solos no estado natural e das misturas solo- F_{EAF} .

Figura 2.4 - Curvas de compactação - Proctor Normal dos solos 1 (a) e 2 (b) em seus estados naturais e em misturas com F_{EAF} .



A Figura 2.5 apresenta as respectivas relações do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima (W_{ot}) com o aumento do teor de F_{EAF} nas misturas com as amostras de solos analisadas.

Figura 2.5 - Variação do peso específico aparente seco máximo (a) e da umidade ótima (b) em função do teor de F_{EAF} nas misturas com as amostras dos solos 1 e 2.



Através dos resultados dos ensaios de compactação das misturas solo-F_{EAF}, foi possível observar que, tanto para a amostra do solo 1 quanto para a do solo 2, houve aumento do valor do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e redução no valor da umidade ótica de compactação. Esse aumento do peso específico aparente, possivelmente, foi provocado pela substituição parcial do solo por um material de elevada massa específica dos grãos sólidos (F_{EAF}).

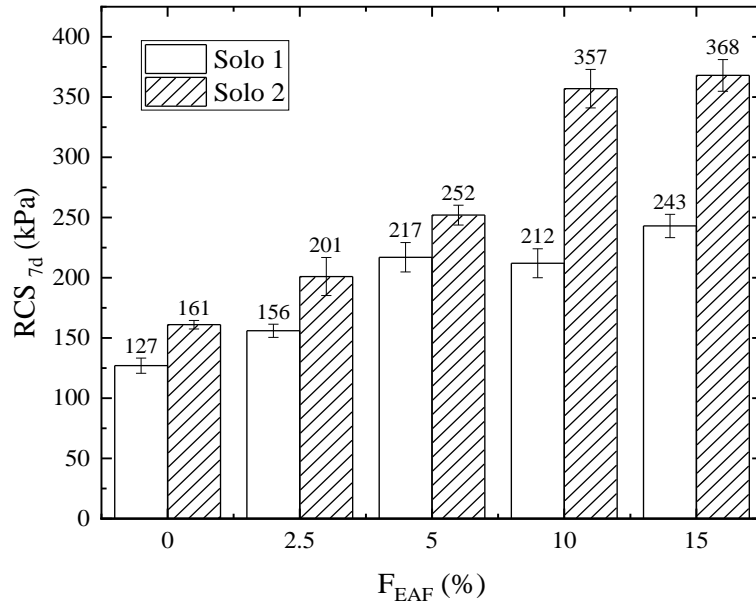
A partir dos resultados da análise granulométrica dos F_{EAF}, foi possível verificar que 20% em massa apresentaram diâmetros menores que 10 μm (Figura 2.1), porção de finos que segundo Diniz et al. (2017) aumenta o efeito *filler*, atuando fisicamente como um material de preenchimento, resultando em diminuição do volume de vazios entre os grãos e, por conseguinte, em incremento da densidade seca máxima do material estabilizado.

A ocorrência de reações de troca catiônica entre os F_{EAF}, ricos em (CaO), e a fração fina dos solos proporciona, em curto prazo, a aglutinação entre as partículas, originando aglomerações de maior tamanho e, conseqüentemente, reduzindo a demanda hídrica necessária para se atingir, sob a ação do esforço de compactação, um arranjo de partículas correspondente à densidade seca máxima (MOSA; TAHER; AL-JABERI, 2017; ONYELOWE, 2019), justificando a redução da umidade ótica de compactação com a presença dos F_{EAF}, e com o incremento do teor desse material na mistura com as amostras de solos.

2.3.3 Ensaios de compressão simples

Os resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão simples (RCS) de corpos de prova moldados para as duas amostras de solos analisadas e as misturas solo-F_{EAF} são apresentados na Figura 2.6. O gráfico da Figura 2.6 apresenta os valores de RCS para 7 dias de cura selada (RCS_{7d}) dos corpos de prova em câmara úmida.

Figura 2.6 - Valores de resistência à compressão simples das amostras de solo em função dos teores de F_{EAF} .



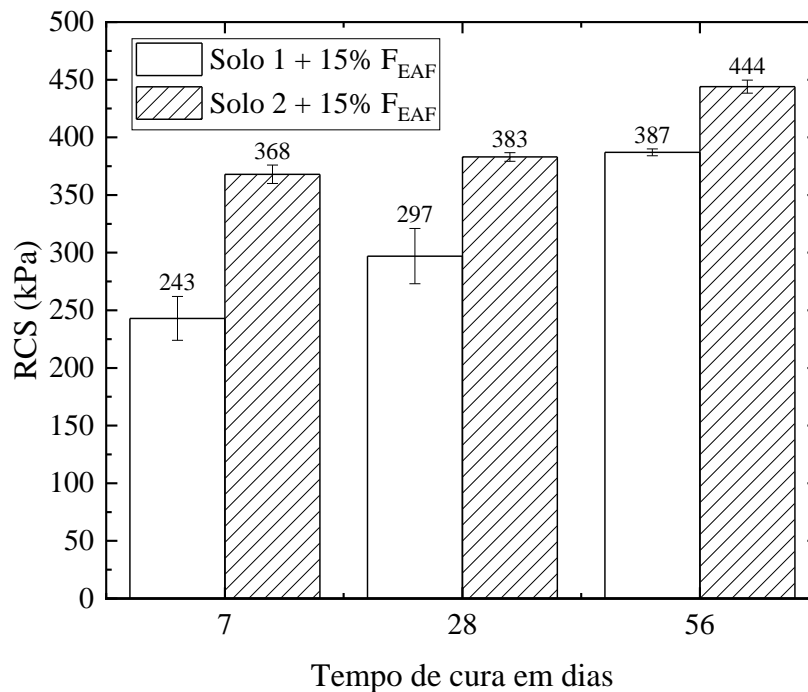
Para as amostras de solos analisadas, foi observado um aumento no valor da RCS_{7d} devido à incorporação do F_{EAF} (Figura 2.6), seguindo o aumento $\gamma_{dm\acute{a}x}$ observado e discutido anteriormente nos ensaios de compactação. O aumento no $\gamma_{dm\acute{a}x}$ promovido pelo acréscimo de F_{EAF} promove uma maior interação entre as partículas do solo, aumentando assim o seu intertravamento e conseqüentemente a resistência a RCS_{7d} .

Para os corpos de prova com teor máximo de F_{EAF} nas misturas com as amostras de solos, o maior valor da RCS_{7d} foi verificado para o solo 2 (solo arenoso), que apresentou aumento de 128% na RCS_{7d} (Figura 2.6). Este aumento no valor da resistência a compressão observado na amostra de solo arenoso foi 40% maior que o aumento de resistência verificado na amostra de solo argiloso. Em solos granulares, a hidratação dos silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio dos F_{EAF} tende a criar pontes de contato intergranulares, levando a maiores valores de resistência devido ao aumento da coesão do material (TRINDADE et al., 2011). A hidratação desses compostos foi relativamente rápida e causou um ganho imediato na resistência dos solos. Em solos finos, a presença dos F_{EAF} induz um processo de aglomeração, recobrando as partículas e unindo os grãos soltos, semelhante ao observado por Abu-Farsakh et al. (2015) na

estabilização de um solo usando cimento.

Para a percentagem de F_{EAF} (15%) na qual foram obtidos os maiores valores de RCS_{7d} , são apresentados, na Figura 2.7, os respectivos valores de RCS para os tempos de cura selada de 7, 28 e 56 dias.

Figura 2.7 - Variação da resistência à compressão simples (RCS) aos 7, 28 e 56 dias de cura selada, para um teor de 15% de F_{EAF} misturados com as amostras de solos.

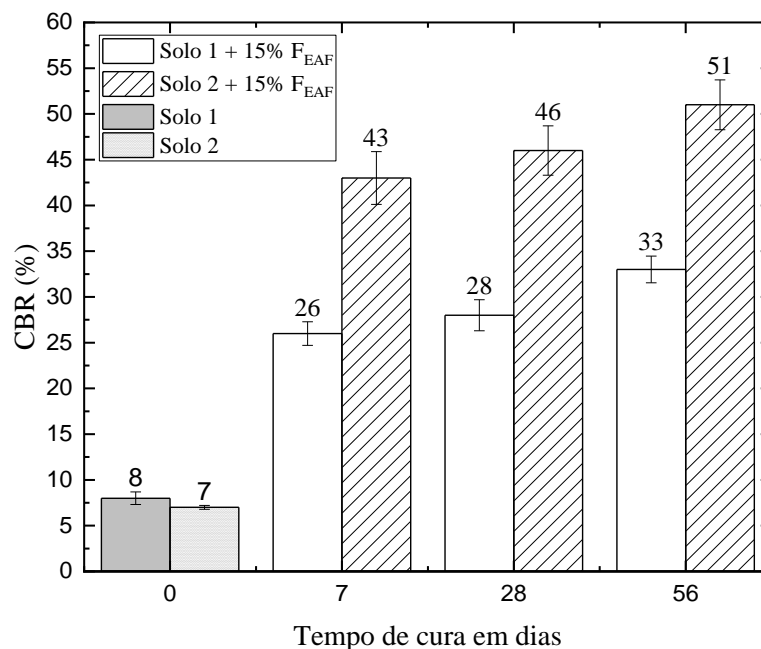


Foi observado um aumento de RCS ao longo do tempo de cura, o desenvolvimento dessa resistência é promovido por processos de cimentação graças à presença de C_2S (belita), que apresenta reações de hidratação lentas e tardias (LONDONO-ZULUAGA et al., 2017), e pelas reações pozolânicas entre os argilominerais presentes nos solos e a cal identificada nos F_{EAF} (ABU-FARSAKH; DHAKAL; CHEN, 2015). Para a amostra de Solo 1, com o maior teor de argila, as reações pozolânicas foram mais efetivas devidas à elevada superfície específica e ao elevado teor de argilominerais. Sendo assim, essas reações podem explicar os maiores ganhos de resistência ao longo do tempo observados nesse solo (Figura 2.7)

2.3.4 Ensaios CBR

Os resultados dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou índice CBR para as duas amostras de solos analisadas e misturas destes materiais com 15% de F_{EAF} são apresentados na Figura 2.8. Para as misturas solo- F_{EAF} , os gráficos da Figura 2.8 apresentam os valores de índice CBR para 7, 28 e 56 dias de cura selada em câmara úmida.

Figura 2.8 - Valores de índice CBR para 0, 7, 28 e 56 dias de cura selada para as amostras de solos e suas misturas com 15% de F_{EAF}



A análise dos resultados dos ensaios de índice CBR para as amostras de solos analisadas mostra um aumento em seu valor, trazendo seus resultados, em ambos os solos estudados, para a faixa de uso como sub-base ($CBR \geq 20\%$) em estruturas de pavimentos flexíveis (DNIT, 2006). Outro fato observado é a tendência de incremento do CBR para tempos de cura superiores aos 7 dias, em ambas as amostras de solos analisadas, com as misturas de solo 2- F_{EAF} apresentando os maiores valores de CBR, tendência similar à observada nos ensaios de RCS.

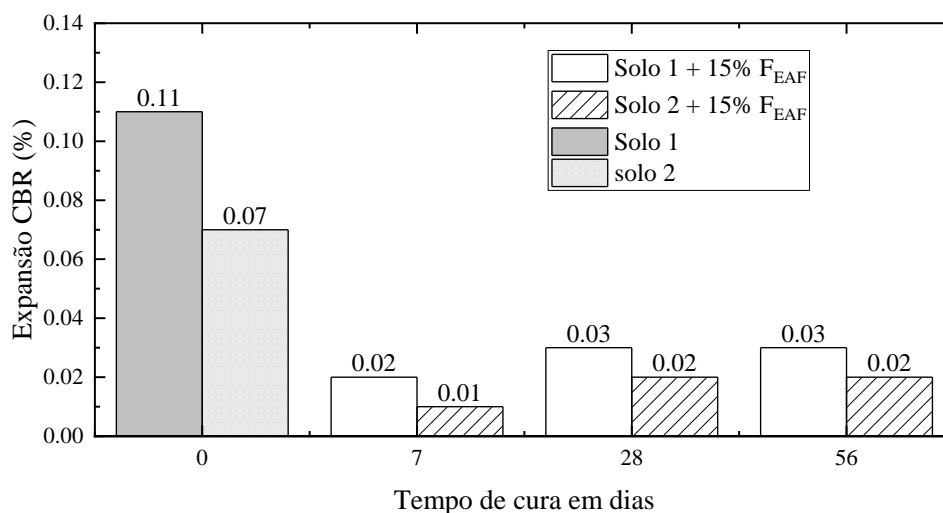
Em solos granulares, representados pelo solo 2, os efeitos de cimentação proporcionam pontes

de contato entre as faces dos agregados, promovendo um aumento relativo na coesão e consequentemente um aumento na resistência mecânica (TRINDADE et al., 2011). Em solos finos (solo 1) o efeito de ancoragem entre os agregados não é tão efetivo, uma vez que as argilas apresentam tamanhos de partícula menores (SUGANYA; SIVAPULLAIAH, 2016; ROCHA; REZENDE, 2017;), explicando a diferença na RCS entre os solos.

As reações químicas influenciam diretamente no aumento dos valores dos índices CBR para as misturas solos- F_{EAF} , pois geraram ligações entre as partículas do solo devido à cimentação, induzindo a floculação e contribuindo para o preenchimento de vazios das misturas estudadas. As prováveis características químicas dos F_{EAF} que segundo Manso et al. (2013) podem ser responsáveis pelo aumento dos valores do índice CBR das misturas solo- F_{EAF} , são: (i) presença de cal e periclásio livre, ambos com capacidade de reação com argilas, o que potencializa sua capacidade de floculação e compactação; (ii) hidratação de aluminatos de cálcio e silicatos de cálcio; (iii) ocorrência de reações pozolânicas; e (iv) surgimento de carbonatos de cálcio e magnésio.

Outro parâmetro avaliado nesta pesquisa, também derivado do ensaio de índice CBR, foi a Expansão CBR (Figura 2.9), determinada para as misturas das amostras de solos analisadas com adição de F_{EAF} no teor de 15%, em relação a massa seca dos solos, para os períodos de cura selada de 7, 28 e 56 dias, em câmara úmida.

Figura 2.9 - Valores de parâmetros de Expansão CBR de corpos de prova para 0, 7, 28 e 56 dias de cura selada para as amostras de solos e suas misturas com 15% de F_{EAF} .



O acréscimo dos F_{EAF} nas amostras de solos analisadas implicou em uma redução de sua expansibilidade, particularmente associada às consequências de sua ação cimentante devida à hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio. Esses produtos hidratados segundo Rocha e Rezende (2017) adquirem a forma de agulhas curtas e feixes que ligam as partículas dos solos umas às outras, os quais passam a apresentar uma matriz mais rígida e, por conseguinte, menos suscetível a variações volumétricas deletérias.

Outros fenômenos que contribuíram para a redução da expansão das amostras de solos analisadas foram as reações de troca catiônica desencadeadas pelos cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} presentes nos F_{EAF} . Esses cátions, em solução com os argilominerais presentes na fração argila das amostras de solos analisadas, promoveram uma redução na dupla camada difusa, permitindo, assim, a aglutinação das partículas de argila. Portanto, as amostras de solos analisadas tiveram suas propriedades coesivas reduzidas e ampliaram o seu potencial de comportamento geotécnico típico de material granular, havendo nestes uma redução de sua plasticidade e do seu grau de expansividade (AL-MUKHTAR; KHATTAB; ALCOVER, 2012; MANSO et al., 2013).

2.3.5 Ensaios de módulo de resiliência

Na Tabela 2.3, são apresentados os parâmetros do modelo composto adotado para a estimativa do módulo de resiliência a partir da tensão desvio (σ_d) e da tensão confinante (σ_3) para os corpos

de prova das amostras de solos analisadas e suas respectivas misturas com 15% de F_{EAF} , compactados na umidade ótima da energia Proctor Normal, aos 28 dias de cura selada em câmara úmida. Os valores de R^2 foram maiores que 0,90, indicando que o modelo composto utilizado nessa pesquisa foi capaz de explicar o comportamento resiliente dos solos e misturas com alta correlação entre os dados.

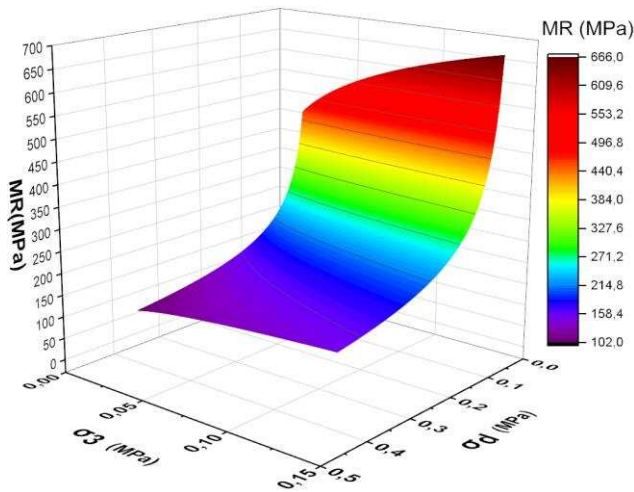
Tabela 2.3 - Valores de parâmetros para o modelo composto (σ_d - σ_3), com os respectivos valores de R^2 para as amostras de solos e suas misturas com 15% de F_{EAF} .

Material	k_1	k_2	k_3	Modelo	R^2	MR (MPa)
Solo 1	138,948	0,190	-0,497	$MR=138,948\sigma_3^{0,190}\sigma_d^{-0,497}$	0,905	247 *
Solo 1+15% F_{EAF}	188,802	0,204	-0,494	$MR=188,802\sigma_3^{0,204}\sigma_d^{-0,494}$	0,901	320 *
Solo 2	138,437	0,262	-0,584	$MR=138,437\sigma_3^{0,262}\sigma_d^{-0,584}$	0,944	242 *
Solo 2+15% F_{EAF}	322,728	0,278	-0,399	$MR=322,728\sigma_3^{0,278}\sigma_d^{-0,399}$	0,928	352 *

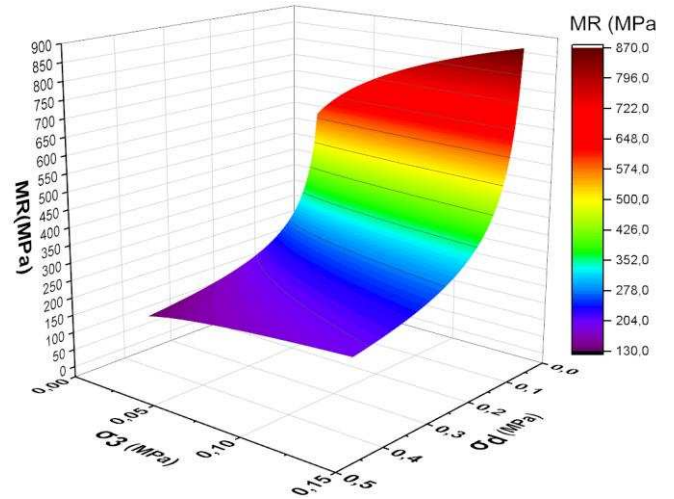
*Valores de MR para os pares médios de tensões $\sigma_3= 0,05$ MPa e $\sigma_d = 0,100$ MPa

Na Figura 2.10 são apresentados os gráficos que expressam a influência das tensões σ_d e σ_3 sobre os valores de módulo de resiliência (MR) de corpos de prova moldados com as amostras de solos analisadas no estado natural e quando misturadas com 15% F_{EAF} , em relação a massa seca de solo, com tempo de cura selada de 28 dias em câmara úmida.

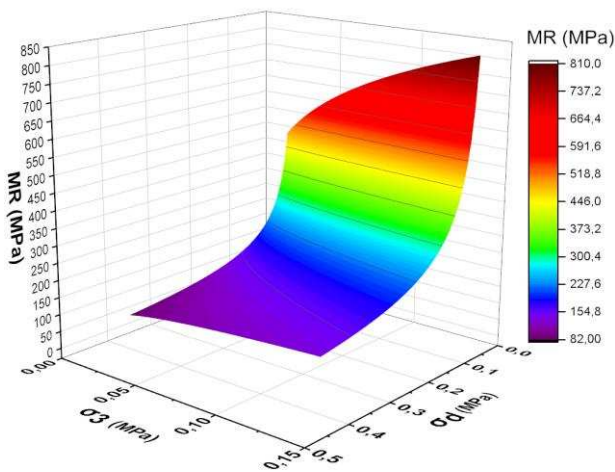
Figura 2.10 - Resultados dos ensaios de MR para o modelo composto (σ_d - σ_3): (a) solo 1; (b) solo 1+15% F_{EAF} ; (c) solo 2; (d) solo 2+15% F_{EAF} .



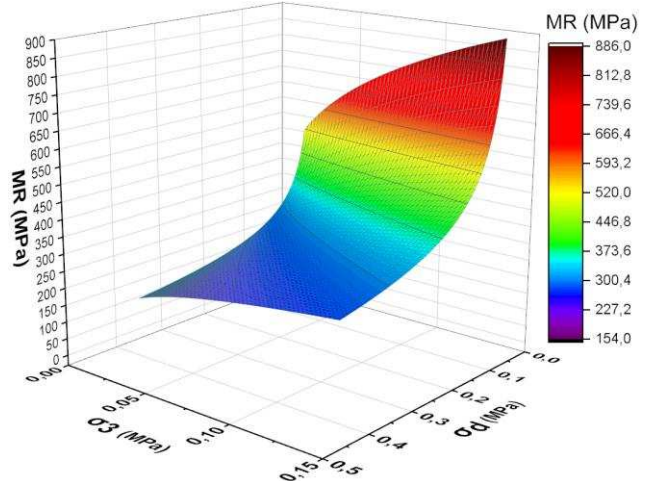
(a)



(b)



(c)



(d)

Para efeito comparativo, adotou-se um par de tensões médias ($\sigma_3 = 0,05$ MPa e $\sigma_d = 0,100$ MPa), obtidos da norma técnica DNIT ME 134/ 2018b, compatível segundo Santos et al. (2019) com um possível estado de tensões atuante em subleitos rodoviários.

Os resultados obtidos revelaram um aumento no valor do módulo de resiliência em função da adição de F_{EAF} , para as duas amostras de solos analisadas, para o período de cura selada de 28 dias, em câmara úmida (Tabela 2.3). Além disso, o comportamento elástico não linear das amostras de solos e misturas solo- F_{EAF} analisadas está evidenciado nas superfícies irregulares

da Figura 2.10. Essas superfícies foram geradas em função dos valores de módulo de resiliência a partir dos 18 estados de tensões estabelecidos segundo a norma técnica DNIT ME 134/2018b.

Observando-se os modelos matemáticos ajustados, verificou-se que os valores dos coeficientes k_2 e k_1 (correspondentes a σ_3) são positivos, indicando que o MR aumentou com o acréscimo de σ_3 . Esse efeito não ocorreu com o incremento da tensão desvio (σ_d) devido aos valores negativos de k_3 .

O aumento dos valores de MR para as misturas solo- F_{EAF} compactadas foi provocado por mudanças na estrutura das amostras de solos estabilizadas, observadas através do aumento dos valores dos coeficientes k_1 e k_2 , promovido pela presença dos F_{EAF} . As alterações estruturais nesses solos foram proporcionadas por diferentes processos, como: (i) a hidratação dos aluminatos e silicatos de cálcio, criando uma série de ligações entre as partículas dos solos; (ii) as trocas catiônicas, promovendo a floculação e a aglutinação das partículas de argila, potencializando a maior compactação das misturas; e (iii) as reações pozolânicas, contribuindo para a formação de compostos cimentantes em idades mais avançadas (BEHNOOD, 2018; MOSA; TAHER; AL-JABERI, 2017).

O efeito da estabilização física realizada pelos F_{EAF} verificado nos ensaios de compactação também provoca alterações na estrutura dos solos e consequente aumento do MR. Esse efeito é promovido pela finura e morfologia dos F_{EAF} produzidos, responsáveis, respectivamente, pelo preenchimento dos vazios presentes na estrutura do solo e pelo intertravamento das partículas, efeitos que acontecem logo após a compactação das misturas.

É importante salientar que, na prática da engenharia de pavimentação, o incremento do MR, o qual corresponde à rigidez elástica do material sob condição de solicitação dinâmica, implica em maior capacidade do material estrutural em recuperar elasticamente as deformações geradas pelo carregamento repetido imposto pelas sucessivas passagens das rodas dos veículos sobre o pavimento por ele constituído. Portanto, o aumento do MR dos solos promovido pelo estabilizante pode constituir um inequívoco diferencial técnico ao proporcionar uma melhor resposta estrutural ao material estabilizado inserido no pavimento.

2.4 Conclusões

Diante dos resultados obtidos e discutidos nesta pesquisa, pode-se concluir que:

- Os óxidos encontrados nos F_{EAF} que são responsáveis pela estabilização química dos solos foram CaO , SiO_2 e Al_2O_3 , os quais são importantes para a formação das reações pozolânicas e cimentantes das misturas. Além disso, foram encontradas fases mineralógicas com capacidade cimentante, sendo elas a larnita ($\beta-C_2S$), a mayenita ($Ca_{12}Al_{14}O_{33}$) e a wollastonita (Ca_3SiO_5);
- As caracterizações físico-químicas realizadas sobre os F_{EAF} indicaram elevado grau de amorfismo, alto índice de hidraulicidade e uma elevada superfície específica, características que favoreceram o desenvolvimento de reações cimentícias;
- As misturas das amostras de solos analisadas com os F_{EAF} aumentaram o peso específico aparente seco máximo e reduziram a umidade ótima. Essas mudanças foram provocadas, possivelmente, pelo acréscimo de material de elevada massa específica em substituição parcial as amostras de solos analisadas, pelo efeito *filler* ou de preenchimento das misturas solo- F_{EAF} compactadas e pelas reações de troca catiônica promovidas pelos F_{EAF} ;
- Para os ensaios de RCS e índice CBR, constatou-se que as misturas solo- F_{EAF} apresentaram melhorias para a resistência mecânica, provocadas, principalmente, pela hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio;
- As misturas solo- F_{EAF} apresentaram uma redução na Expansão CBR, proporcionada possivelmente pela cimentação e flocculação dos argilominerais, que tornaram as misturas mais rígidas e menos coesivas, respectivamente;
- O ganho de resistência mecânica com o aumento do tempo de cura selada foi observado tanto para o ensaio de compressão simples quanto para o ensaio de índice CBR para as duas amostras de solos analisadas, quando estabilizadas com F_{EAF} . Esse ganho de resistência mecânica pode ser atribuído, principalmente, às reações pozolânicas e de hidratação da belita ($\beta-C_2S$);

- O modelo composto (σ_d , σ_3) foi capaz de representar o comportamento do MR das amostras de solos analisadas e misturas solo- F_{EAF} com alto coeficiente de determinação (R^2); e
- O comportamento resiliente das duas amostras de solos analisadas em misturas com os F_{EAF} foi melhorado. Essa melhoria foi proporcionada, possivelmente, pelas mudanças estruturais, verificadas indiretamente através do aumento dos coeficientes k_1 e k_2 , devido as reações de hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio, juntamente com as reações pozolânicas.

Referências Bibliográficas

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO. M 145-91**: Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes Washington, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **ABCP Estudo Técnico 35**: Dosagem das Misturas de Solo-Cimento - Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio. São Paulo, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (n° 200). Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12253**: Solo-cimento- Dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **ABNT NBR 12023**: Solo-cimento - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **ABNT NBR 12025**: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2012d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**. Solo – Análise granulométrica. NBR 7181, Rio de Janeiro, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**. Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016c, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**. Ensaio de Compactação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502**. Rochas e solos - Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

A1BU-FARSAKH, M.; DHAKAL, S.; CHEN, Q. Laboratory characterization of cementitiously treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading. **Soils and Foundations**, v. 55, n. 3, p. 504–516, jun. 2015.

ADEGOLOYE, G. et al. Concretes made of EAF slag and AOD slag aggregates from stainless steel process: Mechanical properties and durability. **Construction and Building Materials**, v. 76, p. 313–321, fev. 2015.

AKINWUMI, I. Soil Modification by the Application of Steel Slag. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, v. 58, n. 4, p. 371–377, 2014.

AL-KHAFAJI, R. et al. **Soft soil stabilisation using ground granulated blast furnace slag**. The 3rd BUiD Doctoral Research Conference. **Anais...**2017

AL-MUKHTAR, M.; KHATTAB, S.; ALCOVER, J.-F. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. **Engineering Geology**, v. 139–140, p. 17–27, jun. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2487-17**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Pensilvânia ASTM International, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D854-14**: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. Pensilvânia ASTM International, 2014.

BARNES, P. AND BENSTED, J. **Structure and Performance of Cements**. 2nd. ed. London: Taylor & Francis Group, 2019.

BEHNOOD, A. Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. **Transportation Geotechnics**, v. 17, p. 14–32, dez. 2018.

BENSTED, J. Calcium aluminate cements. In: **Structure and Performance of Cements**. 2nd. ed. London: Spon Press, 2002. p. 114–139.

BORGES MARINHO, A. L. et al. Ladle Furnace Slag as Binder for Cement-Based Composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 11, p. 04017207, nov. 2017.

CARVALHO, S. Z. et al. The recycling effect of BOF slag in the portland cement properties. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 216–220, dez. 2017.

CORRÊA-SILVA, M. et al. Geomechanical behaviour of a soft soil stabilised with alkali-activated blast-furnace slags. **Journal of Cleaner Production**, v. 267, p. 122017, set. 2020.

DA SILVA, M. J. et al. Feasibility Study of Steel Slag Aggregates in Precast Concrete Pavers. **ACI Materials Journal**, v. 113, n. 4, ago. 2016.

DINIZ, D. H. et al. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical Soil Stabilizer for Use in Roads. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 9, p. 04017118, set. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER. **DNER PRO 003/94**: Coleta de amostras deformadas de solos. Rio de Janeiro, 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER. **DNER-ME 093/94**: Solos-determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER ME 172/2016**: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER ES 142/2018**: Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2018a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 134/2018 - ME**: Pavimentação - Solos -Determinação do Módulo de Resiliência. Rio de Janeiro, 2018b.

DOS SANTOS, T. A. et al. Avaliação da resistência e da deformação resiliente de quatro solos de subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul. **TRANSPORTES**, v. 27, n. 1, p. 48–64, 30 abr. 2019.

FASIHNIKOUTALAB, M. H. et al. Sustainable soil stabilisation with ground granulated blast-furnace slag activated by olivine and sodium hydroxide. **Acta Geotechnica**, 30 nov. 2019.

GÖKALP, İ. et al. Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications. **Transportation Geotechnics**, v. 14, p. 61–69,

mar. 2018.

HASAN, U. et al. Experimental Evaluation of Construction Waste and Ground Granulated Blast Furnace Slag as Alternative Soil Stabilisers. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 34, n. 6, p. 1707–1722, 21 dez. 2016.

JIANG, Y. et al. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 187–197, set. 2018.

KACIMI, L. et al. Synthesis of belite cement clinker of high hydraulic reactivity. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 7, p. 559–565, jul. 2009.

KAMBOLE, C. et al. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 618–631, set. 2017.

KHAN, R. I.; ASHRAF, W. Effects of ground wollastonite on cement hydration kinetics and strength development. **Construction and Building Materials**, v. 218, p. 150–161, set. 2019.

LONDONO-ZULUAGA, D. et al. Clinkering and hydration of belite-alite-ye'elinite cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p. 333–341, jul. 2017.

MANSO, J. M. et al. The use of ladle furnace slag in soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 126–134, mar. 2013.

MOSA, A. M.; TAHER, A. H.; AL-JABERI, L. A. Improvement of poor subgrade soils using cement kiln dust. **Case Studies in Construction Materials**, v. 7, p. 138–143, dez. 2017.

MOZEJKO, C. A.; FRANCISCA, F. M. Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 117901, abr. 2020.

NG, C. W. W. et al. Resilient modulus of unsaturated subgrade soil: experimental and theoretical investigations. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 50, n. 2, p. 223–232, fev. 2013.

NIDZAM, R. M.; KINUTHIA, J. M. Sustainable soil stabilisation with blastfurnace slag – a review. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, v. 163, n. 3, p. 157–165, ago. 2010.

NOGAMI, J. et al. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. 2nd. ed. São Paulo: [s.n.].

ONYELOWE, K. C. Review on the role of solid waste materials in soft soils reengineering. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 2, n. 1, p. 46–51, abr. 2019.

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

PAN, S.-Y. et al. Integrated and innovative steel slag utilization for iron reclamation, green material production and CO₂ fixation via accelerated carbonation. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 617–631, nov. 2016.

PASETTO, M.; BALDO, N. Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3458–3468, ago. 2011.

PATIL, S.; BACHHAV, S.; KSHIRSAGAR, D. Use of steel slag in construction of flexible pavement. **International Journal of Engineering and Innovative Technology**, v. 5, n. 11, p. 24–27, 2016.

PEZO, R. et al. **Development of a reliable resiliente modulus test for subgrade and non-granular subbase materials for use in routine pavement design**. Austin, Texas: [s.n.].

PITANGA, H. N. et al. MCT CLASSIFICATION FOR COMPACTED MIXTURES OF SOIL-STEEL SLAG-FLY ASH FOR APPLICATION IN FOREST ROADS. **Revista Árvore**, v. 40, n. 5, p. 911–919, out. 2016.

ROCHA, M. T.; REZENDE, L. R. DE. Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 4, 2 out. 2017.

ROHDE, L.; NUNEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P. Escória de aciaria elétrica: uma alternativa aos materiais granulares tradicionais. **TRANSPORTES**, v. 11, n. 1, 2 jul. 2003.

ROHDE, L.; PERES NÚÑEZ, W.; AUGUSTO PEREIRA CERATTI, J. Electric Arc Furnace Steel Slag: Base Material for Low-Volume Roads. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1819, n. 1, p. 201–207, jan. 2003.

SAN-JOSÉ, J. T. et al. The performance of steel-making slag concretes in the hardened state. **Materials & Design**, v. 60, p. 612–619, ago. 2014.

SANTAMARIA, A. et al. Dimensional stability of electric arc furnace slag in civil engineering applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 205, p. 599–609, dez. 2018.

SANTAMARÍA, A. et al. The study of properties and behavior of self compacting concrete containing Electric Arc Furnace Slag (EAFS) as aggregate. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 11, n. 1, p. 231–243, mar. 2020.

SILVA, T. O. DA et al. Use of steel waste for the application in urban paving. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 41, n. 1, p. 37596, 12 mar. 2019.

SKAF, M. et al. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 120, p. 176–185, maio 2017.

SOFILIC, T.; MLADENVIČ, A.; SOFILIČ, U. DEFINING OF EAF STEEL SLAG APPLICATION POSSIBILITIES IN ASPHALT MIXTURE PRODUCTION. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 19, n. 2, p. 148–157, 28 jun. 2011.

VELTEN, R. Z. et al. Caracterização mecânica de misturas solo-escória de alto-forno granulada

moída para aplicações em estradas florestais. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 235–240, abr. 2006.

WANG, G.; WANG, Y.; GAO, Z. Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria. **Journal of Hazardous Materials**, v. 184, n. 1–3, p. 555–560, dez. 2010.

YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag. **Advances in Civil Engineering**, v. 2011, p. 1–13, 2011b.

ZUMRAWI, M.; AWAD, M. Estimation of Subgrade Resilient Modulus from Soil Index Properties. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 11, n. 9, p. 816–822, 2017.

3. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS COM FINOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA REDUTORA *LADLE FURNACE* PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO E OBRAS GEOTÉCNICAS

Resumo: Este estudo investigou o uso de finos de escória de aciaria de forno panela redutora - FL (F_{LF}) para a estabilização de solos tropicais. Abordou uma análise comparativa dos efeitos do F_{LF} nas propriedades de engenharia de duas amostras de solos tropicais. Também apresentou uma avaliação da influência de diferentes períodos de cura selada das misturas solo- F_{LF} sobre o desempenho mecânico. O programa experimental da pesquisa foi composto por: (i) ensaios de caracterização geotécnica dos solos, (ii) ensaios de caracterização química, física, mineralógica e morfológica dos F_{LF} usados na pesquisa; (iii) ensaios de compactação (Energia do Proctor normal) das amostras de solo no estado natural e de misturas solo- F_{LF} (iv) ensaios de compressão simples, resistência a tração por compressão diametral, índice CBR, módulo de resiliência e análise de fadiga. Os finos F_{LF} estabilizaram com sucesso os solos estudados, levando a um aumento nos valores de CBR de 8% para 44% para a amostra de solo 1 e de 7% para 140 % para a amostra de solo 2, juntamente com uma diminuição na expansibilidade, melhora no comportamento resiliente e aumento da vida fadiga para um revestimento asfáltico inserido sobre uma base e um reforço de subleito composto pelos referidos solos estabilizados com os F_{LF} . As melhorias mecânicas podem ser explicadas pelas reações de cimentação, troca catiônica e pela ação de *filler* dos F_{LF} em misturas com as amostras de solos analisadas. As reações pozolânicas entre a cal e as partículas de argila dos solos explicam o aumento da resistência para maiores períodos de cura. Sendo assim, os resultados obtidos neste estudo apontam para a viabilidade do uso de F_{LF} para melhoria das propriedades de engenharia dos solos tropicais estudados.

Palavras-Chave: Obras geotécnicas. Escória de aciaria elétrica LF. Estabilização química. Solos tropicais. Aproveitamento de resíduos siderúrgicos.

Abstract: This study investigated the use of fines of ladle furnace reducing steel slag (F_{LF}) for sustainable stabilization of tropical soils. It dealt with a comparative analysis of the effects of F_{LF} on engineering properties of two samples of tropical soils. It also presented a systematic analysis of the influence of different sealed curing periods of specimens of soil- F_{LF} mixtures on the mechanical performance of soil samples in natural state. The experimental program of this research covered: (i) geotechnical characterization tests; (ii) chemical, physical, mineralogical and morphological characterization of the F_{LF} used in this research; (iii) compaction tests (standard Proctor energy) of soil samples in natural state and soil- F_{LF} mixtures; (iv) unconfined uniaxial compression, tensile strength by diametral compression, CBR index, resilient modulus tests, and fatigue analysis. The F_{LF} successfully stabilized the studied soils, leading to increases in the CBR index of soil 1 samples from 8% to 44%, and soil 2 samples from 7% to 140%, together with reductions in swelling, improvements in the resilient behavior, and increases in the fatigue life for an asphalt layer applied on a base and a subgrade reinforcement composed of the soils stabilized with F_{LF} . The mechanical improvements can be attributed to cementitious reactions, cation exchange reactions, and the filler effect of F_{LF} incorporated in the studied soil samples. Then, the results obtained in this study demonstrate the high potential use of F_{LF} for the improvement of the engineering properties of the studied tropical soils.

Keywords: Geotechnical applications. LF steel slag. Chemical stabilization. Tropical soils. Recycling of steelmaking wastes.

3.1 Introdução

Escórias de aço são subprodutos da indústria siderúrgica que podem ser classificados em escórias de forno de oxigênio básico (BOF), forno de arco elétrico (EAF) e forno panela (LF) (JIANG et al., 2018). Dois tipos de escória são produzidos no processo de produção de aço em fornos de arco elétrico: a *Electric Arc Furnace* (EAF) e a *Ladle Furnace* (LF). Este último é conhecido como escória básica ou escória branca.

A escória LF é produzida no processo de metalurgia secundária ou de refino, para gerar aços de alta qualidade. O aço é descarregado em um forno de concha, onde é desoxidado, dessulfurado e ligado sob a proteção da escória LF (SÁEZ-DE-GUINOA VILAPLANA et al., 2015). A cal e a dolomita são adicionadas no processo para fixar elementos indesejáveis e proteger o revestimento refratário do forno. A separação densimétrica é usada para remover a escória do aço no final do processo (SHATNAWI et al., 2008; MAHIEUX; AUBERT; ESCADEILLAS, 2009; BELHADJ; DILIBERTO; LECOMTE, 2012; KAMBOLE et al., 2017).

Devido ao baixo reaproveitamento para o ramo siderúrgico, as escórias de aciaria elétrica de uma maneira geral, são descartadas em aterros que ocupam vastas áreas que tendem a ser degradadas pela necessidade de deposição desses resíduos. A demanda por descartes de pilhas de escórias de aciaria elétrica proporciona um processo contínuo de degradação ambiental, fazendo-se necessários, então, estudos de práticas sustentáveis capazes de planejar um destino adequado às escórias. Entre as destinações mais frequentes, podem-se citar: aplicação em lastro de ferrovias, utilização como agregados de base e sub-base de rodovias e agregados de sistemas de drenagem (SAN-JOSÉ et al., 2014; ADEGOLOYE et al., 2015; SILVA et al., 2016; GÖKALP et al., 2018)

Além da utilização como agregado, a escória de aciaria pode ser explorada por sua reatividade hidráulica que depende de sua composição química, grau de mineralização e tamanho de partículas. Segundo Montenegro et al. (2013), essa reatividade foi considerada fraca para uso

em material cimentício na produção de cimento e concreto. Por outro lado, as melhorias associadas às adições de escória de aciaria podem ser suficientes para aplicações de baixas resistências, como o aprimoramento de solos naturais para construção de rodovias e aterros em obras geotécnicas.

Além dos estabilizantes de solos convencionais cal e cimento, existem métodos de estabilização que usam subprodutos, como a escória de aciaria elétrica, escórias de alto forno, cinzas, poeira de fornos de cimento, detritos cerâmicos, lama de cal, entre outros (PEETHAMPARAN; OLEK, 2008; YOON et al., 2009; MÄKELÄ et al., 2012; KAMEI; AHMED; SHIBI, 2013; MANSO et al., 2013; BEHNOOD, 2018). A estabilização do solo por meio desses materiais é sustentável, economiza recursos naturais e contribui para a redução da emissão de CO₂, já que a produção industrial global de cal virgem e do cimento *Portland* produz 8% dessas emissões (MONTENEGRO-COOPER et al., 2019).

O uso das escórias de aciaria elétrica ainda é limitado, principalmente devido aos efeitos negativos de seus compostos expansivos (PAN et al., 2016; BRAND et al., 2020). Sendo assim, a escórias de alto-forno têm sido o foco principal da maioria dos estudos experimentais em pavimentação e engenharia geotécnica (VELTEN et al., 2006; NIDZAM; KINUTHIA, 2010; HASAN et al., 2016; AL-KHAFAJI et al., 2017; FASIHNIKOUTALAB et al., 2019; CORRÊA-SILVA et al., 2020).

Mozejko e Francisca (2020) afirmaram que o desenvolvimento do conhecimento sobre o comportamento de solos estabilizados com escórias de aciaria elétrica é recente e escasso. Além disso, as avaliações experimentais do uso de escórias de aciaria elétrica para a estabilização de solos visando a construção de pavimentos têm se concentrado principalmente em escórias do tipo *Basic oxygen furnace* (BOF) (POH; GHATAORA; GHAZIREH, 2006; KAMBOLE et al., 2017; CIKMIT et al., 2019). Conseqüentemente, são necessárias investigações mais aprofundadas do desempenho mecânico de solos estabilizados com escórias de aciaria elétrica do tipo forno de panela ou LF.

Pensando nisso, essa pesquisa avaliou a aplicação de finos de escória LF como único agente estabilizante de solos tropicais. Outras adições não foram consideradas, a fim de maximizar o aproveitamento dos resíduos de escória de aciaria LF, e diferenciar a presente pesquisa de

trabalhos anteriores (MANSO et al., 2013; MONTENEGRO et al., 2013; NG et al., 2013; ORTEGA-LÓPEZ et al., 2014; ZUMRAWI; AWAD, 2017; MONTENEGRO-COOPER et al., 2019; BRAND et al., 2020).

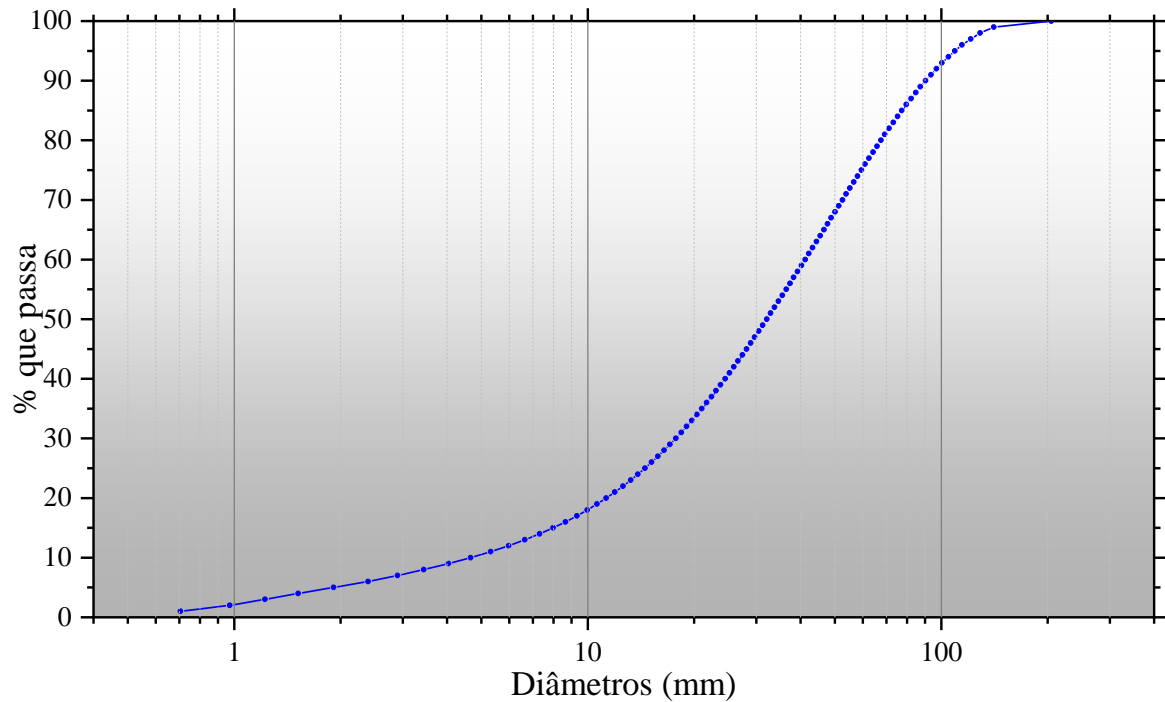
A fim de complementar o conhecimento atual na área, este estudo foi desenvolvido para apresentar uma análise comparativa da influência de diferentes teores de finos de escória de aciaria LF em amostras de solos tropicais arenoso e argiloso. Uma das principais contribuições deste estudo, trata-se de uma abordagem sistemática da interferência de diferentes períodos de cura selada no comportamento mecânico de corpos de prova de misturas solo-finos de escória de aciaria LF, considerando as propriedades físicas e químicas do coproduto siderúrgico. Outra importante contribuição foi a investigação do comportamento resiliente de solos tropicais estabilizados com finos de escória de aciaria LF, aliada a uma análise de vida de fadiga de um revestimento asfáltico inserido sobre uma estrutura de solo tropicais estabilizada pelos finos de escória de aciaria elétrica.

3.2 Materiais e métodos

3.2.1 Beneficiamento e caracterização física da amostra de escória de aciaria LF

Nesse estudo a escória de aciaria LF no seu estado bruto foi moída em aparelho de Abrasão *Los Angeles* até que todo o material passasse na peneira n° 100 (0,15 mm de abertura de malha). O objetivo desse procedimento foi diminuir a granulometria e aumentar a superfície específica do material siderúrgico, também denominado finos de escória de aciaria elétrica LF (F_{LF}). A Figura 3.1 apresenta o resultado da análise granulométrica dos F_{LF} , em que é observado que, aproximadamente, 99% de suas partículas encontram-se dentro do intervalo correspondente a materiais finos ($\leq 150 \mu\text{m}$), em uma distribuição contínua segundo a (ABNT NBR 7211/2009).

Figura 3.1-Distribuição granulométrica dos F_{LF} obtida por difração a laser.



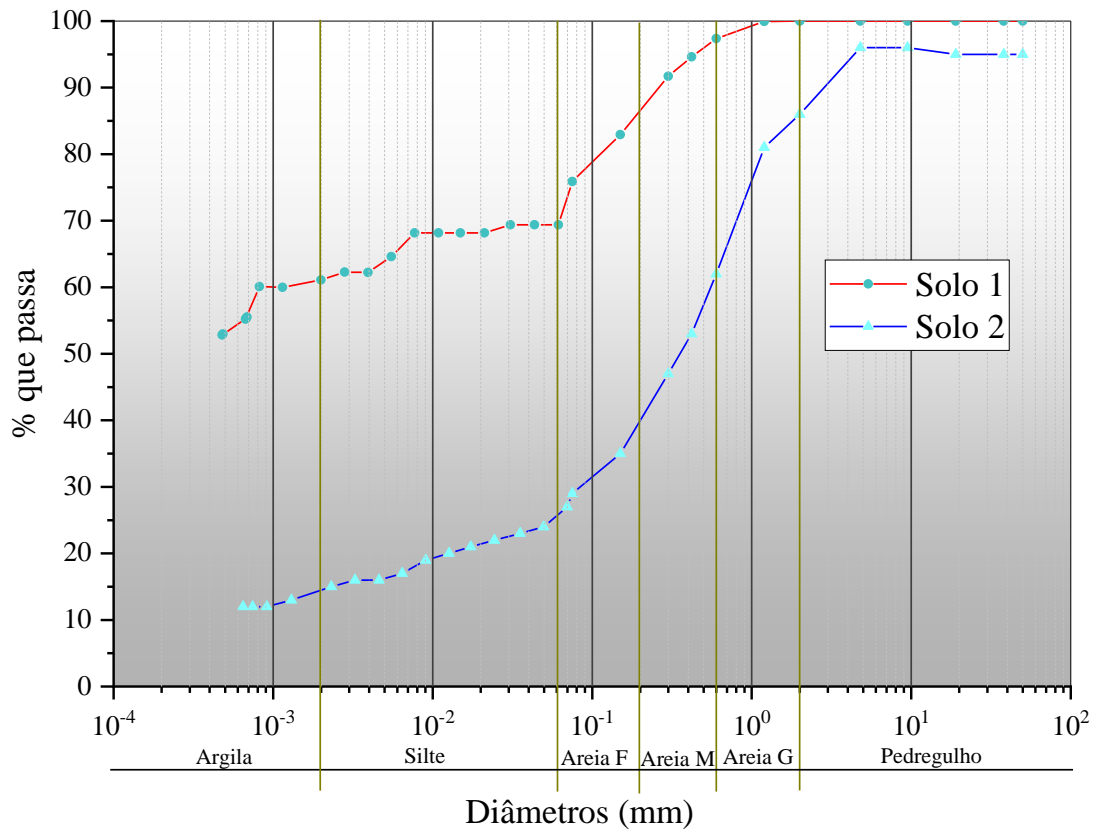
A massa específica dos grãos, área específica e finura dos F_{LF} foram 2,89 g/cm³; 0,26 m²/g e 13,60%, respectivamente. Esses valores segundo Diniz et al. (2017) são semelhantes aos de referência para o cimento *Portland*, com exceção do resultado de finura, que ultrapassou o limite de 12% estabelecido pela norma técnica (ABNT NBR 11579/2012a) devido ao processo de moagem e peneiramento que utilizou a peneira n° 100 (# 0,15 mm).

3.2.2 Amostra de Solos

As amostras de solos foram provenientes de rochas gnáissicas, coletadas em jazidas de empréstimo situadas no Município de Viçosa, Estado de Minas Gerais, Brasil, sendo uma com característica predominantemente argilosa, solo 1, sendo classificada como argila de alta compressibilidade (CH) pelo sistema *Unified Soil Classification System* (USCS), de acordo com a norma técnica ASTM D 2487/2017, ao subgrupo A-7-5(19) pelo sistema *Transportation*

Research Board (TRB), de acordo com a norma técnica AASHTO M 145-91/2017 e ao grupo LA' pela metodologia MCT (*Miniatura Compactado Tropical*), de acordo com (NOGAMI et al., 2009). A outra amostra com predomínio de areia, solo 2, foi classificada como uma areia argilosa (SC) pelo USCS, ao subgrupo A-2-7(0) pelo sistema TRB e ao grupo NA' pela metodologia MCT. As análises granulométricas e as caracterizações físicas das amostras de solos analisadas são apresentadas na Figura 3.2 e Tabela 3.1.

Figura 3.2 - Análise granulométrica das amostras de solo analisadas.



3.2.3 Ensaios de caracterizações química, mineralógica e morfológica dos F_{LF}

A avaliação química qualitativa foi realizada pela técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), usando equipamento PANalytical Epsilon3x. A análise de FRX foi realizada em amostras com tamanho de partícula inferior a 0,075 mm, obtidas por cominuição usando um moinho de bolas planetárias Retsch PM 100 de alta eficiência.

A caracterização mineralógica foi realizada utilizando a técnica de Difração de Raios-X (DRX). O equipamento utilizado foi um Bruker D2 Phaser 2ª geração, com as seguintes configurações: radiação $\text{CuK}\alpha$, tensão de 40kV, intensidade de corrente de 40mA, faixa de varredura 2θ de 10-100°, tamanho de passo de 0,01° e velocidade igual a 1°/min.

Para a análise morfológica das partículas de F_{LF} , foram feitas imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) usando um microscópio Leo-1430VP do Núcleo de Microscopia e Microanálise da Universidade Federal de Viçosa. As amostras foram fixas com a fita adesiva de carbono sobre suporte de amostra de alumínio e recobertas com ouro (material condutor).

3.2.4 Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação em amostras de solos no estado natural e de misturas solo- F_{LF} , em teores de 2,5%, 5,0%, 10,0% e 15,0% em relação a massa seca de solo, foram realizados conforme a norma técnica ABNT NBR 7182/2016. Essas porcentagens foram baseadas na norma técnica ABNT NBR 12253/2012, na literatura técnica ABCP (2004) e na especificação de serviço DNIT ES 142/2018a, por se tratarem de teores de aglomerante normalmente utilizados em ensaios de dosagem de misturas solo-cimento, para a definição do teor de projeto ótimo.

Todas as amostras submetidas a esses ensaios foram compactadas utilizando-se a energia de compactação do Proctor Normal, de acordo com recomendações da norma técnica ABNT NBR 12023/2012c para solo-cimento. A partir dos dados obtidos, foi possível construir as curvas de compactação para as amostras de solos no estado natural e de suas respectivas misturas com F_{LF} .

3.2.5 Ensaio de compressão simples

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS), executados conforme as especificações da norma técnica ABNT NBR 12025/2012d, em que foram moldados 5 corpos de prova para as amostras de solos no estado natural e cada mistura solo- F_{LF} , com teores de F_{LF} correspondentes a 2,5%, 5,0%, 10% e 15%, em relação a massa seca das amostras de solos analisadas.

Os referidos corpos de prova foram moldados na energia de compactação do Proctor Normal, em suas respectivas umidades ótimas (W_{ot}), e em seguida, condicionados em filme plástico para a realização da cura em câmara úmida por um período de 7 dias.

Para as misturas solo- F_{EAF} com teor de 15 % de F_{LF} registrou-se o maior valor de resistência a compressão simples aos 7 dias (RCS_7) de cura em câmara úmida, por isso foram realizadas avaliações adicionais para 28 e 56 dias de cura.

3.2.6 Ensaio de tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram executados segundo a norma técnica ME 181 (DNER, 1994a), em que foram moldados 5 corpos de prova para as amostras de solos no estado natural e para as misturas solo- F_{LF} , com teor de F_{LF} correspondente a 15% da massa seca das amostras de solos analisadas.

Os procedimentos em relação à moldagem, acondicionamento e repetições de corpos de prova foram os mesmos realizados para o ensaio de resistência à compressão simples, sendo avaliadas as resistências à tração por compressão diametral após 7 dias de cura selada em câmara úmida ($RTCD_7$).

3.2.7 Ensaio CBR

Corpos de prova de solo natural e de misturas com percentagem de 15 % de F_{LF} , a qual apresentou os melhores resultados para a RCS_7 , foram compactados nos respectivos pontos de ótimo da energia Proctor Normal, para a realização dos ensaios CBR (California Bearing Ratio),

segundo a norma DNIT ME 172/2016. Para cada tratamento e tempo de cura foram moldados 3 corpos de prova, o tempo de cura em câmara úmida foi de 7, 28 e 56 dias.

3.2.8 Ensaios de módulo de resiliência

Os ensaios de módulos de resiliência (MR) das amostras de solos e das misturas solo-F_{LF} foram realizados de acordo com a norma técnica DNIT ME 134/2018b. Os corpos de prova das amostras de solos no estado natural foram ensaiados logo após sua moldagem, das misturas de solo-F_{LF}, com teor de 15% de F_{LF}, a qual apresentou os melhores resultados para o ensaio de RCS₇, foi obedecido o tempo de cura selada em câmara úmida de 28 dias.

O modelo matemático utilizado nesta pesquisa para a representação do MR foi o modelo composto ou combinado, proposto por Pezo et al. (1992), que relaciona o MR com a tensão confinante (σ_3) e a tensão desvio (σ_d), sendo os coeficientes k_1 , k_2 e k_3 constantes experimentais (Equação 1).

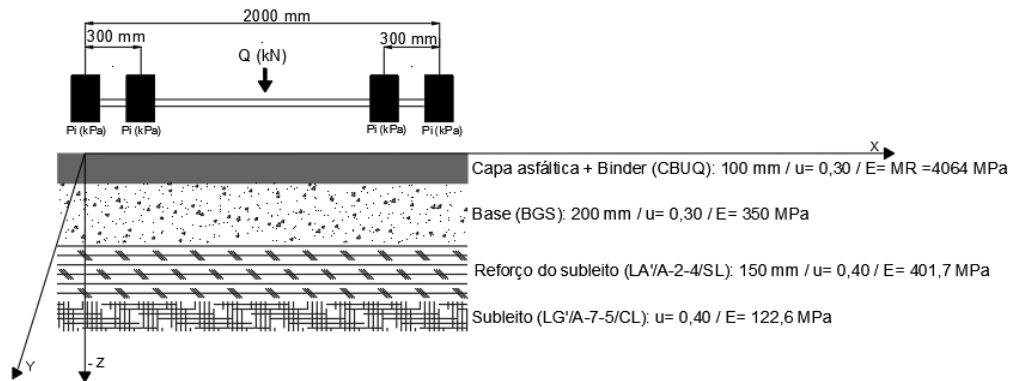
$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad \text{Equação 3.1}$$

3.2.9 Análise de fadiga

Para fins de análise de fadiga de um revestimento asfáltico, foram adotados dois pavimentos:

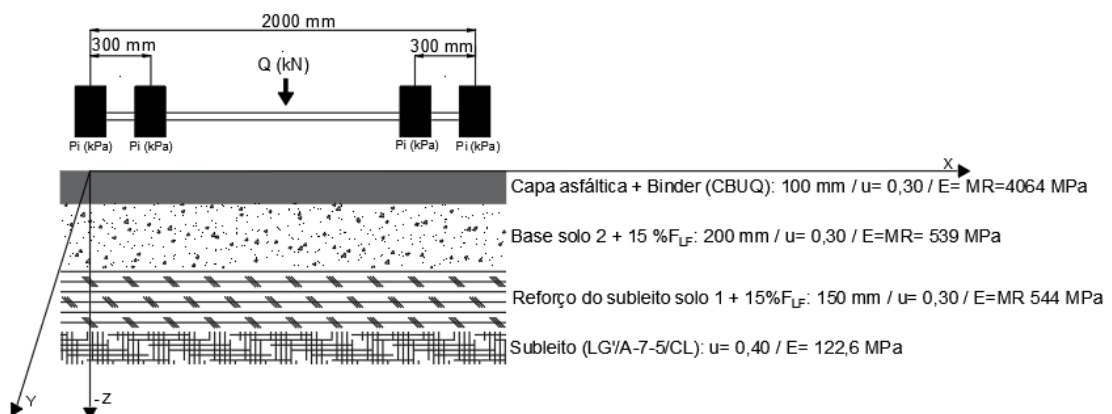
Pav1- Constituído de revestimento asfáltico composto (capa asfáltica e *binder*, simultaneamente), camadas de base (granular) e reforço de subleito, assentado sobre o subleito conforme as características adotadas no estudo de Rezende et al. (2020) (Figura 3.3);

Figura 3.3 - Esquema e parâmetros da seção transversal da estrutura do pavimento asfáltico adotado como referência (Pav1) (REZENDE et al., 2020).



Pav2- Constituído dos mesmos materiais do Pav1, substituindo apenas a base granular pela mistura de solo 2+15% F_{LF} , e o reforço de subleito pelo solo 1+15% F_{LF} , com seus respectivos valores de MR (Figura 3.4).

Figura 3.4 - Esquema e parâmetros da seção transversal da estrutura do pavimento estabilizado com os F_{LF} (Pav2).



As análises estruturais foram realizadas empregando-se o *Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software (me-PADS)*, um programa computacional desenvolvido pela CSIR Transportek.

Os dados de entrada inseridos no software para a realização das análises estruturais foram os relativos às propriedades das camadas estruturais (espessura, módulo de elasticidade e

coeficiente de *Poisson*), a localização e a magnitude das cargas e as coordenadas dos pontos para a determinação das respostas estruturais do pavimento asfáltico adotado.

A localização ou coordenadas dos pontos para a análise estrutural e determinação da vida de fadiga do revestimento asfáltico está no eixo vertical sob as rodas (abscissas $X=0$ mm; $X=300$ mm) e no eixo vertical de simetria entre as rodas (abscissa $X=150$ mm), em uma profundidade $Z=-100$ mm referente ao bordo inferior do revestimento asfáltico.

Para realizar as análises estruturais do Pav2, considerou-se o Módulo de Resiliência (MR) igual ao Módulo de Elasticidade (E) para os dados de entrada referentes às camadas estruturais. O coeficiente de *Poisson* (ν) utilizado para à camada de base e reforço de subleito foi de 0,30, sendo esse valor recomendado para materiais estabilizados pela norma IP-DE-P00/001 (DER, 2006).

O nível de carregamento considerado nessa pesquisa foi:

- Q_1 igual a 80 kN (8,2 tf): carga correspondente ao eixo padrão de 18.000 lb;
- Q_2 igual a 98 kN (10,0 tf): carga máxima permitida pela legislação brasileira para eixo simples de rodas duplas (ESRD); e
- Q_3 igual a 118 kN (12,0 tf): carga 20% acima da máxima permitida pela referida legislação, sendo 10% o limite de tolerância legal. O emprego dessa carga teve como objetivo evidenciar os eventuais danos nas estradas causados pelo excesso de carga nos eixos dos veículos comerciais.

As pressões de enchimento dos pneus adotadas nas análises estruturais foram:

- P_1 igual a 563 kPa (80 psi): pressão-padrão utilizada na pista experimental da AASHTO e normalizada para a determinação da deflexão, conforme o método de ensaio ME 024 (DNER, 1994b);
- P_2 igual a 633 kPa (90 psi): pressão representativa de um valor médio;
- P_3 igual a 703 kPa (100 psi): pressão representativa de um valor alto.

A equação utilizada para calcular a vida de fadiga do revestimento asfáltico em função da diferença da tensão horizontal de tração e a tensão vertical de compressão ($\Delta\sigma$) conforme Rezende et al. (2020) foi:

$$N_f = 2171,5(1/\Delta\sigma)^{4,2135} \quad \text{Equação 3.2}$$

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Ensaios de caracterização química, mineralógica e morfológica dos F_{LF}

Os principais constituintes químicos dos F_{LF} observados na análise de FRX (em óxidos) são apresentados na Tabela 3.2.

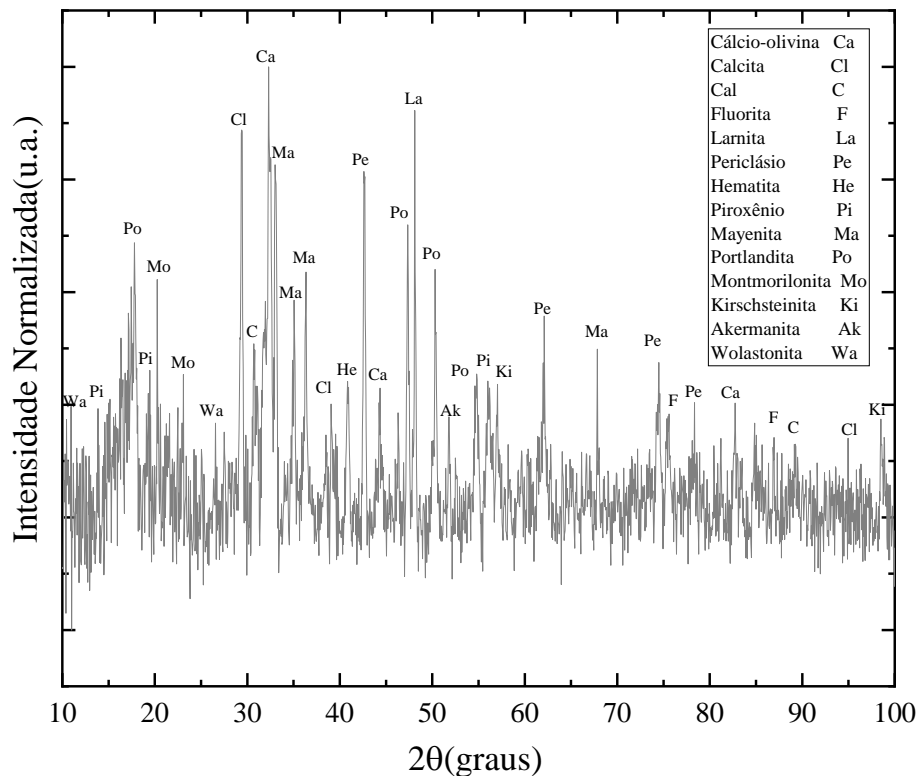
Tabela 3.2 - Caracterização química dos F_{LF} .

Óxidos	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	SO ₃	Cl	Cr ₂ O ₃
(%)	50,24	14,86	16,26	6,84	3,58	1,25	0,87	1,22	0,16	0,27

Pelo resultado do FRX encontrado na Tabela 3.2 foi possível calcular o índice de hidraulicidade da amostra, $[(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)/(\text{CaO} + \text{MgO})]$, que foi 0,70, classificando a amostra de F_{LF} segundo Borges Marinho et al. (2017) como aglomerante fortemente hidráulico. Sua propriedade aglomerante foi relatada em vários trabalhos (MAHIEUX; AUBERT; ESCADEILLAS, 2009; BELHADJ; DILIBERTO; LECOMTE, 2012; PAPAYIANNI; ANASTASIOU, 2012; BORGES MARINHO et al., 2017; CARVALHO et al., 2017; GU et al., 2018). A presença dos óxidos CaO e MgO demandam atenção e provocam restrições no seu uso como material cimentante, uma vez que estes óxidos são instáveis na presença de água e o resultado da sua hidratação geram compostos expansivos. Uma técnica usada para o tratamento desses óxidos expansivos que vem se mostrando eficiente é a exposição do material às intempéries naturais (DINIZ et al., 2017).

Os resultados das fases mineralógicas identificadas pela análise de DRX em F_{LF} são apresentados na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Difratoograma dos F_{LF} analisados na pesquisa.



O resultado do DRX apresentado na Figura 3.5 é típico de escórias de aciaria devido ao seu rápido resfriamento no processo de fundição e, por este motivo, à presença de fases cristalinas dispersas na matriz amorfa, tornando difícil a identificação dessas fases presentes no material, esse comportamento também foi encontrado por (YILDIRIM; PREZZI, 2011). Normalmente, esse tipo de material possui características químicas reativas, o que, no caso deste estudo, favorece a interação com elementos presentes nos solos estudados (PAPAYIANNI; ANASTASIOU, 2012; MONTENEGRO et al., 2013; BORGES MARINHO et al., 2017; CARVALHO et al., 2017).

Nos F_{LF} foi possível identificar compostos capazes de se hidratar como a belita (larnita), que corresponde à forma β -C₂S e possui alta reatividade segundo (KACIMI et al., 2009; JIANG et

al., 2018;). Também foi possível identificar a cálcio-olivina, que corresponde à forma γ -C₂S, esta fase é conhecida como “*dusting*” devido a sua grande mudança de volume e é fracamente hidráulica (POLLMANN, 2002).

A mayenita foi o único aluminato de cálcio observado, sendo comumente encontrada em cimentos cálcio-aluminosos, mas pode ocorrer como um constituinte adicional em cimentos com elevado conteúdo de alumina. Esta fase é a mais reativa entre todas as espécies de aluminatos de cálcio e sua hidratação é rápida, por isso tem um papel chave em cimentos de alta resistência inicial (BENSTED, 2002; BARNES, P; BENSTED, 2019).

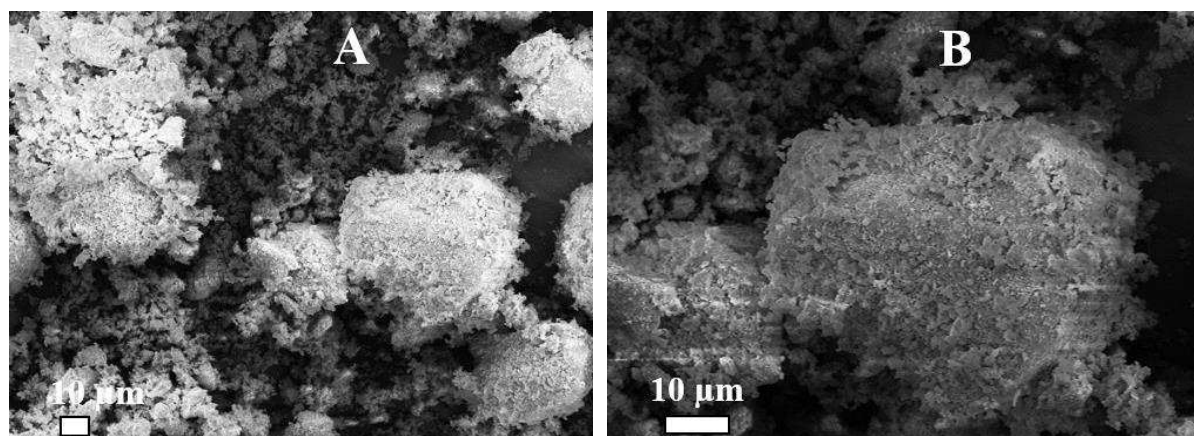
Outra fase mineralógica identificada foi a akermanita (Ca₂MgSi₂O₇), um silicato de cálcio e magnésio que ocorre em algumas escórias de aciaria. Também pode ser observado na escória de aciaria após sua hidratação, sendo considerada, junto com a Gehlenita [Ca₂Mg(Si₂O₇)] as fases mineralógicas ideais para a continuação da atividade hidráulica, garantindo o endurecimento após a cura (PINTO JUNIOR et al., 2011).

Outro silicato identificado foi a wollastonita (Ca₃SiO₅), que possui propriedades hidráulicas e desenvolvimento espontâneo de resistência mecânica ao entrar em contato com água. Por esse motivo, é frequentemente usada como modelo para estudar a hidratação de pastas de cimentos (WANG et al., 2007).

O hidróxido de cálcio Ca(OH)₂ identificado no difratograma acima, chamado de portlandita, constituem 20 a 25% do volume de sólidos na pasta de cimento hidratada, preenchendo o espaço ocupado pela água e pelas partículas do cimento em dissolução. Também foram encontradas a cal e a calcita que, juntamente com a portlandita mais fontes simultâneas de sílica e alumina, promovem as reações pozolânicas responsáveis por conferir ganhos de resistência mecânica nos solos a médio e longo prazos (MANSO et al., 2013).

A análise morfológica das partículas do F_{LF} foi realizada com auxílio das micrografias obtidas utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com aumentos de 2000 e 1000 vezes em um mesmo ponto de foco, conforme apresentado na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos F_{LF} analisados.



(a) 1000x

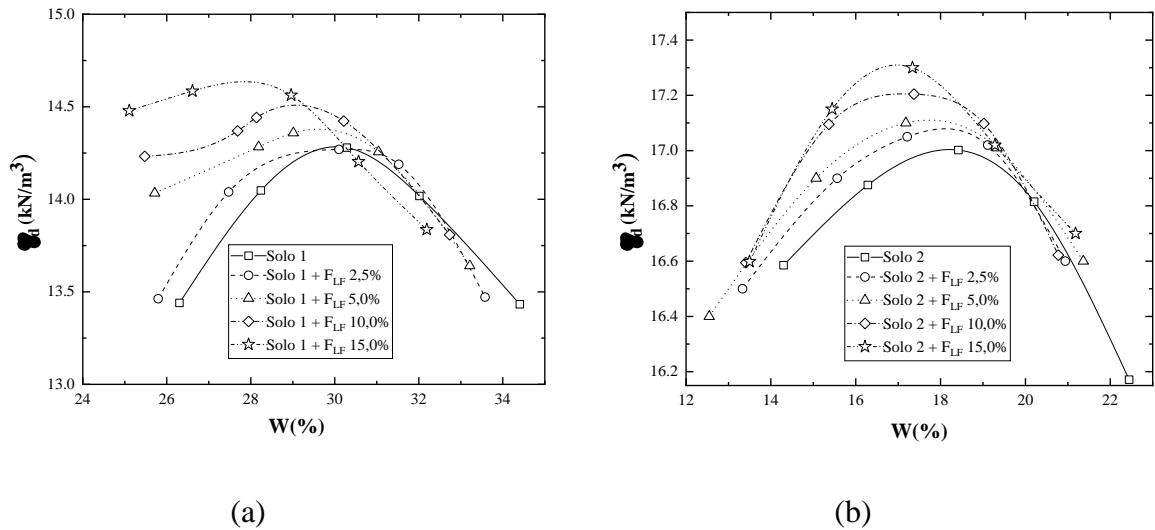
(b) 2000x

Através das imagens de MEV dos F_{LF} foi possível identificar a presença de partículas com textura rugosa de tamanhos variados, sendo possível observar partículas de dimensões muito reduzidas no entorno das partículas maiores com morfologia levemente arredondada. A densidade de empacotamento das misturas envolvendo materiais cimentantes depende das características físicas, como distribuição granulométrica e forma das partículas. Partículas de formato esférico ou mais próximo a isso, como as mostradas na Figura 3.6, são fundamentais para permitir a mobilidade destas no interior da matriz e se alojar nos espaços vazios das misturas compactadas, aumentando, assim, o grau de interação entre as partículas, refletindo em uma melhora nas propriedades mecânicas (DAMINELI, 2013; BORGES MARINHO et al., 2017; CARVALHO et al., 2017).

3.3.2 *Ensaio de compactação*

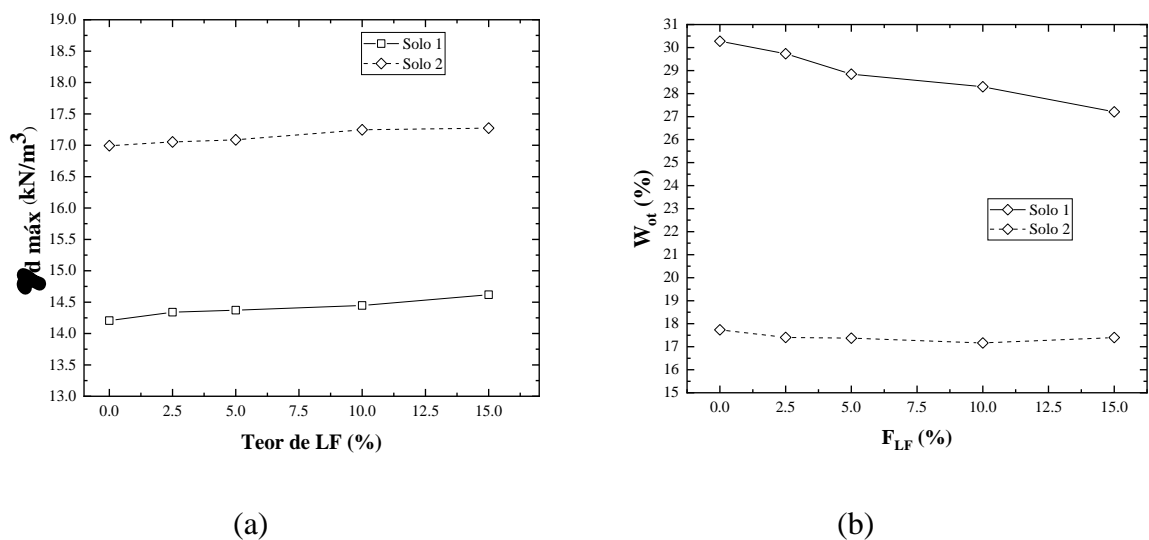
A Figura 3.7 apresenta os resultados dos ensaios de compactação na energia do Proctor Normal das amostras de solos no seu estado natural e das misturas solo- F_{LF} .

Figura 3.7 - Curvas de compactação das amostras de solo 1 (a), solo 2 (b) e respectivas misturas com F_{LF}



A Figura 3.8 mostra a relação do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e a umidade ótima (W_{ot}) das misturas solo- F_{LF} , com a variação dos teores de F_{LF} .

Figura 3.8 - Variação do teor de umidade ótima (W_{ot}) e do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) das misturas solo- F_{LF} analisadas.



O aumento do peso específico aparente seco máximo com a adição dos F_{LF} foi observada para as duas amostras de solos analisadas, conforme apresentado na Figura 3.7 e Figura 3.8, e pode

ser atribuído ao tamanho das partículas de F_{LF} . Os F_{LF} utilizados apresentam um D_{10} com cerca de 4 μm (Figura 3.1). Como explicado por Diniz et al. (2017) essas partículas tendem a ocupar os vazios entre os grãos das amostras de solos, resultando em uma matriz de solo mais densa, elevando o peso específico aparente seco máximo das misturas solo- F_{LF} analisadas.

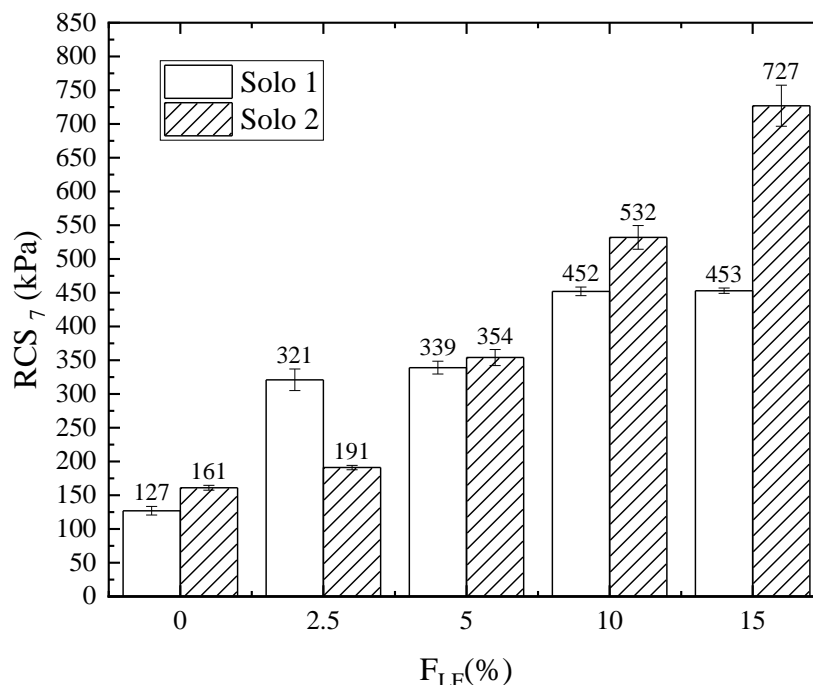
Outro aspecto que contribuiu para o aumento do peso específico aparente seco máximo foi a morfologia das partículas dos F_{LF} . Assim como destacado por Damineli (2013), as partículas que apresentam formato esférico ou próximo a isso, como é o caso das partículas de F_{LF} (Figura 3.6), têm uma melhor mobilidade. Sendo assim, os F_{LF} são capazes de se deslocar no interior da matriz do solo ocupando melhor os espaços vazios existentes.

A redução na umidade ótima de compactação registrada nas amostras de solos estabilizadas com diferentes teores de F_{LF} pode ser explicada segundo Onyelowe (2019) devido à ocorrência de reações de troca catiônica entre o Ca^{2+} e Mg^{2+} presentes nos F_{LF} e os íons monovalentes presentes nos argilominerais, o que proporciona uma redução na espessura da dupla camada difusa, permitindo, assim, a aglutinação das partículas de argila e a redução das exigências de umidade para se atingir um determinado arranjo estrutural sob compactação, resultando em misturas com peso específico aparente seco maiores.

3.3.3 Ensaios de compressão simples

Os resultados do ensaio de resistência à compressão simples (RCS) para corpos de prova das duas amostras de solos analisadas no estado natural e das misturas solo- F_{LF} com cura selada de 7 dias (RCS_{7d}), em câmara úmida são apresentados na Figura 3.9.

Figura 3.9 - Valores de resistência à compressão simples (RCS_{7d}) de misturas solo- F_{LF} para diferentes teores de F_{LF} .



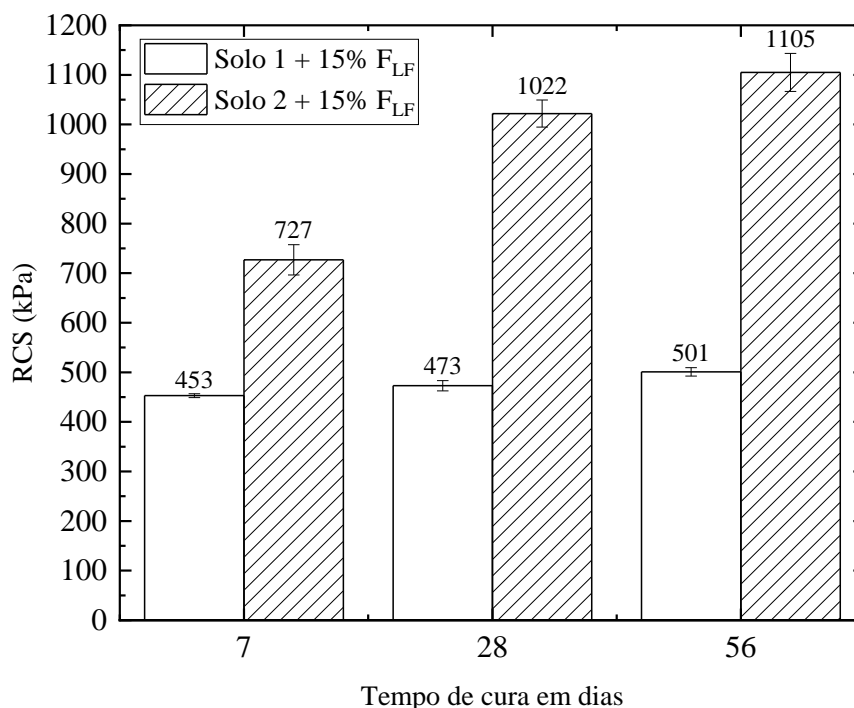
A Figura 3.9 mostra que a RCS_7 de ambos os solos aumentou com o teor de F_{LF} . Os corpos de prova da amostra de solo 2 apresentaram a maior resistência à compressão simples média (727 kPa) aos 7 dias de cura selada, em câmara úmida, quando o teor de F_{LF} foi de 15%, o que representou um aumento de 352% sobre o valor médio da resistência à compressão simples dos corpos de prova da amostra de solo no estado natural. O maior valor médio de RCS_7 (453 kPa) para os corpos de prova da amostra de solo 1 também foi obtido com a adição de 15% de F_{LF} , o que representou um aumento de aproximadamente 257%, em relação ao valor médio da resistência à compressão simples dos corpos de prova da amostra de solo no estado natural. Esses resultados mostraram a capacidade cimentícia dos F_{LF} .

Em solos argilosos, a cimentação proporciona um comportamento de agregação, cobrindo as partículas e unindo os grãos soltos. A hidratação dos aluminatos e silicatos de cálcio previamente identificados aumenta a resistência mecânica de ambos os tipos de solos nos diferentes períodos de cura. No entanto, os resultados dessa pesquisa indicaram que aumentos de RCS_7 observados no solo arenoso foram até 21% maiores do que aqueles observados no solo

argiloso. Isso porque, em solos granulares, os efeitos de ligação melhoraram as pontes de contato entre as faces dos agregados, proporcionando maior resistência mecânica e aumentos relativos em sua coesão (TRINDADE et al., 2011). Ao contrário, tais melhorias na ancoragem entre agregados não são evidentes em solos argilosos ou finos, uma vez que as argilas apresentam tamanhos de partícula menores (SUGANYA; SIVAPULLAIAH, 2016; ROCHA; REZENDE, 2017).

Para a percentagem de F_{LF} (15%) na qual foram obtidos os maiores valores de RCS_{7d} , são apresentados, na Figura 2.7, os respectivos valores de RCS para os tempos de cura selada de 7, 28 e 56 dias.

Figura 3.10 - Valores de resistência à compressão simples (RCS) de corpos de prova de misturas solo-15% F_{LF} para 7, 28 e 56 dias de cura selada, em câmara úmida.



Para as amostras de solos analisadas, foi possível identificar o aumento na RCS com o decorrer do tempo de cura, sendo que, esse aumento foi mais significativo para a amostra do Solo 2, de característica arenosa, com um aumento de, aproximadamente, 52% (Figura 3.10).

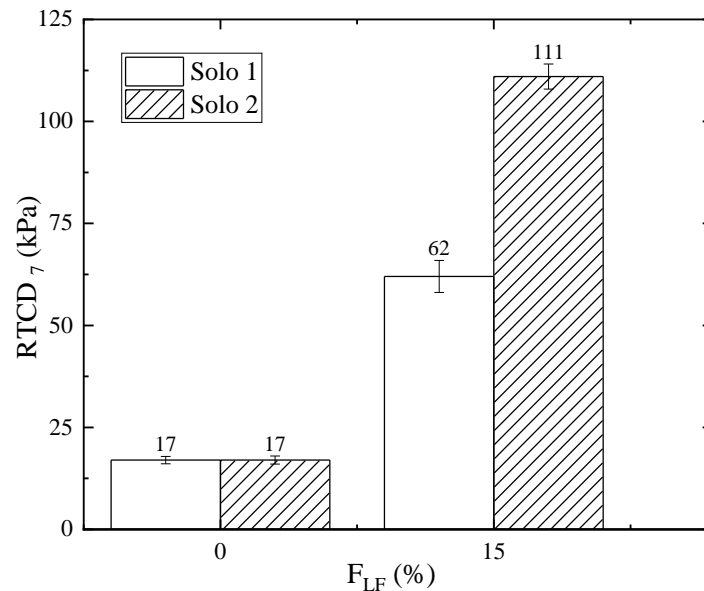
O ganho de resistência ao longo do tempo de cura ocorreu devido aos processos de cimentação envolvendo a hidratação da belita (C_2S), que apresenta reações lentas e tardias segundo Londono-Zuluaga et al. (2017), e por reações pozolânicas entre os argilominerais presentes nas amostras de solos analisadas e a cal identificada nos F_{LF} .

Segundo Manso et al. (2013) e Ardah et al. (2017) as reações pozolânicas dão origem à formação do silicato hidratado de cálcio e/ou do aluminato de cálcio hidratado, através das reações entre a cal, a sílica e a alumina livre nas partículas de argila. A interação entre os íons de cálcio e a fração argila provoca a dissolução da sílica e da alumina das partículas do solo em um ambiente de pH alto. Os íons dissolvidos se combinam com os íons de cálcio e formam-se os agentes cimentantes que se interligam nas partículas argilosas, sendo responsáveis pelo aumento de resistência mecânica ao longo do tempo de cura visto nas amostras de solos estabilizadas com os F_{LF} .

3.3.4 Ensaios de tração por compressão diametral

A Figura 3.11 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral ($RTCD_{7d}$) de corpos de prova de amostras de solos e misturas solo-15% F_{LF} , após 7 dias de cura selada em câmara úmida.

Figura 3.11 - Valores médios de resistência à tração por compressão diametral de amostras de solo no estado natural e misturas solo-15% F_{LF} .



Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral para os corpos de prova das misturas solo- F_{LF} foram superiores aos valores obtidos para os ensaios realizados com os solos na condição natural. A adição de F_{LF} elevou a resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova das misturas solo- F_{LF} em 265 e 553%, respectivamente, em relação as mesmas resistências para as amostras de solo 1 e 2.

A resistência à tração dos solos existe graças à coesão entre as partículas principalmente de argilas. Os mecanismos físicos envolvidos na coesão do solo são: (i) atração de Van Der Waals próximos aos contatos das partículas; (ii) forças de repulsão promovida pela dupla camada difusa; (iii) cimentação devido à precipitação de soluto e (iv) atração capilar devido à existência de pontes de hidrogênio. Sendo que, a compreensão quantitativa de cada um dos mecanismos não é totalmente estabelecida (TANG et al., 2015).

Os F_{LF} em mistura com as amostras de solo analisadas alteraram diretamente os mecanismos (ii), (iii) e (iv) respectivamente, reduzindo a força de repulsão da dupla camada difusa através de reações de troca catiônica, promovendo uma cimentação entre as partículas através da

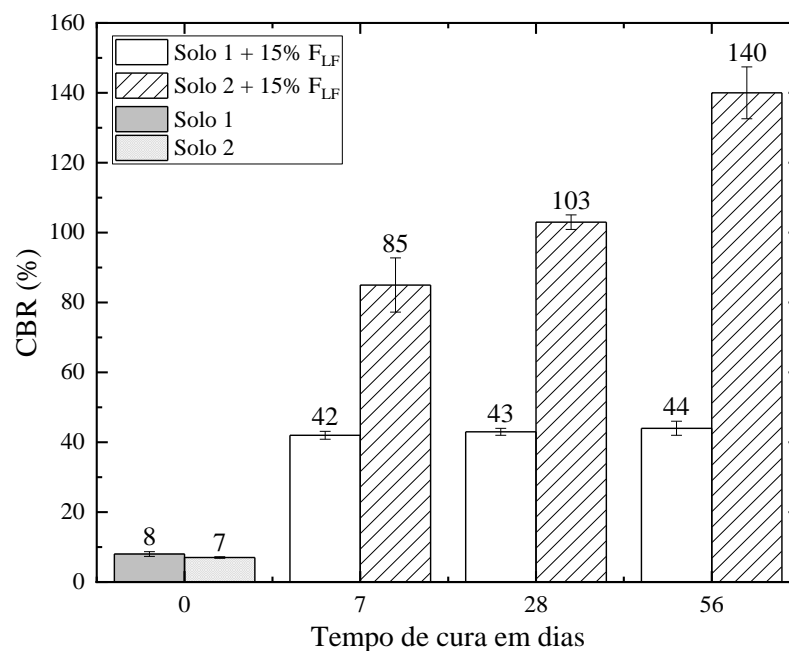
hidratação dos aluminatos e silicatos de cálcio, aumentando a interação entre as partículas promovido pelo material fino devido ao efeito *filler*.

Os aumentos dos valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ promovidos pelo acréscimo dos F_{LF} , promoveram uma maior interação entre as partículas das amostras de solo, aumentando assim o seu intertravamento. Além disso, o aumento da interação entre as partículas das amostras de proporciona um número maior de pontes de hidrogênio, o que provoca, conseqüentemente, um aumento na resistência à tração por compressão diametral das amostras de solos analisadas.

3.3.5 Ensaios CBR

A Figura 3.12 apresenta os resultados dos ensaios de ISC ou índice CBR para as duas amostras de solos analisadas e suas misturas com teor de 15% de F_{LF} . Para as misturas solo- F_{LF} , são apresentados os valores médios de CBR de corpos de prova com cura selada por 7, 28 e 56 dias, em câmara úmida.

Figura 3.12 - Valores médios de índice CBR de corpos de prova de amostras de solos e misturas solo-15% F_{LF} para cura selada de 7, 28 e 56 dias, em câmara úmida.



Para os resultados apresentados na Figura 3.12, notou-se que a adição de F_{LF} nas amostras de solos, na proporção de 15% em relação a massa seca de solo, conferiu aos corpos de prova das misturas solo- F_{LF} uma melhoria no seu comportamento mecânico. Para a amostra de solo 1, foi possível observar um aumento no valor do índice CBR, de um valor médio de 8% para a amostra de solo na condição natural para um valor médio de 44% para a mistura com teor de 15% de F_{LF} . Os acréscimos apresentados nos valores médios do índice CBR da amostra de solo 2 foram ainda maiores, sendo o índice CBR médio de 7% para corpos de prova da amostra de solo na condição natural, chegando a valores de 140 % para misturas solo- F_{LF} para um período de cura selada de 56 dias em câmara úmida.

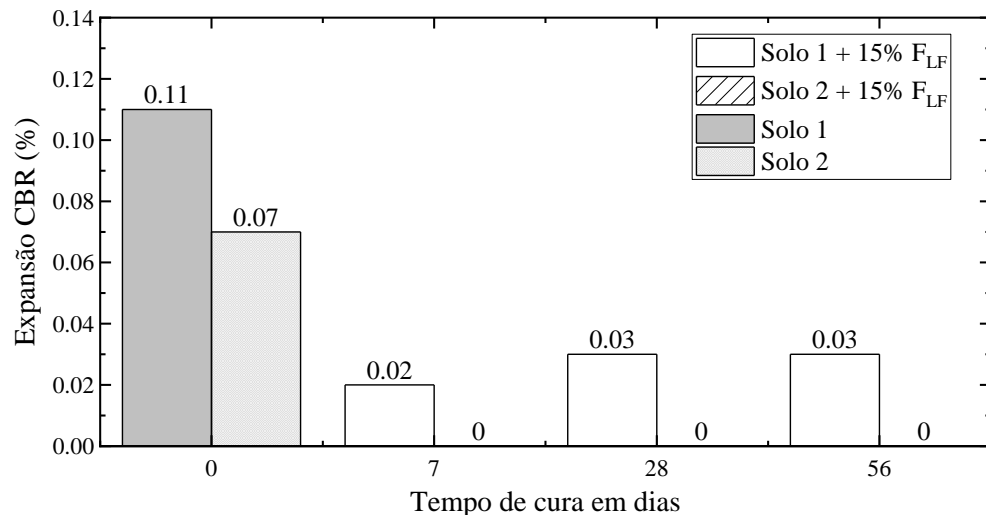
As melhorias das propriedades mecânicas das amostras de solo analisadas podem ser justificadas pelas mudanças em suas estruturas, devido às ações físicas e reações químicas promovidas pelos F_{LF} . A ação física foi traduzida pela finura e morfologia das partículas, que preencheram os vazios presentes nas estruturas das amostras de solo, contribuindo para o intertravamento das misturas solo- F_{LF} , resultando em uma matriz de solo mais densa e competente para resistir aos esforços mecânicos. As reações químicas promovem as ligações entre as partículas das amostras de solo e contribuem para o preenchimento dos vazios das referidas misturas compactadas.

Como verificado em alguns trabalhos (MANSO et al., 2013; ARDAH; CHEN; ABU-FARSAKH, 2017; MOSA; TAHER; AL-JABERI, 2017; ONYELOWE, 2019), as prováveis características e reações químicas promovidas pelos F_{LF} que foram atribuídas ao aumento de valores médios do índice CBR das amostras de solos analisadas foram as seguintes: (i) presença de cal e periclásio, ambos com capacidade de reação com a fração argila nas amostras de solos, o que potencializou a capacidade de floculação e compactação das misturas solo- F_{LF} ; (ii) hidratação de aluminatos e silicatos de cálcio, proporcionando ligação e agregação das partículas das amostras de solos; (iii) surgimento de reações pozolânicas, que contribuíram para a cimentação em idades de cura mais avançadas e (iv) carbonatação devido à presença de calcita e periclásio, que através da reação com o dióxido de carbono resultou em precipitação de carbonato nos poros do solo, contribuindo para a redução dos vazios de corpos de prova das misturas compactadas.

A Figura 3.13 apresenta os resultados médios do parâmetro expansão CBR para corpos de prova

das amostras de solo no estado natural e das misturas solo- F_{LF} , com teor de 15% em relação a massa seca do solo.

Figura 3.13 - Valores médios do parâmetro Expansão CBR para corpos de prova das amostras de solos e misturas solo-15% F_{LF} .



A redução do valor médio do parâmetro de expansão CBR para as amostras de solos analisadas indicou que os F_{LF} não funcionaram apenas como um material de preenchimento, mas também como um agente cimentante. Esse resultado foi confirmado pelas análises químicas e mineralógicas (Tabela 3.2 e Figura 3.5), respectivamente. A ação cimentante provocada pelos F_{LF} deve-se às reações de hidratação de alguns silicatos e aluminatos de cálcio identificados nesse material. Esses produtos segundo Rocha e Rezende (2017) quando hidratados adquirem a forma de agulhas curtas e feixes que unem as partículas das amostras de solos umas às outras, os quais passam a apresentar uma matriz mais rígida, tornando as misturas solo- F_{LF} compactadas e mais resistentes a variações volumétricas.

Assim como verificado por Manso et al. (2013), os compostos cimentados bem como os produtos da carbonatação dos óxidos de cálcio e magnésio presentes nos F_{LF} (Tabela 3.5), preenchem os vazios entre as partículas das misturas estudadas, contribuindo para o maior intertravamento das amostras de solo, criando também uma barreira física para a percolação de água, dificultando a hidratação dos argilominerais expansivos.

Outro importante mecanismo destacado no trabalho de Al-Mukhtar et al. (2012) que contribuiu para a redução do parâmetro expansão CBR das amostras de solos analisadas foi a troca catiônica, que promove a diminuição da dupla camada difusa através de processos de substituição de íons monovalentes livres nos argilominerais por cátions de Ca^{2+} e Mg^{2+} . Esse processo promoveu a aglutinação e agregação das partículas de argilas, com isso as amostras de solos perderam suas propriedades coesivas e passaram a se comportar como um material mais granular menos expansivos.

3.3.6 Ensaios de módulo de resiliência

Na Tabela 3.3, são apresentados os parâmetros dos modelos para a estimativa do módulo de resiliência de corpos de prova das amostras de solo analisadas no estado natural e de misturas solo- F_{LF} , com teor de 15% de F_{LF} , compactados na umidade ótima da Energia do Proctor Normal, a partir da tensão desvio (σ_d) e da tensão confinante (σ_3), com período de cura selada de 28 dias em câmara úmida.

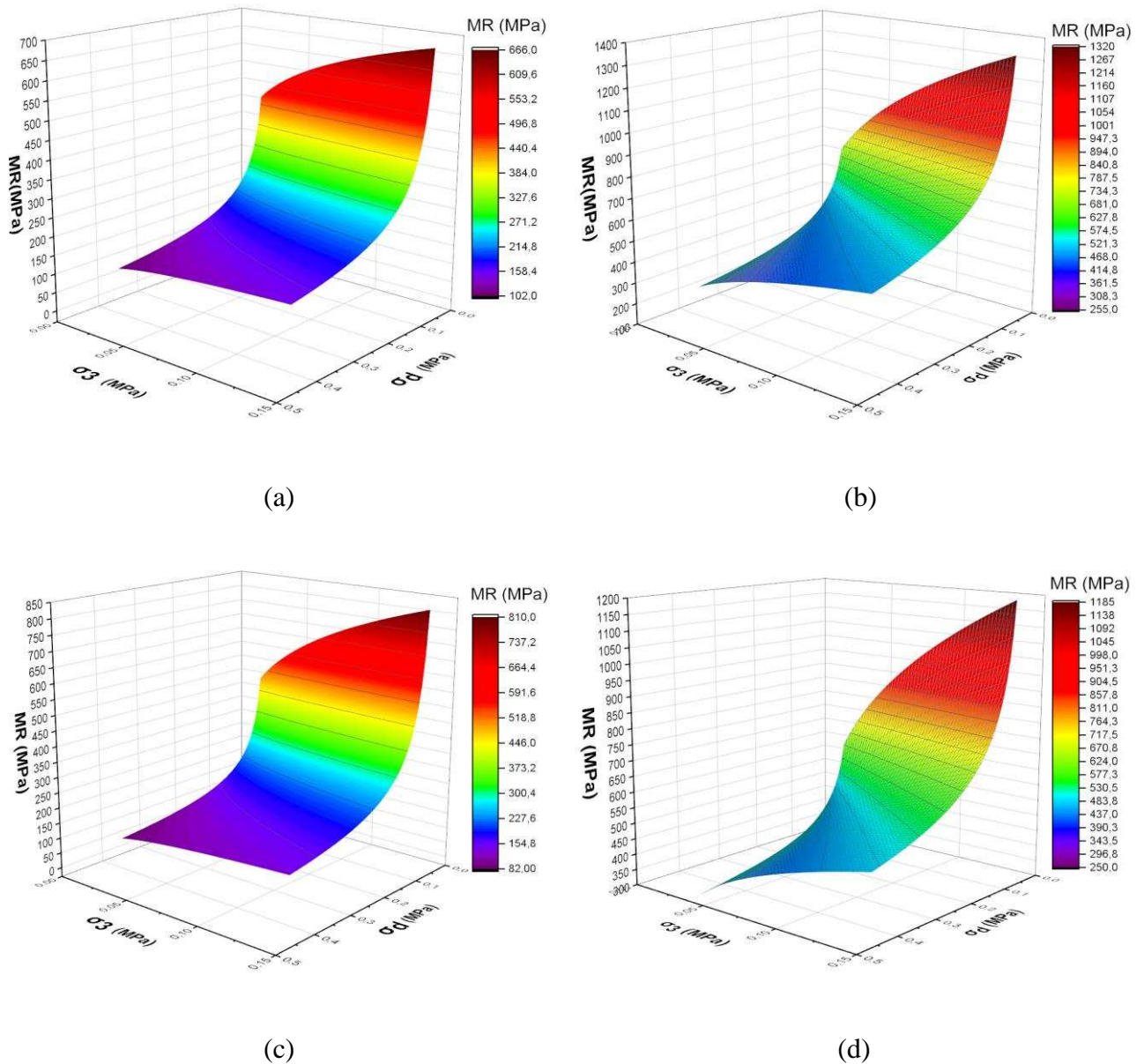
Tabela 3.3 - Valores médios dos parâmetros para o modelo composto (σ_d - σ_3), com os respectivos valores de R^2 para as amostras de solo no estado natural e misturas solo-15% F_{LF} .

Material	k_1	k_2	k_3	Modelo	R^2	MR (MPa)
Solo 1	138,948	0,190	-0,497	$\text{MR}=138,948\sigma_3^{0,190}\sigma_d^{-0,497}$	0,905	180*
Solo 1+15% F_{LF}	659,773	0,316	-0,337	$\text{MR}=659,773\sigma_3^{0,316}\sigma_d^{-0,337}$	0,878	544*
Solo 2	138,437	0,262	-0,584	$\text{MR}=138,437\sigma_3^{0,262}\sigma_d^{-0,584}$	0,944	174*
Solo 2+15% F_{LF}	704,299	0,330	-0,300	$\text{MR}=704,299\sigma_3^{0,330}\sigma_d^{-0,300}$	0,824	539*

*Valores de MR para os pares médios de tensões $\sigma_3=0,140$ MPa e $\sigma_d=0,280$ MPa

A Figura 3.14 apresenta os gráficos que expressam a influência das tensões σ_d e σ_3 sobre os valores médios de módulo de resiliência (MR) dos corpos de prova ensaiados na umidade ótima da energia do Proctor Normal.

Figura 3.14 - Resultados de MR para o modelo composto para as seguintes amostras: (a) solo 1, (b) solo1 + 15% F_{LF}, (c) solo 2 (c) e (d) solo 2 + 15%.



Os valores de R^2 observado na Tabela 3.3 foram maiores que 0,80, indicando que o modelo composto utilizado nessa pesquisa foi capaz de explicar o comportamento resiliente das amostras de solos e misturas solo-F_{LF} com boa correlação entre os dados.

Na Figura 3.13 é possível observar através dos resultados o comportamento elástico não linear das amostras de solos e misturas solo-F_{LF}, evidenciado pela superfície irregular definida pelos

valores de MR a partir dos 18 estados de tensões indicados na norma técnica DNIT ME 134/2018b. Além disso, observou-se que os valores do coeficiente k_2 (correspondente a σ_3) são positivos, indicando que o MR aumentou com o acréscimo de σ_3 em função dos F_{LF} . Esse efeito não ocorreu com o incremento da tensão desvio, devido aos valores negativos de k_3 .

Para a comparação entre os valores de MR para as amostras de solos e misturas solo- F_{LF} analisadas, adotou-se um par de média de tensões, conforme especificação da norma técnica DNIT ME 134/2018b, como um possível estado de tensão encontrado em bases e sub-bases. A partir da Tabela 3.3 foi possível observar o aumento dos valores dos MR para mistura solo- F_{LF} .

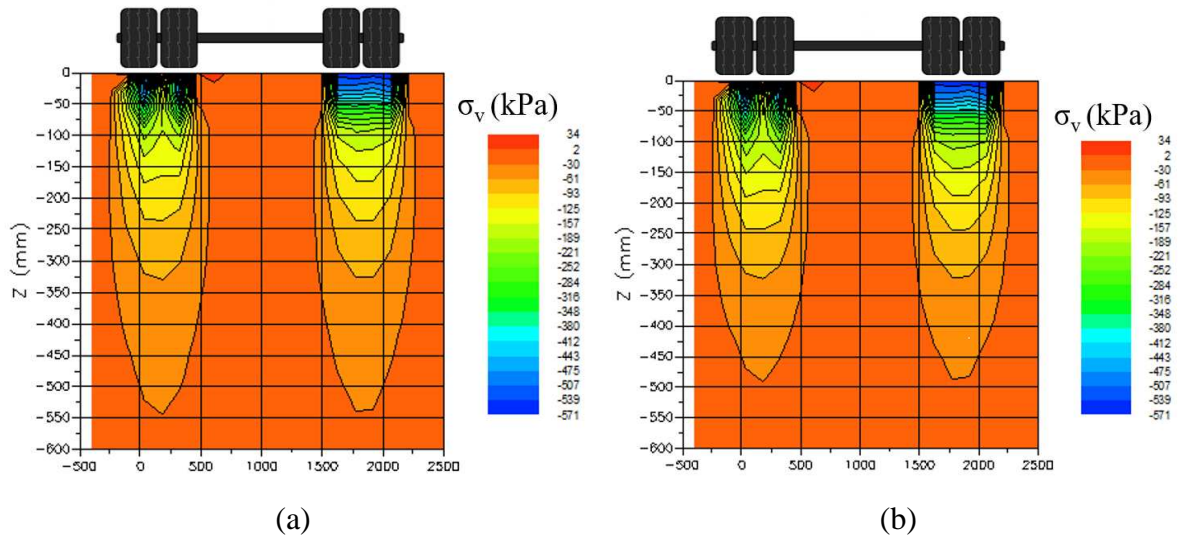
Uma possível explicação verificada em alguns trabalhos (ARDAH; CHEN; ABU-FARSAKH, 2017; BEHNOOD, 2018; MOSA; TAHER; AL-JABERI, 2017; ROCHA; REZENDE, 2017) para a melhoria no comportamento resiliente das misturas das amostras de solos analisadas com os F_{LF} , traduzida pelo aumento nos coeficientes k_1 e k_2 nos modelos supracitados, seria a hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio criando uma série de ligações e feixes entre as partículas dos solos e as reações de troca catiônicas, que promovendo a floculação e a aglutinação dos argilominerais, proporcionaram uma maior compactidade das misturas.

Outra reação de cimentação importante já citada e descritas nos trabalhos de Ardah et al. (2017) e Behnood (2018) são as reações pozolânicas, essas contribuíram para o aumento do valor de MR das misturas solo- F_{LF} analisadas, pois a cal identificada nos F_{LF} tem a capacidade de interagir com a sílica e a alumina livre nas partículas de argila e produzir compostos cimentícios que foram responsáveis pelo aumento da rigidez e resistência mecânica das misturas solo- F_{LF} compactadas .

3.3.7 Análise de fadiga

No que se refere à análise de vida de fadiga dos revestimentos asfálticos propostos (Pav1 e Pav2), faz-se necessária a obtenção da diferença da tensão horizontal de tração e a tensão vertical de compressão ($\Delta\sigma$) no bordo inferior da camada do revestimento. Na Figura 3.13, são apresentadas as tensões verticais (σ_v) que atuam na estrutura dos pavimentos analisados para o carregamento de 80 kN por eixo e a pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa (Figura 3.15).

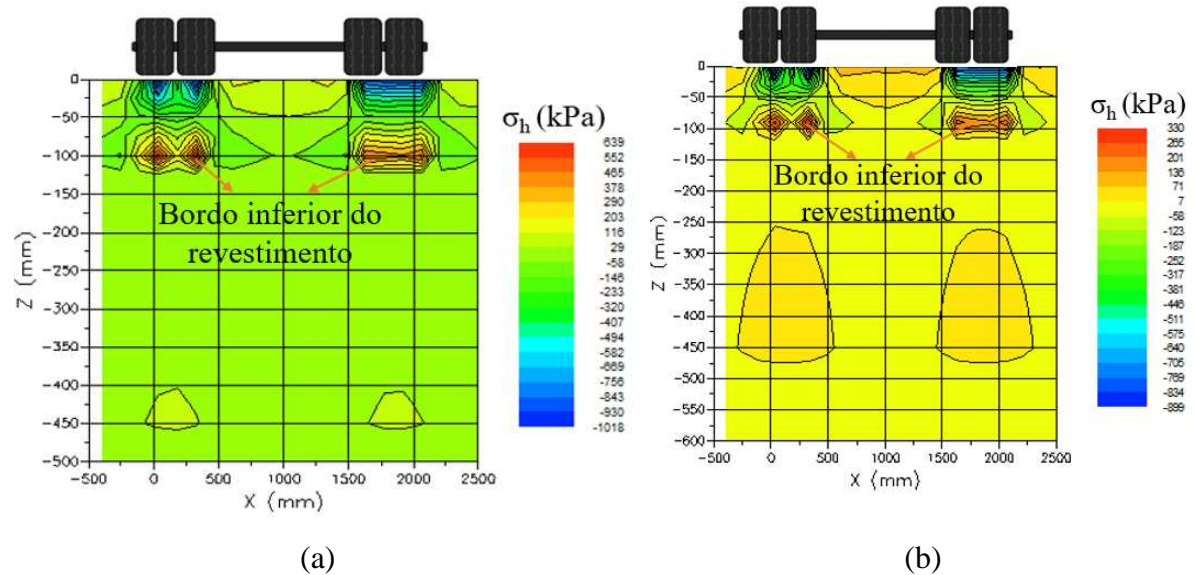
Figura 3.15 - Tensões verticais (σ_v) na estrutura do Pav 1(a) e Pav2 (b): $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa.



Com base nos dados apresentados no ensaio de módulo de resiliência, observou-se que o comportamento resiliente dos solos estabilizados pelos F_{LF} no Pav2 é maior que os materiais utilizados por Rezende et al. (2020) nas camadas de base e reforço de subleito do Pav1. Sendo assim, a maior rigidez observada nesses solos contribui favoravelmente para a capacidade suporte do Pav2, uma vez que, para o mesmo nível de carregamento, as tensões verticais do pavimento estabilizado pelos F_{LF} atingem uma menor profundidade (Figura 3.15 (b)), contribuindo para uma maior preservação do subleito abaixo da camada de reforço.

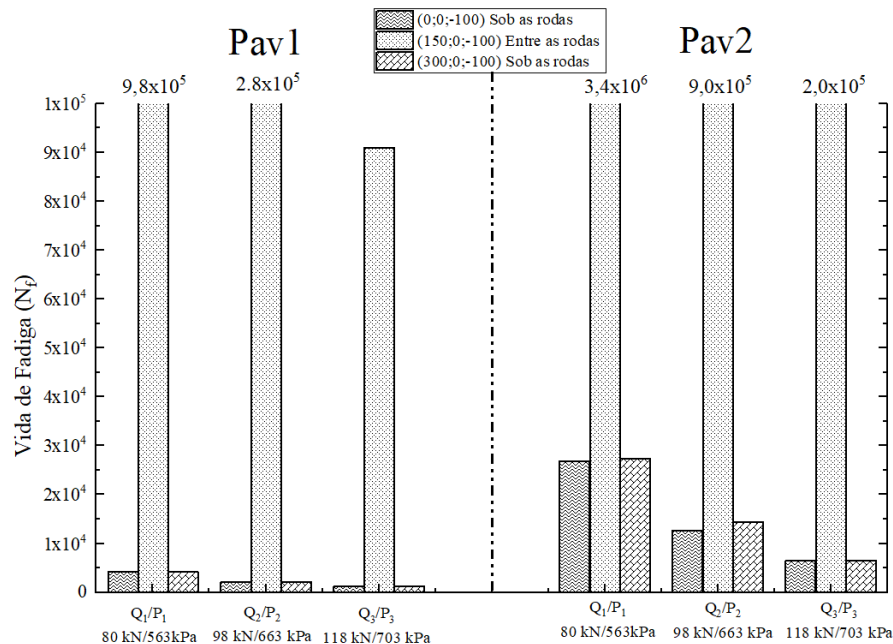
Além das tensões verticais o pavimento asfáltico está sujeito a tensões horizontais de compressão (valores negativos de σ_h) e horizontais de tração (valores positivos de σ_h). Porém o estado crítico corresponde às tensões no bordo inferior do revestimento, no qual a tensão horizontal de tração é máxima (Figura 3.16).

Figura 3.16 - Tensões horizontais (σ_h) de tração (+) e de compressão (-) na estrutura do pavimento asfáltico Pav 1(a) e Pav2 (b): $Q=80$ kN e $P=563$ kPa.



A análise da vida de fadiga (N_F) foi obtida através da Equação 3.2 em função de $\Delta\sigma$. A vida de fadiga dos revestimentos asfálticos avaliados nessa pesquisa foi calculada considerando-se os três níveis de carga por eixo (Q) e de pressão de enchimento dos pneus (P). Cada condição de carregamento considerada nas análises estruturais está sendo representada pela relação Q/P (Figura 3.17).

Figura 3.17 - Vida de fadiga (N_f) do revestimento asfáltico sobre a estrutura do Pav1 e do Pav2 estabilizado pelos F_{LF} .



Verifica-se que a magnitude do número N_f de solicitações do eixo padrão para a estrutura de pavimento estabilizada (Pav2) foi superior, independentemente do cenário de carregamento e de pressão dos pneus analisado nessa pesquisa (Figura 3.14). Assim, é possível inferir sobre a capacidade dos F_{LF} em combinação com os solos estudados em prolongar o período de vida útil do pavimento, suportando um maior número de repetições de cargas sem ocorrer rupturas por fadiga. Esse aumento na vida de fadiga está diretamente relacionado com a menor tensão horizontal de tração observada no bordo inferior do revestimento do Pav2 (Figura 3.16(b)).

É possível observar que a condição de carregamento $Q_3/P_3 = 118 \text{ kN}/703 \text{ kPa}$ (associada à carga por eixo 20% acima da legalmente permitida no Brasil) apresentou os menores valores estimados para vida de fadiga, independente da estrutura do pavimento analisada, o que reforça a importância do controle das cargas nas rodovias, por meio da fiscalização. O local que apresentou a maior vida de fadiga foi entre as rodas (Figura 3.17), isso se justifica devido à baixa tensão horizontal de tração nesse local (Figura 3.16).

O aumento dos valores de MR dos solos por meio da inclusão do F_{LF} faz com que o pavimento tipo proposto (Pav2) consiga absorver com mais eficiência os esforços verticais provocados pelo tráfego, o que implica em maior capacidade do material em recuperar elasticamente as

deformações geradas pelas sucessivas passagens das rodas dos veículos, tornando menor as tensões e deformações de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico. Essas alterações estruturais são importantes, permitindo o projetista diminuir a espessura da camada de revestimento e/ou aumentar o número de solicitações admissíveis ao trincamento por fadiga.

3.4 Conclusões

Diante dos resultados obtidos e discutidos nesta pesquisa, pode-se concluir que:

- Os óxidos nos F_{LF} responsáveis pelas mudanças estruturais e estabilização das misturas solo- F_{LF} analisadas foram: CaO, SiO₂, Al₂O₃ e MgO. Além disso, a mineralogia indicou a presença de akermanita (Ca₂MgSi₂O₇); larnita (β -C₂S); mayenita (Ca₁₂Al₁₄O₃₃) e wollastonita (Ca₃SiO₅) que possuem excelentes capacidades hidráulicas e são responsáveis pelo desenvolvimento das reações de cimentação nas misturas solo- F_{LF} ;
- As caracterizações físico-químicas realizadas sobre os F_{LF} indicaram elevado grau de amorfismo, e uma elevada superfície específica, características que favoreceram o desenvolvimento de reações cimentícias;
- A combinação das amostras de solos analisadas com os F_{LF} proporcionou um aumento do peso específico aparente seco máximo e uma redução na umidade ótima. Essas mudanças foram proporcionadas, principalmente, pelo efeito de empacotamento realizado pelos F_{LF} e a sua capacidade de promover a floculação dos argilosminerais através dos mecanismos de troca catiônica.
- A partir dos resultados dos ensaios de RCS₇, RTCD₇ e índice CBR₇ constatou-se que as misturas solo- F_{LF} analisadas, apresentaram uma significativa melhoria em sua resistência mecânica, provocada, possivelmente, pela hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio;

- Foi possível evidenciar um ganho de resistência mecânica com o aumento do período de cura selada em câmara úmida dos corpos de prova das misturas solo- F_{LF} , observado nos ensaios de RCS e índice CBR. Esse acréscimo de resistência mecânica em idades de cura selada mais avançadas está relacionado, principalmente, com a hidratação da belita (β - C_2S) e com o desenvolvimento de reações pozolânicas.
- Através dos resultados dos parâmetros de expansão do índice CBR, constatou-se que as misturas solo- F_{LF} analisadas apresentaram uma redução no seu potencial expansivo. Essas melhorias ocorreram, principalmente, devido as reações de cimentação e de troca catiônica, que tornaram as misturas solo- F_{LF} mais rígidas, aumentando o efeito de agregação entre os argilominerais.
- O modelo composto (σ_d , σ_3) foi capaz de representar o comportamento do MR das amostras de solos analisadas e misturas solo- F_{LF} com alto coeficiente de correlação (R^2); e
- No ensaio de MR foi possível verificar uma melhoria no comportamento resiliente de corpos de prova das amostras de solo analisadas quando misturada com F_{LF} . Essa melhoria foi proporcionada pelo ganho de rigidez das misturas refletindo em um aumento da vida de fadiga do revestimento asfáltico analisado.

Referências bibliográficas

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 145-91**: Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes Washington, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **ABCP Estudo Técnico 35**: Dosagem das Misturas de Solo-Cimento - Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio. São

Paulo, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200).** Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12253: Solo-cimento- Dosagem para emprego como camada de pavimento.** Rio de Janeiro, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12023: Solo-cimento - Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 2012c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12025: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2012d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182: Ensaio de Compactação – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2016.

ADEGOLOYE, G. et al. Concretes made of EAF slag and AOD slag aggregates from stainless steel process: Mechanical properties and durability. **Construction and Building Materials**, v. 76, p. 313–321, fev. 2015.

AL-KHAFAJI, R. et al. **Soft soil stabilisation using ground granulated blast furnace slag.** The 3rd BUiD Doctoral Research Conference. **Anais...2017**

AL-MUKHTAR, M.; KHATTAB, S.; ALCOVER, J.-F. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. **Engineering Geology**, v. 139–140, p. 17–27, jun. 2012.

ARDAH, A.; CHEN, Q.; ABU-FARSAKH, M. Evaluating the performance of very weak subgrade soils treated/stabilized with cementitious materials for sustainable pavements.

Transportation Geotechnics, v. 11, p. 107–119, jun. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2487-17**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Pensilvânia ASTM International, , 2017.

BARNES, P. AND BENSTED, J. **Structure and Performance of Cements**. 2nd. ed. London: Taylor & Francis Group, 2019.

BASTOS, L. A. DE C. et al. Using Iron Ore Tailings from Tailing Dams as Road Material. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 10, p. 04016102, out. 2016.

BEHNOOD, A. Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. **Transportation Geotechnics**, v. 17, p. 14–32, dez. 2018.

BELHADJ, E.; DILIBERTO, C.; LECOMTE, A. Characterization and activation of Basic Oxygen Furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 1, p. 34–40, jan. 2012.

BORGES MARINHO, A. L. et al. Ladle Furnace Slag as Binder for Cement-Based Composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 11, p. 04017207, nov. 2017.

BRAND, A. S. et al. Stabilization of a Clayey Soil with Ladle Metallurgy Furnace Slag Fines. **Materials**, v. 13, n. 19, p. 4251, 24 set. 2020.

CARVALHO, S. Z. et al. The recycling effect of BOF slag in the portland cement properties. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 216–220, dez. 2017.

CIKMIT, A. A. et al. Particle-size effect of basic oxygen furnace steel slag in stabilization of dredged marine clay. **Soils and Foundations**, v. 59, n. 5, p. 1385–1398, out. 2019.

CORRÊA-SILVA, M. et al. Geomechanical behaviour of a soft soil stabilised with alkali-activated blast-furnace slags. **Journal of Cleaner Production**, v. 267, p. 122017, set. 2020.

DA SILVA, M. J. et al. Feasibility Study of Steel Slag Aggregates in Precast Concrete Pavers. **ACI Materials Journal**, v. 113, n. 4, ago. 2016.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 25 out. 2013.

DEPARTAMENTO DE ESTRADA DE RODAGEM DE SÃO PAULO. **DER/SP IP-DE-P00/001: PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO**. São Paulo, 2006.

DINIZ, D. H. et al. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical Soil Stabilizer for Use in Roads. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 9, p. 04017118, set. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME - 181: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada - determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro, 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 024/94: Pavimento-Derterminação das deflexões pela viga Benckelman**. Rio de Janeiro, 1994b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES **DNIT ME 172/2016: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ES 142/2018: Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2018a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ME 134/2018: Pavimentação - Solos -Determinação do Módulo de Resiliência**. Rio de Janeiro, 2018b.

FASIHNIKOUTALAB, M. H. et al. Sustainable soil stabilisation with ground granulated blast-

furnace slag activated by olivine and sodium hydroxide. **Acta Geotechnica**, 30 nov. 2019.

GÖKALP, İ. et al. Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications. **Transportation Geotechnics**, v. 14, p. 61–69, mar. 2018.

GU, X. et al. Application of secondary steel slag in subgrade: Performance evaluation and enhancement. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 102–108, abr. 2018.

HASAN, U. et al. Experimental Evaluation of Construction Waste and Ground Granulated Blast Furnace Slag as Alternative Soil Stabilisers. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 34, n. 6, p. 1707–1722, 21 dez. 2016.

JIANG, Y. et al. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 187–197, set. 2018.

KACIMI, L. et al. Synthesis of belite cement clinker of high hydraulic reactivity. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 7, p. 559–565, jul. 2009.

KAMBOLE, C. et al. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 618–631, set. 2017.

KAMEI, T.; AHMED, A.; SHIBI, T. The use of recycled bassanite and coal ash to enhance the strength of very soft clay in dry and wet environmental conditions. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 224–235, jan. 2013.

LONDONO-ZULUAGA, D. et al. Clinkering and hydration of belite-alite-ye´elimite cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p. 333–341, jul. 2017.

MAHIEUX, P.-Y.; AUBERT, J.-E.; ESCADEILLAS, G. Utilization of weathered basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic road binders. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 742–747, fev. 2009.

MÄKELÄ, M. et al. Utilization of steel, pulp and paper industry solid residues in forest soil amendment: Relevant physicochemical properties and heavy metal availability. **Journal of Hazardous Materials**, v. 207–208, p. 21–27, mar. 2012.

MANSO, J. M. et al. The use of ladle furnace slag in soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 126–134, mar. 2013.

MONTENEGRO-COOPER, J. M. et al. Study of the expansive behavior of ladle furnace slag and its mixture with low quality natural soils. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 201–209, abr. 2019.

MONTENEGRO, J. M. et al. Ladle Furnace Slag in the Construction of Embankments: Expansive Behavior. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 8, p. 972–979, ago. 2013.

MOSA, A. M.; TAHER, A. H.; AL-JABERI, L. A. Improvement of poor subgrade soils using cement kiln dust. **Case Studies in Construction Materials**, v. 7, p. 138–143, dez. 2017.

MOZEJKO, C. A.; FRANCISCA, F. M. Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 117901, abr. 2020.

NG, C. W. W. et al. Resilient modulus of unsaturated subgrade soil: experimental and theoretical investigations. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 50, n. 2, p. 223–232, fev. 2013.

NIDZAM, R. M.; KINUTHIA, J. M. Sustainable soil stabilisation with blastfurnace slag – a review. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, v. 163, n. 3, p. 157–165, ago. 2010.

NOGAMI, J. et al. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. 2nd. ed. São Paulo: [s.n.].

ONYELOWE, K. C. Review on the role of solid waste materials in soft soils reengineering.

Materials Science for Energy Technologies, v. 2, n. 1, p. 46–51, abr. 2019.

ORTEGA-LÓPEZ, V. et al. The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 455–464, out. 2014.

PAN, S.-Y. et al. Integrated and innovative steel slag utilization for iron reclamation, green material production and CO₂ fixation via accelerated carbonation. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 617–631, nov. 2016.

PAPAYIANNI, I.; ANASTASIOU, E. Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 3, p. 400–407, mar. 2012.

PEETHAMPARAN, S.; OLEK, J. Study of the Effectiveness of Cement Kiln Dusts in Stabilizing Na-Montmorillonite Clay. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 20, n. 2, p. 137–146, fev. 2008.

PEZO, R. et al. **Development of a reliable resiliente modulus test for subgrade and non-granular subbase materials for use in routine pavement design**. Austin, Texas: [s.n.].

PINTO JUNIOR, L. A. B. et al. Caracterização da mistura de resíduos de granito e escória de aciaria LD. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 2, p. 169–174, jun. 2011.

POH, H. Y.; GHATAORA, G. S.; GHAZIREH, N. Soil Stabilization Using Basic Oxygen Steel Slag Fines. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 18, n. 2, p. 229–240, abr. 2006.

REZENDE, J. D. P. et al. Structural analysis of reinforced asphalt pavement by impregnated surface geotextile. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 185–198, 15 dez. 2020.

ROCHA, M. T.; REZENDE, L. R. DE. Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 4, 2 out. 2017.

SÁEZ-DE-GUINOA VILAPLANA, A. et al. Utilization of Ladle Furnace slag from a

steelwork for laboratory scale production of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 837–843, set. 2015.

SAN-JOSÉ, J. T. et al. The performance of steel-making slag concretes in the hardened state. **Materials & Design**, v. 60, p. 612–619, ago. 2014.

SHATNAWI, A. S. et al. Jordan journal of civil engineering. **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 2, n. 3, p. 197–207, 2008.

SUGANYA, K.; SIVAPULLAIAH, P. V. Role of Sodium Silicate Additive in Cement-Treated Kuttanad Soil. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 6, p. 06016006, jun. 2016.

TANG, C.-S. et al. Tensile Strength of Compacted Clayey Soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 141, n. 4, p. 04014122, abr. 2015.

VELTEN, R. Z. et al. Caracterização mecânica de misturas solo-escória de alto-forno granulada moída para aplicações em estradas florestais. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 235–240, abr. 2006.

WANG, X. et al. Reinforcement of Calcium Phosphate Cement by Bio-Mineralized Carbon Nanotube. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 90, n. 3, p. 962–964, mar. 2007.

YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag. **Advances in Civil Engineering**, v. 2011, p. 1–13, 2011.

YOON, S. et al. Construction of an Embankment with a Fly and Bottom Ash Mixture: Field Performance Study. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, n. 6, p. 271–278, jun. 2009.

ZUMRAWI, M.; AWAD, M. Estimation of Subgrade Resilient Modulus from Soil Index Properties. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 11, n. 9, p. 816–822, 2017.

4. ANÁLISE QUÍMICA E MICROESTRUTURAL DA INTERAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS E FINOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA E SUA INTERFERÊNCIA NAS PROPRIEDADES DE ENGENHARIA DOS MATERIAIS ESTABILIZADOS.

Resumo: Existem poucos estudos sobre o comportamento microestrutural, químico e mecânico das escórias de aciaria elétrica como agentes estabilizadores de solos tropicais. Sendo assim, este trabalho de pesquisa avaliou a viabilidade de aplicação dos finos da escória de aciaria elétrica do tipo *Electric Arc Furnace* – EAF (F_{EAF}) e do tipo *Ladle Furnace* – LF (F_{LF}) como agentes estabilizadores de solos tropicais, realizando uma análise do comportamento químico, físico e microestrutural das misturas, solos e finos. O programa experimental foi composto pelos seguintes ensaios de laboratório: (i) caracterização geotécnica dos solos, (ii) ensaios de caracterização química, física, mineralógica e microestrutural dos finos (F_{EAF} e F_{LF}), solos naturais e misturas solo - F_{EAF} e solo - F_{LF} ; (iii) ensaios de compactação (Energia do Proctor normal) das amostras de solo no estado natural e de misturas solo- F_{EAF} , solo- F_{LF} e solo- $F_{EAF}+F_{LF}$; (iv) ensaios de compressão simples, índice CBR e módulo de resiliência. Os resultados dos ensaios químicos e microestruturais indicaram que os principais produtos de hidratação dos solos estabilizados com os F_{EAF} e F_{LF} foram os Silicatos de Cálcio Hidratados (CSH), Aluminatos de Cálcio Hidratados (CAH), Hidróxido de cálcio (CH) e Etringita, os quais ligam as partículas e preenchem os vazios na estrutura das amostras de solos analisadas, resultando em uma matriz de solo mais densa e competente para resistir aos esforços mecânicos. Sendo assim, os resultados possibilitam inferir que a adição de finos de escórias de aciaria elétrica F_{EAF} e F_{LF} nos solos tropicais analisados foi capaz de promover uma alteração no arranjo estrutural ocasionando uma maior rigidez, melhorando as propriedades mecânicas de uma maneira geral.

Palavras-Chave: Estabilização de solos. Solos tropicais. Análise química. Escória de aciaria elétrica EAF e LF. investigação microestrutural.

Abstract: There are few studies on the microstructural, chemical, and mechanical behavior of steel slags used as stabilizing agents of tropical soils. Hence, the present research work evaluated the viability of using fines of electric arc furnace steels slags (F_{EAF}) and ladle furnace steel slags (F_{LF}) as stabilizing agents of tropical soils, based on the analysis of chemical, physical, and microstructural mechanisms that occur in the soils improvement process. The experimental program consisted of the following laboratory tests: (i) geotechnical characterization of soils; (ii) tests for chemical, physical, mineralogical, and microstructural characterization of the fines (F_{EAF} and F_{LF}); (iii) compaction tests (standard Proctor energy) of soil samples in natural state and soil- F_{LF} , soil- F_{EAF} , and soil- $F_{EAF}+F_{EAF}$ mixtures; (iv) unconfined compression, CBR index, and resilient modulus tests. The results of chemical and microstructural tests indicated that the main hydration products stabilized with F_{EAF} and F_{LF} were calcium silicate hydrates (CSH), calcium aluminate hydrates (CAH), calcium hydroxide (CH), and ettringite. These hydration products link particles together and fill voids in the soil structure of the analyzed samples, resulting in a denser soil matrix that can support the mechanical stresses imposed in unconfined compression, CBR and resilient modulus tests. Therefore, the results indicated that the addition of steel slag fines F_{EAF} and F_{LF} in the analyzed tropical soils was able to change their structural arrangement, leading to higher stiffness and improving the mechanical properties in a general way.

Keywords: Soil stabilization. Tropical soils. Chemical analysis. EAF and LF steel slag. Microstructural investigation.

4.1 Introdução

A escória de aciaria elétrica é um dos principais resíduos siderúrgicos gerados no processo de produção do aço, tem seu uso nas seguintes aplicações: material de enchimento em misturas betuminosas (PASETTO; BALDO, 2010), agregado em bioconcreto (SAXENA; TEMBHURKAR, 2020), aplicação em lastros de ferrovias (CHAMLING; HALDAR; PATRA, 2020), composição de camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis (SHEHATA, 2020), utilização como agregados de sistemas de drenagem, materiais cimentícios suplementares, agregados finos em concretos e argamassas (YILDIRIM; PREZZI, 2011; SILVA et al., 2016; BORGES MARINHO et al., 2017; DINIZ et al., 2017; KAMBOLE et al., 2017; SKAF et al., 2017;) e em estabilização de solos (XU; YI, 2019).

Mozejko e Francisca (2020), ao destacarem a utilização de materiais convencionais como cal e cimento na estabilização de solos e na melhora de seu comportamento mecânico, ressaltaram acerca dos significativos impactos ambientais que esses materiais acarretam, relacionados diretamente ao consumo energético no processo de fabricação e ao uso de grandes quantidades de matérias primas não-renováveis. Devido a isso, materiais residuais têm sido cada vez mais empregados em substituição à cal e ao cimento, principalmente, a escórias de aciaria elétrica (YILDIRIM; PREZZI, 2011; GUO; BAO; WANG, 2018).

Tendo em vista a utilização de resíduo siderúrgicos na estabilização de solos, as análises químicas e microestruturais são importantes para a compreensão das interações desses materiais não convencionais com os solos tropicais, principalmente no que se refere aos seus comportamentos distintos, proporcionados pelo processo de intemperismo. A fração argila dos solos lateríticos é constituída basicamente de argilominerais do grupo das caulinitas e de hidróxidos e óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio. Esses óxidos conferem a esses solos a capacidade diferenciada de adsorção de água e cimentação natural (LATIFI et al., 2017).

A análise microestrutural de amostras de solos e misturas solo-materiais não convencionais é normalmente realizada pela microscopia eletrônica de varredura (MEV), enquanto que a

florescência de raio-X (FRX) é usada para identificação de óxidos, e a difração de raio X (DRX) para a determinação das fases minerais (XU et al., 2020).

Devido à sua composição química complexa e variável, as escórias de aciaria elétrica apresentam mecanismo de estabilização de solos não totalmente compreendido, sendo portanto, difícil prever seu desempenho como agente estabilizante (XU; YI, 2019). A natureza química desses aditivos é diferente em relação aos estabilizadores químicos tradicionais, e a maneira pela qual eles reagem com o solo durante o processo de estabilização também se torna diferente. Além disso, particular interesse técnico-científico repousa sobre a estabilização de solos tropicais em decorrência da mineralogia diferenciada desses materiais geológicos (LATIFI et al., 2017). Sob essa perspectiva, estudos científicos são necessários para a investigação dos mecanismos físico-químicos relacionados à interação entre escórias de aciaria e as partículas de solos tropicais.

Estudos sobre análise microestrutural de misturas solo-escórias de aciaria elétrica moída são carentes na literatura técnica, tanto em relação ao uso de escórias de aciaria elétrica do tipo *Electric Arc Furnace* (EAF) (ROHDE; NUNEZ; CERATTI, 2003; ROHDE; PERES NÚÑEZ; AUGUSTO, 2003; AKINWUMI, 2014; PITANGA et al., 2016; SILVA et al., 2019), quanto ao uso de escórias do tipo *Ladle Furnace* (LF) (MANSO et al., 2013; MONTENEGRO et al., 2013; ORTEGA-LÓPEZ et al., 2014; MONTENEGRO-COOPER et al., 2019; BRAND et al., 2020) como agentes de estabilização. Alguns destes trabalhos (MANSO et al., 2013; MONTENEGRO et al., 2013; ORTEGA-LÓPEZ et al., 2014; SILVA et al., 2019) se limitaram apenas à análise microestrutural dos solos ou das escórias de aciaria individualmente, o que torna necessária uma avaliação da complexa interação entre o solo e estes materiais não convencionais em escala microestrutural.

Dentro desse contexto, este trabalho de pesquisa abordou a avaliação microestrutural e química entre amostras de solos tropicais e finos de escórias de aciaria elétrica EAF e LF, com base em uma combinação de quatro diferentes técnicas: microscopia eletrônica de varredura, difração de raios X, espectroscopia Raman e análise termogravimétrica. Essa avaliação microestrutural em misturas solo-finos de escória de aciaria elétrica EAF e LF, para corpos de prova em diferentes idades de cura selada em câmara úmida, permitiu uma melhor compreensão dos

mecanismos envolvidos na cinética de hidratação de compostos cimentantes e suas implicações sobre diferentes propriedades de engenharia das amostras de solos tropicais analisadas.

4.2 Materiais e métodos

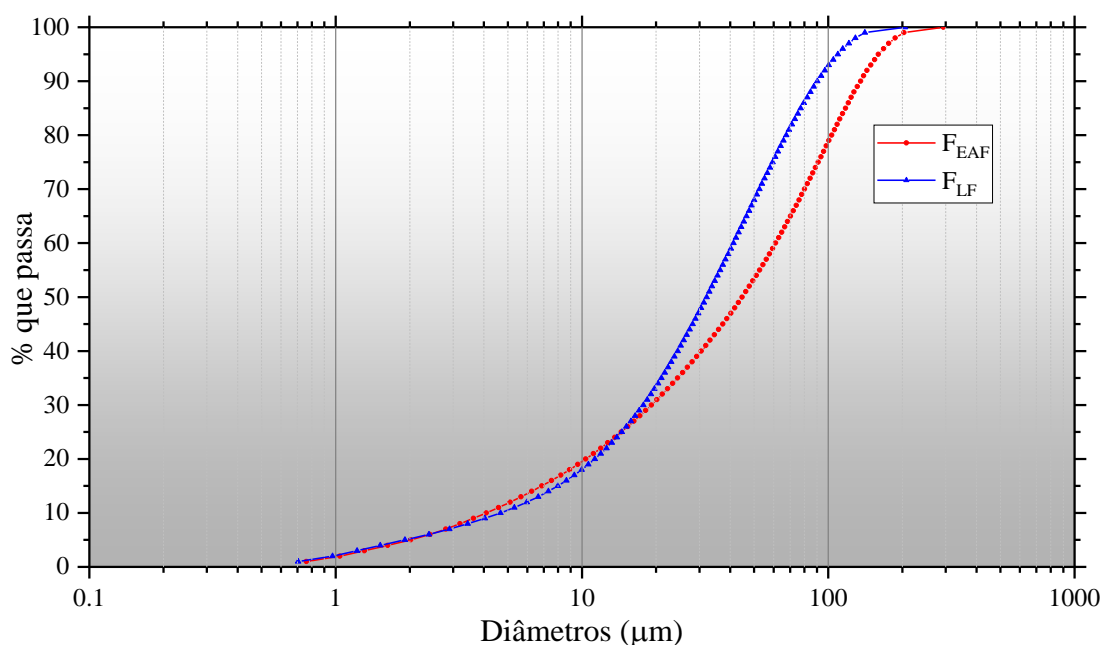
4.2.1 Coleta, preparação e caracterização física

4.2.1.1 Escórias de aciaria EAF e LF

No programa experimental dessa pesquisa, foram utilizadas amostras de escórias de aciaria geradas nos seguintes fornos: *Electric Arc Furnace* (EAF) e *Ladle Furnace* (LF). A amostragem dos resíduos sólidos de escória de aciaria elétrica no estado bruto, dispostos em pilhas, foi realizada na empresa Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil (VSB), situada no Município de Jeceaba, Estado de Minas Gerais, Brasil, atendendo às exigências da norma técnica ABNT NBR 10007/2004.

Posteriormente, os resíduos de escória de aciaria elétrica foram moídos em aparelho de Abrasão *Los Angeles* até que todo o material tivesse passado na peneira n° 100 (# 0,15 mm), procedimento que visou aumentar a distribuição granulométrica e a superfície específica do material, também denominado finos de escória de aciaria elétrica EAF (F_{EAF}) e LF (F_{LF}), conforme apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Distribuições granulométricas de F_{EAF} e F_{LF} obtidas por difração a laser.



Os valores de massa específica dos grãos, área específica e finura dos F_{EAF} e F_{LF} escória encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características físicas da escória de aciaria elétrica F_{EAF} e F_{LF} .

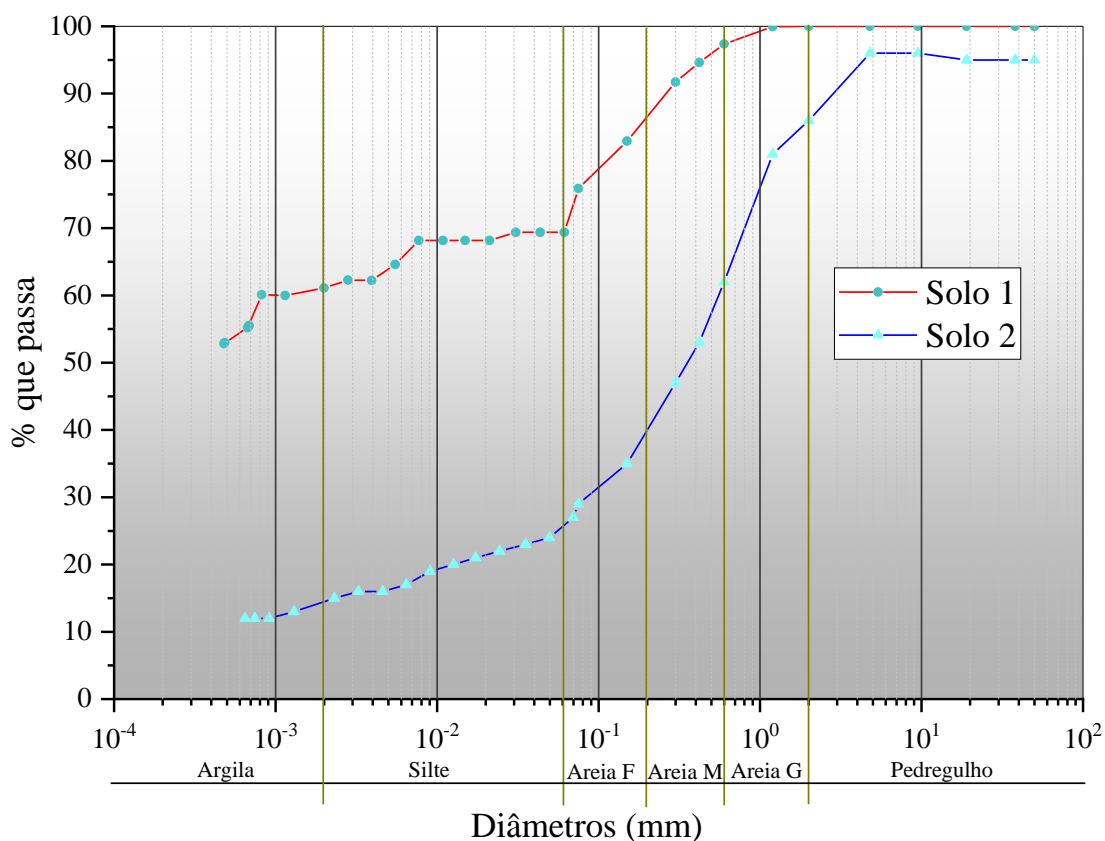
Características físicas	F_{EAF}	F_{LF}
Massa específica dos grãos (g/cm^3)	3,70	2,89
Área específica (m^2/g)	0,26	0,26
Finura (peneira 75 μm / n° 200) (%)	18,00	13,60

4.2.1.2 Solos

As amostras de solos utilizadas na pesquisa foram provenientes de rochas gnáissicas, coletadas em jazidas de empréstimo no Município de Viçosa, Estado de Minas Gerais, Brasil. A amostra de solo 1 apresenta característica argilosa, sendo classificada como uma argila de alta

compressibilidade (CH) pelo sistema *Unified Soil Classification (USC)*, de acordo com a norma técnica ASTM D 2487-17/2017, ao subgrupo A-7-5(19) pelo sistema *Transportation Research Board (TRB)*, de acordo com a norma técnica AASHTO M 145-91/2017 e ao grupo LA' pela metodologia MCT (*Miniatura Compactado Tropical*), de acordo com (NOGAMI et al., 2009). A amostra 2, com predomínio da fração areia, se classificada como uma areia argilosa (SC) pelo USCS, ao subgrupo A-2-7(0) pelo sistema TRB e ao grupo NA' pela metodologia MCT. As distribuições granulométricas e as caracterizações físicas das amostras de solos são apresentadas, respectivamente, na Figura 4.2 e Tabela 4.2.

Figura 4.2 - Distribuições granulométricas das amostras de solos 1 e 2.



4.2.2 Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação, realizados conforme a norma técnica NBR 7182 (ABNT, 2016), foram executados em 5 corpos de prova para as amostras de solos nas condições naturais e em mistura com os F_{EAF} e F_{LF} , separadamente, nos teores de 2,5%, 5,0%, 10,0% e 15,0%. Também foi realizado a compactação de corpos de prova de combinações de finos de escória de aciaria elétrica com as amostras de solos analisadas, nos teores de $10\%F_{EAF}+5\%F_{LF}$ e $5\%F_{LF}+10\%F_{EAF}$, totalizando 15 % de finos em relação a massa seca dos solos. Essas porcentagens foram baseadas na norma técnica ABNT NBR 12253/2012a, na literatura técnica ABCP, (2004) e na especificação de serviço DNIT ES 142/2018a, por se tratarem de teores de aglomerante normalmente utilizados em ensaios de dosagem de misturas solo-cimento, para a definição do teor de projeto ótimo.

Todas as amostras submetidas a esses ensaios foram compactadas na energia do Proctor Normal de acordo com a norma técnica ABNT NBR 12023/2012b para solo-cimento. A partir dos dados obtidos, foi possível, então, construir a curva de compactação para as amostras de solos no estado natural e suas respectivas misturas com F_{EAF} , F_{LF} e $F_{EAF} + F_{LF}$.

4.2.3 Ensaio para caracterizações química, mineralógica e microestrutural.

As avaliações químicas qualitativas das amostras de solo analisadas e de escórias de aciaria elétrica F_{EAF} e F_{LF} foi realizada pela técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), usando equipamento PANalytical Epsilon3x. A análise FRX foi realizada com tamanho de partícula inferior a 0,075 mm, obtidas por cominuição usando um moinho de bolas planetárias Retsch PM 100 de alta eficiência. Após os resultados foi calculado os coeficientes K_i [$1,7(SiO_2/Al_2O_3)$] e K_r [$1,7[SiO_2/(Al_2O_3+0,6375Fe_2O_3)]$] para obtenção do grau do intemperismo dos solos (DONAGEMMA et al., 2011), e o índice de hidraulicidade [$(SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3)/(CaO+MgO)$] (BORGES MARINHO et al., 2017).

Para identificar os minerais existentes nos materiais analisados e misturas, foram realizados ensaios de difratometria de raios-X (DRX). O equipamento utilizado foi um Bruker D2 Phaser 2ª geração, com as seguintes configurações: radiação $CuK\alpha$, tensão de 40kV, intensidade de corrente de 40mA, faixa de varredura 2θ de 10-100°, tamanho de passo de 0,05° e velocidade

igual a $1^\circ / \text{min}$. Esses ensaios foram realizados nas amostras de solo no estado natural e nas misturas de solo- F_{EAF} e solo- F_{LF} com teor de 15% de finos em relação a massa seca dos solos, para um período de cura selada de 7, 28 e 56 dias, em câmara úmida.

Para auxiliar na identificação dos minerais presentes nas amostras de escórias de aciaria elétrica processadas, foram realizadas análises Termogravimétrica (TGA) e Termogravimetria Derivada (DTG) em pastas de F_{EAF} e F_{LF} , com uma relação água/finos de 0,30 (em massa) nas idades de 28 e 56 dias. Para esse fim, foi utilizado um dispositivo Shimadzu DTG-60H, e foram adotadas as seguintes condições: 5 mg de peso da amostra; Faixa de temperatura de 25 - 1000 $^\circ\text{C}$; Taxa de aquecimento de 10 $^\circ\text{C} / \text{min}$; e atmosfera inerte de N_2 (vazão de 50 mL/min).

As pastas de F_{EAF} e F_{LF} também foram submetidas a uma análise Raman. Um espectrômetro Renishaw em Via com laser He-Ne de 633 nm (1 mW) como fonte de excitação e lente objetiva 20 \times . O espectro coletado Raman foi de uma área escolhida aleatoriamente das pastas de F_{EAF} e F_{LF} . O software Fityk foi utilizado para executar o pós-processamento e correção da linha de base, conforme recomendado por Wojdyr (2010).

Para avaliar a microestrutura nas amostras de solo no estado natural e misturas solo- F_{EAF} e solo- F_{LF} com teor de 15% de finos de escória de aciaria elétrica, em relação a massa seca de solo, para um período de cura selada de 28 dias, em câmara úmida, foram executados ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As imagens foram obtidas usando um microscópio A JEOL's JSM-6010. As amostras foram fixas com a fita adesiva de carbono sobre o porta amostra de alumínio, e recobertas com ouro (material condutor).

4.2.4 Ensaios de compressão simples

Os ensaios para determinação da resistência à compressão simples (RCS) foram executados em corpos de prova das amostras de solo no estado natural e em misturas de solo com F_{EAF} e F_{LF} , conforme as especificações da norma técnica ABNT NBR 12025/2012c, com teor de 15% desses materiais, em relação à massa seca de solo. Os corpos de prova das misturas solo-escória de aciaria elétrica F_{EAF} ou F_{LF} passaram por períodos de cura selada de 7, 28 e 56 dias, em câmara úmida. Os corpos de prova foram moldados na energia de compactação do Proctor Normal, em suas respectivas umidades ótimas (W_{ot}).

4.2.5 Ensaio CBR

Os corpos de prova das amostras de solo no estado natural e das misturas solo com F_{EAF} e F_{LF} , com teores de 5% F_{EAF} e 10% F_{LF} , em relação à massa de solo, as quais apresentaram os melhores resultados para o ensaio de RCS, foram compactados nos respectivos pontos de ótimo da energia do Proctor Normal de acordo com a norma técnica DNIT ME 172/2016. Para cada tratamento foram moldados 3 corpos de prova, e para as misturas solo-5% F_{EAF} +10% F_{LF} , foram utilizados períodos de cura de 7, 28 e 56 dias, em câmara úmida.

4.2.6 Ensaio de módulo de resiliência

Os ensaios de módulo de resiliência (MR) das amostras de solos e das misturas solo -5% F_{EAF} + 10% F_{LF} foram realizados de acordo com a norma técnica DNIT ME 134/2018b, sendo moldados 3 corpos de prova para cada tratamento. Os corpos de prova foram moldados por processo dinâmico em 10 camadas iguais, considerando os seguintes limites: altura de $20 \pm 0,2$ cm; diâmetro de $10 \pm 0,2$ cm; umidade igual ao teor ótimo $\pm 0,5\%$; grau de compactação igual $100 \pm 0,5\%$. Os corpos de prova das amostras de solos no estado natural foram ensaiados logo após sua moldagem, e, para os corpos de prova das misturas das amostras de solo com 5% F_{EAF} e 10% F_{LF} , foi adotado o período de cura selada de 28 dias, em câmara úmida.

O modelo matemático utilizado nesta pesquisa para a representação do MR foi o modelo composto ou combinado, proposto por Pezo et al. (1992), que relacionou os valores dos MR com a tensão confinante (σ_3) e a tensão desvio (σ_d), sendo os coeficientes k_1 , k_2 e k_3 constantes experimentais (Equação 4.1).

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad \text{Equação 4.1}$$

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Caracterizações química, mineralógica e microestrutural

Os principais constituintes químicos das amostras dos solos 1 e 2 observados na análise de FRX (em óxidos) são apresentados, respectivamente, na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Caracterização química das amostras de solo 1 e 2.

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	K ₂ O	ZrO ₂	Outros
Solo 1 (%)	34,71	37,28	23,50	3,30	0,50	0,07	0,22	0,04	0,05	0,33
Solo 2 (%)	44,58	30,92	20,94	2,02	0,46	0,16	0,12	0,30	0,07	0,43

Os resultados apresentados na Tabela 4.3 mostraram que a amostra do solo 2, de característica mais arenosa tem uma quantidade maior de silício, promovido pela maior quantidade de quartzo, em consonância com a distribuição granulométrica desse material, uma vez que o quartzo, normalmente, encontra-se em sua totalidade nas fração areia e silte (RESENDE et al., 2011).

Através do resultado de FRX foi possível calcular o grau de intemperismo das amostras de solos analisadas através das relações moleculares K_i $[1,7(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)]$ e K_r $\{1,7[\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+0,6375\text{Fe}_2\text{O}_3)]\}$ (DONAGEMMA et al., 2011), cujos valores respectivamente, foram 1,58 e 1,13, para a amostra do solo 1, classificando-a como solo intemperizado caulinítico; e respectivamente, 2,45 e 1,71, para a amostra do solo 2; classificando-a como solo pouco intemperizado caulinítico. Esses resultados estão em concordância com as análises granulométricas, mostrando que o solo 1 com maior presença de finos apresenta um maior grau de intemperismo. Sendo então, esperado que no solo 1 exista uma maior cimentação natural das caulinitas pelos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, produzindo uma estrutura com aspecto de grúmulos (LATIFI et al., 2017).

Os referidos índices explicam o grau de intemperismo das amostras de solo analisadas, pois o silício (Si) tem maior mobilidade, em detrimento do ferro (Fe) e do alumínio (Al) que são de baixa mobilidade (MOLINA et al., 2019). Desta forma, quanto menores as relações moleculares K_i e K_r , maior será o grau de intemperismo do solo.

Os constituintes químicos dos finos de escória de aciaria elétrica (F_{EAF} e F_{LF}) observados na análise de FRX (em óxidos) são apresentados na Tabela 4.4.

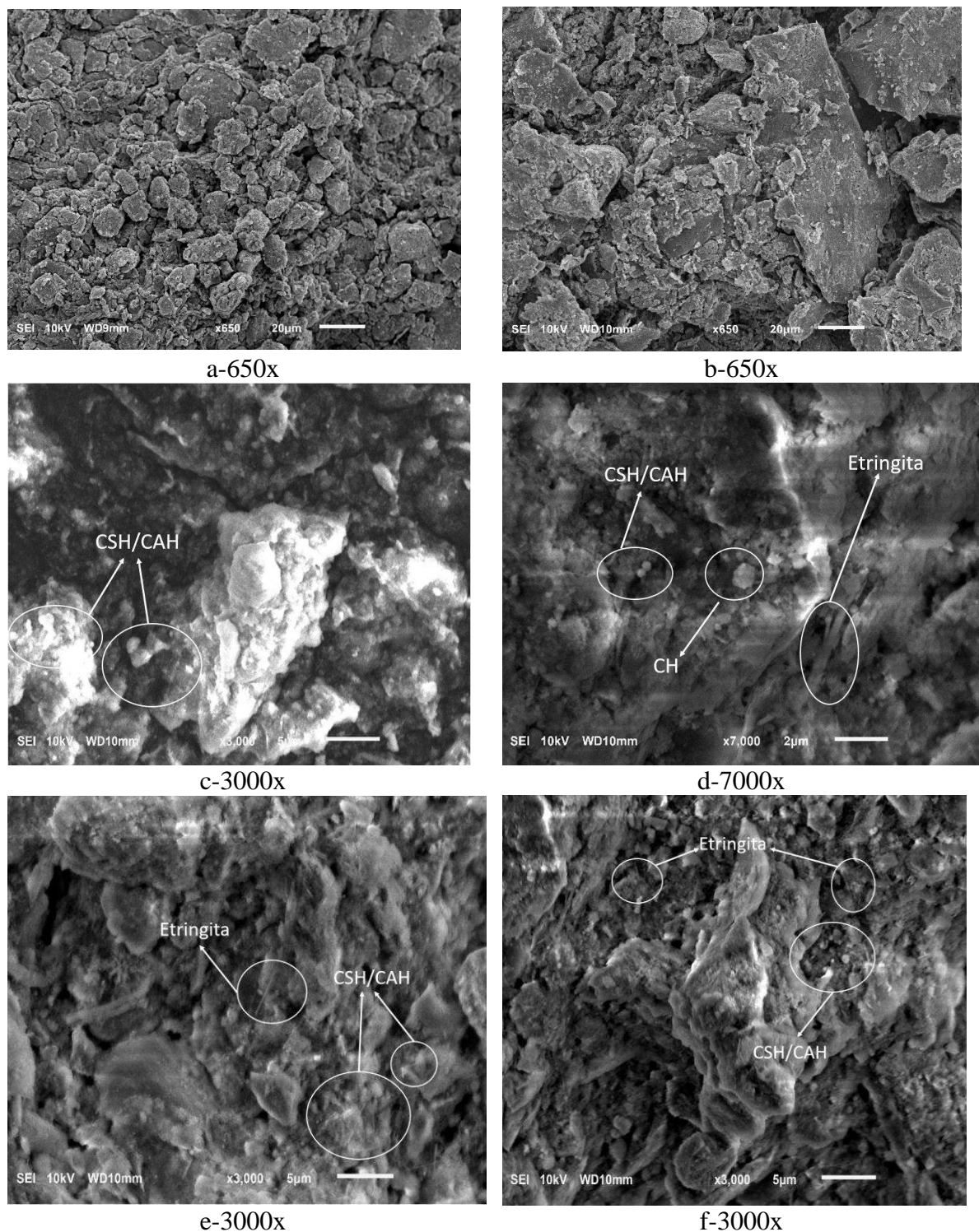
Tabela 4.4 - Caracterização química dos finos das escórias de aciaria elétrica - F_{EAF} e F_{LF} .

Óxidos	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	SO ₃	Cl	Cr ₂ O ₃
F_{EAF} (%)	40,62	11,76	3,66	32,17	2,76	6,25	0,58	0,21	0,04	1,57
F_{LF} (%)	50,24	14,86	16,26	6,84	3,58	1,25	0,87	1,22	0,16	0,27

Pelo resultado das análises de difração de raio X (FRX) apresentados na Tabela 4.4 foi possível calcular o índice de hidraulicidade $[(SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3)/(CaO+MgO)]$ para os finos das escórias de aciaria elétricas analisadas - F_{EAF} e F_{LF} , com valores, respectivamente, iguais a 1,10 e 0,70, classificando esse materiais como aglomerantes fortemente hidráulico (BORGES MARINHO et al., 2017). As propriedades aglomerantes desses finos são relatadas em vários trabalhos (MAHIEUX; AUBERT; ESCADEILLAS, 2009; PAPAYIANNI; ANASTASIOU, 2012; BELHADJ; DILIBERTO; LECOMTE, 2012; BORGES MARINHO et al., 2017; CARVALHO et al., 2017; GUO; BAO; WANG, 2018; SANTAMARIA et al., 2018; SILVA et al., 2019). No entanto, a presença dos óxidos CaO e MgO foram motivos de preocupação nas análises dos finos das amostras de escórias de aciaria elétrica - F_{EAF} e F_{LF} , uma vez que estes óxidos costumam ser instáveis na presença de água e os resultados das suas hidratações geram compostos expansivos (DINIZ et al., 2017). Os óxidos importantes para as reações de cimentação para estabilização de solos são: CaO, SiO₂ e Al₂O₃, para todos esses os F_{LF} apresentou os maiores teores. Essa diferença refletiu nos resultados dos ensaios mecânicos realizados, em que as misturas solo- F_{LF} com maiores teores desse material obtiveram maiores resistência mecânica para as duas amostras de solos analisadas.

As microestruturas das amostras de solos analisadas e misturas com F_{EAF} e F_{LF} foram apreciadas através das imagens de MEV apresentadas na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Ensaio de MEV para as amostras: (a) solo 1, (b) solo 2, (c) solo 1 + 15% F_{EAF} , (d) solo 2 + 15% F_{EAF} , (e) solo 1 + 15% F_{LF} e (f) solo 2 + 15% F_{LF} . Sendo o tempo de cura selada para as misturas de 28 dias.



Foi possível observar, na Figura 4.3 a, que a amostra do solo 1, de característica argilosa, apresentou uma estrutura mais compacta quando comparada à amostra do solo 2, Figura 4.3(b),

de característica mais arenosa, devido a um maior efeito de agregação das partículas argilosas por meio de uma matriz cimentante de óxidos de ferro e alumínio (WU et al., 2019). Para a amostra do solo 2, observou-se uma estrutura mais desordenada, que confere um arranjo estrutural com maior quantidade de poros, em função, principalmente, da estrutura mais lamelar dos minerais. Essa observação está em consonância com o grau de intemperismo dos solos calculado anteriormente.

As imagens de MEV das misturas solo- F_{EAF} e solo- F_{LF} , Figura 4.3 (c, d, e, f), mostraram estruturas de silicatos de cálcio hidratados (CSH), aluminatos de cálcio hidratados (CAH) e Etringita semelhantes às encontradas no estudo desenvolvido por Amini e Ghasemi (2019) e Wu et al. (2019). Todos os produtos de hidratação identificados por meio da avaliação visual da morfologia nas imagens MEV foram detectados na análise de DRX, apresentada em sequência. Esses produtos de hidratação gerados cobrem a superfície das partículas da amostra de solo, fortalecendo a ligação e também preenchendo os poros tornando-os mais compactados e, conseqüentemente, mais resistente aos esforços mecânicos. As mudanças nas estruturas das amostras de solos estabilizadas estão em consonância com os resultados obtidos nos ensaios mecânicos para determinação da resistência à compressão simples (RCS), índice CBR e módulo de resiliência (MR).

Assim como foi verificado por Amini e Ghasemi (2019) a morfologia do CSH é variável e depende do tipo de solo que está sendo estabilizado. Segundo esses autores, as diferenças refletem a relação Ca/Si do CSH produzido.

As fases cristalinas, determinadas por análise de difração de raio X (DRX), das amostras de solos e misturas solo- F_{EAF} e solo- F_{LF} , para o teor de 15% em relação a massa de solo, e períodos de cura selada de 7, 28 e 56 dias são apresentadas nas Figuras 4.4 e 4.5.

Figura 4.4 - Difratoformas da amostra do solo 1 (a e b) e misturas solo 1-F_{EAF} (a) e solo 1-F_{LF} (b).

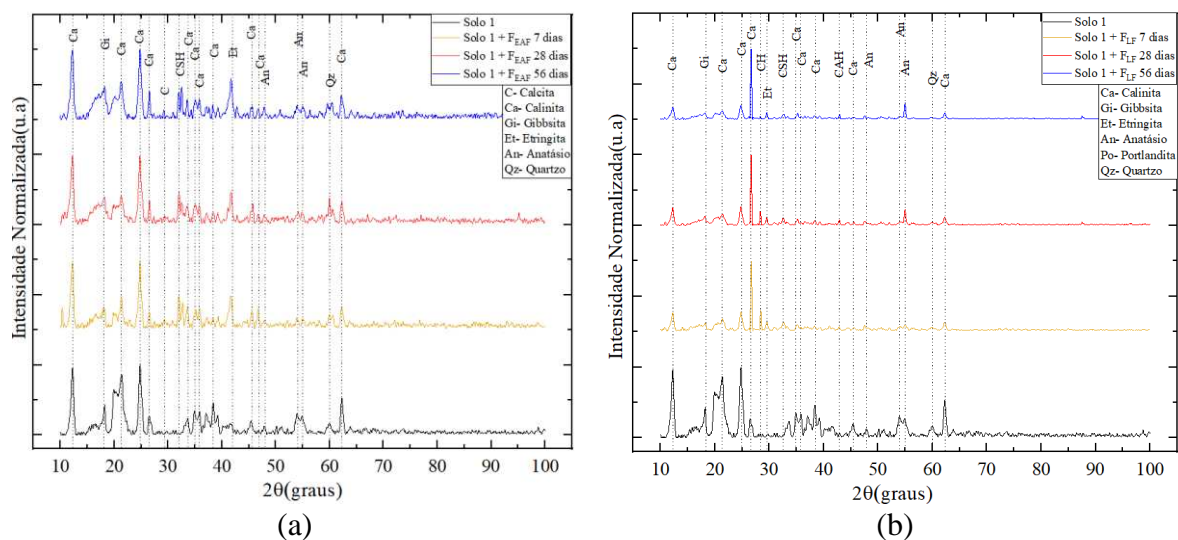
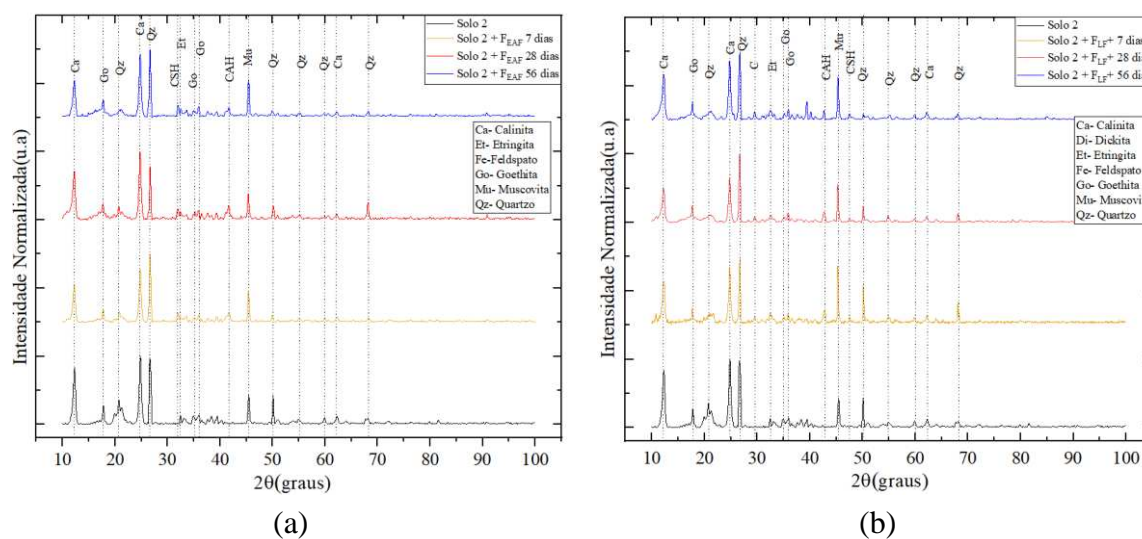


Figura 4.5 - Difratoformas da amostra do solo 2 (a e b) e das misturas solo 2 + F_{EAF} (a) e solo2+ F_{LF} (b).



Os principais minerais presentes na amostra do solo 1 incluíram a caulinita, gibbsita, anastásio e quartzo. Para a amostra do solo 2 os minerais identificados foram a caulinita, feldspato, goethita, muscovita e quartzo. A amostra do solo 2 apresentou características pedológicas de um solo de horizonte C com a presença de minerais ainda pouco intemperizados como o

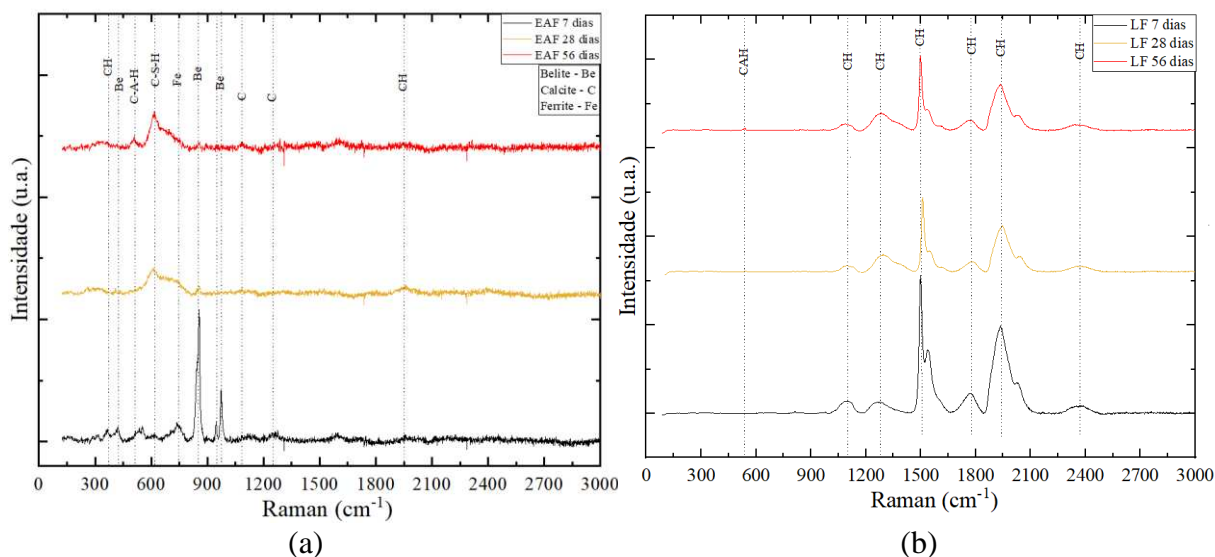
feldspato e a muscovita. A amostra do solo 1 teve características pedológicas de um solo de horizonte B, devido à sua granulometria e à presença de caulinita e gibbsita. O quartzo apareceu em ambas amostras de solos analisadas, devido a sua alta resistência ao intemperismo químico e graças à sua composição química e ao arranjo tridimensional de ligações fortes Si-O-Si (DONAGEMMA et al., 2011).

A presença da caulinita e da gibbsita nos solos é condicionada, principalmente, pelo conteúdo de sílica, oriunda da evolução pedogenética, conteúdo esse que torna mais reativos os solos constituídos por tais minerais (MARQUES DE CASTRO; SIQUEIRA VENDRAME; PINESE, 2014; YI et al., 2015; JIANG et al., 2018).

O declínio na intensidade do pico da caulinita e da gibbsita pela adição de finos de escória de aciaria elétrica F_{EAF} e F_{LF} pode ser atribuído à produção de materiais cimentícios e, conseqüentemente, de estruturas floculadas devido às reações de troca catiônica. Tais partículas agregadas exibiram intensidades reduzidas, devido à redução na reflexão do raio incidente em comparação com sua estrutura inicial, efeito que também foi observado por Salimi e Ghorbani (2020). Além disso, a ocorrência de reações pozolânicas pode ter modificado as frações de argila. Devido à reação pozolânica, o hidróxido de cálcio fornecido pelos finos de aciaria elétrica F_{EAF} e F_{LF} reagem com a sílica e a alumina livres nas partículas de argila e produzem compostos cimentícios, como CSH e CAH (Figura 4.4 e 4.5). Essas reações foram observadas, principalmente, na mistura com os F_{LF} , devido ao fato desse conter uma maior concentração de CH determinada nos ensaios de Raman (Figura 4.6).

A Figura 4.6 apresenta os espectros Raman registrados na pasta de F_{EAF} e F_{LF} após os períodos de cura de 7, 28 e 56 dias. As bandas atribuídas à Belite, Ferrite, Calcite, CH, CSH e CAH foram indicadas.

Figura 4.6 - Espectros Raman registrados nas pastas de finos de escórias de aciaria elétrica –

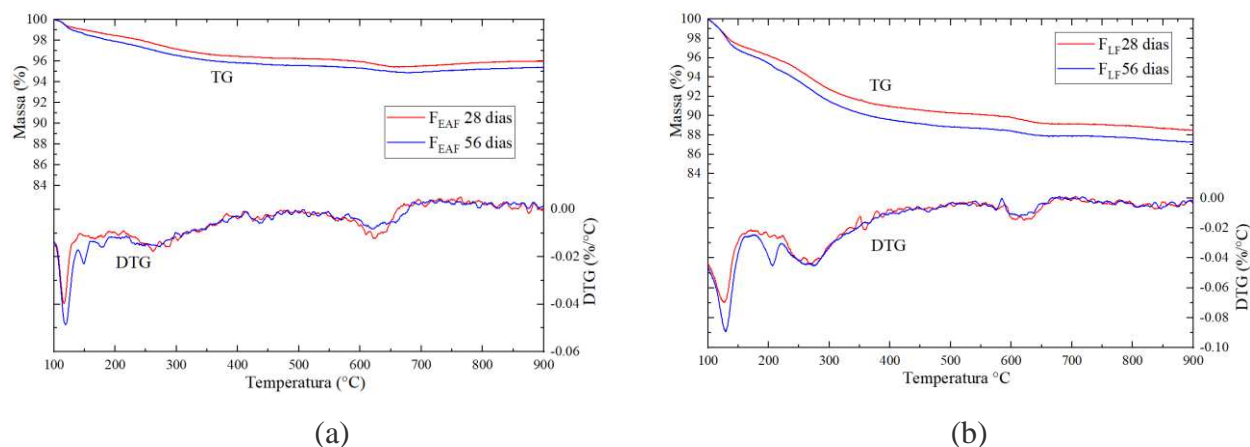
(a) F_{EAF} e (b) F_{LF} .

Assim como observado nas análises de DRX das misturas solos- F_{EAF} e solo- F_{LF} , nas pastas desses aglutinantes também foi possível identificar a formação de CAH e CSH. A formação desses produtos foi possível devido às reações pozolânicas promovidas pelo CH contido, principalmente, nos F_{LF} com a sílica e a alumina disponível. Além disso, é possível verificar que o CSH formado pelos F_{EAF} foi devido, principalmente, a hidratação da Belita (Figura 4.6).

O uso de aglutinantes com elevados teores de Belita não é a única forma de se obter uma pasta com grandes quantidades de CSH. As adições pozolânicas são capazes de converter o CH em CSH, melhorando a resistência mecânica. Essa reação química pode ser estimulada combinando solos que tenham altos teores de sílica e alumina disponíveis, solos esses que são caracterizados pelo grau de intemperismo elevado, como verificado anteriormente no solo 1, sendo então oportuno à utilização dos F_{LF} como aglutinantes em solos tropicais (SOARES et al., 2005; ROCHA; REZENDE, 2017;). As partículas de CSH são menores se comparadas com as de CH, sendo capazes de ocupar os vazios capilares dos solos, proporcionando um aumento na resistência e uma diminuição na permeabilidade (YI et al., 2015).

Os produtos de hidratação também foram identificados por análise Termogravimétrica (TGA) e Termogravimetria Derivada (DTG). As curvas TG e DTG típicas para as pastas de F_{EAF} e F_{LF} para períodos de cura de 28 e 56 dias são apresentados na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Análises TG e DTG de pastas de finos de escória de aciaria elétrica - (a) F_{EAF} e (b) F_{LF} .

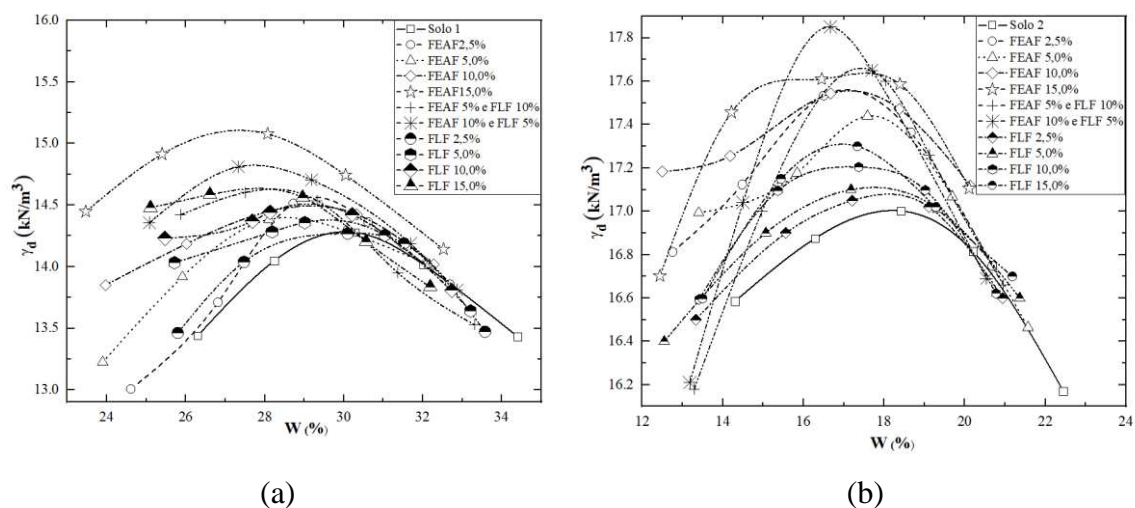


Com base nos picos DTG, a perda de massa foi dividida em três regiões representativas de três produtos de reação típicos: 100-400 °C, 400-500 °C e 500-900 °C. A perda de massa entre 100 e 400 °C representou a perda de água devido à desidratação de CSH e CAH, perda de massa entre 400 e 500 °C representou a perda de água devido à desidratação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e perda de massa entre 500 e 900 °C representou a perda de CO_2 devido à descarbonatação do CaCO_3 e o CAH que pode ter ocorrido um perda final de água ainda nesse intervalo de temperatura (MAHOUTIAN; GHOULEH; SHAO, 2014; SETIÉN; HERNÁNDEZ; GONZÁLEZ, 2009)

4.3.2 Ensaios de compactação

A Figura 4.8 apresenta as curvas de compactação na energia do Proctor Normal de corpos de provas das amostras de solos em seu estado natural e das misturas solos-finos de escórias de aciaria elétrica - F_{EAF} e F_{LF} .

Figura 4.8 - Curvas de compactação das amostras: (a) solos 1 e (b) solo 2 em seus estados naturais e respectivas misturas com ϕ s F_{EAF} e F_{LF}



Através dos resultados dos ensaios de compactação das misturas solos-finos de escórias de aciaria elétrica – F_{EAF} e F_{LF} , foi possível observar que, tanto para a amostra do solo 1 quanto para a do solo 2, houve aumentos consideráveis nos valores dos pesos específicos aparentes secos máximos ($\gamma_{dm\acute{a}x}$). Através dos resultados da análise granulométrica dos F_{EAF} e F_{LF} , foi possível verificar que cerca de 20% e 17%, respectivamente, em massa apresentaram diâmetros menores que $10 \mu\text{m}$ (Figura 1), porção de finos que acentuaram o efeito *filler*, atuando fisicamente como um material de preenchimento, proporcionando uma diminuição do volume de vazios entre os grãos e, conseqüentemente, um aumento do peso específico aparente seco máximo do material estabilizado (DINIZ et al., 2017). Essa maior quantidade de material fino abaixo de $10 \mu\text{m}$ junto com uma elevada massa específica dos grãos sólidos (Tabela 4.1), pode explicar os maiores valores de peso específico aparente seco máximo encontrados nas curvas de compactação das misturas com os F_{EAF} .

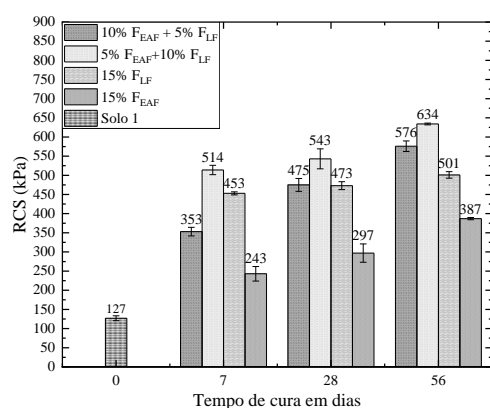
A ocorrência de reações de troca catiônica contribuiu para o efeito de compactação das misturas solos-finos de escórias de aciaria elétrica - F_{EAF} e F_{LF} e para a tendência de redução da umidade ótima observada, principalmente, para a amostra de solo 1. Os finos dos estabilizantes estudados, principalmente os F_{LF} , são ricos em CaO , e a fração fina dos solos proporciona, em curto prazo, a aglutinação entre as partículas, originando agregados de maiores tamanhos que, por sua vez, gera um solo com distribuição granulométrica de partículas maiores. Sendo assim,

o solo em mistura com os finos de escória passa a se comportar como um material mais granular, o que proporciona uma redução das exigências de umidade para se atingir um determinado arranjo estrutural, resultando também em um peso específico aparente seco maior (MOSA; TAHER; AL-JABERI, 2017; ONYELOWE, 2019).

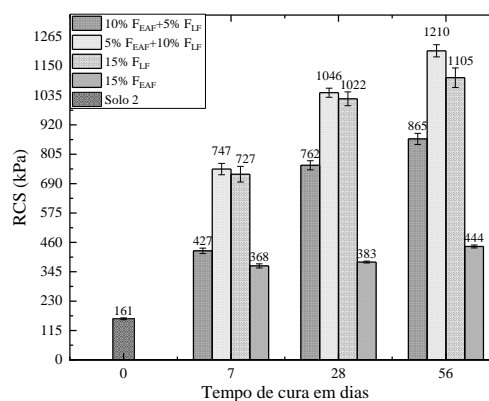
4.3.3 *Ensaio de compressão simples e CBR*

Os resultados dos ensaios para determinação da resistência à compressão simples (RCS) e CBR de corpos de prova moldados com as amostras de solos e as misturas solos-finos das escórias de aciaria - F_{EAF} e F_{LF} são apresentados na Figura 4.9. Os resultados dos ensaios de RCS e CBR representam ensaios realizados em corpos de prova com períodos de cura selada de 7, 28 e 56 dias, em câmara úmida.

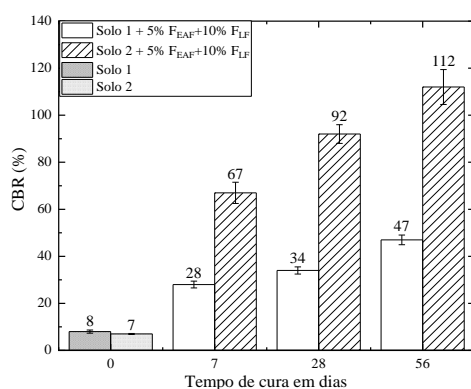
Figura 4.9 -Valores de resistência à compressão simples (RCS) de corpos de prova de amostras de solos e misturas com (a) F_{EAF} e (b) F_{LF} . CBR (c) e expansão CBR (b) para misturas solo-finos de escórias de aciaria elétrica, com teores 5% de F_{EAF} + 10% de F_{LF} .



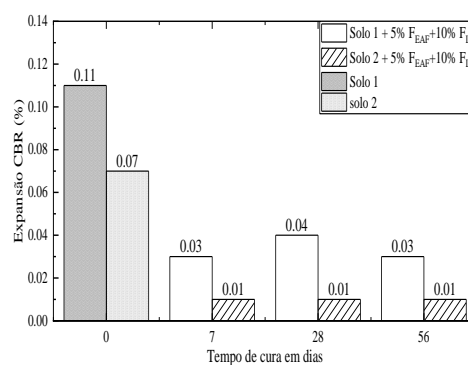
(a)



(b)



(c)



(d)

Os resultados dos ensaios de RCS e CBR para corpos de prova das amostras de misturas de solo-finos de escórias de aciaria elétrica – F_{EAF} e F_{LF} , curadas por períodos de 7, 28 e 56 dias, em câmara úmida, mostraram uma tendência crescente dos valores de resistência na presença dos F_{EAF} e F_{LF} (Figura 4.9). Com base nos estudos desenvolvidos por Abu-Farsakh et al. (2015); Ardah et al. (2017) e Londono-Zuluaga et al. (2017); e dos ensaios de caracterização química apresentados (DRX e FRX) e microestrutural (MEV) dos finos de escória de aciaria elétrica e das misturas desses com os solos analisados, tal comportamento pode ser explicado pelo desenvolvimento de reações de curto prazo, trocas catiônicas, e de longo prazo, reações pozolônicas, que se destacaram para os F_{LF} , e a hidratação da belita para os F_{EAF} (ABU-

FARSAKH; DHAKAL; CHEN, 2015; ARDAH; CHEN; ABU-FARSAKH, 2017; LONDONO-ZULUAGA et al., 2017).

Para as duas amostras de solos foi possível verificar que os corpos de prova da mistura que obteve maior valor de RCS foi a composta por teores de 10% de F_{LF} e 5% de F_{EAF} , com aumento de resistência a compressão simples na ordem de, aproximadamente, 400% e 651%, respectivamente, para as amostras de solo 1 e 2, para um período de cura selada de 56 dias.

Os resultados dos ensaios para determinação do CBR e a expansão CBR de corpos de prova das amostras das misturas solo-finos de escória de aciaria elétrica, com teores de 5% de F_{EAF} mais 10% de F_{LF} apresentaram acréscimos de resistência mecânica com o aumento do período de cura selada. Para a amostra de solo 1, foi possível observar um aumento no CBR, de um valor médio de 8% para a amostra de solo na condição natural para um valor médio de 47%. Os acréscimos apresentados nos valores médios do CBR da amostra de solo 2 foram ainda maiores, sendo índice CBR médio de 7% para corpos de prova da amostra de solo na condição natural, chegando ao valor médio de 112% para um período de cura selada de 56 dias em câmara úmida, representando um acréscimo na resistência ao puncionamento na ordem de, 487% e 1500%, respectivamente, para as amostras de solo 1 e 2.

Os finos F_{LF} se destacaram, promovendo maior resistência mecânica nas amostras de solos analisadas quando utilizados de forma individual ou quando consorciado com os finos F_{EAF} . Esses resultados podem ser explicados devido à grande quantidade de CH identificada nos finos F_{LF} e a maior concentração de CaO, Al_2O_3 e SiO_2 . A intensidade das reações pozolânicas que resultaram na formação de gel CSH e CAH dependeram diretamente da quantidade de CH disponível e da concentração de sílica e alumina (ROCHA; REZENDE, 2017; COUDERT et al., 2019; SALIMI; GHORBANI, 2020; WANG et al., 2020). Além disso, o sucesso da combinação entre os dois finos de escória de aciaria elétrica - F_{EAF} e F_{LF} analisados pode ser explicado através da consonância entre a melhor estabilização física (F_{EAF}), evidenciada nos ensaios de compactação através do efeito *filler*, com o melhor aglutinante químico (F_{LF}), destacado pela evidente presença de CH e pelas maiores quantidades de CaO, Al_2O_3 e SiO_2 .

Um fator importante observado tanto para o ensaio de RCS e para o índice CBR foi que independentemente do período de cura, o solo 1 (solo argiloso) sempre apresentou resistência

inferior ao solo 2 (solo arenoso) quando em misturas com os finos estudados. Isso pode ser atribuído às reações de cimentação associadas aos silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio formados. Em solos arenosos essas reações fornecem fortes pontes de contato entre a superfície dos agregados. Nos solos argilosos, por sua vez, não é possível uma ancoragem semelhante entre os grãos, devido ao pequeno tamanho das partículas de argila (ROCHA; REZENDE, 2017; SUGANYA; SIVAPULLAIAH, 2016).

A redução da expansibilidade observada na Figura 4.9 (d) em ambos os solos quando misturados com os finos estudados pode ser explicada pelas reações de cimentação discutidas anteriormente e pelas trocas catiônicas promovidas pelos cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} presentes nos F_{EAF} e F_{LF} . Esses cátions, promovem uma redução na dupla camada difusa dos argilominerais, permitindo uma maior aproximação e aglutinação das partículas de argila. Através desse processo, os solos têm suas propriedades coesivas reduzidas, sendo assim, passam a ter um comportamento geotécnico típico de material granular, havendo nestes uma redução de sua plasticidade e do seu grau de expansividade (AL-MUKHTAR; KHATTAB; ALCOVER, 2012; MANSO et al., 2013).

4.3.4 Ensaios de módulo de resiliência

Na Tabela 4.5, são apresentados os parâmetros do modelo composto adotado para a estimativa do módulo de resiliência a partir da tensão desvio (σ_d) e da tensão confinante (σ_3) para os Solos 1 e 2 e suas respectivas misturas com 15% de F_{EAF} , compactados na umidade ótima da energia Proctor Normal, aos 28 dias de cura.

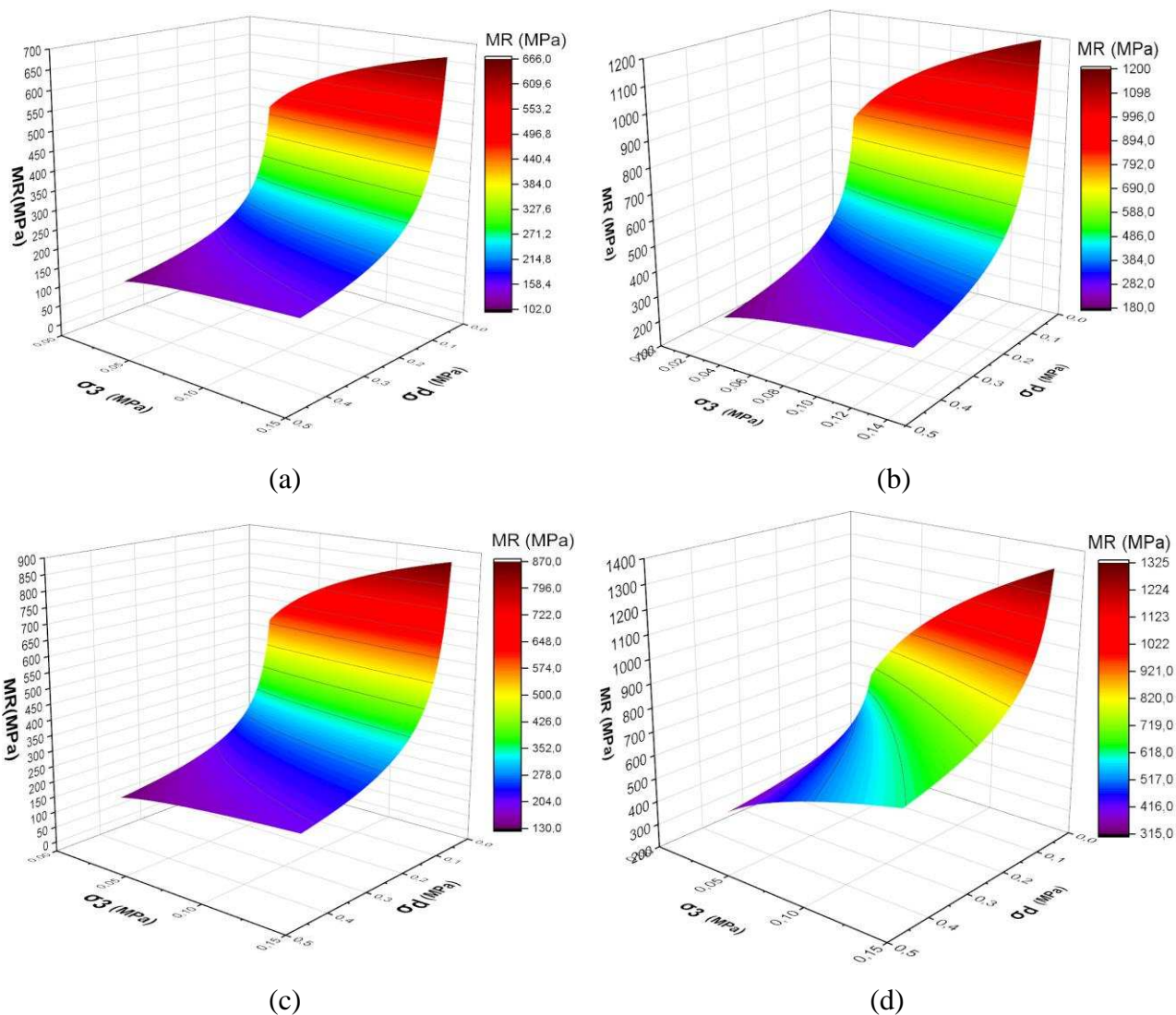
Tabela 4.5 - Valores dos parâmetros para o modelo composto (σ_d - σ_3), com os respectivos valores de R^2 para os solos e misturas aos 28 dias de cura.

Material	k_1	k_2	k_3	Modelo	R^2	MR (MPa)
Solo 1	138,948	0,190	-0,497	$\text{MR}=138,948\sigma_3^{0,190}\sigma_d^{-0,497}$	0,905	247 *
Solo 1+10% F_{LF} +5% F_{EAF}	288,873	0,228	-0,479	$\text{MR}=288,873\sigma_3^{0,228}\sigma_d^{-0,479}$	0,929	440 *
Solo 2	138,437	0,262	-0,584	$\text{MR}=138,437\sigma_3^{0,262}\sigma_d^{-0,584}$	0,944	242 *
Solo 2+10% F_{LF} +5% F_{EAF}	971,783	0,343	-0,253	$\text{MR}=971,783\sigma_3^{0,343}\sigma_d^{-0,253}$	0,837	623 *

*Valores de MR para os pares de tensões médios $\sigma_3= 0,05$ MPa e $\sigma_d = 0,100$ MPa

A Figura 4.10 apresenta os gráficos que expressam a influência das tensões σ_d e σ_3 sobre os valores de módulo de resiliência (MR) dos corpos de prova ensaiados na umidade ótica da energia Proctor Normal.

Figura 4.10 - Resultados de MR aos 28 dias de cura para o modelo composto (σ_d - σ_3): solo 1 (a); solo 1+10% F_{LF} +5% F_{EAF} (b); solo 2 (c); solo 2+10% F_{LF} +5% F_{EAF} (d).



Para fins de análise comparativa entres os solos estabilizados e no seu estado natural, adotou-se um par de tensões médios ($\sigma_3=0,05$ MPa e $\sigma_d=0,100$ MPa), que segundo Santos et al. (2019) é um possível estado de tensões atuante em subleitos rodoviários.

Os resultados obtidos revelam um aumento no valor do módulo de resiliência em função da adição da mistura de finos F_{EAF} e F_{LF} , para os dois solos estudados, aos 28 dias de cura (Tabela 4.5). Além disso, é possível verificar o comportamento elástico não linear dos solos e misturas nas superfícies irregulares da Figura 4.10. Essas superfícies foram geradas em função dos valores de módulo de resiliência a partir dos 18 estados de tensões estabelecidos segundo DNIT ME 134/2018b.

Os valores de MR mostram a tendência de crescimento com um aumento na tensão de confinamento (σ_3) e diminuição com aumento na tensão do desvio (σ_d) essa tendência também foi observada em alguns trabalhos de estabilização de solos (SANTOS et al., 2019; MAMATHA; DINESH, 2017; ROCHA; REZENDE, 2017). Segundo Mamatha e Dinesh (2017), os valores de MR crescem com o aumento do peso específico seco. Como verificado nos ensaios de compactação e na análise microestrutural, os F_{EAF} e F_{LF} promovem uma alteração no arranjo estrutural nas amostras de solos, os efeitos físicos e químicos dos finos provocam a ligação entre as partículas e o preenchimento dos vazios entre os grãos das misturas, proporcionando um maior intertravamento e conseqüentemente um aumento na rigidez e no MR das misturas compactadas.

Os principais processos químicos envolvidos na mudança da estrutura das amostras de solos analisadas que levaram ao aumento do MR foram: (i) a hidratação dos aluminatos e silicatos de cálcio, criando uma série de ligações entre as partículas dos solos; (ii) as trocas catiônicas, promovendo a floculação e a aglutinação das partículas de argila, potencializando a maior compacidade das misturas; e (iii) as reações pozolânicas, a estrutura dos argilominerais são quebradas e forma-se géis coloidais de silicato e aluminato de cálcio que possuem propriedades de cimentação semelhantes às do cimento *Portland* (MOSA; TAHER; AL-JABERI, 2017).

4.4 Conclusões

Diante dos resultados apresentados nesta pesquisa, pode-se concluir que:

- As amostras de solos analisadas apresentaram graus de intemperismo distintos. Isso se confirmou com a presença de minerais ainda pouco intemperizados no solo 2, como o feldspato e a muscovita, e a presença de minerais muito intemperizados no solo 1, como a caulinita e gibbsita.
- Os óxidos encontrados nos F_{EAF} e F_{LF} que são responsáveis pelas reações pozolânicas e de cimentação das misturas com os solos analisados foram o CaO , SiO_2 e Al_2O_3 , sendo que, para todos esses óxidos as porcentagens dos F_{LF} foram maiores.
- Os resultados das análises químicas, mineralógicas e microestruturais de ambos os finos estudados em forma de pasta e em mistura com os solos, mostram a presença de produtos de hidratação como: CSH, CAH, CH e Etringita. Esses produtos foram responsáveis pelo ganho de resistência mecânica observada nos ensaios de RCS, índice CBR e módulo de resiliência;
- O ganho de resistência mecânica de corpos de prova das misturas solo- F_{EAF+FL} com o decorrer do tempo período de cura é atribuído às reações pozolânicas e às reações de hidratação da belita ($\beta-C_2S$) encontrada principalmente nos F_{EAF} ;
- Nas misturas de solos analisadas como os F_{EAF} e F_{LF} houve aumento do peso específico aparente seco máximo. Esse aumento foi provocado devido a mudança no arranjo estrutural dos solos imediatamente após a compactação, atribuída ao efeito *filler* e as reações de troca catiônica;
- As misturas solo- F_{EAF+LF} apresentaram uma redução na Expansão CBR, proporcionada pela cimentação e flocculação dos argilominerais, que tornaram as misturas mais rígidas e menos coesivas, respectivamente;
- A modelagem do comportamento resiliente das misturas solo- F_{EAF+FL} e solos no seu estado natural segue uma tendência geral de crescimento com o aumento da pressão confinante (σ_3) e uma diminuição com o aumento da tensão desvio (σ_d).

Referências Bibliográficas

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 145-91**: Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. Washington, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **ABCP Estudo Técnico 35**: Dosagem das Misturas de Solo-Cimento - Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio. São Paulo, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12253**: Solo-cimento- Dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12023**: Solo-cimento - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12025**: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2012c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Ensaio de Compactação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2016.

ABU-FARSAKH, M.; DHAKAL, S.; CHEN, Q. Laboratory characterization of cementitiously treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading. **Soils and Foundations**, v. 55, n. 3, p. 504–516, jun. 2015.

AKINWUMI, I. Soil Modification by the Application of Steel Slag. **Periodica Polytechnica**

Civil Engineering, v. 58, n. 4, p. 371–377, 2014.

AL-MUKHTAR, M.; KHATTAB, S.; ALCOVER, J.-F. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. **Engineering Geology**, v. 139–140, p. 17–27, jun. 2012.

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

ARDAH, A.; CHEN, Q.; ABU-FARSAKH, M. Evaluating the performance of very weak subgrade soils treated/stabilized with cementitious materials for sustainable pavements. **Transportation Geotechnics**, v. 11, p. 107–119, jun. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2487-17**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). PensilvâniaASTM International, 2017.

BELHADJ, E.; DILIBERTO, C.; LECOMTE, A. Characterization and activation of Basic Oxygen Furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 1, p. 34–40, jan. 2012.

BORGES MARINHO, A. L. et al. Ladle Furnace Slag as Binder for Cement-Based Composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 11, p. 04017207, nov. 2017.

BRAND, A. S. et al. Stabilization of a Clayey Soil with Ladle Metallurgy Furnace Slag Fines. **Materials**, v. 13, n. 19, p. 4251, 24 set. 2020.

CARVALHO, S. Z. et al. The recycling effect of BOF slag in the portland cement properties. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 216–220, dez. 2017.

CHAMLING, P. K.; HALDAR, S.; PATRA, S. Physico-Chemical and Mechanical Characterization of Steel Slag as Railway Ballast. **Indian Geotechnical Journal**, v. 50, n. 2, p. 267–275, 20 abr. 2020.

COUDERT, E. et al. Use of alkali activated high-calcium fly ash binder for kaolin clay soil stabilisation: Physicochemical evolution. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 539–552, mar. 2019.

DA SILVA, M. J. et al. Feasibility Study of Steel Slag Aggregates in Precast Concrete Pavers. **ACI Materials Journal**, v. 113, n. 4, ago. 2016.

DINIZ, D. H. et al. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical Soil Stabilizer for Use in Roads. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 9, p. 04017118, set. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ME 172/2016**: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ES 142/2018**: Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2018a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ME 134/2018**: Pavimentação - Solos -Determinação do Módulo de Resiliência. Rio de Janeiro, 2018b.

DONAGEMMA, GUILHERME KANGUSSÚ, CAMPOS, DADID VILAS BOAS DE, CALDERANO, SEBASTIÃO BARREIROS, TEIXEIRA, WESCESLAU GERALDES, VIANA, J. H. M. Documentos 132 Manual de Métodos de. **Embrapa**, n. ISSN 1517-2627, p. 230, 2011.

DOS SANTOS, T. A. et al. Avaliação da resistência e da deformação resiliente de quatro solos de subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul. **TRANSPORTES**, v. 27, n. 1, p. 48–64, 30 abr. 2019.

GUO, J.; BAO, Y.; WANG, M. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. **Waste Management**, v. 78, p. 318–330, ago. 2018.

JIANG, Y. et al. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 187–197, set. 2018.

KAMBOLE, C. et al. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 618–631, set. 2017.

LATIFI, N. et al. Tropical residual soil stabilization: A powder form material for increasing soil strength. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 827–836, ago. 2017.

LONDONO-ZULUAGA, D. et al. Clinkering and hydration of belite-alite-ye'elinite cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p. 333–341, jul. 2017.

MAHIEUX, P.-Y.; AUBERT, J.-E.; ESCADEILLAS, G. Utilization of weathered basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic road binders. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 742–747, fev. 2009.

MAHOUTIAN, M.; GHOULEH, Z.; SHAO, Y. Carbon dioxide activated ladle slag binder. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 214–221, set. 2014.

MAMATHA, K. H.; DINESH, S. V. Resilient modulus of black cotton soil. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 10, n. 2, p. 171–184, mar. 2017.

MANSO, J. M. et al. The use of ladle furnace slag in soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 126–134, mar. 2013.

MARQUES DE CASTRO, P. H.; SIQUEIRA VENDRAME, P. R.; PINESE, J. P. P. Mineralogia da fração argila de solos localizados em ilhas no alto Rio Paraná, PR/MS. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 35, n. 2, p. 181, 30 out. 2014.

MOLINA, A. et al. Patterns in Soil Chemical Weathering Related to Topographic Gradients and Vegetation Structure in a High Andean Tropical Ecosystem. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 124, n. 2, p. 666–685, 27 fev. 2019.

MONTENEGRO-COOPER, J. M. et al. Study of the expansive behavior of ladle furnace slag and its mixture with low quality natural soils. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 201–209, abr. 2019.

MONTENEGRO, J. M. et al. Ladle Furnace Slag in the Construction of Embankments: Expansive Behavior. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 8, p. 972–979, ago. 2013.

MOSA, A. M.; TAHER, A. H.; AL-JABERI, L. A. Improvement of poor subgrade soils using cement kiln dust. **Case Studies in Construction Materials**, v. 7, p. 138–143, dez. 2017.

MOZEJKO, C. A.; FRANCISCA, F. M. Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 117901, abr. 2020.

NOGAMI, J. et al. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. 2nd. ed. São Paulo: [s.n.].

ONYELOWE, K. C. Review on the role of solid waste materials in soft soils reengineering. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 2, n. 1, p. 46–51, abr. 2019.

ORTEGA-LÓPEZ, V. et al. The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 455–464, out. 2014.

PAPAYIANNI, I.; ANASTASIOU, E. Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 3, p. 400–407, mar. 2012.

PASETTO, M.; BALDO, N. Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags. **Journal of Hazardous Materials**, v. 181, n. 1–3, p. 938–948, set. 2010.

PEZO, R. et al. **Development of a reliable resiliente modulus test for subgrade and non-**

granular subbase materials for use in routine pavement design. Austin, Texas: [s.n.].

PITANGA, H. N. et al. MCT CLASSIFICATION FOR COMPACTED MIXTURES OF SOIL-STEEL SLAG-FLY ASH FOR APPLICATION IN FOREST ROADS. **Revista Árvore**, v. 40, n. 5, p. 911–919, out. 2016.

RESENDE, M. et al. **Mineralogia de solos brasileiros: Interpretação e aplicações.** [s.l: s.n.].

ROCHA, M. T.; REZENDE, L. R. DE. Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 4, 2 out. 2017.

ROHDE, L.; NUNEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P. Escória de aciaria elétrica: uma alternativa aos materiais granulares tradicionais. **TRANSPORTES**, v. 11, n. 1, 2 jul. 2003.

ROHDE, L.; PERES NÚÑEZ, W.; AUGUSTO PEREIRA CERATTI, J. Electric Arc Furnace Steel Slag: Base Material for Low-Volume Roads. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1819, n. 1, p. 201–207, jan. 2003.

SALIMI, M.; GHORBANI, A. Mechanical and compressibility characteristics of a soft clay stabilized by slag-based mixtures and geopolymers. **Applied Clay Science**, v. 184, p. 105390, jan. 2020.

SANTAMARIA, A. et al. Dimensional stability of electric arc furnace slag in civil engineering applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 205, p. 599–609, dez. 2018.

SAXENA, S.; TEMBHURKAR, A. R. Microbiological Induced Calcium Carbonate Process to Enhance the Properties of Cement Mortar. **Materials Today: Proceedings**, v. 21, p. 1350–1354, 2020.

SETIÉN, J.; HERNÁNDEZ, D.; GONZÁLEZ, J. J. Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p. 1788–1794, maio 2009.

SHEHATA, H. A. M. J. M. M. H. **Recent Thoughts in Geoenvironmental Engineering**. Cham: Springer International Publishing, 2020.

SILVA, T. O. DA et al. Use of steel waste for the application in urban paving. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 41, n. 1, p. 37596, 12 mar. 2019.

SKAF, M. et al. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 120, p. 176–185, maio 2017.

SOARES, M. R. et al. Mineralogy and ion exchange properties of the particle size fractions of some Brazilian soils in tropical humid areas. **Geoderma**, v. 125, n. 3–4, p. 355–367, abr. 2005.

SUGANYA, K.; SIVAPULLAIAH, P. V. Role of Sodium Silicate Additive in Cement-Treated Kuttanad Soil. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 6, p. 06016006, jun. 2016.

WANG, Y. et al. Changes of small strain shear modulus and suction for a lime-treated silt during curing. **Géotechnique**, v. 70, n. 3, p. 276–280, mar. 2020.

WOJDYR, M. Fityk: a general-purpose peak fitting program. **Journal of Applied Crystallography**, v. 43, n. 5, p. 1126–1128, 1 out. 2010.

WU, J. et al. Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways. **Soils and Foundations**, v. 59, n. 4, p. 955–965, ago. 2019.

XU, B.; YI, Y. Soft clay stabilization using ladle slag-ground granulated blastfurnace slag blend. **Applied Clay Science**, v. 178, p. 105136, set. 2019.

XU, F. et al. Experimental investigation on replacing cement by sintered limestone ash from the steelmaking industry for cement-stabilized soil: Engineering performances and micro-scale analysis. **Construction and Building Materials**, v. 235, p. 117425, fev. 2020.

YI, Y. et al. Comparison of reactive magnesia- and carbide slag-activated ground granulated blastfurnace slag and Portland cement for stabilisation of a natural soil. **Applied Clay Science**, v. 111, p. 21–26, jul. 2015.

YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag. **Advances in Civil Engineering**, v. 2011, p. 1–13, 2011.

5. CONCLUSÕES GERAIS

Constatou-se que o uso de finos de escórias de aciaria elétrica oxidante F_{EAF} e redutora F_{LF} na estabilização das amostras de solos tropicais analisada foi uma solução técnica viável, sob a perspectiva de aplicação em obras de pavimentação e de terra. Esses materiais foram capazes de melhorar as propriedades de engenharia dos solos estudados, criando uma alternativa de uso, apontando para a possibilidade de redução dos desperdícios na siderurgia mediante a utilização desse subproduto.

Os resultados experimentais indicaram que os F_{EAF} estabilizaram com sucesso os solos analisados, com destaque para um aumento de 30% e 42% nos valores de módulo de resiliência para as amostras de solo argiloso e arenoso, respectivamente. Além disso, os F_{EAF} em misturas com as amostras de solos estudadas, aumentou o peso específico aparente seco máximo e reduziu a umidade ótima. Essas mudanças foram proporcionadas, principalmente, pelo efeito de empacotamento realizado pelos F_{EAF} e a sua capacidade de promover a floculação dos argilominerais através dos mecanismos de troca catiônica.

Os F_{LF} também estabilizaram com sucesso os solos estudados, com destaque para aumentos nos valores de CBR de 8% para 44% para a amostra de solo 1 e de 7% para 140% para a amostra de solo 2, além de reduções de expansibilidade e melhora no comportamento resiliente das amostras de solos estudadas. O aumento no módulo resiliente proporcionou aos solos estudados uma maior rigidez, possibilitando o uso desses materiais em camadas de base e reforço de subleito, conferindo ao pavimento asfáltico analisado uma maior vida de fadiga.

Os ensaios químicos e microestruturais possibilitaram a identificação dos principais produtos de hidratação dos solos estabilizados com os F_{EAF} e F_{LF} : Silicatos de Cálcio Hidratados (CSH), Aluminatos de Cálcio Hidratados (CAH), Hidróxido de cálcio (CH) e Etringita. Ao ligarem as partículas das amostras de solo e preencherem os vazios na estrutura porosa, estes produtos de hidratação proporcionaram a obtenção de uma matriz de solo mais rígida e densa, que

consequentemente, promoveu a melhora nas propriedades de engenharia das amostras de solos analisadas.