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

LUCAS OLIVEIRA BRIDI

ESTUDO DO EFEITO DA ESTABILIZAÇÃO COM COPRODUTO DE DESSULFURAÇÃO KR SOB AS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E QUÍMICAS DE SOLOS COM DIFERENTES TEORES DE FINOS

LUCAS OLIVEIRA BRIDI

ESTUDO DO EFEITO DA ESTABILIZAÇÃO COM COPRODUTO DE DESSULFURAÇÃO KR SOB AS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E QUÍMICAS DE SOLOS COM DIFERENTES TEORES DE FINOS

Dissertação de Mestrado а ser apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Mestre Engenharia Civil na área de concentração Estruturas.

Orientador: Professor D.Sc. Patrício José

Moreira Pires.

Coorientadora: Professora Ph.D. Jamilla

Emi Sudo Lutif Teixeira.

VITÓRIA – ES 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

ESTUDO DO EFEITO DA ESTABILIZAÇÃO COM COPRODUTO DE DESSULFURAÇÃO KR SOB AS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E QUÍMICAS DE SOLOS COM DIFERENTES TEORES DE FINOS

Lucas Oliveira Bridi

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas.

Aprovada no dia 14 de fevereiro de 2020 por:

Prof. Dr. Fatricio José Moreira Pires Doutor em Engenharia Civil

Orientador - UFES

Profa. Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira

Doutora em Engenharia Civil Coorienadora – UFES

1 min

Prof. Dr. João Luiz Camon Nogueira da Gama

Doutor em Engenharia Civil

Examinador Interno - Ul

Profa. Dra Lilian Ribeiro de Rezende Doutora em Geotecnia

Examinadora Externa - UFG

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

Oliveira Bridi, Lucas, 1994-

O48e

Estudo do efeito da estabilização com coproduto de dessulfuração KR sob as propriedades físicas, mecânicas e químicas de solos com diferentes teores de finos / Lucas Oliveira Bridi. - 2020.

139 f.: il.

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

1. Escória. 2. Solos. I. Moreira Pires, Patrício José. II. Emi Sudo Lutif Teixeira, Jamilla. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reações de dessulfuração	22
Figura 2 – Kambara Reactor.	22
Figura 3 – Estrutura interna do tetraedro de sílica e octaedro de alumina	23
Figura 4 – Camada de Stern e Camada Difusa (sem escala)	25
Figura 5 – Esquema de estrutura solo-cimento (sem escala)	31
Figura 6 – Cimento neo-formado	31
Figura 7 – Esquema de estrutura solo-cal (sem escala)	33
Figura 8 – Esquema de estrutura interna da escória (sem escala)	35
Figura 9 – Esquemas da estrutura de CSH em função da relação C/S (sen	n escala).
	36
Figura 10 – Resultados obtidos por Moratti e Scotá (2016) e Moura e Araú	jo (2017).
	39
Figura 11 – Resultados obtidos por Netto e Nakamura (2016)	40
Figura 12 – Resultados obtidos por Oliveira (2018) e Furieri (2019)	41
Figura 13 – Materiais	44
Figura 14 – Composição dos materiais	45
Figura 15 – Compactador automático	51
Figura 16 – Imersão em água	51
Figura 17 – Curvas Granulométricas das amostras	57
Figura 18 – Módulo de Finura das amostras	58
Figura 19 – Relação Arcabouço-Matriz das amostras	59
Figura 20 – Equivalente de Areia das amostras	61
Figura 21 – Grau de Floculação.	62
Figura 22 – Teor de Matéria Orgânica das amostras	63
Figura 23 – Massa Específica Real dos Grãos das amostras	64
Figura 24 – Limites de Consistência.	65
Figura 25 – Atividade das amostras	66
Figura 26 – Ábaco de Casagrande SUCS	67
Figura 27 – Ábaco MCT	69
Figura 28 – Umidade Ótima das amostras	71
Figura 29 – Massa Específica Aparente Seca Máxima das amostras	71

Figura 30 - ISC das amostras na umidade ótima após 4 dias de imersão e após 28
dias de cura e 4 dias de imersão72
Figura 31 – Expansão das amostras na Umidade Ótima74
Figura 32 – Expansibilidade das amostras74
Figura 33 – Potencial Hidrogeniônico das amostras
Figura 34 – TGA da amostra Sa10088
Figura 35 – DTG da amostra Sa10088
Figura 36 – TGA da amostra KR10089
Figura 37 – DTG da amostra KR10089
Figura 38 – DRX da amostra A10092
Figura 39 – DRX da amostra Sa10092
Figura 40 – DRX da amostra KR10092
Figura 41 – DRX da amostra Sa80+KR2093
Figura 42 – DRX da amostra Sb80+KR2093
Figura 43 – DRX da amostra Sc80+KR2094
Figura 45 – DRX da amostra Sa80+KR20 28d94
Figura 46 – DRX da amostra Sb80+KR20 28d95
Figura 47 – DRX da amostra Sc80+KR20 28d95
Figura 48 – MEV da amostra A10099
Figura 49 – MEV da amostra Sa100
Figura 50 – MEV da amostra KR100101
Figura 51 – MEV da amostra Sa100 compactada após 4 dias de imersão102
Figura 52 – MEV da amostra Sb100 compactada após 4 dias de imersão103
Figura 53 – MEV da amostra Sc100 compactada após 4 dias de imersão104
Figura 54 – MEV da amostra Sa80+KR20 compactada após 4 dias de imersão105
Figura 55 – MEV da amostra Sb80+KR20 compactada após 4 dias de imersão106
Figura 56 – MEV da amostra Sc80+KR20 compactada após 4 dias de imersão107
Figura 57 – MEV da amostra Sa80+KR20 compactada após 28 dias de cura e 4 dias
de imersão
Figura 58 – MEV da amostra Sb80+KR20 compactada após 28 dias de cura e 4 dias
de imersão109
Figura 59 – MEV da amostra Sc80+KR20 compactada após 28 dias de cura e 4 dias
de imersão110

Figura 60 – Modelo de interação solo-KR (sem escala)111
Figura 61 – Curva Mini-MCV da amostra Sa100126
Figura 62 – Curva de Compactação da amostra Sa100126
Figura 63 – Curva de Compactação da amostra Sb100127
Figura 64 – Curva de Compactação da amostra Sc100128
Figura 65 – Curva de Compactação da amostra Sa100 após 4 dias de imersão129
Figura 66 – Curva de Compactação da amostra Sb100 após 4 dias de imersão129
Figura 67 – Curva de Compactação da amostra Sc100 após 4 dias de imersão130
Figura 68 – Curva de Compactação da amostra Sa80+KR20 após 4 dias de imersão
Figura 69 – Curva de Compactação da amostra Sb80+KR20 após 4 dias de imersão
Figura 70 – Curva de Compactação da amostra Sc80+KR20 após 4 dias de imersão.
Figura 71 – Curva Pressão x Penetração da amostra Sa100 após 4 dias de imersão.
Figura 72 – Curva de Índice de Suporte Califórnia da amostra Sa100 após 4 dias de imersão
Figura 73 – Curva Pressão x Penetração da amostra Sb100 após 4 dias de imersão.
Figura 74 – Curva de Índice de Suporte Califórnia da amostra Sb100 após 4 dias de imersão
Figura 75 – Curva Pressão x Penetração da amostra Sc100 após 4 dias de imersão.
Figura 76 – Curva de Índice de Suporte Califórnia da amostra Sc100 após 4 dias de
imersão134
Figura 77 - Curva Pressão x Penetração da amostra Sa80+KR20 após 4 dias de
imersão135
Figura 78 – Curva de Índice de Suporte Califórnia da amostra Sa80+KR20 após 4 dias
de imersão135
Figura 79 - Curva Pressão x Penetração da amostra Sb80+KR20 após 4 dias de
imersão136

Figura 80 – Curva de Índice de Suporte Califórnia da amostra Sb80+KR20 após 4 dias
de imersão136
Figura 81 – Curva Pressão x Penetração da amostra Sc80+KR20 após 4 dias de
imersão137
Figura 82 – Curva de Índice de Suporte Califórnia da amostra Sc80+KR20 após 4 dias
de imersão137
Figura 83 – Curva de Expansão da amostra Sa100 após 4 dias de imersão138
Figura 84 – Curva de Expansão da amostra Sb100 após 4 dias de imersão138
Figura 85 – Expansão da amostra Sc100 após 4 dias de imersão139
Figura 86 – Curva de Expansão da amostra Sa80+KR20 após 4 dias de imersão. 139
Figura 87 – Curva de Expansão da amostra Sb80+KR20 após 4 dias de imersão. 140
Figura 88 – Curva de Expansão da amostra Sc80+KR20 após 4 dias de imersão. 140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química expressa em óxidos por FRX de escórias siderúrgicas
provenientes da ArcelorMittal Tubarão, Vitória – ES34
Tabela 2 – Caracterização Física dos solos investigados por Oliveira (2018) e Furier
(2019)42
Tabela 3 – Caracterização Física45
Tabela 4 – Caracterização Mecânica46
Tabela 5 – Caracterização Química46
Tabela 6 – Granulometria das amostras58
Tabela 7 – Classificação SUCS das amostras67
Tabela 8 – Classificação AASHTO das amostras68
Tabela 9 – Classificação MCT das amostras69
Tabela 10 – Especificações da norma ES 141/10 do DNIT (2010) para solos utilizados
em bases estabilizadas granulometricamente e resultados das amostras76
Tabela 11 – Especificações da norma ES 098/07 do DNIT (2010) para solos lateríticos
utilizados em bases estabilizadas granulometricamente e resultados das amostras
77
Tabela 12 – Especificações da norma ES 139/10 do DNIT (2010) para solos utilizados
em sub-bases estabilizadas granulometricamente e resultados das amostras77
Tabela 13 – Especificações da norma ES 139/10 do DNIT (2010) para solos lateríticos
utilizados em sub-bases estabilizadas granulometricamente e resultados das
amostras78
Tabela 14 – Reação ao Ácido Clorídrico das amostras79
Tabela 15 – Análise Química de Complexo Sortivo das amostras82
Tabela 16 – Análise Química de Complexo Sortivo das amostras83
Tabela 17 – EDS das amostras85
Tabela 18 – FRX das amostras86
Tabela 19 – Estimativa de compostos a partir do TGA da amostra KR10090
Tabela 20 – Quantificação de fases das amostras96

LISTA DE SIGLAS

AASHTO American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM American Society for Testing and Materials

COD Crystallography Open Database

CP Cimento Portland

CPR Centro de Pesquisas Rodoviárias
CTC Capacidade de Troca de Cátions

DER Departamento de Estradas de Rodagem

DNER Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DRX Difratometria de de Raios-X

DTG Differential Thermal Gravimetric

EDS Espectroscopia por Energia Dispersiva

EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FRX Fluorescência de Raios-X

IAB Instituto Aço Brasil

IP Índice de Plasticidade

ISC Índice de Suporte Califórnia

KR Kambara Reactor

LAMES Laboratório de Mecânica dos Solos

LC Limite de Contração

LD Linz-Donawitz

LL Limite de Liquidez

LP Limite de Plasticidade

MCT Tropical Compact Miniature

MEV Microscopia Eletrônica de Varredura

MPT Metallurgical Plant and Technology

NCHRP National Cooperative Highway Research Program

pH Potencial Hidrogeniônico

SUCS Sistema Unificado de Classificação dos Solos

TGA Thermal Gravimetric Analysis

AGRADECIMENTOS

À Deus, primeiramente, pela oportunidade de participar de um programa de mestrado, e pelas tantas outras oportunidades que me concedeu e me concederá a partir desta, além é claro, por ter estado ao meu lado em cada instante desse percurso.

À minha família, em especial, meus pais, Santa Aparecida de Oliveira e Amauri José Bridi, pelos exemplos de força, coragem, determinação e luta, que me inspiraram e me incentivaram a prosseguir até o fim.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), pelos esforços em prol da pesquisa e do crescimento acadêmico da instituição, e em especial, aos professores Patrício José Moreira Pires e Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira, pela orientação eficiente e segura, pelas valiosas sugestões e estímulos.

Aos servidores, professores, técnicos, monitores e alunos do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFES, pela assistência prestada, sempre comprometidos em atender de forma qualificada seus usuários.

Aos colegas de classe e de pesquisa, pelos momentos de compartilhamento de conhecimentos, expectativas, sucessos e frustrações.

Aos demais amigos, por se manterem fiéis inabalavelmente à lealdade, sinceridade e confidência, princípios que construíram nossas amizades.

À empresa ArcelorMittal Tubarão, pelo apoio financeiro indispensável para desenvolvimento do projeto de pesquisa, e à Fundação Espírito-santense de Tecnologia (FEST) pela respectiva gestão do projeto.

RESUMO

A escória de aciaria originada no reator Kambara é um coproduto do processo de dessulfuração do ferro fundido, que após beneficiamento, tem se mostrado eficiente estabilizante de solos, conforme literatura técnico-científica e recentes experiências nacionais na engenharia geotécnica e de pavimentação, sobretudo na estabilização de solos. Há ainda, no entanto, certa deficiência no conhecimento em torno das questões relacionadas aos mecanismos de estabilização, e de como estes mecanismos agem em diferentes cenários de interação solo-KR, distintos sobretudo em função da granulometria dos solos, ou mais especificamente, em função do seu teor de finos. Complementarmente, no aporte à essa deficiência, este trabalho caracterizara fisicamente, mecanicamente e quimicamente misturas solo-KR, distintas em função do teor de finos do solo (56,6%, 42,7% e 28,9%, respectivamente). Da análise granulométrica, observou-se que o coproduto de dessulfuração KR tem seu efeito mais expressivo restrito às faixas granulométricas mais grossas, de pedregulho fino e pedregulho médio. Da análise do grau de floculação, não se constataram modificações apreciáveis, uma vez que estes solos, de formação laterítica, segundo classificação MCT, já se apresentavam com a faixa granulométrica argila totalmente floculada. Da análise de complexo sortivo, observou-se que Ca²⁺ é o principal cátion trocável (99,3%). Nesta concepção, quanto maior o valor da CTC dos solos, maiores seriam a promoção e a manutenção das trocas catiônicas orientadas por Ca²⁺. Da análise microscópica, identificou-se a formação de estruturas preenchendo lacunas e unindo grãos adjacentes, possivelmente oriundas de reações de hidratação, transformações estas também sinalizadas na análise da mineralogia em diferentes idades. Conclui-se então que a estabilização, de natureza química, de se dá principalmente por mecanismos de trocas catiônicas e de reações de hidratação, sendo imprescindível a presença de argilominerais das frações mais finas, reforçando a importância da granulometria dos solos na eficiência da técnica de estabilização de solos com coproduto de dessulfuração KR.

Palavras chave: Escória de dessulfuração; Estabilização de solos; Teor de finos.

ABSTRACT

The steel slag originated in the Kambara reactor is a co-product of the molten iron desulfurization process, which, after beneficiation, has been shown to be an efficient soil stabilizer, according to technical-scientific literature and recent national experiences in geotechnical and paving engineering, especially in stabilization of soils. There is, however, still a certain deficiency in the knowledge around the issues related to the stabilization mechanisms, and how these mechanisms act in different scenarios of soil-KR interaction, different mainly due to the soil granulometry, or more specifically, depending on of its fine content. Complementarily, in the contribution to this deficiency, this work will characterize physically, mechanically and chemically soil-KR mixtures, different according to the soil fines content (56.6%, 42.7% and 28.9%, respectively). From the granulometric analysis, it was observed that the desulfurization by-product KR has its most expressive effect restricted to the thickest granulometric bands, with fine gravel and medium gravel. In the analysis of the degree of flocculation, there were no appreciable changes, since these soils, of lateritic formation, according to the MCT classification, already had the full flocculated clay size range. From the analysis of the assortment complex, it was observed that Ca2+ is the main exchangeable cation (99.3%). In this conception, the higher the CTC value of the soils, the greater the promotion and maintenance of the cationic exchanges guided by Ca2+. From the microscopic analysis, the formation of structures was identified, filling gaps and joining adjacent grains, possibly originating from hydration reactions, transformations also signaled in the analysis of mineralogy at different ages. It is concluded that the chemical stabilization occurs mainly through mechanisms of cationic exchange and hydration reactions, with the presence of clay minerals of the finer fractions being essential, reinforcing the importance of soil granulometry in the efficiency of the soil stabilization with KR desulfurization by-product technique.

Keywords: Desulphurization slag; Soil stabilization; Fine content.

SUMÁRIO

1. INTRO	DDUÇÃO	16
1.1.	OBJETIVOS	18
1.1.1.	Objetivo Geral	18
1.1.2.	Objetivos Específicos	19
1.2.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2. REFE	RENCIAL TEÓRICO	20
2.1.	SIDERURGIA DE PRÉ-TRATAMENTO	20
2.2.	MICROESTRUTURA DOS SOLOS	22
2.3.	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	26
2.3.1.	Estabilização Granulométrica	26
2.3.2.	Estabilização por Compactação	26
2.3.3.	Estabilização com Polímero	27
2.3.4.	Estabilização com Cimento	28
2.3.5.	Estabilização com Cal	31
2.3.6.	Estabilização com Agregados Siderúrgicos	33
3. MATE	RIAIS E MÉTODOS	43
3.1.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	47
3.1.1.	Granulometria por Peneiramento e Sedimentação	47
3.1.2.	Equivalente de Areia	48
3.1.3.	Grau de Floculação	48
3.1.4.	Massa Específica Real dos Grãos	48
3.1.5.	Teor de Matéria Orgânica	49
3.1.6.	Limites de Consistência	49
3.2.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	50
3.2.1.	Curva de Compactação	50
3.2.2.	Índice de Suporte Califórnia (ISC)	51

	3.2.3.	Expansão	52
	3.2.4.	Expansibilidade	52
;	3.3.	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	52
	3.3.1.	Reação ao Ácido Clorídrico (HCI)	52
	3.3.2.	Potencial Hidrogeniônico (pH)	53
	3.3.3.	Análise Química de Complexo Sortivo	53
	3.3.4.	Espectroscopia de Raios-X por Energia Dispersiva (EDS)	54
	3.3.5.	Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)	55
	3.3.6.	Análise Termogravimétrica (TGA)	55
	3.3.7.	Difratometria de Raios-X (DRX)	56
	3.3.8.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	56
4.	RESUL	.TADOS	57
4	4.1.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	57
	4.1.1.	Granulometria por Peneiramento e Sedimentação	57
	4.1.2.	Equivalente de Areia	61
	4.1.3.	Grau de Floculação	61
	4.1.4.	Teor de Matéria Orgânica	62
	4.1.5.	Massa Específica Real dos Grãos	63
	4.1.6.	Limites de Consistência	65
	4.1.7.	Classificações	67
	4.1.7.1.	Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)	67
		American Association of State Highway and Transportation	
	4.1.7.3.	Tropical Compact Miniature (MCT)	68
4	4.2.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	71
	4.2.1.	Curva de Compactação	71
	4.2.2.	Índice de Suporte Califórnia (ISC)	72

	4.2.3.	Expansão	73
	4.2.4.	Expansibilidade	74
	4.2.5.	Especificações	75
	4.2.5.1.	Bases Estabilizadas Granulometricamente	75
	4.2.5.2.	Bases Estabilizadas Granulometricamente (Solos Lateríticos)	76
	4.2.5.3.	Sub-bases Estabilizadas Granulometricamente	77
	4.2.5.4	Sub-bases Estabilizadas Granulometricamente (Solos Lateríticos)	78
2	1.3.	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	79
	4.3.1.	Reação ao Ácido Clorídrico (HCI)	79
	4.3.2.	Potencial Hidrogeniônico	79
	4.3.3.	Análise Química de Complexo Sortivo	81
	4.3.4.	Espectroscopia de Raios-X por Energia Dispersiva (EDS)	85
	4.3.5.	Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)	85
	4.3.6.	Análise Termogravimétrica (TGA)	86
	4.3.7.	Difratometria de Raios-X (DRX)	90
	4.3.8.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	96
5.	CONCI	_USÃO	.112
6.	SUGES	STÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	.114
A١	IEXO I		.126
ΑN	IEXO II		.129
ΑN	IEXO III.		.132
ΑN	IEXO IV		.138

1. INTRODUÇÃO

O aço, considerado principal produto da Segunda Revolução Industrial, abriu novas possibilidades para os processos produtivos, permitindo criar e consolidar novos produtos e novos mercados, e tornou possível ainda, por meio do aperfeiçoamento do maquinário, a produção em larga escala (MORANDI, 1997). "A indústria moderna se construiu (e, a rigor, continua a ser construída, mesmo após o desenvolvimento dos plásticos e dos concretos) sobre uma estrutura de metal, particularmente o metal ferroso" (LANDES, 1969, p. 258). A siderurgia, portanto, tornou-se uma das indústrias fornecedoras dos materiais requeridos pelas demais indústrias constitutivas da Terceira Revolução Industrial. O novo ambiente competitivo exigiu a modernização dos processos produtivos, aumento da eficiência produtiva e melhorias na qualidade de seus produtos, além de respostas para as necessidades e as características específicas dos setores usuários, por exemplo, a fabricação de aços mais leves, mais finos, mais maleáveis, e mais resistentes ao calor ou à corrosão. Nesse sentido, a origem das inovações esteve diretamente ligada às necessidades internas do mercado, e se traduziram com a melhoria da qualidade dos produtos, sobretudo com a fabricação de aços especiais com baixos e ultrabaixos teores de impurezas.

Segundo Mahendra *et al.* (2017), o enxofre é uma das principais impurezas do aço, causa fragilidade e trincas, e afeta negativamente propriedades mecânicas, tais como ductilidade e resistência ao impacto. Para Kirmse (2006), os requisitos de qualidade para diversas aplicações do aço têm implicado em teores de enxofre abaixo de cerca de 50 ppm, e em razão disso, praticamente todas as unidades de produção têm se esforçado para esse atendimento, introduzindo em seus processos produtivos etapas de pré-tratamento, sobretudo de dessulfuração.

A dessulfuração em planta KR (*Kambara Reactor*) é uma etapa componente da aciaria, e é conduzida pela agitação mecânica do banho, que promove a dispersão do material dessulfurante, geralmente a cal, elevando a eficiência das reações de dessulfuração. Após a dessulfuração, o ferro-gusa líquido é vazado para o conversor e segue para a etapa de refino, também componente da aciaria. A escória gerada em planta KR, denominada escória KR – de interesse neste trabalho –, por sua vez, é removida e enviada ao pátio para reciclagem da fração magnética.

Segundo Tong *et al.* (2016), no processo de dessulfuração em planta KR são geradas cerca de 7 a 9 kg de escória KR por tonelada de metal quente tratado. Em caráter comparativo, segundo relatório de sustentabilidade do IAB (2018) do ano de 2017 referente às empresas associadas ao instituto, são gerados em média cerca de 607 kg de resíduos e coprodutos diretos por tonelada de aço produzido. A geração de escória de alto-forno representa 42% do total e a de escória de aciaria representa 27%. Finos, pós, lamas e outros materiais resultantes dos processos e sistemas representam os 31% restantes.

Na prática, a utilização de escórias como agregados sintéticos, em substituição aos agregados naturais embora não seja considerada rotineira, segundo Senço (2001), já é bastante frequente em países como Estados Unidos, Reino Unido, Alemanha e Japão. Segundo relatório do programa *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) (1964), além das escórias de alto-forno e de aciaria, mais difundidas, outros tipos de escórias siderúrgicas geradas em menores quantidades em etapas intermediárias após beneficiadas também demonstram comportamento competitivo na indústria da construção civil.

Este é o caso da escória de dessulfuração KR. Sua forma, estrutura interna e propriedades físico-químicas indicam que o material não é apenas um resíduo, e em certo sentido, pode ser considerado um coproduto com aplicações diversas. Segundo Sheng *et al.* (2014), a composição química do coproduto de dessulfuração demonstra ser útil para o tratamento de efluentes ácidos industriais e urbanos (esgotos). Cal livre, portlandita e calcita, presentes nesse tipo de agregado, são componentes apropriados para a neutralização de efluentes. Segundo Grunwald e Heinrichs (2015), estes compostos também podem substituir a cal em tratamentos de solos ácidos. O coproduto de dessulfuração contém ainda pequenas quantidades de enxofre, fósforo, potássio e magnésio, nutrientes essenciais em algumas culturas agrícolas. Na indústria da construção civil, segundo Cho (2016), demonstra ainda seu alto desempenho como ativador alcalino de cimentos em argamassas e concretos.

Além disso, trabalhos pioneiros como os Netto e Nakamura (2016), Moratti e Scotá (2016), Moura e Araújo (2017) e Ramos (2018) demonstraram que o coproduto de dessulfuração age como um eficiente estabilizante de solos e que sob teores adequados atinge valores de resistência ao cisalhamento não drenada suficientemente seguros para a estabilidade de aterros sobre solos moles. Trabalhos como os de Gonçalves (2016), Tessari *et al.* (2016), Meneguete (2018), Oliveira (2018), Garioli e Brandão (2018) e Furieri (2019), também pioneiros, por sua vez, demostraram a viabilidade do coproduto de dessulfuração como estabilizante de solos para fins de pavimentação, visto que atende os principais requisitos técnicos para camadas de bases e sub-bases de pavimentos, notadamente de resistência à penetração e expansão.

Nesta seara, o conhecimento do comportamento do coproduto de dessulfuração KR, tanto prático quanto científico, é obtido em grande parte empiricamente e está longe de ser suficiente se comparado ao conhecimento do comportamento do cimento Portland. Segundo Chen (2007), a completa descrição do comportamento físico-químico exigiria a definição das reações químicas envolvidas na ativação e hidratação, e do tipo, composição, quantidade, distribuição e tempo de formação dos produtos formados, além é claro, de algumas propriedades acompanhadas, como liberação de calor e alterações volumétricas. Nota-se, no entanto, que considerações consistentes para os vários fatores que influenciam a sua reatividade com solos e outros agregados ainda não estão bem desenvolvidas. Isto, porque ainda que alguns trabalhos tenham sido voltados à avaliação da interação solo-KR a partir da caracterização de propriedades mecânicas, poucos trabalhos foram realizados avaliando-a a partir da determinação de propriedades microestruturais, composicionais e mineralógicas e da discussão dos fenômenos envolvidos na estabilização.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é definir os mecanismos envolvidos na estabilização de solos com coproduto de dessulfuração KR e seus efeitos sob as propriedades físicas, mecânicas e químicas de solos com diferentes teores de finos.

1.1.2. Objetivos Específicos

São objetivos específicos desse trabalho:

- Avaliar se o efeito do coproduto de dessulfuração KR sobre a distribuição granulométrica de misturas solo-KR constitui-se como um dos mecanismos de estabilização e de que forma este efeito age para solos com diferentes teores de finos;
- II. Avaliar o efeito do coproduto de dessulfuração KR sobre o grau de floculação de misturas solo-KR constitui-se como um dos mecanismos de estabilização e de que forma este efeito age para solos com diferentes teores de finos;
- III. Avaliar o efeito do coproduto de dessulfuração KR sobre a distribuição de cargas elétricas adsorvidas de misturas solo-KR constitui-se como um dos mecanismos de estabilização e de que forma este efeito age para solos com diferentes teores de finos;
- IV. Avaliar o efeito do coproduto de dessulfuração KR sobre a mineralogia de misturas solo-KR constitui-se como um dos mecanismos de estabilização e de que forma este efeito age para solos com diferentes teores de finos;
- V. Avaliar o efeito do coproduto de dessulfuração KR sobre a microestrutura de misturas solo-KR constitui-se como um dos mecanismos de estabilização e de que forma este efeito age para solos com diferentes teores de finos.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 2 tratará do referencial teórico, que reunirá os trabalhos científicos e acadêmicos já feitos por outros autores sobre o assunto em questão, servindo como embasamento para o desenvolvimento deste tema específico; o Capítulo 3 tratará dos materiais e métodos utilizados, ou seja, do delineamento dos procedimentos utilizados para a produção de resultados; o Capítulo 4 tratará da apresentação dos resultados obtidos; e o Capítulo 5 tratará da conclusão, que reunirá as principais análises e desdobramentos do assunto em questão.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. SIDERURGIA DE PRÉ-TRATAMENTO

Segundo relatório do Instituto do Aço Brasil (IAB) (2014), há basicamente duas rotas para a produção de aço: rota integrada e rota semi-integrada. As usinas integradas produzem aço a partir do minério de ferro, em cujo processo produtivo se incluem as etapas de preparação das cargas, redução, refino, lingotamento e laminação. As usinas semi-integradas, por sua vez, produzem aço a partir da fusão de materiais metálicos, tais como sucatas, ferro-gusa sólido e ferro-esponja, em cujo processo produtivo se incluem somente as etapas de refino, lingotamento e laminação. Para as usinas integradas, após a redução, o processo alternativo utilizado para remover impurezas do ferro-gusa líquido previamente à etapa de refino é denominado como pré-tratamento. O ajuste da composição se dá principalmente por remoção de enxofre, silício e fósforo.

Segundo publicação da revista *Metallurgical Plant and Technology* (MPT) (2016), embora o alto-forno seja uma unidade muito eficiente para dessulfuração e capaz de remover cerca de 85% da adição total de enxofre, 15% permanecem no ferro-gusa líquido produzido. A MPT (2016) aponta como vantagens da dessulfuração no prétratamento relativos à operação de alto-forno: a liberação do alto-forno do trabalho metalúrgico de dessulfuração, o que eleva sua produtividade; a redução de cargas (coque, carvão e fundentes) para o alto-forno; a redução de escória, devido ao melhoramento do balanço alcalino do alto-forno, que opera a uma menor basicidade, o que torna possível uma produção mais econômica; além da produção de aço com baixos e ultrabaixos teores de enxofre.

Devido a essa séria de vantagens, uma variedade de processos de dessulfuração de ferro-gusa líquido que sai do alto-forno foi desenvolvida na siderurgia: injeção de agentes de dessulfuração em panelas torpedo; injeção de agentes de dessulfaração em panelas abertas; adição de agentes de dessulfuração em panelas abertas usando o sistema de agitação *Kambara Reactor* (KR); dessulfuração no conversor a oxigênio; e dessulfuração na panela de aço. As diversas tecnologias utilizadas se diferenciam em função da eficiência do dessulfurante e da eficiência do método de mistura do reagente em solução.

Em relação ao dessulfurante, para Gadsdon e Han (2009), o baixo custo e a disponibilidade da cal são os principais motivos que tornaram o seu uso atraente. Além disso, a afinidade entre cálcio e enxofre é elevada, o que permite uma reação direta entre os elementos. A dessulfuração do ferro-gusa líquido pela cal ocorre segundo a Equação 1 (na presença de carbono) e a Equação 2 (na presença de silício) (TONG et al., 2016).

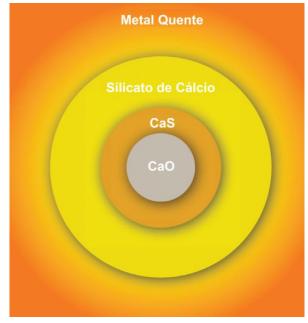
CaO+ S+ C
$$\rightarrow$$
 CaS+ CO Equação 1
4CaO + 2S + Si \rightarrow 2CaS+ 2CaO.SiO₂ Equação 2

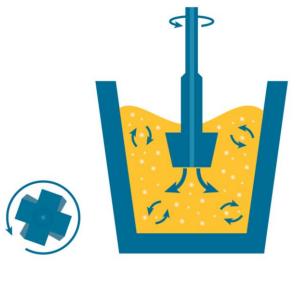
Segundo Kirmse (2006), durante o processo de dessulfuração, as partículas de cal são continuamente cobertas por dois precipitados: sulfeto de cálcio (CaS) e silicato de cálcio (2CaO.SiO₂) (Figura 1). O enxofre do metal líquido se difunde até a interface CaO-CaS, onde ocorre propriamente a reação de dessulfuração, aumentando a espessura da camada de CaS. O oxigênio liberado na reação se difunde através da camada de CaS para a interface CaS-metal, onde finalmente reage com carbono ou silício. À medida que as reações prosseguem, as camadas de CaS e 2CaO.SiO₂ se tornam mais espessas, envolvendo CaO, e dificultando o processo. As reações são controladas por transporte de massa através de algum tipo de camada limite, tal que os produtos formados na interface dessulfurante-metal são retirados através da escória fluída, capaz de absorvê-los, mantendo-os em baixa atividade para evitar a reversão (KIRMSE, 2006).

Em relação ao método de mistura, o processo KR, de interesse nesse trabalho, promove a agitação necessária para provocar o contato do dessulfurante, geralmente a cal, com o ferro-gusa líquido (Figura 2). Nesse tipo de reator, a agitação eleva a eficiência das reações, uma vez que além da homogeneização térmica e composicional do banho, propicia o transporte de reagentes até as interfaces de reações e a remoção dos produtos gerados. O grau de dispersão do dessulfurante sólido aumenta com a agitação, o que também provoca melhores possibilidades de contato com o ferro-gusa líquido, e aumenta a ocorrência do fenômeno de emulsificação metal-escória, em razão da multiplicação da interface metal-escória, elevando o desempenho (KIRMSE, 2006).

Figura 1 – Reações de dessulfuração.

Figura 2 – Kambara Reactor.





Fonte: GADSDON; HAN, 2010.

Fonte: SCHRAMA; VAN DEN BERG, 2014.

Ao fim do processo, o banho é deixado em repouso. Nessa etapa, a imiscibilidade e a diferença de densidades promovem a separação, por ação da gravidade, das fases metal e escória em duas camadas, o que permite que a escória sobrenadante seja posteriormente removida (SCHRAMA *et al.*, 2017).

2.2. MICROESTRUTURA DOS SOLOS

A discussão da estabilização de solos e dos processos de interação solo- estabilizante exige a definição prévia de conceitos relacionados à microestrutura dos solos.

Segundo Santos *et al.* (2012), o solo é um material polifásico, particulado e poroso, e constituído de numerosos componentes, fisicamente, quimicamente e biologicamente heterogêneos, arranjados em um padrão geométrico multiforme. Segundo Reichardt e Timm (2004), as partículas sólidas do solo variam ainda enormemente de qualidade e de tamanho. Tradicionalmente, são divididas em três frações texturais: areia, silte e argila. A fração argila é a fração sólida do solo que mais decisivamente determina o seu comportamento físico-químico. Ela possui a maior área específica (área por unidade de volume) e, por isso, é a fração mais ativa. Junto com a fração argila, a fração areia e a fração silte formam, geralmente, a fração sólida do solo.

A fração argila é constituída de partículas de diâmetro menor que 2 μm (10-6 m), e compreende um grande grupo de minerais, cuja boa parte é constituída de microcristais de tamanho coloidal e estrutura definida. Entre esses cristais, ou argilominerais, destacam-se os aluminossilicatos. Segundo Grim (1953), há dois tipos principais de aluminossilicatos, que se constituem basicamente de duas unidades: um tetraedro de átomos de oxigênio envolvendo um átomo de silício ou um octaedro de átomos de oxigênio (ou grupo hidroxílico) envolvendo um átomo de alumínio, que se unem pelos seus vértices por meio de átomos de oxigênio compartilhados (Figura 3).

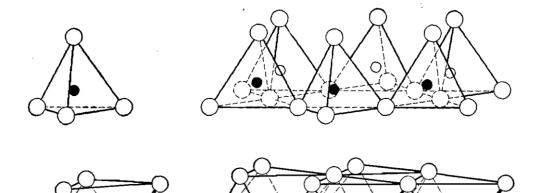


Figura 3 – Estrutura interna do tetraedro de sílica e octaedro de alumina.

Fonte: GRIM, 1953.

Essas estruturas, denominadas micelas, são ideais e eletricamente neutras. No estado natural, porém, ocorrem substituições de átomos durante suas formações, o que produz um desbalanceamento de cargas. Essas substituições são denominadas substituições isomórficas, pois quanto ao tamanho esses átomos podem perfeitamente substituir uns aos outros na rede cristalina. Como resultado, cargas negativas de átomos de oxigênio permanecem desbalanceadas, tornando a superfície das micelas eletricamente carregadas. Outra fonte de desbalanceamento é a neutralização incompleta de átomos nas extremidades das redes cristalinas e de materiais orgânicos (REICHARDT; TIMM, 2004).

A fração líquida do solo, por sua vez, é uma solução aquosa de sais minerais e substâncias orgânicas. Em seu estado natural, o solo contém água nos vazios entre as partículas sólidas sob a forma de água livre, capilar e adsorvida. Segundo Grim (1953) a água adsorvida (mantida diretamente na superfície das partículas de argila) está em um estado físico diferente daquele manifestado na água livre ou capilar, tal que suas moléculas estão organizadas em uma estrutura mais "rígida", frequentemente considerada mais densa e viscosa. Segundo Santos (1928), a espessura e a estabilidade da camada de água adsorvida dependem essencialmente da natureza da superfície de interação solo-água e, portanto, da própria estrutura cristalina dos argilominerais, da presença de cátions adsorvidos, e de outros fatores específicos. As principais considerações sobre a constituição do sistema coloidal argila-água são apresentadas a seguir:

Os argilominerais têm forma de placa com faces carregadas negativamente e com arestas podendo ser carregadas positivamente. Essa polaridade aliada à deficiência de carga proveniente de substituições isomórficas, faz com que íons e moléculas de líquidos polares (como a água) sejam atraídos à superfície para equilibrar as cargas elétricas (CASTELLO, 1998). O sistema formado pelas cargas elétricas negativas superficiais dos argilominerais em conjunto com a sua envoltória de cargas positivas é denominada Camada de Stern (Figura 4). A região do meio aquoso externa à Camada de Stern apresenta uma concentração de cátions que vai diminuindo à medida que aumenta a distância da partícula de referência. Esta região de variação contínua é denominada "Camada de Difusão".

O processo é bem complexo e desuniforme, envolvendo atração elétrica, ionização e hidratação. Assim, forma-se uma dupla camada elétrica na interface da partícula com o líquido, denominada Dupla Camada Difusa (Figura 4). Esta difusão de cátions também é acompanhada pela difusão de moléculas de água. Para Little (1995), a espessura da camada de água adsorvida está associada ao tipo e concentração de cátions adsorvidos. Cátions multivalentes podem equilibrar de forma mais eficiente o potencial de carga negativo na superfície de argilominerais, tal que a espessura da camada de água difusa para cátions multivalentes é muito menor que a espessura da camada de água difusa para cátions monovalentes.

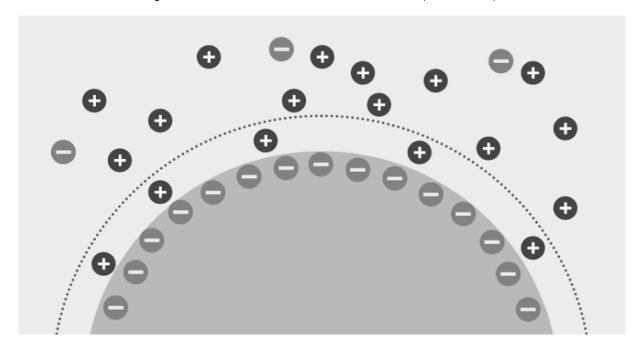


Figura 4 – Camada de Stern e Camada Difusa (sem escala).

Fonte: Autor.

A estabilidade da camada de água adsorvida está associada à Capacidade de Troca de Cátions (CTC). Segundo Santos (1928), argilominerais têm a capacidade de trocar cátions adsorvidos à superfície, entre as camadas e dentro do próprio retículo cristalino por outros cátions em solução. Os cátions trocáveis estão fixos eletrostaticamente ao longo das faces e entre as camadas estruturais ou ainda fixos por ligações químicas quebradas ao longo das arestas das partículas. Nem todos os cátions são trocados com a mesma energia e em diferentes argilominerais um mesmo cátion poder não estar ligado ao retículo cristalino pela mesma força.

Os cátions podem ser ordenados segundo uma série de "facilidade" de troca (Equação 3), denominada série liotrópica, e que varia ligeiramente para cada tipo de argilomineral, mas, em geral, cátions de valência múltipla substituem mais facilmente cátions de valência única, e cátions maiores substituem mais facilmente cátions menores (LITTLE, 1995).

2.3. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Do ponto de vista da engenharia de pavimentação, o solo é o principal constituinte do subleito, sub-base, base e em alguns casos até do revestimento. Quando as características dos solos não atendem, total ou parcialmente, os requisitos exigidos para esses fins, a estabilização é aplicada como técnica de melhoramento. Para Soliz (2007), a estabilização de solo é definida como um conjunto de métodos que promovem a alteração de propriedades do solo, de forma a melhorar seu comportamento sob o ponto de vista da engenharia. Consiste em um tratamento por meio de processos físicos, mecânicos ou químicos, que torna o solo estável para os limites de sua utilização, de maneira tal que a estabilização permaneça sob a ação de cargas exteriores e sob ações climáticas variáveis. Para Senço (2001), são características que um solo estabilizado deve apresentar: resistência ao cisalhamento e resistência à deformação. A condição de resistência ao cisalhamento deve garantir que o solo quando sujeito às tensões oriundas do tráfego de veículos resista, sem se romper, às deformações além de certos limites considerados ainda compatíveis com as necessidades do projeto.

2.3.1. Estabilização Granulométrica

A estabilização granulométrica é um tratamento físico com a finalidade de ajustar o comportamento do solo às necessidades de projeto alterando-se a sua textura. Segundo Rodrigues (2018), busca-se uma distribuição tal que os vazios dos grãos maiores sejam preenchidos pelos grãos médios, e os vazios desses, pelos grãos menores. O conjunto, de estrutura densa, representa um material de massa específica aparente seca elevada, o que lhe dá maior resistência mecânica e menor permeabilidade.

2.3.2. Estabilização por Compactação

A estabilização por compactação, por sua vez, é um tratamento mecânico que busca reduzir a porosidade do solo por meio da aplicação de cargas. As mudanças volumétricas, motivadas pela eliminação de ar dos vazios, são acompanhadas por mudanças estruturais, na condutividade hidráulica e na resistência mecânica.

Segundo Pinto (2006), a estrutura do solo compactado depende da energia aplicada e da umidade do solo por ocasião da compactação. Quando se compacta com umidade baixa, o atrito entre as partículas é muito alto, de tal forma que não é vencido pela energia aplicada. Para umidades mais elevadas, a água provoca efeito de lubrificação entre as partículas, que deslizam entre si, acomodando-se num arranjo mais compacto. A partir de um certo teor de umidade, a compactação não consegue mais expulsar o ar dos vazios, pois o grau de saturação já é elevado e ar está ocluso (envolto por água). Há, portanto, para uma certa energia aplicada, um teor de umidade, denominado umidade ótima, que conduz a uma massa específica aparente seca máxima. O tipo de obra e de solo irão ditar a energia de compactação empregada, a umidade em que o solo deve se encontrar na ocasião e a massa específica aparente seca a ser atingida.

2.3.3. Estabilização com Polímero

Segundo Siddiq (1978), a interação entre moléculas de polímero e grãos da fração grossa do solo dependem de fatores relacionados às propriedades do polímero e às características do solo. A estabilização se desenvolve por meio de forças de Van der Waals, interação polar e reações químicas. Como as forças de Van der Waals dependem diretamente da distância entre as moléculas de polímero e o substrato, todos os fatores que promovem um contato mais íntimo entre os materiais implicarão em um vínculo mais forte e mais durável. São esses fatores: textura da superfície dos grãos do solo, porosidade das partículas do solo, e adsorção do polímero no substrato. A interação polar e as reações químicas, por sua vez, dependem da natureza físico-química do polímero e do solo.

Segundo Siddiq (1978), a interação entre moléculas de polímero e grãos da fração fina do solo são mais complexas e menos compreendidas. Para a teoria de Ponte de Cátions, vários tipos de cátions multivalentes são fortemente sustentados por cargas negativas na superfície de argilominerais. Para a teoria de Ligações de Hidrogênio e Reações Químicas, polímeros não iônicos quando misturados com minerais de argila formam um complexo interlamelar, responsável por manter os argilominerais unidos de tal forma que nem mesmo a saturação é capaz de quebrar as ligações formadas.

2.3.4. Estabilização com Cimento

A estabilização com cimento é um tratamento químico que promove a melhoria da resistência e da deformabilidade para determinados usos na engenharia, que se deve à formação de fases sólidas na massa de solo, que preenchem parte dos vazios e unem os grãos adjacentes. É largamente empregada na construção de estradas, sendo geralmente utilizada em base ou sub-base de pavimentos sob duas formas: solo-cimento e solo melhorado com cimento. Segundo a especificação de projeto ES-P 11/05 do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER/PR) (2005), a distinção entre solo-cimento e solo melhorado com cimento é baseada no comportamento da camada, avaliado através da resistência à compressão simples aos sete dias de idade. Para o solo-cimento, a resistência deve atingir valor superior a 2,1 MPa para base ou sub-base; e para o solo tratado com cimento, a resistência deve atingir valor entre 1,5 e 2,1 MPa para base e entre 1,2 e 2,1 MPa para sub-base.

Os principais componentes do cimento Portland são compostos cálcicos: aluminato tricálcico (C_3A); aluminoferrato tetracálcico (C_4AF); silicato tricálcico (alita, C_3S); e silicato bicálcico (belita, C_2S). Segundo Coutinho (2002), no processo de hidratação do cimento, parte de C_3A reage com a água muito rapidamente, conduzindo a uma pega rápida, produzindo aluminato tricálcico hidratado (C_3AH_6) à superfície do grão (Equação 4). Para controlar ou retardar esta reação é possível adicionar ao cimento um sulfato, o mais econômico dos quais é o gesso natural. Este reage com C_3A formando-se agulhas finas de sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita, $C_6A\overline{S}H_{32}$) também à superfície do grão (Equação 5).

$$\begin{array}{ll} C_{3}A+6H\to C_{3}AH_{6} \\ \\ 3CaO.Al_{2}O_{3}+6H_{2}O\to 3CaO.Al_{2}O_{3}.6H_{2}O \end{array} \qquad \qquad \text{Equação 4} \\ \\ C_{3}A+3C\overline{S}H_{2}+26H\to C_{6}A\overline{S}H_{32} \\ \\ 3CaO.Al_{2}O_{3}+3(CaSO_{4}.2H_{2}O)+26H_{2}O\to 3CaO.Al_{2}O_{3}.3CaSO_{4}.32H_{2}O \end{array} \qquad \qquad \text{Equação 5} \\ \end{array}$$

O C₃S também reage com a água rapidamente, produzindo CH, produzindo uma capa externa de bissilicato tricálcico hidratado (C₃S₂H₃), muitas vezes referido simplesmente como silicato de cálcio hidratado (CSH) (Equação 6), à uma certa distância da superfície.

$$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$$
 $2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2$ Equação 6

O CSH é o principal responsável pela resistência atingida na pasta hidratada. C₂S ao reagir com a água também produz CH, embora em menor quantidade, e transformase num outro tipo de CSH (Equação 7). A hidratação contínua de C₃A produz agulhas mais grossas de etringita, e a hidratação contínua de C₃S, por sua vez, produz CSH no interior da capa externa, reduzindo a separação entre o grão anidro e a capa externa hidratada

$$2C_{2}S + 4H \rightarrow C_{3}S_{2}H_{3} + CH$$

$$2(2CaO.SiO_{2}) + 4H_{2}O \rightarrow 3,3CaO.2SiO_{2}.3,3H_{2}O + 0,7Ca(OH)_{2}$$
 Equação 7

Cerca de 24 horas depois, o gesso já foi totalmente consumido e inicia-se a formação de placas hexagonais de monosulfoaluminato ($C_4A\overline{S}H_{12}$) a partir de etringita no interior da capa e de C_3A ainda existentes (Equação 8).

$$C_{6}A\overline{S}H_{32} + 2C_{3}A + 4H \rightarrow 3C_{4}A\overline{S}H_{12}$$
 Equação 8
$$3CaO.Al_{2}O_{3}.3CaSO_{4}.32H_{2}O + 2(3CaO.Al_{2}O_{3}) + 4H_{2}O \rightarrow 3(4CaO.Al_{2}O_{3}.CaSO_{4}.12H_{2}O)$$

A hidratação do C₄AF verifica-se durante o mesmo período da hidratação do C₃A. De forma simplificada, C₄AF reage com a água, produzindo C₃AH₆ e ferrato monocálcico (CFH) (Equação 9). Este último, reage com o hidróxido de cálcio (portlandita, CH), transformando-se em ferrato tricálcico (C₃FH_m) (Equação 10).

$$C_4AF + 7H \rightarrow C_3AH_6 + CFH$$

$$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 + 7H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O + CaO.Fe_2O_3.H_2O$$
Equação 9
$$CFH + 2CH + nH \rightarrow C_3FH_m$$

$$CaO.Fe_2O_3.H_2O + 2Ca(OH)_2 + nH_2O \rightarrow 3CaO.Fe_2O_3.mH_2O$$
Equação 10

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as quatro principais fases sólidas na pasta de cimento completamente hidratada são: CSH, CH, etringita e grãos de clínquer não hidratados. A fase CSH constitui 50 a 60% do volume de sólidos e é, portanto, a fase mais importante. As fases CH e etringita constituem 20 a 25% e 15 a 20% do volume de sólidos, respectivamente.

Segundo Little (1995), consideram-se reações pozolânicas aquelas que ocorrem entre os íons hidroxila (OH⁻) e íons de cálcio (Ca²⁺) e materiais silicosos ou aluminosos na presença de água, e que formam os agentes estabilizantes CSH e CAH (Equação 11 e Equação 12, respectivamente). Nas misturas solo-cimento, íons OH⁻ e Ca²⁺ são disponibilizados por CH liberado nas reações de hidratação do cimento, descritas anteriormente. Argilominerais, quartzo, feldspato, micas e outros minerais do tipo silicatos e aluminossilicatos são as principais fontes de sílica e alumina nos solos.

Equação 11

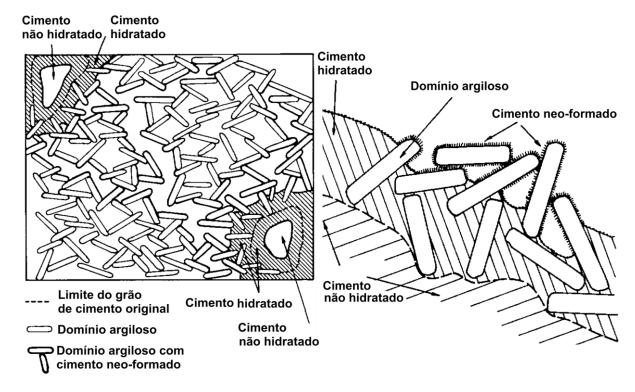
Ca²⁺ + OH⁻ + Alumina Solúvel da Argila → CAH

Equação 12

A Figura 5 apresenta um esquema da estrutura solo-cimento. Segundo Rodrigues (1992), o cimento hidratado encaixa-se em meio ao domínio argiloso, estabelecendo ligações fortes na interface argila-cimento. Os íons OH solubilizados de CH atacam os argilominerais e componentes amorfos das argilas. A sílica e alumina dissolvidas combinam-se com íons Ca²⁺ de CH, precipitando materiais cimentícios neo-formados através das reações pozolânicas (Figura 6). Enquanto houver CH suficiente no sistema para combinar-se a sílica e alumina e o pH permanecer alto o suficiente para manter a solubilidade, as reações pozolânicas continuarão ocorrendo, com a deposição ocorrendo de forma mais intensa nas extremidades dos domínios argilosos.

Figura 5 – Esquema de estrutura solo-cimento (sem escala).

Figura 6 – Cimento neo-formado (sem escala).



Fonte: RODRIGUES, 1992. Fonte: RODRIGUES, 1992.

2.3.5. Estabilização com Cal

Segundo relatório do Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) (2014), a estabilização com cal é mais efetiva em solos que apresentam elevado conteúdo de argila. Para esses solos, o processo de estabilização envolve o tratamento químico desenvolvido em quatro etapas distintas: trocas catiônicas; aglomeração e floculação; reações pozolânicas; e carbonatação.

Segundo Little (1995), na primeira etapa, após a incorporação de cal ao solo, uma concentração de cátions Ca²⁺ livre é criada. Os cátions Ca²⁺ irão substituir os cátions normalmente adsorvidos na superfície dos argilo-minerais. Essa substituição ocorre segundo a série liotrópica descrita anteriormente, que nada mais é do que uma sequência lógica de retenção de cátions pelo solo. As trocas catiônicas provocam uma redução da espessura da camada difusa, pois cátions multivalentes equilibram de forma mais eficiente o potencial de carga negativa na superfície da argila.

Em razão da redução, as partículas de argila se aproximam (aglomeração), o que resulta em uma rede de atração, especialmente entre faces carregadas negativamente e bordas carregadas positivamente de partículas adjacentes, e uma estrutura do tipo borda-face se desenvolve, responsável pelo fenômeno de floculação, que promove uma aparente mudança na textura (LITTLE, 1995). Segundo Diamond e Kinter (1965), também é geralmente observada na estabilização com cal uma redução aparente no Índice de Plasticidade (IP), embora, segundo Bell (1996), o IP não é necessariamente reduzido quando a cal é adicionada a um argilomineral do tipo caulinita por exemplo.

O aumento da resistência a longo prazo deve-se às reações pozolânicas descritas anteriormente (Equação 11 e Equação 12). Nessa etapa, são produzidos os mesmos produtos que se formam durante a hidratação do cimento Portland (CSH e CAH). As reações pozolânicas apresentam desenvolvimento contínuo desde que o pH se mantenha alcalino e haja cátions Ca²⁺ disponíveis. Segundo Diamond e Kinter (1965), os produtos exatos formados variam um pouco com o tipo de argila e as condições das reações, especialmente a temperatura.

A carbonatação, por sua vez, é uma reação desenvolvida entre hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) e o dióxido de carbono (CO₂) presente na atmosfera. A reação promove a reconstrução do carbonato de cálcio (CaCO₃), reduzindo significativamente a alcalinidade do sistema através do consumo de Ca(OH)₂. Segundo Bell (1996), o desempenho de camadas de solo estabilizadas com cal também pode ser afetado pela carbonatação, que inibe a formação de produtos cimentícios nas reações desenvolvidas na interação solo-cal.

A Figura 7 apresenta um esquema da estrutura solo-cal. Segundo Rodrigues (1992), na fase líquida, os íons OH- difundem-se e atingem as partículas de argila, reagem, e formam sílica e alumina solúveis. A sílica solúvel difunde-se para a fase líquida, reage com os íons Ca²⁺, e precipita-se como CaSiO₃, que se cristaliza lentamente na superfície da argila, retirando água do poro e tomando a forma de CSH, até que a reação seja completamente interrompida.

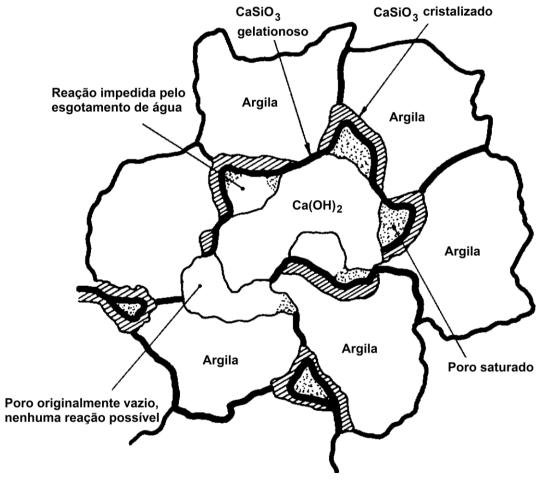


Figura 7 – Esquema de estrutura solo-cal (sem escala).

Fonte: RODRIGUES, 1992.

2.3.6. Estabilização com Agregados Siderúrgicos

A reatividade da escória, isto é, a medida do seu potencial desempenho como estabilizante, é altamente dependente das suas propriedades físico-químicas. Dada a baixa solubilidade da fração cristalina, o teor de vidro é um dos primeiros condicionantes. Isto, porque somente a fração vítrea das escórias é capaz de, em condições normais de temperatura e pressão, hidratar-se (JOHN, 1995). Segundo Puertos (1995), a quantidade da fase vítrea na escória depende da história térmica experimentada por ela. Nesse sentido, a escória quando submetida a condições de resfriamento brusco na saída do alto-forno, apresenta-se sob predominantemente vítrea, e com propriedades hidráulicas, do contrário, quando submetida a condições de resfriamento lento, apresenta-se sob a forma predominantemente cristalina, e sem propriedades hidráulicas (SANT'ANA, 2003).

Segundo John (1995) e Eisenhuttenleute (1995), na estrutura interna das escórias, os átomos de silício podem estar conectados através de ligações covalentes a quatro átomos de oxigênio, formando um tetraedro (Figura 8). Nesta estrutura bem típica, cada oxigênio está ligado a no máximo dois átomos de silício. Em oposição ao silício, considerado um formador de cadeia, os outros elementos presentes na forma de cátions Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, e Fe²⁺, denominados modificadores de cadeia, que equilibram as valências dos oxigênios, estão ligados iônicamente somente a um átomo de silício. A quantidade e as características dos cátions modificadores também influenciam diretamente o comportamento das escórias, como a solubilidade da fração vítrea, uma vez que a água atua nos pontos de ligação iônica (JOHN, 1995).

Na Tabela 1 é apresentada a composição química determinada por meio de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) de escórias provenientes da ArcelorMittal Tubarão, Vitória – ES. Nota-se que em relação às escórias de alto-forno, as escórias de aciaria normalmente contêm maiores quantidades de ferro e manganês, e menores quantidades de silício e enxofre, conforme já sinalizado por Lewis (1982). As escórias de dessulfuração KR, embora sejam formadas no prétratamento entre o alto-forno e a aciaria, apresentam uma composição química muito mais próxima às escórias de aciaria.

Tabela 1 – Composição química expressa em óxidos por FRX de escórias siderúrgicas provenientes da ArcelorMittal Tubarão, Vitória – ES.

	Escória de Alto-Forno	Escória de Aciaria de	Escória de
	Resfriada ao Ar	Conversor LD	Dessulfuração KR
CaO (%)	41,2	43,4	44,8
Fe ₂ O ₃ (%)	2,7	26,4	26,0
SiO ₂ (%)	32,4	12,7	14,6
Al ₂ O ₃ (%)	9,3	4,9	5,1
MgO (%)	5,2	5,0	2,7
SO₃ (%)	4,5	0,2	3,8
MnO (%)	0,6	3,2	1,7
P ₂ O ₅ (%)	0,1	1,3	0,5
TiO ₂ (%)	0,5	0,4	0,3
Na₂O (%)	0,3	0,2	0,1
SrO (%)	0,1	0,1	0,1
K ₂ O (%)	0,3	< 0,1	< 0,1

Fonte: OLIVEIRA, 2018.

Ponte de oxigênio
Não ponte de oxigênio
Cátion Formador de cadeia
Cátion Modificador de cadeia
Silício
Oxigênio
Sílica Cristalina
Sílica Vítrea

Figura 8 – Esquema de estrutura interna da escória (sem escala).

Fonte: EISENHUTTENLEUTE, 1995.

A relação entre a composição química e a reatividade das escórias pode ser expressa através do conceito de basicidade. Segundo Ferraro (2014), a formulação mais simples da basicidade, denominada basicidade binária, é dada pela relação mássica CaO/SiO₂, também denominada C/S. A partir desse parâmetro, as escórias podem ser classificadas em ácidas (C/S < 1), neutras (C/S = 1) ou básicas (C/S > 1). Segundo Tanzer *et al.* (2014), se a basicidade da escória aumenta, o teor de CaO aumenta com a diminuição simultânea de SiO₂, o que leva a uma expansão da rede de vidro e facilita a divisão das ligações Si-O existentes. Isso geralmente também resulta em melhores dissolução e reatividade, além é claro, em um endurecimento mais rápido.

Para Wang e Peiyu (2010), os principais componentes cimentícios das escórias de aciaria são os compostos C₂S e C₃S, embora suas concentração e atividade sejam muito menores do que às encontradas no cimento Portland. Quando misturados à água, estes minerais se hidratam primeiro nas partículas finas da escória. O gel de silicato de cálcio hidratado (CSH) e hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) são os principais

produtos de hidratação, tal que a relação C/S em CSH varia com a disponibilidade dos reagentes. Segundo Chen (2007), CSH resultante da hidratação de escórias puras apresenta uma relação C/S muito menor do que a relação C/S em CSH resultante da hidratação normal do cimento Portland. Em cimentos de escória, com o aumento da proporção de escória na mistura, a relação C/S em CSH também diminui, no entanto, é ainda maior do que à encontrada em escórias puras (Figura 9).

Tetraedro de sílica - Carga negativa • Íon cálcio

(a) 0,7 < C/S < 1,0

(b) 1,0 < C/S < 1,5

(c) 1,5 < C/S < 1,7

Figura 9 – Esquemas da estrutura de CSH em função da relação C/S (sem escala).

Fonte: STEPHANT, 2015.

Outro importante condicionante da reatividade da escória é a sua velocidade de dissolução (JOHN, 1995). Quando misturada a ativadores químicos que possibilitem um ambiente de alto pH, a velocidade de dissolução da escória aumenta, e se desenvolvem mais rapidamente reações químicas formadoras de produtos hidratados. Evidentemente, a formação desses compostos depende dos reagentes da fração vítrea, e em grande medida, dos ativadores empregados. Segundo John e Agopyan (2000), os ativadores têm, portanto, dupla função: dissolver-se rapidamente em água e elevar o pH da solução, acelerando a dissolução da fração vítrea da escória; e precipitar produtos hidratados, seja porque participam das fases hidratadas, ou porque reduzem a solubilidade de espécies dissolvidas, forçando sua precipitação. Uma grande parte desses ativadores contém metais alcalinos (álcalis), são os chamados ativadores alcalinos.

Segundo Puertos (1995), a superfície específica da escória também tem grande influência na cinética de suas reações de hidratação. Isto ocorre porque a velocidade de dissolução depende da área de contato com a solução. Nesse sentido, com o objetivo de atingir superfícies específicas elevadas, a ativação também pode ocorrer de forma mecânica, através da moagem. Para Puertos (1995), a superfície específica ótima para escórias ácidas ou neutras é da ordem de 4.500 a 6.500 cm²/g, enquanto para escórias básicas é da ordem de 4.000 a 5.500 cm²/g.

De forma geral, as reações químicas de hidratação e ativação da escória são mais complexas do que as reações químicas do cimento ou da cal. Segundo Mymrin *et al.* (2005), o processo de endurecimento a longo prazo é desencadeado pela síntese de novas formações a partir da dissolução de componentes da escória. Segundo Cho (2016), a ativação alcalina facilita a dissolução de íons Ca²⁺, Si⁴⁺ e Al³⁺ da fração vítrea da escória, que é seguida da formação de produtos hidratados do tipo silicato de cálcio hidratado (CSH) e aluminato de cálcio hidratado (CAH). Segundo Shen *et al.* (2009), as reações de formação de CSH e CAH podem ser descritas qualitativamente conforme Equação 13 e Equação 14, respectivamente.

$$xCa(OH)_2 + SiO_2 + nH_2O \rightarrow xCaO.SiO_2.(n + x)H_2O$$
 Equação 13
$$yCa(OH)_2 + Al_2O_3 + mH_2O \rightarrow yCaO.Al_2O_3.(m + y)H_2O$$
 Equação 14

Segundo Toda *et al.* (2018), a portlandita (Ca(OH)₂), ao ser dissolvida, fornece íons Ca²⁺ e OH⁻. Os íons OH⁻ são os responsáveis pelo ambiente altamente alcalino que dissolve sílicas e aluminas amorfas do sistema. Estas, por sua vez, reagem com Ca²⁺ em solução através de reações químicas que formam os produtos hidratados CSH e CAH e diminuem o pH do sistema. A diminuição na concentração de íons Ca²⁺ e do pH do sistema tornam a portlandita subsaturada, o que induz sua dissolução, e mantém um ciclo contínuo de formação de produtos hidratado. Segundo Puertos (1995), o processo continua, mas a velocidade de reação diminui. Isto é atribuído à uma precipitação maciça de produtos em torno dos próprios grãos de escória e à diminuição da água livre, o que impede ou dificulta os processos químicos e, portanto, diminui as reações de hidratação progressivamente.

De maneira análoga, o processo de endurecimento do sistema solo-escória tem a mesma natureza. Mas, como a fração fina dos solos naturais absorvem uma parte significativa de íons, sobretudo Ca²+ e Mg²+, como discutido nas hipóteses iniciais levantadas, a excitação alcalina das partes sólidas da escória e a síntese de novas formações amorfas podem ocorrer em intensidades mais baixas (MYMRIN *et al.*, 2005). Não obstante, um ótimo desempenho é obtido em misturas solo-escória, geralmente superior ao obtido em misturas solo-cal, e em alguns casos superior até mesmo ao obtido em misturas solo-cimento. Segundo Manso *et al.* (2013), este é um resultado razoável, uma vez que uma maior variedade de reações químicas pode ocorrer na interação solo-escória e substâncias mais duráveis poderiam ser formadas.

No caso específico da estabilização com coproduto de dessulfuração KR, os trabalhos encontrados na literatura técnico-científica a respeito de suas potenciais aplicações como agregado ou estabilizante na engenharia geotécnica e de pavimentação concentram-se sobretudo nas experiências brasileiras. Como discutido, estas experiências limitaram-se a avaliar o desempenho da estabilização de misturas solo-KR a partir da determinação de distintas propriedades mecânicas: resistência ao cisalhamento não drenada, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à penetração, entre outras.

A avaliação da estabilização solo-KR a partir da determinação da resistência ao cisalhamento não drenada pelos métodos de palheta (*Vane Test*) e de cone de queda livre (*Cone Fall*) fora realizada por Moratti e Scotá (2016) em misturas solo-KR em diferentes idades nas proporções de 90:10 e 85:15, constituídas de solo argiloso e coproduto de dessulfuração KR de diâmetro máximo de 9 mm, vide Figura 10; e por Moura e Araújo (2017) em mistura solo-KR em diferentes idades na proporção de 90:10, constituída de igual solo e coproduto de dessulfuração KR de diâmetro máximo de 19 mm, vide Figura 10.

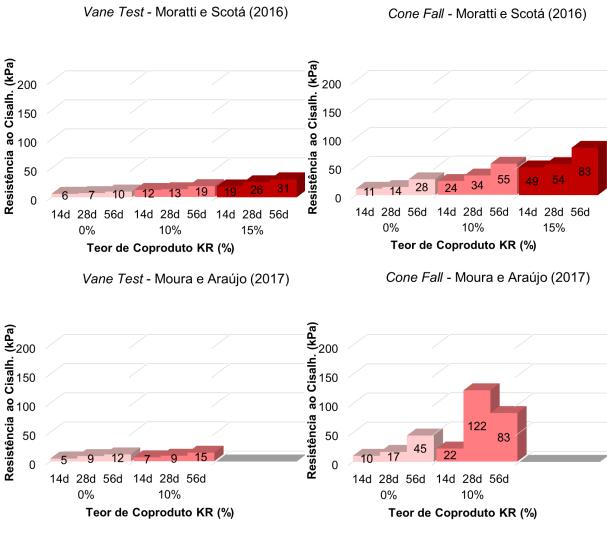


Figura 10 – Resultados obtidos por Moratti e Scotá (2016) e Moura e Araújo (2017).

Vane Test - Moratti e Scotá (2016)

Cone Fall - Moratti e Scotá (2016)

Conforme resultados de *Vane Test*, método mais representativo para determinação da resistência ao cisalhamento não drenada, o coproduto de dessulfuração KR apresentou-se muitíssimo eficiente para os teores de 10% e 20% na avaliação de Moratti e Scotá (2016), e pouquíssimo eficiente para o teor de 10% na avaliação de Moura e Araújo (2017), o que se deveu a composição granulométrica mais grossa do coproduto associada a um menor teor de umidade de moldagem. Esta constatação sustenta a hipótese de que a estabilização seja creditada à interação desenvolvida na interface solo-KR, e, portanto, tanto mais eficiente quanto maior a superfície específica do coproduto de dessulfuração KR. Além disso, a interação ocorre necessariamente por via úmida, tal que deve haver uma disponibilidade mínima de água.

A avaliação da estabilização solo-KR a partir da determinação da resistência à compressão axial e da resistência à tração por compressão diametral, por sua vez, fora realizada por Netto e Nakamura (2016) em misturas solo-KR nas proporções de 90:10, 80:20 e 70:30, constituídas de solo argiloso e coproduto de dessulfuração KR de diâmetro máximo de 9 mm, vide Figura 11. Segundo os autores, o coproduto de dessulfuração KR apresentou-se mais uma vez como eficiente estabilizante, sobretudo para um teor de 20%. Esta constatação chama a atenção para a natureza da estabilização solo-KR, que atua resistindo à diferentes planos e tipos de tensões, inclusive de tração, o que sustenta a hipótese de que a resistência não advém apenas do contato físico entre os materiais, mas de algum tipo de força ou produto que os une fortemente.

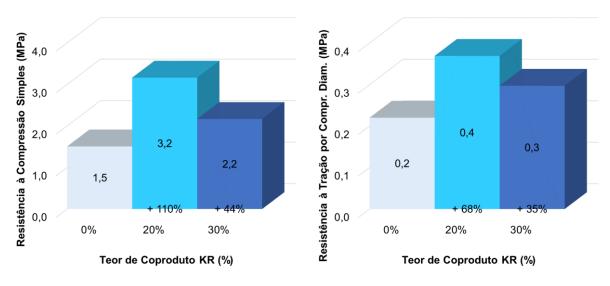
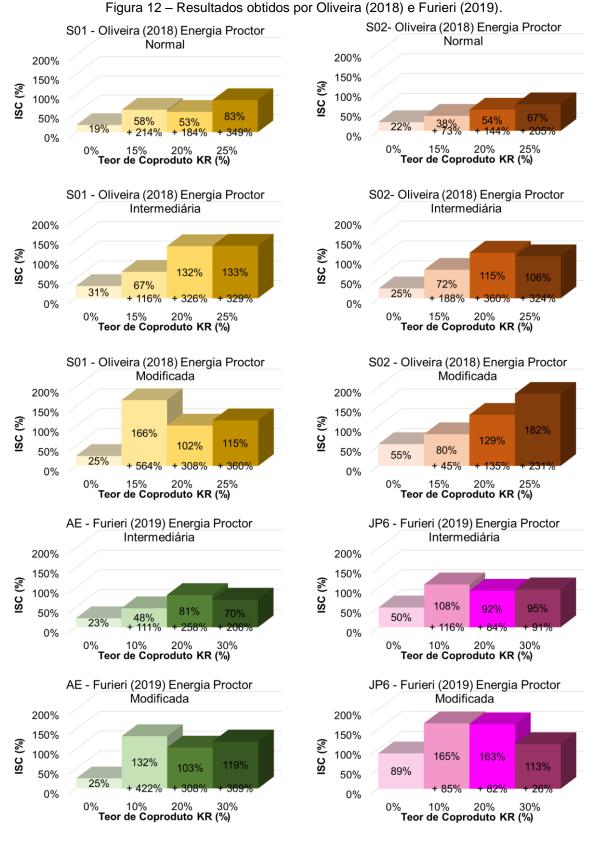


Figura 11 – Resultados obtidos por Netto e Nakamura (2016).

Fonte: Autor.

A avaliação do desempenho mecânico da estabilização solo-KR a partir da determinação da resistência à penetração pelo método de Capacidade de Suporte Califórnia ou ISC, também pretendida neste trabalho, fora realizada por Oliveira (2018) em misturas solo-KR para diferentes energias nas proporções 90:10, 80:20 e 70:30, para dois solos, denominados S1 e S2, e coproduto de dessulfuração KR de diâmetro máximo de 9 mm; e igualmente por Furieri (2019) em misturas solo-KR para diferentes energias nas proporções 85:15, 80:20 e 75:25, para dois solos, denominados AE e JP6, e coproduto de dessulfuração KR de diâmetro máximo de 19 mm, vide Figura 12.



Fonte: Autor.

Nota-se que os valores absolutos e os aumentos relativos do ISC com o aumento do teor de coproduto de dessulfuração KR variam para cada tipo de solo e para cada energia empregada, bem como o teor ótimo de coproduto de dessulfuração KR, correspondente ao máximo valor absoluto ou de aumento relativo do ISC. Por outro lado, em linhas gerais, os aumentos relativos do ISC são superiores em S01 e AE em relação a S02 e JP6, respectivamente, tal que os teores ótimos de coproduto de dessulfuração KR são atingidos em torno de 10% a 20%.

Considerando o desempenho distinto do coproduto de dessulfuração KR nas misturas para diferentes solos e os dados de caracterização apresentados na Tabela 2, dos respectivos solos, conclui-se que a granulometria é uma variável chave, uma vez que é o parâmetro que mais expressivamente os distingue. A saber, S01 e AE tratam-se de solos argilosos (mais finos), e S02 e JP6, por sua vez, tratam-se de solos arenosos (mais grossos). Isto é, o desempenho da estabilização com coproduto de dessulfuração KR parece mais uma vez ser função do teor de finos do solo, e é tanto mais eficiente quanto o maior teor de finos, hipótese fomentadora da criação deste presente trabalho.

Tabela 2 – Caracterização Física dos solos investigados por Oliveira (2018) e Furieri (2019).

Autor	Oliveira (2018)		Furieri	(2019)
Amostras	S01	S02	AE	JP6
Fração Passante 4,8 mm (%)	100,0	73,3	100,0	81,1
Fração Passante 2 mm (%)	100,0	69,4	95,5	79,0
Fração Passante 0,425 mm (%)	70,5	49,8	80,4	46,6
Fração Passante 0,075 mm (%)	52,7	36,8	60,0	23,1
Módulo de Finura	1,55	3,61	1,12	3,38
Massa Espec. Real (g/cm³)	2,67	2,73	2,65	2,65
Limite de Liquidez (%)	55%	52%	49%	26%
Limite de Plasticidade (%)	27%	30%	25%	15%
Índice de Plasticidade (%)	28%	22%	24%	11%
Classificação SUCS	СН	SC	CL	SC
Classificação AASHTO	A-7-6	A-2-7	A-7-6	A-2-6

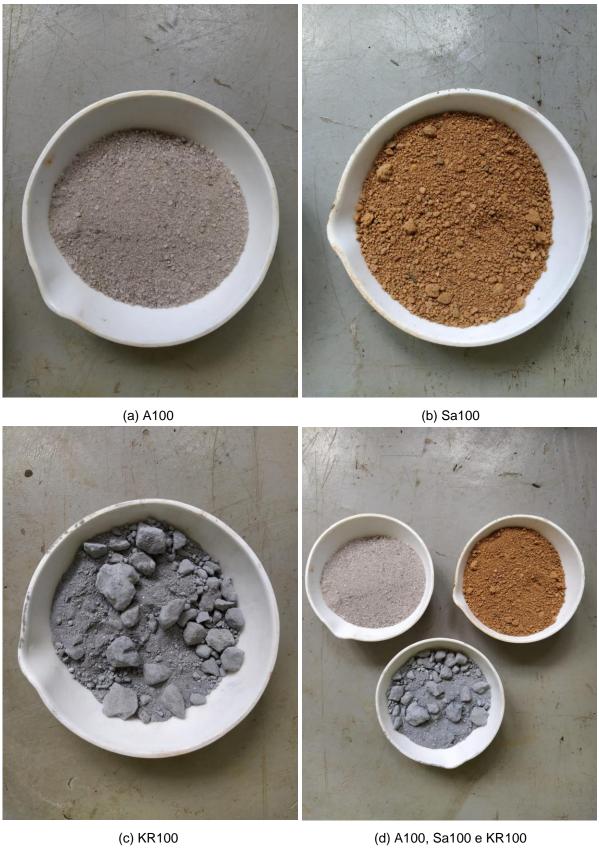
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme objetivos, fora avaliada o efeito do coproduto de dessulfuração KR sobre as propriedades de solos com diferentes teores de finos. Os materiais e métodos empregados para esta análise são discutidos a seguir:

Quanto à composição dos materiais, foram avaliados três solos, sendo um deles obtido naturalmente, denominado Sa100, e dois outros obtidos artificialmente, denominados Sb100 e Sc100. O solo Sa100 refere-se à amostra predominantemente argilosa, de diâmetro máximo de 4,8 mm, de formação tropical laterítica, proveniente de uma área de empréstimo localizada nas proximidades do km 368 da rodovia BR-101, Anchieta - ES (Figura 13). Segundo Furieri (2019), o solo nesta área de empréstimo é constituído de cerca de 60% de finos. Sb100 e Sc100, por sua vez, referem-se às amostras de solos obtidas a partir de Sa100, mas com reduções do teor de finos, para 45% e 30%, respectivamente. As reduções ocorreram mediante substituições parciais da amostra Sa100 por material uniforme e de granulometria mais grossa, denominado A100, nas proporções 75:25 e 50:50, respectivamente, em relação à massa seca, vide Figura 14. A100 refere-se então a amostra predominantemente arenosa, de diâmetro máximo de 4,8 mm, lavada, utilizada corriqueiramente na indústria da construção civil, em especial como agregado miúdo em argamassas e concretos (Figura 13). KR100, por sua vez, refere-se ao coproduto de dessulfuração KR, resultado do beneficiamento da escória de aciaria na etapa de dessulfuração do ferro-gusa na fabricação de aço em planta KR, com grãos de diâmetro máximo de 19 mm, proveniente da ArcelorMittal Tubarão, Vitória – ES (Figura 13). Sa100, Sb100 e Sc100 ao se consubstanciarem à amostra KR100 na proporção de 80:20, em relação à massa seca, resultam nas amostras Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20 (Figura 14), que se referem às misturas solo-KR cujos efeitos da estabilização serão avaliados neste trabalho.

Quanto aos métodos, o programa experimental aplicado a estes materiais é pormenorizado nos tópicos que se seguem, sendo subdividido em três linhas de pesquisa: caracterização física, caracterização mecânica e caracterização química, e vide as Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente.

Figura 13 – Materiais.



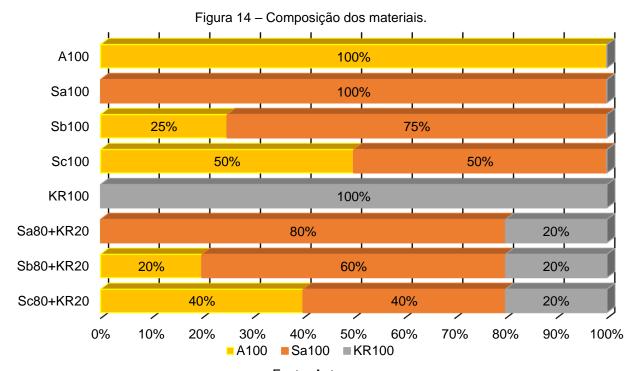


Tabela 3 – Caracterização Física.

rabela 5 – Garacterização Frisida.				
1a. Granulometria 1b. Módulo de Finura 1c. Relação Arcabouço-Matriz	A100; Sa100; Sb100; Sc100; KR100; Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20			
NBR 7181/16, ABNT (2016)				
2. Equivalente de Areia ME 054/97, DNER (1997)	A100; Sa100; Sb100; Sc100; KR100; Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20			
3. Grau de Floculação	Sa100; Sb100; Sc100;			
Manual de Análise de Solo, EMBRAPA (2017)	Sa100, Sb100, SC100, Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20			
4. Massa Específica Real dos Grãos NM 52/09, ABNT (2009) NM 53/09, ABNT (2009)	A100; Sa100; Sb100; Sc100; KR100; Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20			
5. Teor de Matéria Orgânica NBR 13600/96, ABNT (1996)	A100; Sa100; Sb100; Sc100; KR100; Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20			
6a. Limite de Liquidez 6b. Limite de Plasticidade 6c. Limite de Contração 6d. Índice de Plasticidade 6e. Atividade NBR 6459/16, ABNT (2016) NBR 7180/16, ABNT (2016) NBR 7183/82, ABNT (1982)	Sa100; Sb100; Sc100; Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20			
7. Classificação SUCS	A100; Sa100; Sb100; Sc100; KR100; Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20			
8. Classificação AASHTO	A100; Sa100; Sb100; Sc100; KR100; Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20			
9. Classificação MCT CLA 259/94, DNER (1994)	Sa100; Sb100; Sc100			

Tabela 4 – Caracterização Mecânica.

NBR 7182/16, NBR (2016) 2. Índice de Suporte Califórnia (ISC) NBR 9895/16, ABNT (2016) 3. Expansão	Sa100; Sb100; Sc100; Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20 Sa100; Sb100; Sc100; Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20 Sa100; Sb100; Sc100; Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20		
NBR 7182/16, NBR (2016) 2. Índice de Suporte Califórnia (ISC) NBR 9895/16, ABNT (2016) 3. Expansão	Sa100; Sb100; Sc100; Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20 Sa100; Sb100; Sc100; Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20		
2. Índice de Suporte Califórnia (ISC) NBR 9895/16, ABNT (2016) 3. Expansão	Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20 Sa100; Sb100; Sc100; Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20		
NBR 9895/16, ABNT (2016) 3. Expansão	Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20 Sa100; Sb100; Sc100; Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20		
3. Expansão	Sa100; Sb100; Sc100; Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20		
	Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20		
NBR 9895/16. ABNT (2016)			
(/	Ca100: Ch100: Ca100:		
4. Expansibilidade	Sa100; Sb100; Sc100;		
ME 160/12, DNIT (2012)	Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20		
5. Especificação – Bases Estabilizadas	Sa100; Sb100; Sc100;		
Granulometricamente	Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20		
ES 141/10, DNIT (2010)	3800+KK20, 3000+KK20, 3000+KK20		
6. Especificação – Base Estabilizada	Sa100; Sb100;		
Granulometricamente (Solos Lateríticos)	Sa80+KR20; Sb80+KR20		
ES 098/07, DNIT (2007)	3d00+RR20, 3D00+RR20		
7. Especificação – Sub-Bases Estabilizadas	C-400, Ch400, C-400,		
Granulometricamente	Sa100; Sb100; Sc100;		
ES 139/10, DNIT (2010)	Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20		
8. Especificação – Sub-Bases Estabilizadas	0-400 01400		
Granulometricamente (Solos Lateríticos)	Sa100; Sb100; Sa80+KR20; Sb80+KR20		
ES 139/10, DNIT (2010)			

Tabela 5 – Caracterização Química.

1. Reação ao Ácido Clorídrico D 2488/06, ASTM (2006)	A100; Sa100; Sb100; Sc100; KR100		
2. Potencial Hidrogeniônico (pH)	A100; Sa100; Sb100; Sc100; KR100;		
Manual de Análise de Solo, EMBRAPA (2017)	Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20		
3a. Análise Química de Complexo Sortivo			
3b. Capacidade de Troca Catiônica (CTC)	A100; Sa100; Sb100; Sc100; KR100		
Manual de Análise de Solo, EMBRAPA (2017)			
4. Espectroscopia de Raios-X por Energia			
Dispersiva (EDS)	A100; Sa100; KR100		
5. Espectrometria por Fluorescência de Raios-X			
(FRX)	A100; Sa100; KR100		
6. Análise Termogravimétrica (TGA)	Sa100; KR100		
	<u> </u>		
7. Difratometria de Raios-X (DRX)	A100; Sa100; Sb100; Sc100; KR100;		
	Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20		
8. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	A100; Sa100; Sb100; Sc100; KR100;		
	Sa80+KR20; Sb80+KR20; Sc80+KR20		
	A .		

3.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

3.1.1. Granulometria por Peneiramento e Sedimentação

O ensaio para determinação da granulometria por peneiramento e sedimentação foi realizado conforme a norma NBR 7181/16 da ABNT (2016), sobre as amostras A100, Sa100, Sb100, Sc100, KR100, Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, no estado solto, preparadas com secagem prévia em estufa a 105 ± 5°C até constância de massa. As determinações foram praticadas em duplicatas e com apresentação dos valores médios.

A série de aberturas utilizada no peneiramento grosso fora composta das malhas das peneiras 2" (50 mm), 1 1/2" (38 mm), 1" (25 mm), 3/4" (19 mm), 1/2" (12,5 mm), 3/8" (9,5 mm), Nº 4 (4,8 mm), Nº 8 (2,4 mm), Nº 10 (2 mm); a série de aberturas utilizada no peneiramento fino fora composta das malhas das peneiras Nº 16 (1,2 mm), Nº 20 (0,85 mm), Nº 30 (0,6 mm), Nº 40 (0,425 mm), Nº 50 (0,3 mm), Nº 60 (0,25 mm), Nº 80 (0,175 mm), Nº 100 (0,15 mm) e Nº 200 (0,075 mm); e a série de intervalos utilizada na sedimentação fora composta dos tempos 30 s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h e 24 h.

Os resultados deste ensaio compreendem a curva de distribuição granulométrica, que dispõe no eixo das abscissas (em escala logarítmica) os diâmetros das partículas e no eixo das ordenadas (em escala aritmética) as relações percentuais em massa entre as frações passantes correspondentes aos diâmetros considerados e a totalidade da amostra.

Adicionalmente, realizou-se ainda, a partir da curva de distribuição granulométrica, o cálculo do módulo de finura, definido através da soma das frações granulométricas retidas acumuladas nas peneiras da série normal (1 1/2" (38 mm), 3/4" (19 mm), 3/8" (9,5 mm), Nº 4 (4,8 mm), Nº 8 (2,4 mm), Nº 16 (1,2 mm), Nº 30 (0,6 mm), Nº 50 (0,3 mm) e Nº 100 (0,15 mm)), e o cálculo da relação arcabouço-matriz, definida através da razão entre a soma das frações de areia grossa (0,6 a 2 mm) e areia média (0,2 a 0,6 mm) e a soma das frações de areia fina (0,06 a 0,2 mm), silte (0,002 a 0,06 mm) e argila (< 0,002 mm).

3.1.2. Equivalente de Areia

O ensaio para determinação do equivalente de areia foi realizado conforma a norma ME 054/97 do DNER (1997), sobre as amostras A100, Sa100, Sb100, Sc100, KR100, Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, no estado solto, preparadas com secagem prévia em estufa a 105 ± 5 °C até constância de massa e peneiradas até atingir-se um diâmetro máximo de 4,8 mm. As determinações foram praticadas em duplicatas e com apresentação dos valores médios.

Este ensaio se distingue do ensaio de determinação da granulometria por peneiramento e sedimentação, pois nele o que se estabelece é a relação percentual volumétrica entre a faixa granulométrica de areia e a totalidade da amostra.

3.1.3. Grau de Floculação

O ensaio para determinação do grau de floculação, definido através da relação entre o teor de argila floculada e o teor de argila total (floculada e dispersa em água), foi realizado conforme Manual de Análise de Solo da EMBRAPA (2017), pelo método do densímetro, sobre as amostras A100, Sa100, Sb100, Sc100, KR100, Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, no estado solto, preparadas com secagem prévia em estufa a 105 ± 5°C até constância de massa. As determinações foram praticadas em duplicatas e com apresentação dos valores médios.

3.1.4. Massa Específica Real dos Grãos

O ensaio para determinação da massa específica real dos grãos passantes e retidos na peneira 4,8 mm foi realizado conforme as normas NM 52/09 e NM 53/09 da ABNT (2009), respectivamente, sobre as amostras A100, Sa100, Sb100, Sc100, KR100, Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, no estado solto, preparadas com secagem prévia em estufa a 105 ± 5°C até constância de massa. As determinações foram praticadas em duplicatas e com apresentação dos valores médios.

3.1.5. Teor de Matéria Orgânica

O ensaio para determinação do teor de matéria orgânica foi realizado conforme a norma NBR 13600/96 da ABNT (1996) pelo método de queima em mufla à temperatura de 440 ± 5°C, sobre as amostras A100, Sa100, Sb100, Sc100, KR100, Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, no estado solto, preparadas sem secagem prévia em estufa a 105 ± 5°C até constância de massa. As determinações foram praticadas em duplicatas e com apresentação dos valores médios.

3.1.6. Limites de Consistência

O ensaio para determinação do Limite de Plasticidade (LP) foi realizado conforme a norma NBR 7180/16 da ABNT (2016), sobre as amostras Sa100, Sb100, Sc100, Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, no estado solto, preparadas com secagem prévia em estufa a $105 \pm 5^{\circ}$ C em estufa a $105 \pm 5^{\circ}$ C até constância de massa e peneiradas até atingir-se um diâmetro máximo de 0,425 mm. As determinações foram praticadas em duplicatas e com apresentação dos valores médios.

O ensaio para determinação do Limite de Liquidez (LL) foi realizado conforme a norma NBR 6459/16 da ABNT (2016), sobre as amostras Sa100, Sb100, Sc100, Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, preparadas com secagem prévia em estufa a $105 \pm 5^{\circ}$ C em estufa a $105 \pm 5^{\circ}$ C até constância de massa e peneiradas até atingir-se um diâmetro máximo de 0,425 mm. As determinações foram praticadas em duplicatas e com apresentação dos valores médios.

O ensaio para determinação do Limite de Contração (LC) foi realizado conforme a norma NBR 7183/82 da ABNT (1882), sobre as amostras Sa100, Sb100, Sc100, Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, preparadas com secagem prévia em estufa a $105 \pm 5^{\circ}$ C em estufa a $105 \pm 5^{\circ}$ C até constância de massa e peneiradas até atingirse um diâmetro máximo de 0,425 mm. As determinações foram praticadas em duplicatas e com apresentação dos valores médios.

Estes limites se baseiam na constatação de que os solos se comportam de formas distintas conforme o teor de umidade. Isto também significa que o teor de umidade corresponde ao estado de consistência do solo (sólido, semissólido, plástico e líquido), e que a passagem de um estado para outro ocorre gradualmente, mediante a sua variação, tal que a definição dos limites de consistência se dá de forma arbitrária, porém padronizada.

A padronização dos ensaios é o que possibilita a comparação, identificação e classificação do comportamento de diferentes solos. Nesse sentido, os valores obtidos são indicativos do tipo de partícula presentes no solo, e representam adequadamente principalmente aqueles solos cujas partículas ocorrem isoladamente, isto é, sem agregações. Isto, porque os ensaios para definição dos limites de consistência são realizados com amostras secas e destorroadas, isto é, amassadas energicamente. Em razão disso, as correlações estabelecidas entre os valores obtidos e o comportamento dos solos podem não se aplicar adequadamente aos solos residuais tão bem como se aplicam aos solos transportados.

Adicionalmente, realizou-se ainda o cálculo do Índice de Plasticidade (IP), definido pela subtração do valor do LP do valor de LL, e o cálculo da atividade de Skempton, definida pela razão entre o IP e a percentagem em massa da faixa granulométrica de argila (< 0,002 mm).

3.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

3.2.1. Curva de Compactação

O ensaio para determinação da curva de compactação foi realizado conforme a norma NBR 7182/16 da ABNT (2016), sobre as amostras Sa100, Sb100, Sc100, Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, no estado compactado, preparadas com secagem prévia em estufa a 105 ± 5°C até constância de massa, moldadas em cinco teores distintos de umidade, sem reuso de material, e compactadas na energia Proctor Intermediária.

Neste trabalho utilizaram-se cilindros do tipo grande e soquete de compactação do tipo grande, tal que para atingir-se a energia Proctor Intermediária fora executada uma sequência de 12 golpes por camada em 3 camadas subsequentes utilizando-se um compactador do tipo automático (Figura 15).

3.2.2. Índice de Suporte Califórnia (ISC)

O ensaio para determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) foi realizado conforme a norma NBR 9895/17 da ABNT (2016), sobre as amostras Sa100, Sb100, Sc100, Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, referentes ao ensaio de determinação da curva de compactação, após 4 dias de imersão em água (Figura 16); e, de igual forma, sobre as amostras Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, no estado compactado, preparadas com secagem prévia em estufa a 105 ± 5°C até constância de massa, moldadas na umidade ótima e compactadas na energia Proctor Intermediária, após 28 dias de cura e 4 dias de imersão em água.





Figura 16 – Imersão em água.



Fonte: Autor. Fonte: Autor.

Após os respectivos períodos de cura e/ou de imersão, realizara-se o rompimento das amostras através da penetração de um pistão cilíndrico, a uma velocidade de 1,27 mm/min. Utilizando-se um anel dinamômetro na prensa, registrara-se os valores necessários para o cálculo das pressões referentes às penetrações de 2,54 e 5,08 mm. O valor de ISC é então determinado pela relação entre a pressão necessária para o pistão cilíndrico penetrar um corpo de prova de material a ser avaliado e a pressão necessária para o mesmo pistão penetrar um corpo de prova de brita graduada padrão (de 6,90 e 10,35 MPa para as penetrações de 2,54 e 5,08 mm respectivamente).

3.2.3. Expansão

O ensaio para determinação da expansão foi realizado conforme a norma NBR 9895/17 da ABNT (2017), cujas condições de ensaio determinam a completa saturação das amostras através de imersão em água por um prazo de cerca de 4 dias, sobre as amostras Sa100, Sb100, Sc100, Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, referentes ao ensaio para determinação da curva de compactação.

3.2.4. Expansibilidade

O ensaio para determinação da expansibilidade foi realizado conforme a norma ME 160/12 do DNIT (2012), sobre as amostras Sa100, Sb100, Sc100, Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, no estado compactado, preparadas com secagem prévia em estufa a 105 ± 5°C até constância de massa e peneiradas até atingir-se um diâmetro máximo de 0,425 mm.

Este ensaio se distingue do ensaio de determinação de expansão, pois ele é realizado em amostras compactadas inicialmente sob condições não saturadas em aparelho próprio, especificado na referida norma.

3.3. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

3.3.1. Reação ao Ácido Clorídrico (HCI)

O ensaio para determinação da reação ao ácido clorídrico (HCI) foi realizado conforme a norma D 2488/06 da ASTM (2006), sobre as amostras A100, Sa100 e KR100, no estado solto, preparadas com secagem prévia em estufa a 105 ± 5°C até constância de massa.

Trata-se de um ensaio de simples execução, que permite inferir sobre algumas características da amostra, como a presença de carbonato de cálcio (CaCO₃). Isto, porque quando uma amostra cujo principal constituinte é CaCO₃ é adicionada à uma solução de ácido clorídrico (HCI), ocorre uma reação violenta que dá origem ao gás carbônico (CO₂), que se desprende, levando a formação imediata de bolhas.

3.3.2. Potencial Hidrogeniônico (pH)

O ensaio para determinação do pH foi realizado conforme manual de análise de solo da EMBRAPA (2017), pelo método em água, sobre as amostras A100, Sa100, Sb100, Sc100, KR100, Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, no estado solto, preparadas com secagem prévia em estufa a 105 ± 5°C até constância de massa.

O pH é uma escala utilizada para medir a concentração de cátions hidrônio (H₃O⁺) em uma solução, indicando o caráter ácido, básico ou neutro da solução. Neste trabalho, sua determinação visa compreender, além da distribuição de cargas na solução, os fenômenos desenvolvidos na interação solo-KR relacionados às trocas catiônicas.

3.3.3. Análise Química de Complexo Sortivo

O ensaio para análise química de complexo sortivo, foi realizado conforme manual de análise de solo da EMBRAPA (2017), sobre as amostras A100, Sa100, Sb100, Sc100 e KR100, no estado solto e preparadas com secagem prévia em estufa a 105 ± 5°C até constância de massa; e, de igual forma, sobre amostras de referência CPIII100 (Cimento Portland tipo III, também denominado Cimento Portland de Alto-forno), CPV100 (Cimento Portland tipo V, também denominado Cimento Portland de Alta Resistência Inicial) e CHI100 (Cal Hidratada tipo I), no estado solto e preparadas com secagem prévia em estufa a 105 ± 5°C até constância de massa;

Os resultados deste ensaio compreendem as concentrações dos macronutrientes (Hidrogênio (H), Cálcio (Ca); Magnésio (Mg); Potássio (K); Sódio (Na); Enxofre (S); e Fósforo (P)) e micronutrientes (Alumínio (Al); Boro (B); Cobre (Cu); Ferro (Fe); Manganês (Mn); e Zinco (Zn)). Adicionalmente, realizou-se ainda o cálculo de alguns índices reconhecidos na análise química do complexo sortivo de solos: Soma de Bases, Capacidade de Troca Catiônica (CTC) Efetiva, CTC Total e Saturação de

Bases (relação percentual entre a Soma de Bases e a CTC Total). Segundo EMBRAPA (2010), a Soma de Bases representa a quantidade de cátions básicos Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e Na⁺ retidos à superfície dos coloides em condição permutável. A CTC Efetiva representa a quantidade de cátions já considerados na Soma de Bases e Al³⁺. A CTC Total, por sua vez, representa a quantidade de cátions já considerados na CTC efetiva e H⁺.

Segundo Sonon *et al.* (2017), a Soma de Bases pode ser uma fração da CTC Efetiva ou aproximadamente igual a CTC Efetiva em função do pH do solo. Em geral, se o pH estiver abaixo de cerca de 5,5, a Soma de Bases será menor que CTC Efetiva. Em pH aproximado de 5,5 ou superior, todo o alumínio (Al³+) é precipitado para solução sob a forma de hidróxido de alumínio (Al(OH)₃), e, portanto, a Soma de Bases é igual a CTC Efetiva. A CTC Efetiva, por sua vez, pode ser uma fração da CTC Total ou aproximadamente igual a CTC Total também em função do pH do solo. Em geral, se o pH estiver abaixo de cerca de 7,0, a CTC Efetitva será menor que CTC Total. Em pH aproximado de 7,0 ou superior, todo o hidrogênio (H+) é retirado da superfície de adsorção por reações diretas com ânions hidroxila (OH-), originando água (H2O), e, portanto, a CTC Efetiva é igual à CTC Total, que é igual à Soma de Bases.

3.3.4. Espectroscopia de Raios-X por Energia Dispersiva (EDS)

O ensaio para EDS foi realizado conforme manual de equipamento da JEOL BRASIL Instrumentos Científicos Ltda, modelo JSM-6610, com resolução de 3nm e detectores de raios-X do tipo EDS, sobre as amostras A100, Sa100 e KR100, no estado solto e preparadas com secagem prévia em estufa a $105 \pm 5^{\circ}$ C até constância de massa.

Trata-se de um ensaio sofisticado de mapeamento de superfícies, que através de instrumentos que detectam e processam raios-X, convertendo-os em dados que representam o tipo e a quantidade de cada elemento presente na amostra, permite a obtenção de microanálises quantitativas a respeito da composição química das amostras em função de elementos.

Segundo Queiroz et al. (2012), a técnica, no entanto, não produz alta confiabilidade nos resultados, não sendo indicada para detecção de pequenas concentrações (< 2%), como eventuais impurezas presentes na amostra, ou para detecção de elementos químicos com peso molecular inferior ao sódio (como, por exemplo, o oxigênio, o nitrogênio e o carbono, principais elementos da química orgânica). Alguns elementos químicos, com o hidrogênio, hélio, lítio e berílio também não são detectados por esta técnica espectroscópica.

3.3.5. Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)

O ensaio para FRX foi realizado conforme manual de equipamento WDS Philips, modelo PW 2404, que oferece uma determinação quantitativa rápida de elementos atômicos grandes e pequenos, sobre as amostras A100, Sa100 e KR100, no estado solto e preparadas com secagem prévia em estufa a 105 ± 5°C até constância de massa.

Também segundo Queiroz *et al.* (2012), o ensaio tem as indicações similares à EDS, porém com maior resolução. A radiação de FRX normalmente é difratada por um cristal sob diferentes ângulos para separar os comprimentos de ondas dos raios-X e identificar cada elemento químico. Diferentemente da EDS, na FRX as microanálises quantitativas a respeito da composição química das amostras são geralmente apresentadas em função de óxidos.

3.3.6. Análise Termogravimétrica (TGA)

O ensaio para TGA foi realizado conforme manual de equipamento Shimadzu TGA-50, com fluxo de 50 ml/min de ar sintético até 1000 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, sobre as amostras Sa100 e KR100, no estado solto e preparadas com secagem prévia em estufa a 105 ± 5°C até constância de massa.

Trata-se é uma técnica destrutiva no ramo de análises térmicas, na qual se monitora a variação da massa de uma amostra em função da temperatura em um ambiente de temperatura e atmosfera controladas.

3.3.7. Difratometria de Raios-X (DRX)

O ensaio para DRX foi realizado conforme manual de equipamento difratômetro de Raios-X com alvo de cobre (Cu), sobre as amostras A100, Sa100 e KR100, no estado solto, preparadas com secagem prévia em estufa a 105 ± 5°C até constância de massa, moídas em moinho de bolas e peneiradas até atingir-se um diâmetro máximo de 0,075 mm; e de igual forma sobre as amostras Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, referentes ao ensaio de determinação do ISC, moídas em moinho de bolas e peneiradas até atingir-se um diâmetro máximo de 0,075 mm. Para interpretação dos resultados, recorreu-se ao banco de dados *Crystallography Open Database* (COD).

3.3.8. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O ensaio para MEV foi realizado conforme manual de equipamento JSM-6610 da JEOL BRASIL Instrumentos Científicos Ltda, com resolução de 3nm e detectores de raios-X do tipo EDS e WDS, sobre as amostras A100, Sa100 e KR100, no estado solto e preparadas com secagem prévia em estufa a 105 ± 5°C até constância de massa; e de igual forma sobre as amostras Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, referentes ao ensaio de determinação do ISC.

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.1.1. Granulometria por Peneiramento e Sedimentação

Na Figura 12 são apresentadas as curvas granulométricas das amostras submetidas ao ensaio de determinação da granulometria por peneiramento e sedimentação e na Tabela 6 é apresentada a respectiva composição granulométrica em função das faixas tradicionalmente reconhecidas na engenharia geotécnica: argila, silte, areia fina, areia média, areia grossa, pedregulho fino, pedregulho médio e pedregulho grosso. Os valores de módulo de finura e relação arcabouço-matriz, funções desta composição granulométrica, são apresentados nas Figura 18 e Figura 19, respectivamente.

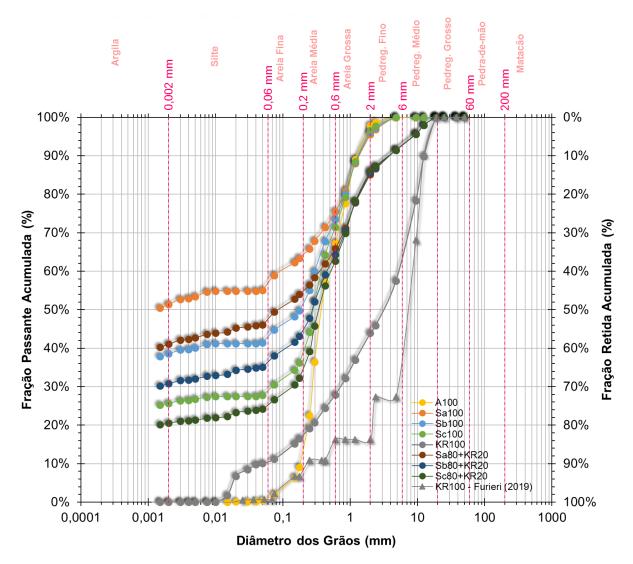


Figura 17 – Curvas Granulométricas das amostras.

Tabela 6 – Granulometria das amostras.

	Araila	Silte	Areia	Areia	Areia	Pedr.	Pedr.	Pedr.
	Argila		Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso
(mm)	<0,002	0,002-0,06	0,06-0,2	0,2-0,6	0,6-2	2-6	6-20	20-60
A100	0,0%	1,0%	12,5%	53,8%	30,5%	2,1%	0,1%	0,0%
Sa100	51,3%	5,3%	7,6%	11,3%	20,1%	4,4%	0,0%	0,0%
Sb100	38,5%	4,2%	8,8%	21,9%	22,7%	3,8%	0,0%	0,0%
Sc100	25,7%	3,2%	10,0%	32,5%	25,3%	3,3%	0,0%	0,0%
KR100	0,0%	10,5%	6,8%	10,5%	16,0%	18,9%	37,3%	0,0%
Sa80+KR20	41,1%	6,3%	7,4%	11,1%	19,3%	7,4%	7,4%	0,0%
Sb80+KR20	30,8%	5,5%	8,4%	19,6%	21,3%	6,9%	7,5%	0,0%
Sc80+KR20	20,5%	4,6%	9,4%	28,1%	23,4%	6,4%	7,6%	0,0%
KR100 Furieri (2019)	0,0%	0,7%	7,4%	8,2%	0,0%	21,5%	62,2%	0,0%

5,00 4,50 4,00 **Wodnlo de Linnta** 3,00 3,00 2,50 2,00 1,50 2,08 1,00 1,90 1,71 1,33 0,50 0,00 A100 Sa 100 Sb100 Sc100 KR100 Sa80+KR20 Sb80+KR20 Sc80+KR20

Figura 18 – Módulo de Finura das amostras.

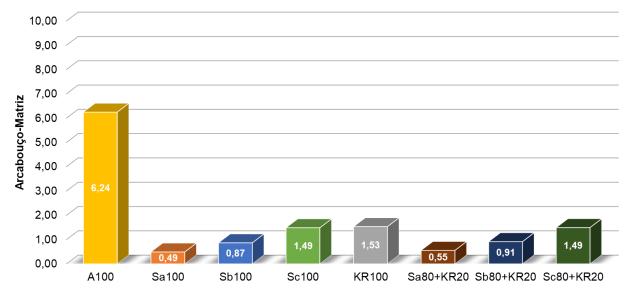


Figura 19 – Relação Arcabouço-Matriz das amostras.

Conforme resultados, A100 é constituída sobretudo por areia fina, areia média e areia grossa (96,8%). Em razão de sua granulometria mais grossa apresenta altos valores de módulo de finura e de relação arcabouço-matriz. Estes valores sugerem também um maior número de vazios existentes em um determinado volume de material solto. Sa100, por sua vez, é constituída sobretudo de argila e silte (56,6%), e em razão de sua granulometria mais fina apresenta baixos valores de módulo de finura e relação arcabouço-matriz. Em contrapartida, estes valores sugerem um menor número de vazios existentes em um determinado volume de material solto. Nota-se que à medida que se incorpora A100 à amostra Sa100 por substituição parcial, resultando em Sb100 e Sc100, ocorrem aumentos das faixas granulométricas de areia fina, areia média e areia grossa em detrimento de reduções das faixas granulométricas de argila e silte. A saber, 56,6%, 42,7% e 28,9%, respectivamente. Estas alterações se desdobram também em aumentos proporcionais dos valores de módulo de finura e de relação arcabouço-matriz.

KR100 é constituída sobretudo de pedregulho fino e pedregulho médio (56,1%) e as faixas granulométricas mais finas são constituídas exclusivamente por silte (10,5%), sem presença de argila. Furieri (2019), no entanto, embora tenha utilizado em seu trabalho o coproduto de dessulfuração em igual extensão granulométrica (≤ 19 mm), encontrara para a referida amostra uma distribuição granulométrica com maior

presença de pedregulho fino e pedregulho médio (83,7%). Segundo Sheng (et al., 2014), a formação das faixas granulométricas mais grossas do coproduto de dessulfuração KR está associada ao teor de escória de alto-forno residual não removida na etapa de alto-forno e do teor de ferro residual não removido na etapa de separação magnética, o que de fato é variável no processo produtivo do aço. A reação desses compostos com o dessulfurante, geralmente a cal, tendem a gerar grandes partículas durante o resfriamento da escória. A formação das faixas granulométricas mais finas, por sua vez, está associada ao teor de carbono, que também é variável. O carbono em relação aos outros componentes da escória apresenta coeficiente de expansão significativamente diferente, o que resulta em diferentes encolhimentos durante o resfriamento, o que oportuniza a fissuração.

Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20 apresentam constituições granulométricas bem distintas. Nota-se por exemplo, do comparativo entre os três solos, que a ação do coproduto de dessulfuração KR é mais acentuada em Sa100, haja visto o maior distanciamento entre o par de curvas granulométricas das amostras Sa100 e Sa80+KR20, em relação ao distanciamento entre os pares de curvas granulométricas das amostras Sb100 e Sb80+KR20 ou Sc100 e Sc80+KR20. Esta ação parece ainda desenvolver-se graficamente de forma mais perceptível nas faixas granulométricas mais finas, conforme também sinalizado a partir do aumento dos resultados numéricos de módulo de finura das misturas. Estas constatações são de certa forma já esperadas, visto que o coproduto é constituído em grande peso por faixas granulométricas mais grossas, tal que o efeito de sua incorporação sobre a granulometria será tão mais significante, quanto mais fino o material a ser estabilizado. Os resultados de relação arcabouço-matriz, por sua vez, não reconhecem efeito expressivo da incorporação de KR100 às referidas amostras. Isto, porque este índice não considera em seu cômputo as faixas granulométricas de pedregulho fino e pedregulho médio, em que se concentra a ação de KR100 sob a granulometria.

4.1.2. Equivalente de Areia

Na Figura 20 são apresentados os resultados das amostras submetidas ao ensaio de determinação do equivalente de areia. Nota-se que a amostra Sa100 apresenta valor de equivalente de areia de cerca de 0%, que se deve à constituição predominantemente fina da amostra, característica de sua formação. Sb100 e Sc100, por sua vez, apresentam valores crescentes de equivalente de areia à medida que se incorpora A100.

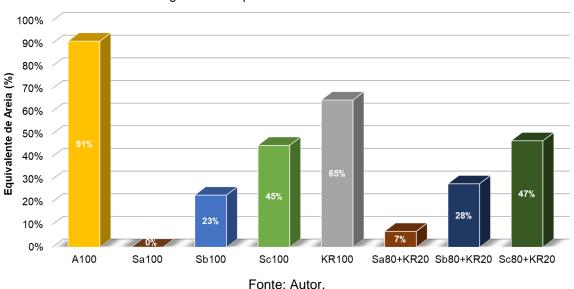


Figura 20 – Equivalente de Areia das amostras.

Em contrapartida, a incorporação de KR100 às amostras não se traduz em alterações significativas nos valores de equivalente de areia. Isto, porque uma parcela significativa da amostra KR100 é constituída de grãos de diâmetro superior à 4,8 mm, desconsiderados neste ensaio, o que reduz a proporção de KR100 incorporada.

4.1.3. Grau de Floculação

Na Figura 21 são apresentados os resultados das amostras submetidas ao ensaio de determinação do grau de floculação. Da Figura 21 nota-se que não é possível constatar modificações apreciáveis no grau de floculação dos solos com a incorporação de KR100 por substituição parcial às amostras Sa100, Sb100 e Sc100, uma vez que as referidas amostras já se apresentam com a faixa granulométrica argila demasiadamente floculada. Isto possivelmente deve-se à formação destes solos.

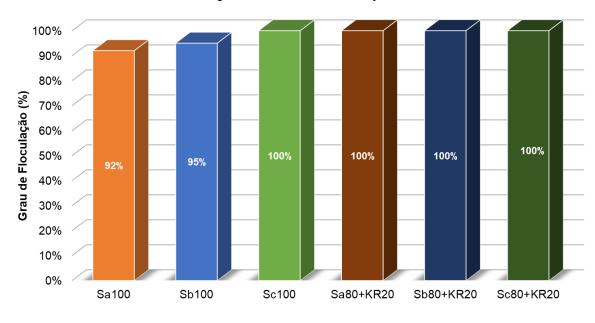


Figura 21 - Grau de Floculação.

Segundo Martínez (2003), em solos lateríticos, a quase ausência de argila dispersa, correspondente a um elevado grau de floculação, ocorre devido a presença de sesquióxidos de ferro e alumínio que revestem e unem os constituintes argilosos em agregações. O grau de floculação também é influenciado por um elevado teor de matéria orgânica, que afeta a microestrutura e o balanço de cargas elétricas. Destarte a ação de KR100 também não parece opor-se a esta microestrutura, isto é, não parece promover a dispersão das partículas de argila nas condições do ensaio.

4.1.4. Teor de Matéria Orgânica

Na Figura 22 são apresentados os resultados das amostras submetidas ao ensaio de determinação do teor de matéria orgânica.

A amostra Sa100, natural, de formação tropical laterítica, apresenta particularmente um expressivo teor de matéria orgânica, de 8,9%. Segundo Nascimento *et al.* (2010), em condições naturais, o teor de matéria orgânica é condicionado pela alteração de resíduos orgânicos, além é claro de uma série de fatores, como temperatura, aeração, pH e disponibilidade de água, sendo comum para solos formadas sob condições de grande umidade, apresentarem horizontes subsuperficiais com grande acumulação de matéria orgânica e/ou óxidos de ferro.

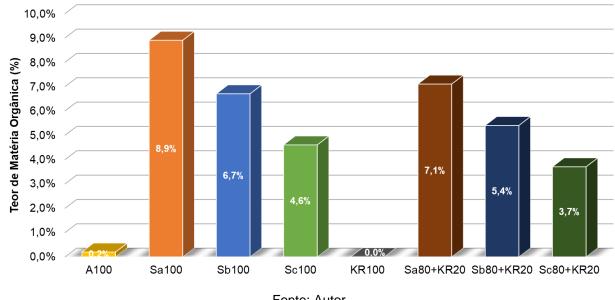


Figura 22 – Teor de Matéria Orgânica das amostras.

As amostras A100 e KR100, submetidas a processos próprios de beneficiamento para utilização na indústria da construção civil, apresentam teores ínfimos de matéria orgânica, de 0,2% para A100, em razão da lavagem e seleção granulométrica, e de aproximadamente 0,0% para KR100, em razão do superaquecimento nos fornos de siderurgia. As amostras Sb100, Sc100, Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20 apresentam valores de teor de matéria orgânica proporcionais aos pesos ponderados dos teores de A100, Sa100 e KR100 em suas composições, isto é, ocorre redução do valor desta grandeza à medida que se incorpora A100 ou KR100 às amostras.

4.1.5. Massa Específica Real dos Grãos

Na Figura 23 são apresentados os resultados das amostras submetidas ao ensaio de determinação da massa específica real dos grãos.

Nota-se que as amostras A100, Sa100, Sb100 e Sc100 apresentaram o mesmo valor para esta grandeza física, de 2,69 g/cm³. Isto, porque os constituintes minerais predominantes no solo são geralmente quartzo, feldspatos, e silicatos e aluminatos coloidais, cujos valores de massa específica real dos grãos, de fato, não variam expressivamente.

Em contrapartida, as diversas escórias siderúrgicas apresentam grande amplitude de variação nos valores para esta grandeza, uma vez que os seus constituintes são intrínsecos aos materiais e aos processos da cadeia produtiva na qual se inserem. A amostra KR100 particularmente apresenta o valor de 3,18 g/cm³.

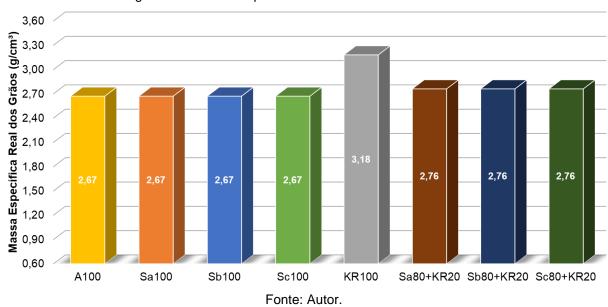


Figura 23 – Massa Específica Real dos Grãos das amostras.

Nota-se que as amostras A100, Sa100, Sb100 e Sc100 apresentaram o mesmo valor para esta grandeza física, de 2,69 g/cm³. Isto, porque os constituintes minerais predominantes no solo são geralmente quartzo, feldspatos, e silicatos e aluminatos coloidais, cujos valores de massa específica real dos grãos, de fato, não variam expressivamente. Em contrapartida, as diversas escórias siderúrgicas apresentam grande amplitude de variação nos valores para esta grandeza, uma vez que os seus constituintes são intrínsecos aos materiais e aos processos da cadeia produtiva na qual se inserem. A amostra KR100 particularmente apresenta o valor de 3,18 g/cm³.

As amostras Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20 apresentam valores de massa específica real dos grãos proporcionais aos pesos ponderados dos teores de Sa100, Sb100 ou Sc100 e KR100, respectivamente, em suas composições. Considerando que a proporção de incorporação de KR100 é a mesma nos três casos, de 80:20 em relação à massa seca, as amostras apresentaram o mesmo valor para esta grandeza física, de 2,76 g/cm³.

4.1.6. Limites de Consistência

Na Figura 24 são apresentados os resultados das amostras submetidas aos ensaios de determinação do LL, LP e LC.

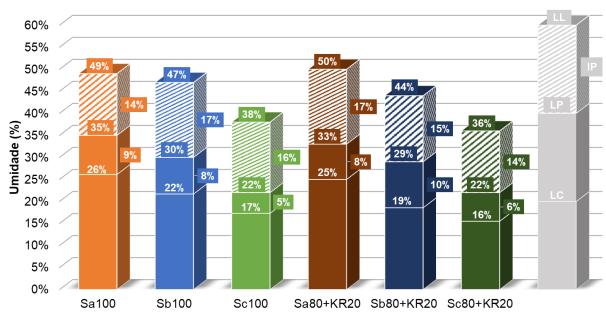


Figura 24 – Limites de Consistência.

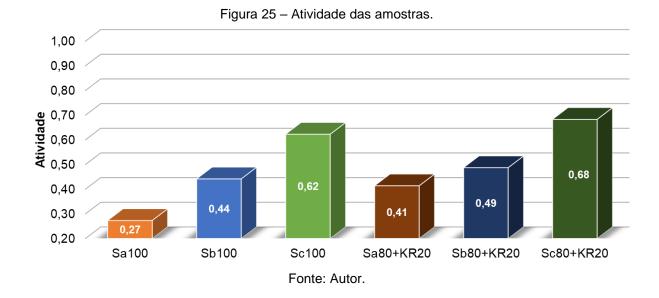
Fonte: Autor.

Da Figura 24 nota-se que as amostras Sa100, Sb100 e Sc100 apresentam valores decrescentes de LL, LP e LC à medida que se incorpora A100. Segundo Castello (1988), solos de mesma formação, isto é, com a predominância do mesmo argilomineral, mas com diferentes teores da faixa granulométrica de areia, apresentarão limites de consistência diferentes, tanto menores quanto maiores os teores da faixa granulométrica de areia, numa razão aproximadamente constante. Para o IP, por sua vez, não há uma previsão segura sobre a variação de seu comportamento. A saber, os valores de LL e LP não resultam em mudanças significativas nos valores de IP à medida que se incorpora A100 às referidas amostras.

A incorporação de KR100 às amostras Sa100, Sb100 e Sc100, por sua vez, não resulta em mudanças significativas nos LL, LP, LC, e, por conseguinte, no IP. Isto, porque na execução dos respectivos ensaios desconsideram-se as frações granulométricas superiores à 0,425 mm, reduzindo a presença do coproduto (constituído de cerca de 76% em massa de grãos de diâmetro superior à 0,425 mm)

e mantendo-se a predominância de Sa100 nas misturas e, portanto, de seus respectivos argilominerais. Além disso, há que se considerar que os ensaios para determinação dos índices de consistência foram realizados imediatamente após a mistura dos materiais, não permitindo que se desenvolvessem interações suficientemente capazes de alterar a plasticidade dos materiais, e através de normativas cujos procedimentos de ensaio incluem a espatulação das amostras, o que destruiria interações físicas entre os grãos.

Na Figura 25 são apresentados os valores de atividade da fração granulométrica argila das amostras, também denominada atividade de Skempton, calculada pela razão entre o IP e a percentagem em massa da faixa granulométrica de argila.



Considerando que praticamente não ocorre variação no IP, numerador, à medida que se incorpora A100 ou KR100 ocorre redução da percentagem de fração granulométrica de argila, denominador, e, por conseguinte, aumento do valor da atividade, tal que em todos os casos atingiram-se valores inferiores à 0,75, correspondentes, segundo Skempton, à fração granulométrica de argila do tipo inativa.

4.1.7. Classificações

4.1.7.1. Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)

Na Figura 26 são apresentados os pontos correspondentes às amostras no ábaco de Casagrande, critério de classificação segundo a metodologia SUCS; e na Tabela 7 são apresentadas as identificações das amostras submetidas à referida classificação com a descrição dos materiais predominantes.

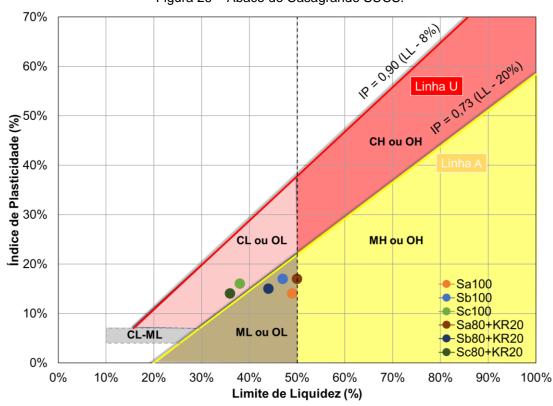


Figura 26 – Ábaco de Casagrande SUCS.

Fonte: Autor.

Tabela 7 – Classificação SUCS das amostras.

SP	Areia Mal Graduada		
	Areia Mal Graduada		
ML	Silte		
SM	Areia Siltosa		
SC	Areia Argilosa		
GP-GM	Pedregulho Mal Graduado Siltoso		
SM	Areia Siltosa		
SM	Areia Siltosa		
SC	Areia Argilosa		
	SM SC GP-GM SM		

Nota-se o efeito mais expressivo da incorporação de KR100 ocorre apenas sobre a amostra Sa100, passando de silte de baixa compacidade (ML) em Sa100 para areia siltosa (SM) em Sa80+KR20, enquanto Sb100 e Sc100 permaneceram areia siltosa (SM) e areia argilosa (SC), respectivamente, após incorporação.

4.1.7.2. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

Na Tabela 8 são apresentados os valores de índice de grupo e as identificações das amostras submetidas à classificação AASHTO com a descrição dos materiais predominantes.

Índice de Grupo Identificação Descrição A100 A-3 Areia Fina Sa100 14 A-7-5 Argila Sb100 8 A-7-5 Argila Sc100 3 A-2-6 Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa **KR100** 0 Pedra Britada, Pedregulho ou Areia A-1-a Sa80+KR20 A-7-5 10 Argila Sb80+KR20 5 A-7-6 Argila Sc80+KR20 2 A-2-6 Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa

Tabela 8 – Classificação AASHTO das amostras.

Fonte: Autor.

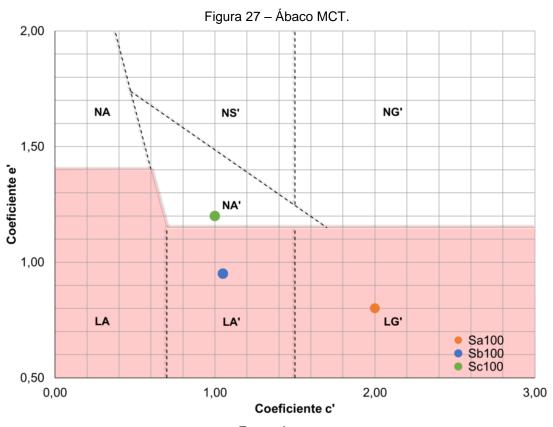
Nota-se o efeito mais expressivo da incorporação de KR100 apenas ocorre sobre a amostra Sb100, passando de argila do tipo A-7-5 em Sb100 para argila do tipo A-7-6 em Sb80+KR20, enquanto Sa100 e Sc100 permaneceram argila A-7-5 e areia argilosa e/ou siltosa do tipo A-2-6, respectivamente, após incorporação.

4.1.7.3. Tropical Compact Miniature (MCT)

Segundo Batalione (2007), a formação dos solos tropicais, notadamente dos solos brasileiros, está condicionada a alguns fatores específicos, como: temperaturas elevadas, grande regime pluviométrico, períodos de umidade elevada em contraste com períodos de seca, entre outros. Os solos tropicais podem ser divididos em dois tipos distintos: saprolíticos, que se apresentam menos intemperizados, e portanto,

possuem características intrínsecas ao manto rochoso que lhe deu origem; e lateríticos, que apresentam-se como solos mais intemperizados.

No ANEXO I são apresentadas as curvas mini-MCV e as respectivas curvas de compactação; na Figura 27 são apresentados os pontos correspondentes às amostras no ábaco de classificação, critérios de classificação segundo a metodologia MCT; e na Tabela 9 são apresentadas as identificações das amostras submetidas à classificação MCT com a descrição dos materiais predominantes.



Fonte: Autor.

Tabela 9 – Classificação MCT das amostras.

	Coeficiente c'	Coeficiente e'	Identificação	Descrição
Sa100	2,00	0,80	LG'	Argiloso Laterítico
Sb100	1,05	0,95	LA'	Arenoso Laterítico
Sc100	1,00	1,20	NA'	Arenoso Não Laterítico

Nota-se que a amostra Sa100 corresponde a um solo do tipo argiloso laterítico, e que as amostras Sb100 e Sc100 corresponderiam, caso fossem naturais, a solos do tipo arenoso laterítico e arenoso não laterítico, respectivamente.

Segundo Espindola *et al.* (2008), nas regiões tropicais, os solos lateríticos são os que ocorrem de forma mais expressiva e associam-se, geralmente, a solos muito desenvolvidos e espessos. Sob a forma de depósitos, as superfícies geomorfológicas os exibem em diferentes profundidades, o que muitas vezes afeta a relação entre a pedogênese (evolução do solo) e a morfogênese (formação do relevo).

No Brasil, por exemplo, a ocorrência de solos lateríticos é bastante generalizada nas suas diversas regiões bioclimáticas, e as questões da antiguidade dos solos e das superfícies nas quais eles se inserem nem sempre são correlacionáveis. Na grande maioria destes casos, os pesquisadores atribuem a formação dos solos tropicais lateríticos a um fator comum: a atuação de um intenso intemperismo químico, de modo que a superfície desenvolvida possa testemunhar pedogêneses múltiplas. Segundo Bricalli 2015), o estado do Espírito Santo, localizado na região Sudeste, de interesse nesse trabalho, representa um notável exemplo de mosaico nos aspectos geológico e geomorfológico. Geologicamente, o estado divide-se em dois compartimentos: o primeiro é caracterizado por rochas do embasamento pré-cambriano, de litologias diversas; o segundo corresponde à porção emersa da bacia do Espírito Santo, aflorando depósitos sedimentares cenozoicos (Formação Barreiras e Sedimentos Quaternários). Geomorfologicamente, apresenta relevos de serras e colinas, desenvolvidas sobre as rochas do embasamento pré-cambriano; tabuleiros costeiros, associados aos depósitos da Formação Barreiras; e extensas planícies costeiras associadas à Sedimentação Quaternária.

4.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

4.2.1. Curva de Compactação

No ANEXO I são apresentados os resultados das amostras submetidas ao ensaio de determinação da curva de compactação na energia Proctor Intermediária; na Figura 28 são apresentados os valores de umidade ótima; e na Figura 29 são apresentados os valores de massa específica aparente seca máxima.

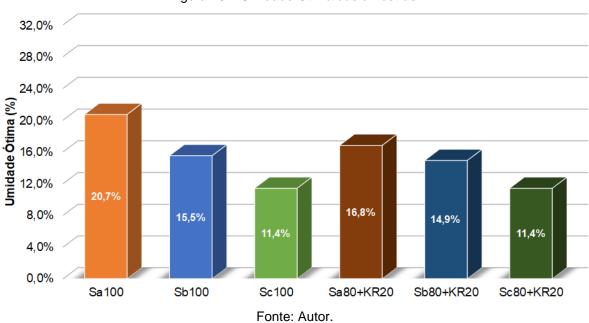
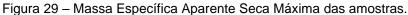
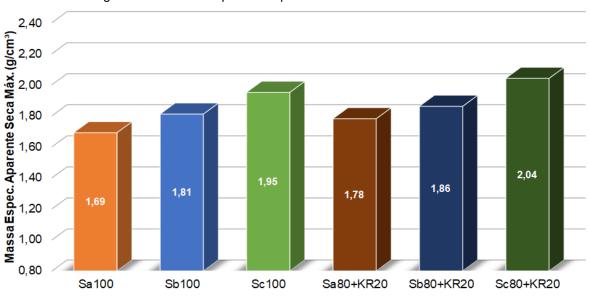


Figura 28 – Umidade Ótima das amostras.





Nota-se que as amostras Sa100, Sb100 e Sc100 apresentam valores decrescentes de umidade ótima e crescentes de massa específica aparente seca à medida que se incorpora A100, e que as amostras Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, por sua vez, também apresentam valores decrescentes de umidade ótima e crescentes de massa específica aparente seca à medida que se incorpora KR100. Segundo Luciano et al. (2012), isto se deve ao fato de que a fração granulométrica argila e matéria orgânica apresentam CTC Total superior às outras frações granulométricas, por exemplo areia e silte. Essa característica somada à maior capilaridade e à maior área superficial específica, resulta em maior retenção de água. Como resultado, a fração granulométrica argila e matéria orgânica se tornam também mais reativas, capazes de interagir mais com a água, diminuindo o efeito lubrificante entre as partículas, e exigindo teores de umidade mais elevados para atingir-se a máxima densificação, correspondente à massa específica aparente seca máxima, conforme observado.

4.2.2. Índice de Suporte Califórnia (ISC)

No ANEXO III são apresentados os resultados das amostras submetidas ao ensaio de determinação da curva de Índice de Suporte Califórnia (ISC) para energia Proctor Intermediário; na Figura 30 são apresentados os resultados estimados de ISC na umidade ótima após 4 dias de imersão e após 28 dias de cura e 4 dias de imersão.

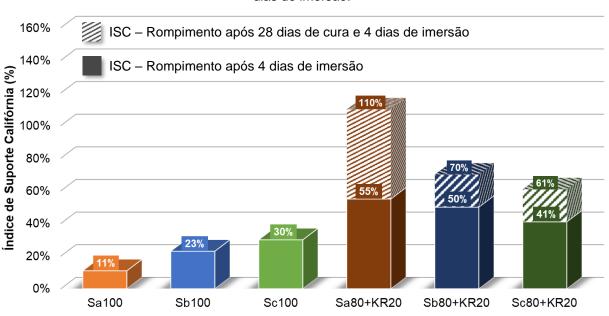


Figura 30 – ISC das amostras na umidade ótima após 4 dias de imersão e após 28 dias de cura e 4 dias de imersão.

Conforme resultados, a incorporação de KR100 às amostras Sa100, Sb100 e S100, após um período de 4 dias de imersão em água, se traduz em valores absolutos de 55%, 50% e 41%, respectivamente, ou seja, fora constatado que a amostra Sa100 – de granulometria mais fina, o que a priori, significaria uma prerrogativa de empeço à sua utilização, dada a experiência insatisfatória com materiais de elevado teor de finos – após incorporação de KR100, resultando em Sa80+KR20, fora responsável pelo maior incremento de resistência. Nesta concepção, quanto maior o teor de finos da mistura solo-KR, maior a eficiência da estabilização, o que reforça a hipótese de que os mecanismos de estabilização estejam relacionados às frações granulométricas mais finas.

Ainda conforme resultados, a incorporação de KR100 às amostras Sa100, Sb100 e S100, após um período 28 dias de cura e 4 dias de imersão em água, se traduz em valores absolutos de 110%, 70% e 61%, respectivamente. Isto significa que o tempo de cura também tem impacto sobre a estabilização com coproduto de dessulfuração KR, sobretudo para a amostra Sa100, cujos valores de ISC evidenciam um aumento significativo na resistência final.

Ademais, constata-se que o ensaio convencional de determinação de ISC, após 4 dias de imersão em água, não é o ensaio mais adequado para avaliação do efeito da incorporação de KR100 sobre a resistência das misturas, visto que os fenômenos desenvolvidos na interação solo-KR têm desenvolvimento contínuo, em período superior à 4 dias.

4.2.3. Expansão

No ANEXO IV são apresentados os resultados das amostras submetidas ao ensaio de determinação da expansão, realizado em paralelo com o ensaio de determinação do ISC; e na Figura 31 são apresentados os valores de expansão estimados para umidade ótima de compactação a partir das curvas de expansão.

Nota-se que na umidade ótima de compactação as amostras não desenvolvem expansão nas condições específicas do ensaio, com exceção da amostra Sb80+KR20.

1,6%
1,4%
1,2%

\$\int \text{1,0%}
0,8%
0,8%
0,4%
0,4%
0,2%
0,0%
0,0%
0,0%
0,0%
0,0%
Sa100
Sb100
Sc100
Sa80+KR20
Sb80+KR20
Sc80+KR20

Figura 31 – Expansão das amostras na Umidade Ótima.

4.2.4. Expansibilidade

Na Figura 32 são apresentados os resultados das amostras submetidas ao ensaio de determinação da expansibilidade, que se inicia sob condições não saturadas.

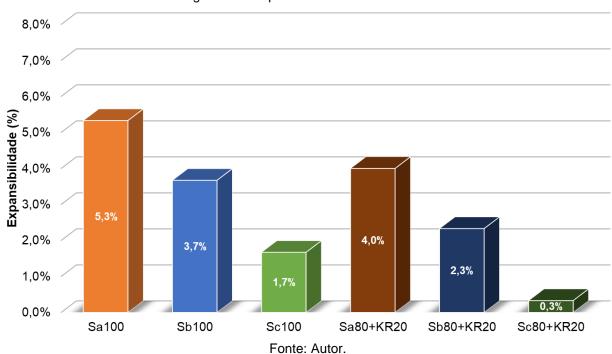


Figura 32 – Expansibilidade das amostras.

Segundo Moreira (2004), em solos não saturados, a variação volumétrica associada à expansibilidade do solo depende, em grande peso, dos fenômenos que ocorrem entre a água e o ar (efeito da capilaridade) e entre a água e as partículas sólidas (efeito da adsorção), responsáveis pela origem de um conjunto de forças que mantém água atraída ao esqueleto sólido (matriz) do solo. A este conjunto de forças está associado um potencial hidráulico, denominado potencial matricial. Ademais, este potencial matricial é mais forte quando o solo se encontra não saturado e tão mais intenso quanto mais fino for este solo, e vice-versa. Nota-se por exemplo que os valores de expansibilidade reduzem à medida que se incorpora A100 ou KR100 às amostras, pois há redução do teor de finos.

4.2.5. Especificações

4.2.5.1. Bases Estabilizadas Granulometricamente

Na Tabela 10 são apresentadas as especificações da norma ES 141/10 do DNIT (2010) para solos utilizados em bases estabilizadas granulometricamente e resultados das amostras Sa100, Sb100, Sc100 e suas misturas Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20. Vale ressaltar que a estabilização pretendida não se propôs a atender os critérios da referida norma, no entanto, a título de registro, são discreteadas as observações realizadas:

Nota-se que o critério estabelecido para a granulometria fora atendido apenas pelas amostras Sc100 e Sc80+KR20; o critério estabelecido para equivalente de areia fora atendido apenas pelas amostras Sc100 e Sc80+KR20; o critério estabelecido para o LL não fora atendido por nenhuma das amostras; o critério estabelecido para o IP não fora atendido por nenhuma das amostras; o critério estabelecidos para o ISC não fora atendido por nenhuma das amostras; o critério de expansão fora atendido por todas as amostras; e o critério estabelecido para abrasão Los Angeles não fora avaliado.

Tabela 10 – Especificações da norma ES 141/10 do DNIT (2010) para solos utilizados em bases estabilizadas granulometricamente e resultados das amostras.

	ES 139/10	Sa100	Sb100	Sc100	Sa80+KR20	Sb80+KR20	Sc80+KR20
N ≤ 5x10	⁶ E, F	_	_	F	_	_	 Е, F
Granul. $\overline{N > 5x10}$	⁶ A, B, C, D			·			_, .
Equivalente de Areia (%)	≥ 30	0	23	45	7	28	47
LL (%)	≤ 25	49	47	38	50	44	36
IP (%)	≤ 6	14	17	16	17	15	14
N ≤ 5x10 ISC (%)	6 ≥ 60	11	23	30	55	50	41
N > 5x10	6 ≥ 80		20	00	00	00	
Expansão (%)	≤ 0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
Abrasão Los Angeles (%)	≤ 55	ND	ND	ND	ND	ND	ND

4.2.5.2. Bases Estabilizadas Granulometricamente (Solos Lateríticos)

Na Tabela 11 são apresentadas as especificações da norma ES 098/07 do DNIT (2007) para solos lateríticos utilizados em bases estabilizadas granulometricamente e resultados das amostras Sa100, Sb100 (solos lateríticos) e suas misturas solo-KR Sa80+KR20 e Sb80+KR20. Vale ressaltar que a estabilização pretendida não se propôs a atender os critérios da referida norma, no entanto, a título de registro, são discreteadas as observações realizadas:

Nota-se que o critério estabelecido para a granulometria não fora atendido por nenhuma das amostras; o critério estabelecido para equivalente de areia não fora atendido por nenhuma das amostras; o critério estabelecido para o LL não fora atendido por nenhuma das amostras; o critério estabelecido para o IP fora atendido pelas amostras Sa100 e Sb80+KR20; o critério estabelecido para o ISC não fora atendido por nenhuma das amostras; o critério de expansão fora atendido por todas as amostras; e o critério estabelecido para abrasão Los Angeles não fora avaliado.

Tabela 11 – Especificações da norma ES 098/07 do DNIT (2010) para solos lateríticos utilizados em bases estabilizadas granulometricamente e resultados das amostras.

	ES 098/07	Sa100	Sb100	Sc100	Sa80+KR20	Sb80+KR20	Sc80+KR20
Faixa Granul.	A, B	-	-	-	-	-	-
Equivalente de Areia (%)	≥ 30	0	23	45	7	28	47
LL (%)	≤ 40	49	47	38	50	44	36
IP (%)	≤ 15	14	17	16	17	15	14
N ≤ 5x10 ⁶	6 ≥ 60	11	23	30	55	50	41
$\frac{100}{N > 5x10}$	6 ≥ 80		25	30	33	30	71
Expansão (%)	≤ 0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
Abrasão Los Angeles (%)	≤ 65	ND	ND	ND	ND	ND	ND

4.2.5.3. Sub-bases Estabilizadas Granulometricamente

Na Tabela 12 são apresentadas as especificações da norma ES 139/10 do DNIT (2010) para materiais utilizados em sub-bases estabilizadas granulometricamente e resultados das amostras Sa100, Sb100, Sc100 e suas misturas Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20. Vale ressaltar que a estabilização pretendida não se propôs a atender os critérios da referida norma, no entanto, a título de registro, são discreteadas as observações realizadas:

Nota-se que o critério estabelecido para o índice de grupo fora atendido apenas pela amostra Sc100; o critério estabelecido para o ISC fora atendido pelas amostras Sb100, Sc100, Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20; e o critério de expansão fora atendido por todas as amostras.

Tabela 12 – Especificações da norma ES 139/10 do DNIT (2010) para solos utilizados em sub-bases estabilizadas granulometricamente e resultados das amostras.

	ES 139/10	Sa100	Sb100	Sc100	Sa80+KR20	Sb80+KR20	Sc80+KR20
Índice de Grupo	0	14	8	3	10	5	2
ISC (%)	≥ 20	11	23	30	55	50	41
Expansão (%)	≤ 1,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0

4.2.5.4. Sub-bases Estabilizadas Granulometricamente (Solos Lateríticos)

Na Tabela 13 são apresentadas as especificações da norma ES 139/10 do DNIT (2010) para materiais utilizados em sub-bases estabilizadas granulometricamente e resultados das amostras Sa100, Sb100, Sc100 e suas misturas Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20. Vale ressaltar que a estabilização pretendida não se propôs a atender os critérios da referida norma, no entanto, a título de registro, são discreteadas as observações realizadas:

Nota-se que o critério estabelecido para o ISC fora atendido pelas amostras Sb100, Sc100, Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20; e o critério de expansibilidade fora atendido por todas as amostras.

Tabela 13 – Especificações da norma ES 139/10 do DNIT (2010) para solos lateríticos utilizados em sub-bases estabilizadas granulometricamente e resultados das amostras.

	ES 139/10	Sa100	Sb100	Sc100	Sa80+KR20	Sb80+KR20	Sc80+KR20
ISC (%)	≥ 20	11	23	30	55	50	41
Expansibilid. (%)	≤ 10,0	5,3	3,7	1,7	4,0	2,3	0,3

Fonte: Autor.

Diante de todos os resultados apresentados neste item e nos itens anteriores, inferese que são os principais efeitos da incorporação do coproduto: o incremento considerável da resistência, notadamente do ISC, e a manutenção de baixos níveis de expansão, propriedades importantes na estabilização de bases e sub-bases.

4.3. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

4.3.1. Reação ao Ácido Clorídrico (HCI)

Na Tabela 14 são apresentados os resultados das amostras submetidas ao ensaio de determinação da reação ao HCI.

Tabela 14 – Reação ao Ácido Clorídrico das amostras.

A100	Sa100	Sb100	Sc100	KR100
Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Forte

Fonte: Autor.

Nota-se que as amostras A100, Sa100, Sb100 e Sc100 não apresentam nenhuma reação ao ácido clorídrico. A amostra KR100, por sua vez, apresenta reação violenta ao ácido HCI, com formação de bolhas, comportamento que pode indicar a presença de CaCO₃ em sua composição química, o que conferiria características alcalinas à amostra, visto que quando em solução aquosa esta substância sofre uma hidrólise salina, produzindo uma base forte, de elevado valor de pH.

4.3.2. Potencial Hidrogeniônico

Na Figura 33 são apresentados os resultados das amostras submetidas ao ensaio de determinação do Potencial Hidrogeniônico (pH).

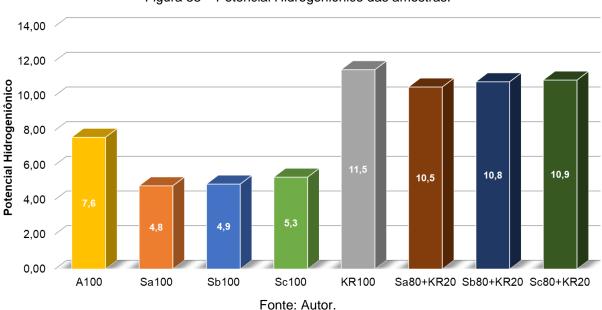


Figura 33 – Potencial Hidrogeniônico das amostras.

A amostra A100 apresenta pH neutro, de aproximadamente 7,6. Considerando-se que se trata de uma amostra predominantemente arenosa, lavada, cuja composição mineral, geralmente sílica sob a forma de quartzo, é de elevada inércia química, de difícil ionização ou dissociação em água, o valor de pH obtido é na verdade uma representação da solução de medição (água), também neutra.

A amostra Sa100 – predominantemente argilosa e de formação tropical laterítica – apresenta pH ácido, de aproximadamente 4,8. Segundo Moreira e Siqueira (2002), os horizontes superficiais de solos em regiões de climas tropicais e mais úmidos são geralmente mais ácidos, devido à lixiviação de bases e à decomposição da serapilheira. A fertilização, a chuva ácida e a fixação biológica, também são fatores que podem contribuir para reduzir o valor de pH. As amostras Sb100 e Sc100, embora tenham sido produzidas a partir da mistura de A100 e Sa100, apresentam valor de pH de mesma ordem de grandeza de Sa100. A saber de 4,9 e 5,3, respectivamente, o que reforça a hipótese de que A100 seja constituída por minerais de elevada inércia química.

A amostra KR100 apresenta pH básico (alcalino), de 11,5, muito superior às amostras de solos. Isto, porque os principais constituintes na escória de dessulfuração são compostos cálcicos, como já sugerido na determinação da reação ao ácido clorídrico, presumivelmente devido à adição de cal como agente dessulfurante no processo de pré-tratamento em planta KR na fabricação de aço. A dissociação desses compostos em solução pode levar a formação de íons de cálcio Ca²⁺ e íons hidroxila OH⁻, estes últimos são responsáveis pelo aumento do valor de pH.

As amostras Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20 também apresentam valores de pH básico (alcalino), 10,5, 10,8 e 10,9, respectivamente, que se devem à incorporação de KR100 às misturas. Estes resultados sugerem, em conformidade com a literatura técnico-científica, que o coproduto de dessulfuração KR pode atuar como um eficiente corretor de alcalinidade em solos ácidos para fins agrícolas. Adicionalmente, para fins rodoviários, o pH é uma variável importante na promoção e na sustentabilidade das reações de hidratação, a curto prazo, e das reações pozolânicas, a longo prazo, ambas desenvolvidas na estabilização química de solos (LITTLE *et al.*, 2010).

4.3.3. Análise Química de Complexo Sortivo

Na Tabela 15 são apresentados os resultados das amostras A100, Sa100, Sb100 e Sc100; e na Tabela 16 são apresentados os resultados das amostras CPIII100, CPV100 e CHI100; submetidas à análise química de complexo sortivo.

Da Tabela 15 nota-se que o valor de CTC Total é reduzido proporcionalmente à medida que A100 é incorporada às amostras Sb100 e Sc100 em substituição parcial à Sa100. Isto, porque, a incorporação de A100 reduz os teores da fração granulométrica argila e matéria orgânica, principais retentores de cátions no solo, segundo Brown e Lemmon (S/D). Além disso, as amostras Sa100, Sb100 e Sc100 apresentam valores de Soma de Bases inferiores aos valores de CTC Efetiva e estes últimos inferiores aos valores de CTC Total, o que significa que no cômputo da acidez total (Al³+ e H+) há contribuição de ambos os cátions Al³+ e H+, sendo a contribuição do cátion de hidrogênio majoritária na CTC Total. Estes resultados corroboram com os resultados de determinação de pH, que já haviam sinalizado uma elevada acidez das amostras Sa100, Sb100 e Sc100, isto é, uma alta concentração de cátions H+.

Da Tabela 16 nota-se que a amostra KR100 apresenta valores de Soma de Bases, CTC Efetiva e CTC Total bem expressivos, embora discretamente inferiores aos valores das amostras de referência CPIII100, CPV100 e CHI100. Em todos os casos os valores de Soma de Bases são iguais aos valores de CTC Efetiva e estes iguais aos valores de CTC Total, o que significa que no cômputo da acidez total (Al³+ e H+) não há contribuição de nenhum dos cátions Al³+ e H+. Estes resultados corroboram com os resultados de determinação de pH, que já haviam sinalizado uma baixa acidez na amostra KR100, isto é, uma baixa concentração de cátions H+. Além disso, Ca²+ é o cátion básico predominante na Soma de Bases, tal que o seu Índice de Saturação atinge valores percentuais muito superiores à 90%.

Tabela 15 – Análise Química de Complexo Sortivo das amostras.

	A100	Sa100	Sb100	Sc100
Hidrogênio (H) (cmol _d /dm³)	0,8	4,0	3,1	1,7
Hidrogênio (H) (pH)	5,8	4,6	4,5	4,7
Alumínio (Al) (cmol _c /dm³)	0,0	1,0	0,9	0,8
Alumínio (Al) (mg/dm³)	0,0	89,9	80,9	71,9
Cálcio (Ca) (cmol _o /dm³)	0,3	0,6	0,4	0,3
Cálcio (Ca) (mg/dm³)	60,1	120,2	80,2	60,1
Magnésio (Mg) (cmol ₀ /dm³)	0,1	0,2	0,1	0,1
Magnésio (Mg) (mg/dm³)	12,2	24,3	12,2	12,2
Potássio (K) (cmol√dm³)	0,0	0,0	0,0	0,0
Potássio (K) (mg/dm³)	8,0	15,0	10,0	9,0
Sódio (Na) (cmol₀/dm³)	0,0	0,1	0,1	0,1
Sódio (Na) (mg/dm³)	1,0	18,0	15,0	11,0
Enxofre (S) (mg/dm³)	5,0	79,0	92,0	69,0
Fósforo (P) (mg/dm³)	2,0	2,0	1,0	1,0
Boro (B) (mg/dm³)	0,2	0,3	0,5	0,2
Cobre (Cu) (mg/dm³)	0,1	0,5	0,2	0,1
Ferro (Fe) (mg/dm³)	30,0	123,0	142,0	110,0
Manganês (Mn) (mg/dm³)	4,0	5,0	3,0	2,0
Zinco (Zn) (mg/dm³)	0,2	13,6	12,0	8,0
Soma de Bases (cmol _c /dm³)	0,4	0,9	0,6	0,5
Capacidade de Troca Catiônica Efetiva (cmold/dm³)	0,4	1,9	1,5	1,3
Capacidade de Troca Catiônica Total (pH 7,0) (cmolc/dm³)	1,2	5,9	4,6	3,0
Índice de Saturação Ca (%)	24,6	10,3	8,8	10,3
Índice de Saturação Mg (%)	8,2	3,4	2,2	3,4
Índice de Saturação K (%)	1,7	0,7	0,6	0,8
Índice de Saturação Na (%)	0,4	1,1	1,2	1,3
Saturação de Bases (%)	34,7	15,5	12,9	15,9

Tabela 16 – Análise Química de Complexo Sortivo das amostras.

	KR100	CPIII100	CPV100	CHI100
Hidrogênio (H) (cmol _o /dm³)	0,0	0,0	0,0	0,0
Hidrogênio (H) (pH)	12,2	12,4	12,4	12,4
Alumínio (Al) (cmol _o /dm³)	0,0	0,0	0,0	0,0
Alumínio (Al) (mg/dm³)	0,0	0,0	0,0	0,0
Cálcio (Ca) (cmol₀/dm³)	44,9	59,7	62,2	59,8
Cálcio (Ca) (mg/dm³)	8998,0	11950,1	12450,6	11983,9
Magnésio (Mg) (cmol/dm³)	0,1	0,1	0,1	0,1
Magnésio (Mg) (mg/dm³)	12,2	12,2	12,2	12,2
Potássio (K) (cmol₀/dm³)	0,2	3,6	0,5	1,3
Potássio (K) (mg/dm³)	82,0	1422,0	198,0	490,0
Sódio (Na) (cmol _c /dm³)	1,9	3,9	0,8	0,1
Sódio (Na) (mg/dm³)	440,0	890,0	195,0	30,0
Enxofre (S) (mg/dm³)	86,0	969,0	932,0	26,0
Fósforo (P) (mg/dm³)	1,0	1,0	1,0	1,0
Boro (B) (mg/dm³)	1,1	0,2	0,3	0,2
Cobre (Cu) (mg/dm³)	0,2	0,2	0,3	0,2
Ferro (Fe) (mg/dm³)	13,0	20,0	17,0	11,0
Manganês (Mn) (mg/dm³)	1,0	1,0	0,0	1,0
Zinco (Zn) (mg/dm³)	0,2	0,2	0,2	0,1
Soma de Bases (cmol _c /dm³)	47,1	67,3	63,7	61,3
Capacidade de Troca Catiônica Efetiva (cmold/dm³)	47,1	67,3	63,7	61,3
Capacidade de Troca Catiônica Total (pH 7,0) (cmolc/dm³)	47,1	67,3	63,7	61,3
Índice de Saturação Ca (%)	99,3	94,1	99,0	97,8
Índice de Saturação Mg (%)	0,2	0,2	0,2	0,2
Índice de Saturação K (%)	0,5	5,7	0,8	2,1
Índice de Saturação Na (%)	4,2	6,1	1,3	0,2
Saturação de Bases (%)	100,0	100,0	100,0	100,0

Estas e outras similaridades entre o coproduto KR e alguns tipos de cimento ou cal reforçam a hipótese de que a interação solo-KR possa se processar através de mecanismos físico-químicos já reconhecidos nestes materiais, como as trocas catiônicas e reações de hidratação. Há que se considerar por exemplo que na hidratação na hidratação do cimento Portland, segundo Coutinho (2002), apesar da CTC ser bastante elevada, as trocas catiônicas ocorrem apenas parcialmente, tal que o material no estado original, praticamente vítreo (amorfo) em sua totalidade, é convertida em uma variedade de novos compostos através de reações de hidratação, constituídos predominantemente por fases minerais também de baixa cristalinidade; e que na hidratação da cal, segundo Silva (2016), as primeiras mudanças observadas de textura ocorrem em decorrência dos fenômenos de CTC e seus desdobramentos (floculação e aglomeração).

Embora as misturas Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20 não tenham sido submetidas à análise de complexo sortivo, o microambiente a ser instalado na presença de água é de fácil previsão. Constata-se por exemplo que são atingidos altos valores de pH, seguramente muito superiores a 7,0, em soluções que estejam presentes, quais sejam as amostras Sa100, Sb100 ou Sc100, e KR100, numa proporção em massa seca de 80:20. Neste microambiente, ânions OH⁻, oriundos da dissociação em água de componentes da amostra KR100, são neutralizados por cátions ácidos Al³⁺ e H⁺, sobretudo H⁺, devido a sua maior concentração, desprendidos da superfície das amostras Sa100, Sb100 ou Sc100 para solução. A dissociação de componentes de KR100 também produz cátions Ca²⁺, disponíveis para as trocas catiônicas nas superfícies das amostras Sa100, Sb100 ou Sc100, e que, segundo a série liotrópica proposta por Little (1995), têm facilidade de troca com cátions H⁺.

Nesta concepção, quanto maior o valor da CTC Total do solo, maiores serão a promoção e a manutenção das trocas catiônicas orientadas por Ca²⁺, e maiores se traduzirão os aumentos dos valores de Soma de Bases, e, por conseguinte, de Saturação de Bases e de CTC Efetiva nas amostras Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20.

4.3.4. Espectroscopia de Raios-X por Energia Dispersiva (EDS)

Na Tabela 17 são apresentados os resultados das amostras A100, Sa100 e KR100, submetidas ao ensaio de determinação da composição química por EDS.

Tabela 17 – EDS das amostras.

	A100	Sa100	KR100
Oxigênio (O)	47,2%	51,1%	51,1%
Silício (Si)	50,7%	13,4%	3,7%
Alumínio (Al)	0,9%	22,5%	2,5%
Enxofre (S)	0,8%	0,6%	2,6%
Titânio (Ti)	0,3%	1,4%	0,0%
Ferro (Fe)	0,1%	9,3%	2,3%
Cálcio (Ca)	0,0%	0,8%	35,0%
Magnésio (Mg)	0,0%	0,1%	1,4%
Sódio (Na)	0,0%	0,8%	1,3%
Potássio (K)	0,0%	0,0%	0,1%
Ouro (Au)	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Autor.

Conforme resultados da Tabela 17, A100 é constituída principalmente por oxigênio e silício, o que corrobora com a expectativa da presença de sílica sob a forma de quartzo (SiO₂). Sa100 é constituída principalmente por oxigênio, silício, alumínio e ferro, o que corrobora com a classificação da amostra pela metodologia MCT como sendo do tipo solo argiloso laterítico, cuja formação em climas tropicais está geralmente associada à presença de sesquióxidos de ferro e alumínio em sua microestrutura. KR100, por sua vez, é constituída principalmente por oxigênio e cálcio, o que corrobora com os resultados da análise química do complexo sortivo, que também expressara elevada contribuição do cálcio na forma de cátions adsorvidos à superfície da amostra.

4.3.5. Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)

Na Tabela 18 são apresentados os resultados das amostras A100, Sa100 e KR100, submetidas ao ensaio de determinação da composição química em óxidos por FRX. Nota-se que os resultados sinalizando a presença dos mesmos tipos químicos identificados na técnica de EDS.

Tabela 18 – FRX das amostras.

	A100	Sa100	KR100
Al ₂ O ₃	< 0,10%	35,00%	3,69%
CaO	0,10%	0,03%	51,01%
Cr ₂ O ₃	0,06%	<0,01%	<0,01%
Fe ₂ O ₃	0,56%	11,47%	6,91%
K₂O	<0,01%	0,09%	<0,01%
MgO	0,11%	0,11%	1,94%
MnO	<0,01%	<0,01%	0,24%
Na ₂ O	<0,10%	0,21%	<0,10%
P ₂ O ₅	0,01%	0,08%	0,09%
SiO ₂	98,52%	33,95%	10,48%
TiO ₂	0,17%	1,61%	0,20%
ZrO_2	0,02%	0,10%	0,00%
SO₃	0,00%	0,00%	5,38%
ZnO	0,00%	0,00%	0,00%
V ₂ O ₅	0,00%	0,00%	0,00%
F	0,00%	0,00%	0,00%
Perda por Calcinação (1000 °C)	0,21%	17,26%	19,96%

4.3.6. Análise Termogravimétrica (TGA)

Nas Figura 34 são apresentados os resultados da amostra Sa100, submetida à análise termogravimétrica, donde identifica-se, segundo Santos (1928), as principais transformações térmicas sofridas por argilominerais do grupo caulinita: perda de água de umidade e água adsorvida até 100 °C, perda de água que preenche canais da estrutura cristalina dos argilominerais no intervalo entre 250 a 400 °C e reações de desidroxilação no intervalo de 450 a 600 °C, relevadas pelas posições dos intervalos dos picos endotérmicos na curva diferencial da DTG (Figura 35). Ainda segundo o autor, a intensidade, a amplitude e a posição dos picos podem diminuir com a diminuição da granulometria e cristalinidade das partículas de caulinita. A intensidade e agudeza dos picos, por outro lado, podem aumentar com o aumento da velocidade de aquecimento. Apesar disto, as descrições supracitadas coincidem mais ou menos com os resultados obtidos.

Nas Figura 36, por sua vez, são apresentados os resultados da amostra KR100 submetida à análise termogravimétrica em duas faixas granulométricas, inferior e superior à 4,8 mm, donde identifica-se, segundo Cho (2016), as principais transformações térmicas sofridas pelo coproduto de dessulfuração KR: perda de água de umidade e água adsorvida até 100 °C e perdas de massas nos intervalos de temperatura entre cerca de 400 e 500 °C e entre cerca de 600 e 800 °C, que se devem sobretudo à desidratação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂ e à descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO₃), respectivamente, relevadas pelas posições dos intervalos dos picos endotérmicos na curvas diferenciais da DTG (Figura 37).

Para o caso particular da amostra KR100, além da TGA é possível realizar uma análise semiquantitativa do teor de Ca(OH)₂ e de CaCO₃. Para tanto, calculam-se os fatores de conversão nas reações supramencionadas, tal que o primeiro é dado pela razão entre as massas moleculares de Ca(OH)₂ e de H₂O (74,09 e 18,02, resultando em 4,11), e o segundo é dado pela razão entre as massas moleculares de CaCO₃ e de CO₂ (100,09 e 44,01, resultando em 2,27). Estes fatores ao serem multiplicados pelas perdas de massa nos intervalos de temperatura referentes aos picos endotérmicos das curvas diferenciais da DTG se traduzem nos resultados apresentados na Tabela 19. Da Tabela nota-se que a fração mais fina do coproduto de dessulfuração KR (≤ 4,8 mm) apresenta uma maior quantidade de Ca(OH)₂ e uma quantidade aproximadamente equiparável de CaCO₃, em relação à fração mais grossa (> 4,8 mm). Esta constatação associada ao fato de que é também na fração mais fina que se obtém uma maior superfície específica, sugere que o coproduto de dessulfuração KR é tão mais reativo quanto mais fina a sua composição granulométrica.

Figura 34 – TGA da amostra Sa100.

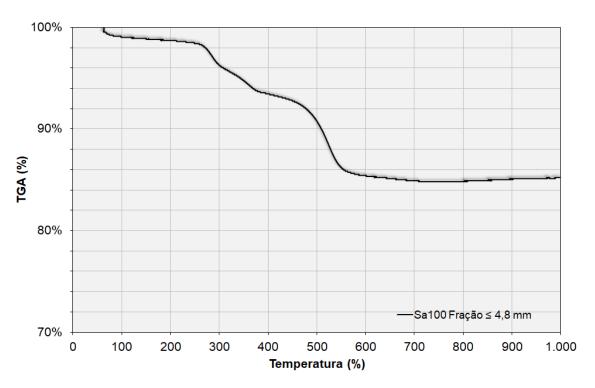
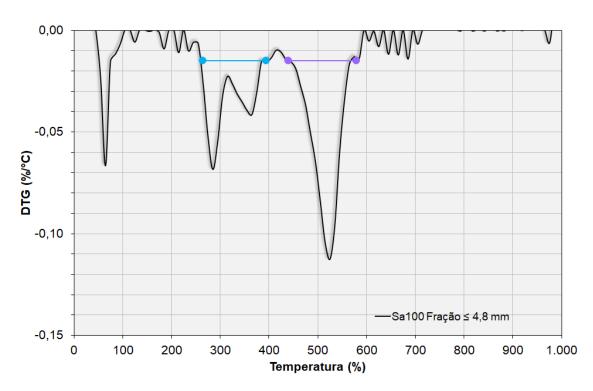


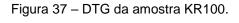
Figura 35 – DTG da amostra Sa100.



100% 90% TGA (%) 80% ---KR100 Fração ≤ 4,8 mm ----KR100 Fração > 4,8 mm 70% 0 100 300 400 500 200 600 700 800 900 1.000

Figura 36 – TGA da amostra KR100.

Temperatura (%)



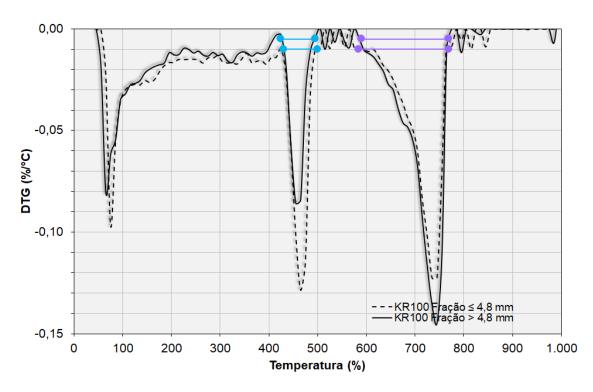


Tabela 19 – Estimativa de compostos a partir do TGA da amostra KR100.

	KR100 (≤ 4,8 mm)	KR100 (> 4,8 mm)
ΔT (°C)	425-495	430-500
Ca(OH) ₂ / H ₂ O	4,11	4,11
H ₂ O (%)	4,7	1,9
Ca(OH) ₂ (%)	18,9	12,0
ΔT (°C)	590-770	585-770
CaCO ₃ / CO ₂	2,27	2,27
CO ₂ (%)	8,4	9,7
CaCO ₃ (%)	19,0	23,1

4.3.7. Difratometria de Raios-X (DRX)

As Figura 38, Figura 39 e Figura 40 apresentam os resultados para determinação da mineralogia pela DRX nas amostras A100, Sa100 e KR100, respectivamente, no estado solto; as Figura 41, Figura 42 e Figura 43 apresentam os resultados para determinação da mineralogia pela DRX nas misturas Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, respectivamente, no estado compactado após 4 dias de imersão; e as Figura 44, Figura 45 e Figura 46 apresentam os resultados para determinação da mineralogia por DRX nas misturas supracitadas no estado compactado após 28 dias de cura e 4 dias de imersão. Paras as misturas, contou-se ainda com uma abordagem quantitativa pelo método de Rietveld, vide Tabela 20.

Em ambas as idades, é possível reconhecer nas misturas os picos cristalográficos de quarzto, nacrita, caulinita, gipsita e sulfato ferroso, também identificados individualmente nos resultados de determinação da mineralogia por DRX nas amostras A100, Sa100 e KR100. A presença de quartzo nas misturas atribui-se à amostra A100. A presença de argilominerais do grupo caulinita nas mistruras, notadamente caulinita, caulinita cristalina, nacrita e nacrita cristalina, além de anatase, por sua vez, atribui-se à amostra Sa100. A saber, as diferenças entre os constituintes do grupo da caulinita se devem à direção e empilhamento das lamelas, e a localização da vacância de sítios octaédricos entre lamelas sucessivas. Em linhas gerais, segundo Zatta (2010), a nacrita apresenta frequência de empilhamento a cada duas lamelas, enquanto a caulinita apresenta frequência de empilhamento a cada uma lamela.

Adicionalmente, são conhecidos para ambos os argilominerais um tipo especial de estrutura, dita bem cristalizada, cujas lamelas se empilham simetricamente em relação ao eixo cristalográfico "c", apresentando um leve deslocamento em relação ao eixo cristalográfico "a". Por fim, a presença de gipsita e sulfato ferroso nas misturas atribuise à amostra KR100. Da análise pormenorizada e individual da amostra KR100 no estado solto, identifica-se também a presença de portlandita, calcita e magnetita, constituintes não identificados nas misturas solo-KR após certa idade, o que sugere então que há consumo e/ou transformação total destes compostos nas misturas com o tempo. Segundo Oliveira (2018), o coproduto individualmente contaria ainda com a presença de etringita, não identificada neste trabalho. Uma explicação para a aparente inconsistência é a de que a etringita identificada por Oliveira (2018) tratar-se-ia de um produto de reações decorrentes de um longo processo de hidratação, por exemplo de uma cura excessiva nos pátios de armazenamento do coproduto, resultando em estruturas de alta cristalinidade e de picos bem definidos no difratograma.

Do comparativo entre as idades, no período de 28 dias de cura e 4 dias de imersão (Figura 44, Figura 45 e Figura 46) parece ser promovida ainda uma redução de alguns picos em relação ao período de 4 dias de imersão, sobretudo em posições atribuídas à amostra Sa100. Destarte, a estrutura cristalina de Sa100 sugere estar fortemente susceptível ao microambiente proporcionado por KR100 quando em solução e às reações decorrentes da interação solo-KR, resultando em reduções percentuais de constituintes de Sa100 na fase mineral das misturas. Em contrapartida, os picos referentes à amostra A100 mantêm-se inalterados, uma vez que o quartzo é um mineral praticamente inerte quimicamente, resultando em aumentos percentuais de constituinte de A100 na fase mineral das misturas, vide Tabela 20.

Figura 38 – DRX da amostra A100.

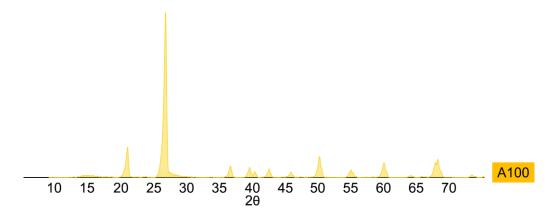
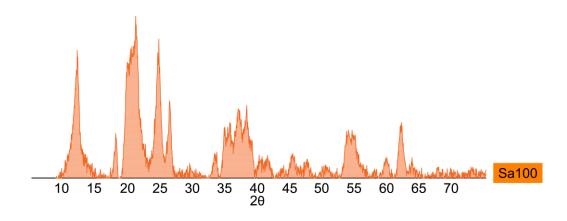
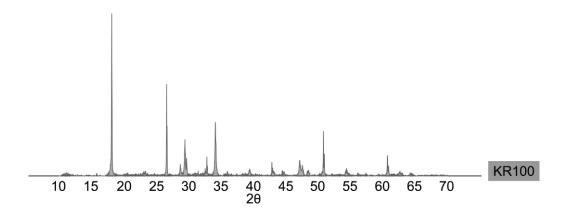


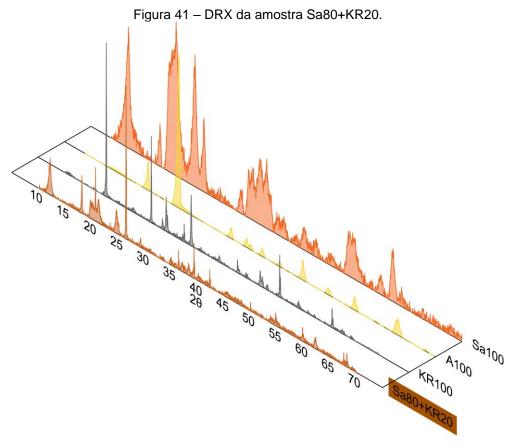
Figura 39 – DRX da amostra Sa100.

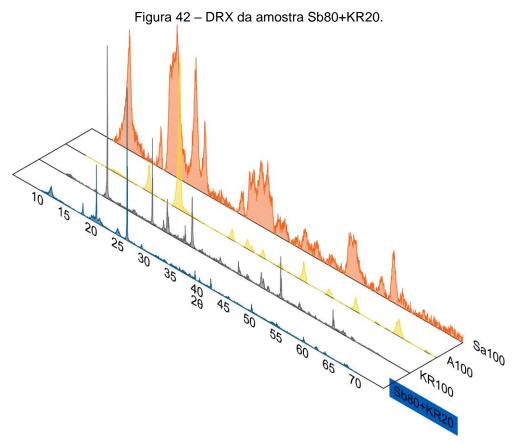


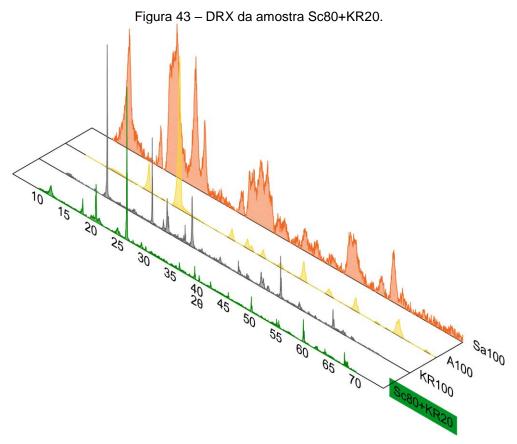
Fonte: Autor.

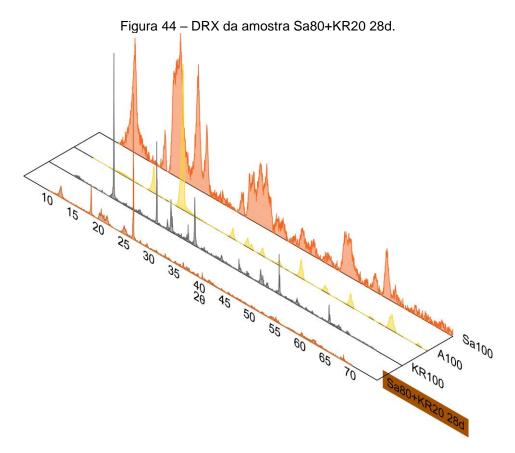
Figura 40 – DRX da amostra KR100.

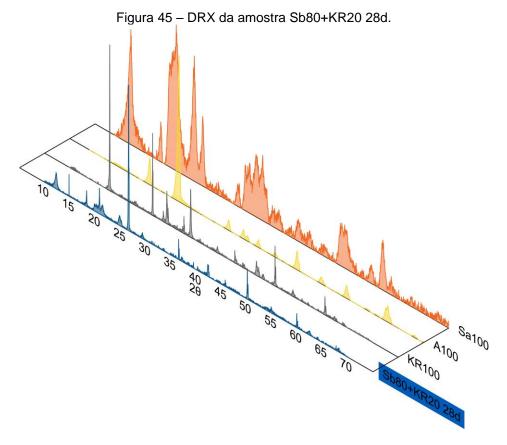












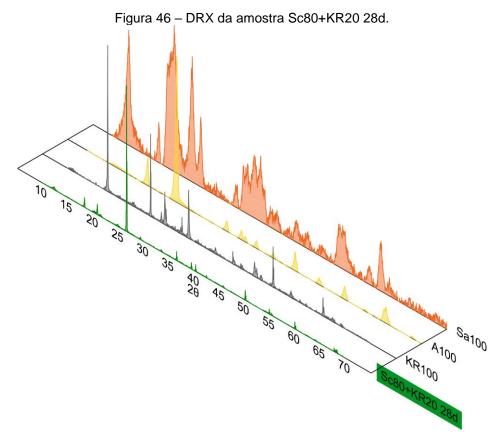


Tabela 20 – Quantificação de fases das amostras.

	Sa80+KR20	Sb80+KR20	Sc80+KR20	Sa80+KR20 28d	Sb80+KR20 28d	Sc80+KR20 28d
Quartzo	2,26%	2,09%	12,67%	4,86%	11,40%	18,93%
Caulinita	19,43%	11,77%	17,11%	18,28%	7,36%	18,68%
Caulinita Cristalina	12,77%	19,69%	11,13%	15,79%	14,43%	18,69%
Nacrita	40,92%	40,05%	36,42%	37,09%	37,40%	21,80%
Nacrita Cristalina	15,45%	16,76%	14,06%	14,74%	17,33%	7,10%
Anatase	1,39%	1,03%	0,64%	1,49%	0,75%	0,58%
Total	89,96%	89,30%	79,36%	87,39%	77,27%	66,85%
Sultato de Ferro	3,13%	2,46%	3,36%	2,22%	3,40%	3,86%
Gipsita	4,65%	6,15%	4,63%	5,53%	7,94%	10,36%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,01%	100,00%

4.3.8. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Nas Figura 47, Figura 48 e Figura 49 são apresentados os resultados das amostras A100, Sa100 e KR100, respectivamente, no estado solto (não compactado), submetidas ao ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com ampliações de 100x e 1000x.

A amostra A100 apresenta-se aparentemente em uma distribuição granulométrica uniforme, com grãos predominantemente na faixa granulométrica de areia média, formato subarrendodado e superfícies muito lisas. A amostra Sa100, por sua vez, apresenta-se em uma distribuição granulométrica não uniforme, graduada, com grãos nas faixas granulométricas de areia fina, silte e argila, cujas superfícies são cobertas por um espesso revestimento argiloso em formato de lâminas superpostas, aparentemente orientadas e com elevado grau de floculação. A amostra KR100 também se apresenta em uma distribuição não uniforme, graduada. Segundo Cho (2016), o beneficiamento do coproduto de dessulfuração KR no processo siderúrgico envolve a pulverização de água para resfriamento rápido e controle da dispersão de

poeira. Em razão disto, a superfície é tomada por incrustações e estruturas fibrilares e em formato de agulhas, que sugerem se tratar, a priori, de produtos de hidratação, resultando também em superfícies muito rugosas.

Nas Figura 50, Figura 51 e Figura 52 são apresentados os resultados das amostras Sa100, Sb100 e Sc100, respectivamente, no estado compactado após 4 dias de imersão, submetidas ao ensaio de MEV com ampliações de 250x e 1000x. Nota-se que em todos os três casos as amostras apresentam estruturas muito semelhantes, com presença de um espesso revestimento argiloso na superfície dos grãos maiores.

Nas Figura 53, Figura 54 e Figura 55 são apresentados os resultados das amostras Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, no estado compactado após 4 dias de imersão; e nas Figura 56, Figura 57 e Figura 58 são apresentados os resultados das amostras Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20, no estado compactado após 28 dias de cura e 4 dias de imersão, respectivamente, submetidas ao ensaio de MEV com ampliações de 250x e 1000x.

Segundo Kourounis *et al.* (2007), em escórias de aciaria, a hidratação é responsável pela formação de produtos que formam uma densa estrutura de rede no interior dos poros após poucos dias. Esta típica morfologia é evidente sobretudo nas amostras Sa80+KR20 e Sb80+KR20 após o período de 4 dias de imersão, em que nota-se a presença de estruturas fibrilares ou em formato de agulhas, conforme também observado em KR100 individualmente, o que permite inferir ainda que a estabilização está condicionada às interações do coproduto com as frações mais finas (argilominerais), tal que para um reduzido teor de finos, como em Sc80+KR20, a presença de estruturas fibrilares ou em formato de agulhas não é perceptível.

Além disso, nota-se que após o período de 28 dias de cura e 4 dias de imersão, os espaços disponíveis no interior dos poros são bem pequenos, devido a uma espécie de colmatação, que une os grãos em maiores agregações. Em ambas as idades, as feições indicam que estes produtos se ajustam bem ao espaço disponível, aparentemente unindo os grãos adjacentes sem exercer nenhuma ou exercendo poucas tensões ou ações expansivas.

Conforme discutido no item que tratou da estabilização com cimento Portland, a presença de estruturas fibrilares ou em formato de agulhas nas primeiras idades pode ser creditada à formação de CSH ou de etringita. Segundo Taylor (1997), CSH pode ser encontrada em quatro principais morfologias, tal que a morfologia Tipo I é aquela que ocorre em formato fibrilar, normalmente em estrutura de "ouriço", quando a hidratação está ainda em desenvolvimento incipiente. Outrossim, a etringita também ocorre nos primeiros momentos da hidratação sob a forma de agulhas finas entrelaçadas, pela combinação de sulfatos disponíveis em solução aquosa e de aluminato cálcico (C₃A) ou ferroaluminato cálcico (C₄AF). Vale lembrar que eventualmente a etringita também poderá se formar ou recristalizar em materiais cimentícios já endurecidos, em idades mais avançadas. É quando, sob condições propícias de temperatura, umidade e alcalinidade, são disponibilizados sulfatos, aluminatos e água em concentrações adequadas para promover as reações. Dentre os produtos, têm-se justamente o que se chama etringita tardia ou secundária, cuja recristalização tende a gerar agulhas relativamente mais grossas.

Por fim, na Figura 59 é apresentado, de forma esquemática, o modelo de interação solo-KR proposto, fundamentando a partir dos resultados discutidos ao longo deste trabalho. No modelo, conforme detalhes, a estabilização se dá principalmente por mecanismos de trocas catiônicas e de reações de hidratação, sendo estas últimas responsáveis pela formação de estruturas fibrilares e em formato de agulhas. A formação contínua destes produtos modifica a microestrutura, conduzindo a uma colmatação em torno dos grãos de coproduto, o que reduz os poros e une os grãos adjacentes. Como consequência destes fenômenos, tem-se a estabilização mecânica da mistura solo-KR, que é tanto maior e melhor distribuída quanto maior o teor de finos do solo estabilizado e/ou o período de cura submetido, reforçando a importância da granulometria do solo e do período de cura na eficiência da técnica.

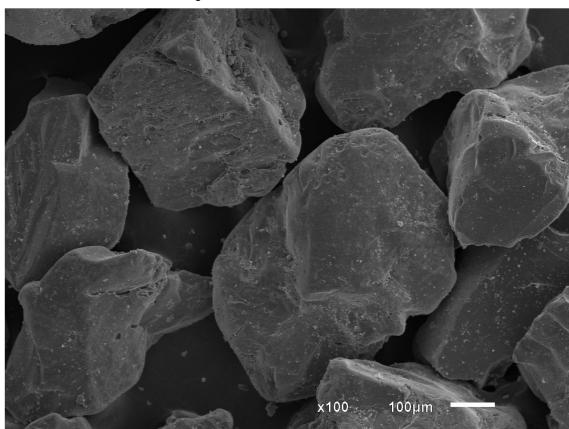
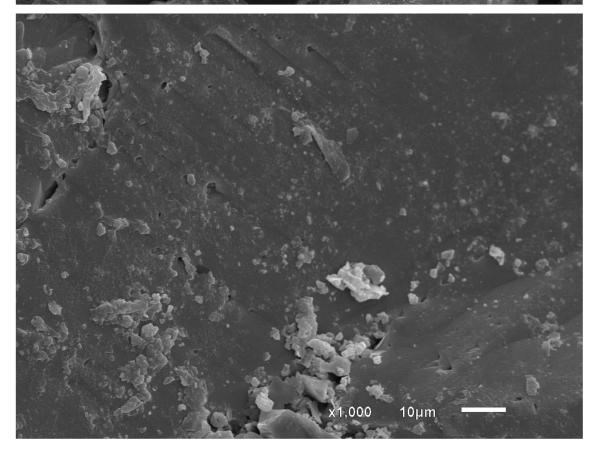


Figura 47 – MEV da amostra A100.



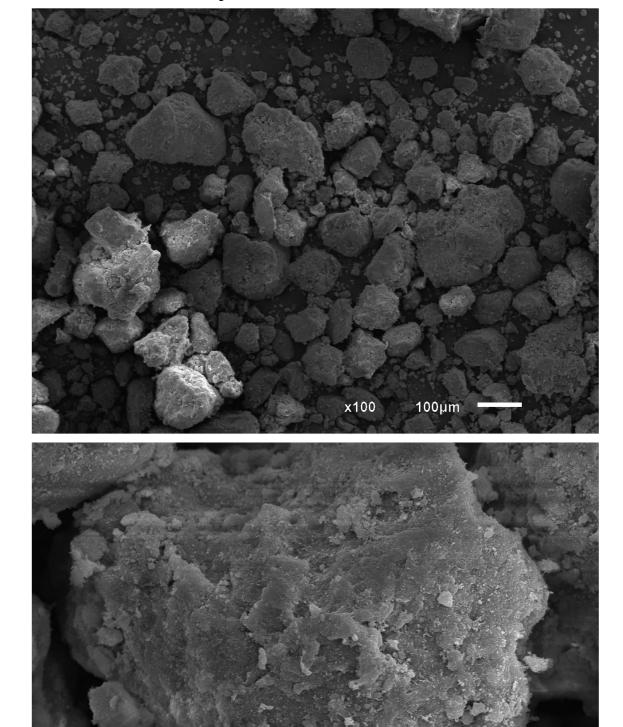


Figura 48 – MEV da amostra Sa100.

x1,000

10µm

x100 100µm

Figura 49 – MEV da amostra KR100.

x1,000

10µm

x250 100µm x1,000 10µm

Figura 50 – MEV da amostra Sa100 compactada após 4 dias de imersão.

x250 100µm x1,000 10µm

Figura 51 – MEV da amostra Sb100 compactada após 4 dias de imersão.

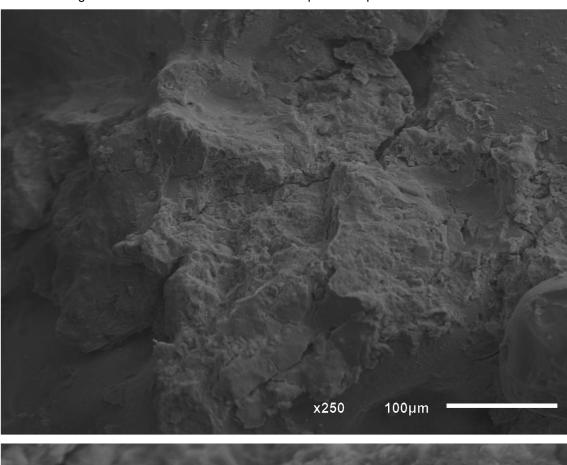
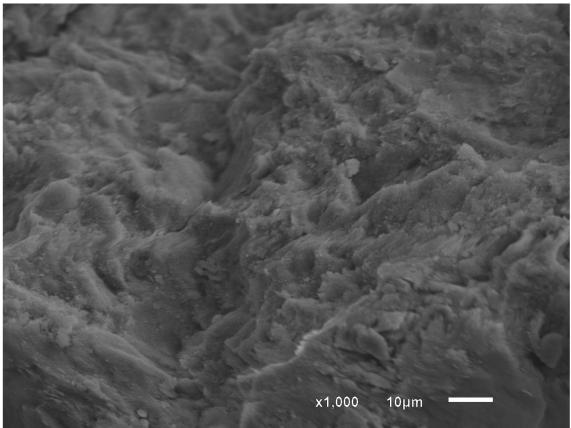


Figura 52 – MEV da amostra Sc100 compactada após 4 dias de imersão.



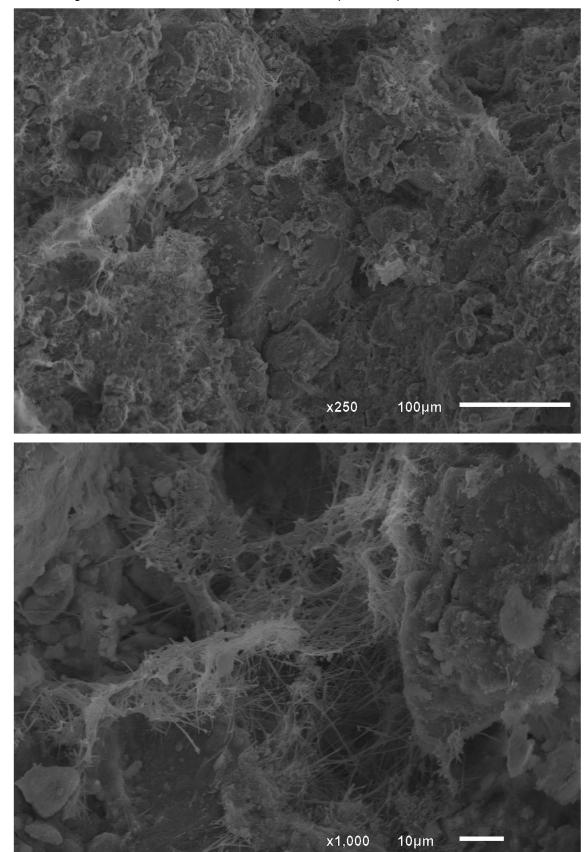


Figura 53 – MEV da amostra Sa80+KR20 compactada após 4 dias de imersão.

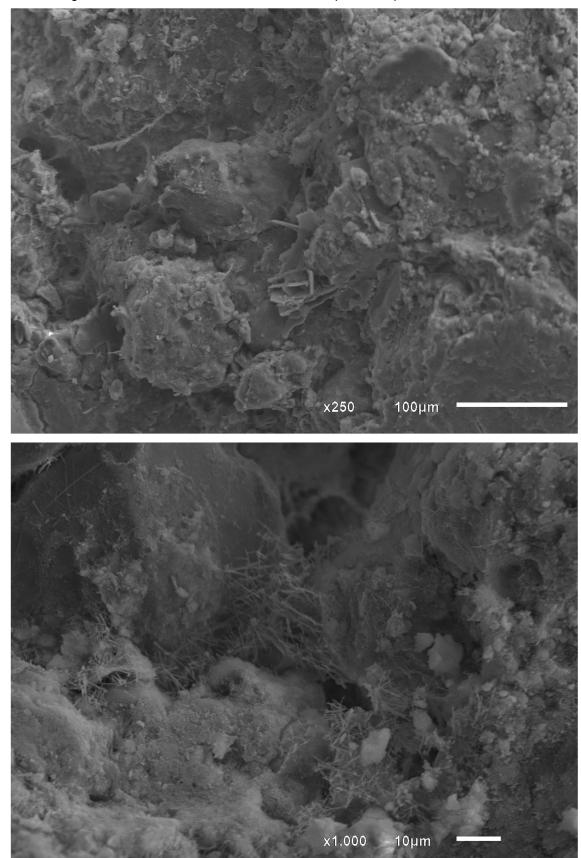


Figura 54 – MEV da amostra Sb80+KR20 compactada após 4 dias de imersão.

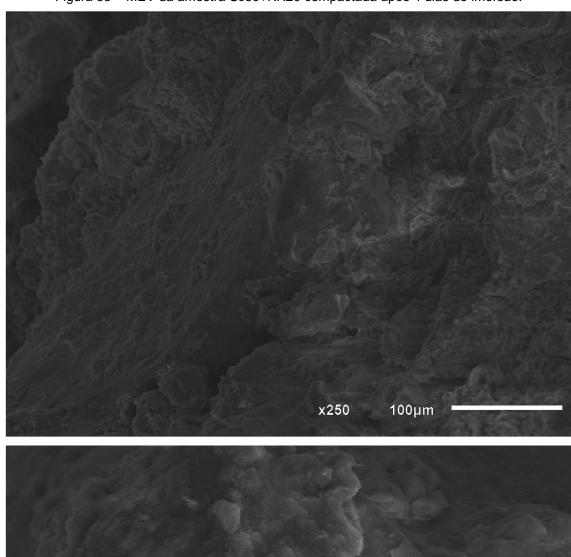
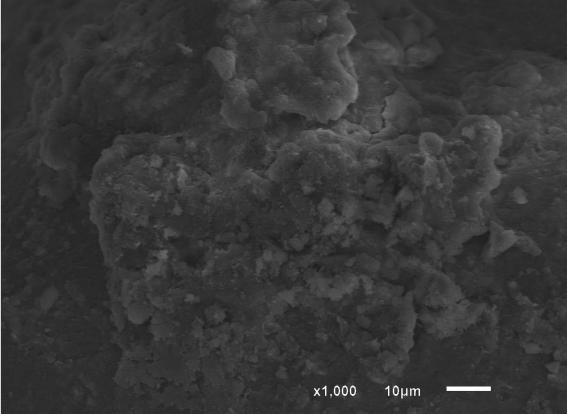


Figura 55 – MEV da amostra Sc80+KR20 compactada após 4 dias de imersão.



100µm x250 x1,000 10μm

Figura 56 – MEV da amostra Sa80+KR20 compactada após 28 dias de cura e 4 dias de imersão.

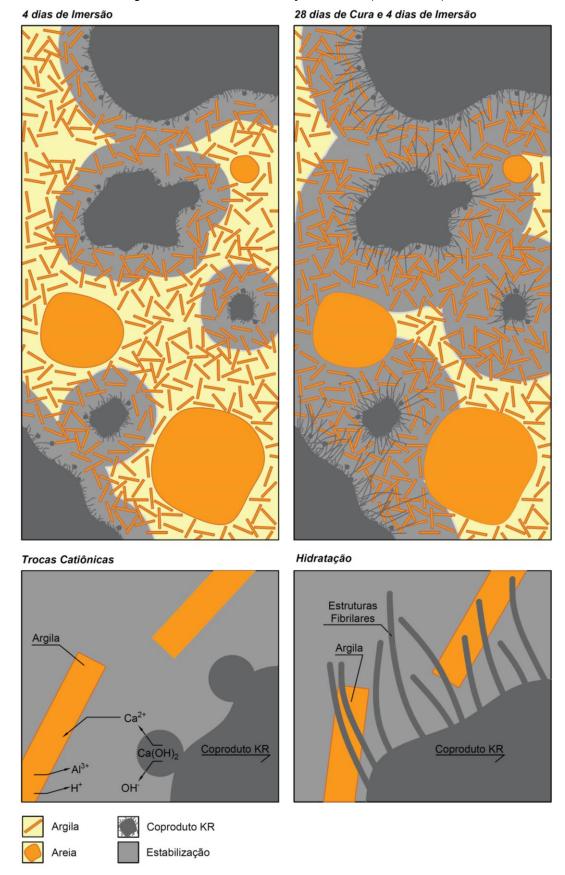
x250 100µm x1,000 10µm

Figura 57 – MEV da amostra Sb80+KR20 compactada após 28 dias de cura e 4 dias de imersão.

x250 100µm x1,000 10µm

Figura 58 – MEV da amostra Sc80+KR20 compactada após 28 dias de cura e 4 dias de imersão.

Figura 59 – Modelo de interação solo-KR (sem escala).



5. CONCLUSÃO

As caracterizações física, mecânica e química das amostras A100, Sa100 e KR100, – praticadas a fim de, em uma primeira instância, definir parâmetros numéricos de suas propriedades e compreender como estas propriedades poderiam orientar o comportamento dos mesmos, seja individualmente, seja conjuntamente nas misturas Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20 –, permitiram ainda criar relações importantes entre o teor de finos e o grau de interação solo-KR, definindo assim os principais mecanismos de estabilização solo-KR, válidos dentro das condições específicas deste trabalho. São eles:

Quanto ao efeito sob a granulometria, conforme os resultados de granulometria por peneiramento e sedimentação, módulo de finura, relação arcabouço-matriz, e equivalente de areia, a ação do coproduto de dessulfuração KR sob a granulometria de misturas solo-KR a partir de Sa100, Sb100 e Sc100 – de teores de finos de 56,6%, 42,7% e 28,9%, respectivamente – concentra-se nas faixas granulométricas mais finas, tal que esta ação é mais acentuada em Sa80+KR20 em relação à Sb80+KR20, e em Sb80+KR20 em relação à Sc80+KR20, ou equivalentemente, esta ação é tanto maior quanto maior o teor de finos do solo a ser estabilizado. Apesar disto não é um mecanismo de estabilização predominante, visto que a interação solo-KR é de natureza química.

Quanto ao efeito sob o grau de floculação, conforme os resultados de grau de floculação, não fora possível constatar modificações apreciáveis no grau de floculação dos solos com a incorporação de KR100 às misturas, uma vez que as amostras Sa100, Sb100 e Sc100 já se apresentam com a faixa granulométrica argila demasiadamente floculada, o que se deve à formação de concreções com grandes concentrações de hidróxidos de ferro e alumínio, unindo os grãos, típica de solos argilosos lateríticos, e consoante com os resultados de classificação MCT. Portanto, não é um mecanismo de estabilização admissível.

Quanto ao efeito sob a CTC, a incorporação de K100 às amostras de solos oportuniza em via úmida as trocas catiônicas entre cátions ácidos Al³⁺ e H⁺ – desprendidos da superfície das frações mais finas das amostras Sa100, Sb100 ou Sc100 para solução

e neutralizados por ânions OH-, oriundos da dissociação em água de componentes da amostra KR100 (também responsáveis por estabelecer altos valores de pH em solução) – e cátions Ca²⁺, também oriundos da dissociação em água de componentes da amostra K100. Nesta concepção, quanto maior o teor de finos do solo a ser estabilizado, e consequentemente, quanto maior o valor da CTC Total, maiores serão a promoção e a manutenção das trocas catiônicas orientadas por Ca². Portanto, é um mecanismo de estabilização admissível.

Quanto ao efeito sob a mineralogia, conforme os resultados de DRX, durante o processo de hidratação ao longo do tempo parece ser promovido o consumo e/ou transformação total de compostos de KR100 – notadamente compostos cálcicos do tipo portlandita e calcita, constituintes predominantes do material isoladamente –, e o consumo e/ou transformação parcial de Sa100 – notadamente argilominerais do tipo caulinita, nacrita e anatase –, resultando numa aparente redução da cristalinidade geral das misturas, tanto maior quanto maior a quantidade de Sa100 nas misturas, isto é, tanto maior quanto maior o teor de finos do solo a ser estabilizado. Portanto, é um mecanismo de estabilização admissível.

Quanto ao efeito sob a microestrutura, conforme os resultados de MEV, nota-se a presença de estruturas fibrilares ou em formato de agulhas ainda nas primeiras idades, que com o tempo parecem conduzir a uma colmatação dos poros, unindo os grãos adjacentes e contribuindo para densificação da amostra. Portanto, é um mecanismo de estabilização admissível.

Diante do exposto, fica claro que a estabilização solo-KR sob as condições específicas deste trabalho se dá principalmente por mecanismos de trocas catiônicas e de reações de hidratação, cujos efeitos também impactam a mineralogia e microestrutura das amostras, sendo imprescindível para tanto a presença de argilominerais das frações mais finas.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a realização deste trabalho, foi possível concluir que a natureza da estabilização dos solos analisados com coproduto de dessulfuração oriundo de planta KR é de fato química, sendo sustentada por mecanismos de interação entre as frações mais finas do solo e do coproduto KR, sobretudo trocas catiônicas e reações de hidratação, transformações que impactam a mineralogia e microestrutura das misturas solo-KR, conferindo-as maior densificação e resistência, a partir do preenchimento de vazios por estruturas fibrilares e em formato de agulhas, que também promovem a união de grãos adjacentes. Foi possível concluir também que a eficiência da técnica de estabilização está condicionada sobretudo ao teor de finos do solo, fração granulométrica mais reativa, sendo tão mais eficiente quanto maior o seu valor. Adicionalmente, conclui-se ainda que o período de cura também está associado à eficiência da técnica, e que sua influência é tanto maior quanto maior o teor de finos do solo.

Mas, se por um lado o desenvolvimento deste trabalho trouxe respostas mais claras para os questionamentos qualitativos sobre a natureza da interação solo-KR, por outro, levantou novos questionamentos quantitativos sobre os mecanismos de estabilização agora já definidos, como por exemplo a determinação do tipo, composição, quantidade, distribuição e tempo de formação dos produtos formados.

Não obstante, estes conhecimentos poderão ser consideravelmente ampliados através do desenvolvimento de trabalhos futuros que proponham uma caracterização mecânica mais representativa, valendo-se de ensaios como o de determinação do Módulo de Resiliência e/ou afins – o que permitiria uma análise estrutural de misturas solo-KR em termos de tensão e deformação sob condições de carregamento dinâmico – e uma caracterização química mais sofisticada, valendo-se de técnicas como a de Espectroscopia de Infravermelho e/ou afins – o que permitiria a identificação de alterações da natureza das ligações químicas das amostras com o avanço dos mecanismos de interação solo-KR; e como a de Microscopia Óptica em Lâminas e/ou afins – o que permitiria acompanhar sob diferentes condições de estabilização o processo de colmatação de poros pelos produtos formadas na interação solo-KR.

RERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure). 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7183/82: Solo - Determinação do limite de contração. Rio de Janeiro: 1982.
NBR 13600/96: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica . Rio de Janeiro: 1996.
NM 52/09: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: 2009.
NM 53/09: Agregado graúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: 2009.
NBR 6459/16: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: 2016.
NBR 7180/16: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: 2016.
NBR 7181/16: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: 2016.
NBR 7182/16: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: 2016.
NBR 9895/16: Solo – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro: 2016.
BATALIONE, Giovane. Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedreira de uma rocha granítica. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. 2007.

BELL, F. G. Lime stabilization of clay minerals and soils. **Engineering geology**, v. 42, n. 4, p. 223-237, 1996.

BRICALLI, L. L. Caracterização litoestratigráfica, geotécnica e correlações com a ocorrência de processos de movimento de massa em talude da Formação Barreiras (Cariacica-ES). Revista Geografares, v. 19, p. 3–27, 2015.

BROWN, Katharine; LEMON, Jeremy. **Cations and Cation Exchange Capacity**. Department of Agriculture and Food.

CASTELLO, Reno Reine. **Notas de Aula de Geotécnica**. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, 1998.

CENTRO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Estabilizados com Cal Hidratada: Relatório Número CCR-ND-SCH-RTF-SET/2014, 2014.

CHEN, Wei. **Hydration of Slag Cement**: Theory, Modeling and Application. Tese de Doutorado, University of Twente, 2007.

CHEN, Wei; BROUWERS, H. J. H. **The hydration of slag, part 1: reaction models for alkali-activated slag**. Construction Management & Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering Technology, University of Twente, 2006.

CHO, Bongsuk. Hydration characteristics of cement-free binder using Kambara reactor slag. **Magazine of Concrete Research**, v. 68, n. 22, 2016.

COUTINHO, Joana de Sousa. **Materiais de Construção 2**: 1ª Parte – Ligantes e caldas. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, 2002.

259/94: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando
corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. 1994.
ES-P 11/05: Pavimentação Solo-Cimento e Solo Tratado com Cimento . Curitiba: Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná, 2005.
DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 054/97: Equivalente de Areia – Método de Ensaio . Rio de Janeiro: 1997.
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ES 098/07: Pavimentação – base estabilizada granulometricamente com utilização de Solo Laterítico – Especificação de serviço . Rio de Janeiro: 2007.
ES 139/10: Pavimentação – Sub-Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: 2010.
ES 141/10: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: 2010.
ME 160/12: Solos – Determinação da expansibilidade – Método de ensaio. Rio de Janeiro: 2012.
DIAMOND, Sidney; KINTER, Earl B. Mechanisms of Soil-Lime Stabilization: An Interpretive Review. Highway Research Record , n. 92, p. 83 – 96. 1965.
EISENHUTTENLEUTE, Verein Deutscher. Slag Atlas . Dusseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, Eurpean Communities, 1995. ISBN 3-514-00457-9.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de Método de

Análise de Solo – 2ª Edição Revista e Atualizada. Rio de Janeiro: Centro Nacional

de Pesquisa de Solos, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2017.

_____. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 8: Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Campinas: EMBRAPA Monitoramento por Satélite, 2010.

ESPINDOLA, Carlos Roberto; DANIEL, Luiz Antonio. Laterita e solos lateríticos no Brasil. Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2008.

FERRARO, Bruno Bertelli. Estudos da Propriedades Termofísicas de Escória Metalúrgica e de Escória Sintéticas de CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO. São Paulo: 2014. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química, Escola Politécnica de São Paulo.

FURIERI, Elaine Cristina. Avaliação em Laboratório e em Campo por meio de Simulador Linear de Tráfego Móvel de Solos Estabilizados com Coproduto KR, Cimento Portland Blindasolo®. Vitória: 2019. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

GADSDON, Brock; HAN, Xingguang. Hot metal desulphurisation: benefits of magnesium lime co-injection. **Millennium Steel**, Raw Materials and Ironmaking, 2009.

GARIOLI, Beatriz de Souza; BRANDÃO, Thais Camatta. **Estudo do melhoramento de solos por meio da adição de coproduto KR para diferentes teores de finos**. Vitória: 2018. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

GONÇALVES, Raphael de Martin. Incorporação de produto de aciaria KR e polímero PDC em solos para base de pavimentos. Vitória: 2016. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

GRIM, Ralph E. **Clay mineralogy**. Mcgraw-Hill Book Company, Inc; New York; Toronto; London, 1953.

GRUNWALD, Norbert; HEINRICHS, Michael. **Innovation, Entrepreneurship and Sustainability**: Series of Robert-Schmidt-Institut Wismar, Vol. 2. Bremen: EHV Academicpress GmbH, 2015. ISBN 9783945021187.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade 2014. 2014.

_____. Relatório de Sustentabilidade 2018. 2018.

JOHN, Vanderley M. **Cimentos de escória ativada com silicato de sódio**. São Paulo: 1995. 199 p. Tese de Doutorado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Construção Civil, São Paulo, 1995.

JOHN, Vanderley M.; AGOPYAN, Vahan. **Reciclagem de escória de alto-forno no Brasil**. São Paulo: Seminário Nacional Sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais, São Paulo, 2000.

KIRMSE, Odair José. Estudo do Comportamento Metalúrgico do Reator Kambara através da Modelagem Física. Ouro Preto: 2006. Dissertação de Mestrado, Programa De Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

KOUROUNIS, S.; TSIVILIS, S.; TSAKIRIDSM P. E.; PAPADIMITRIOU, G. D.; TSIBOUKI, Z. **Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag**. Cement and Concrete Research 37. 815-822. 2007.

LANDES, David S. Prometeu desacorrentado: transformação e desenvolvimento industrial na Europa Ocidental, desde 1750 até a nossa época. Rio de Janeiro: **Nova Fronteira**, 1969.

LEWIS, D. W. **Proprities and uses of iron and steel slags**. South Africa: National Institutute for Transport And Road Research. 1982.

LITTLE, Dallas N. Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime. Dubuque: Kendall Hunt Publishing Company, 1995.

LUCIANO, Rodrigo Vieira; ALBUQUERQUE, Jackson Adriano; COSTA, André da; BATISTELLA, Bruno; WARMLING, Maria Tereza. **Atributos Físicos Relacionados à Compactação de Solos sob Vegetação Nativa em Região de Altitude no Sul do Brasil**. 2012. R. Bras. Ci. Solo, 36:1733-1744.

LÚCIO, Álvaro. **Físico Química Metalúrgica**: Segunda Parte. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica, 1981.

MAHENDRA, K. C.; VIRUPAKSHA, Gouda H.; ADARSHA, Kompi; MUNISWAMI K.; KURUBARA, Honnuraswamy; SHIVARAJ, R. N. Hot Metal De-Sulphurisation by KR Process. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology, 2017.

MANSO, Juan M.; LÓPEZ-ORTEGA, Vanesa; POLANCO, Juan A.; SETIÉN, Jesús. The use of ladle furnace slag in soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 126-134, 2013.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto**: Microestrutura, propriedades e materiais. 3ª Edição. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto, 2008.

MENEGUETE, Dayanne Severino. Estabilização Físico-Química de Resíduo Sulfetado-Sultatado com incorporação de Escória de Dessulfuração. Vitória: 2018. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

MARTÍNEZ, Gioconda Santos e Souza. **Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Lateríticos da Formação Barreiras**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

METALLURGICAL PLANT AND TECHNOLOGY. **Edição Brasileira 2/2016**. Silvia Nunes, 2016. ISSN 18565-8393.

MORANDI, Angela Maria. A siderurgia e sua adaptação ao novo paradigma tecnológico. **Revista Análise Econômica**, Porto Alegre, v. 15, n. 28, p. 5 – 34. 1997.

MORATTI, Dalmon Guzzo; SCOTÁ, Nádia Maria Drago. **Estabilização de solo argiloso com incorporação de coproduto siderúrgico de aciaria tipo KR**. Vitória: 2016. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2016.

MOREIRA, Fátima M. S.; SIQUEIRA, José Oswaldo. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2002.

MOREIRA, Eliana Martins. Estudo do Comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

MOURA, Bárbara Luiza Riz; ARAÚJO, Bruna Ferrari. **Avaliação do ganho de resistência do solo argiloso associado à areia, ao cimento e ao resíduo KR**. Vitória: 2016. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2017.

MYMRIN, V. A.; PONTE, H. A.; PONTE, M. J. J. S.; MAUL, A. M. Structure formation of slag-soil construction materials. **Materials and structures**, v. 38, n. 1, 2005.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. Report 8: Synthetic aggregates for highway construction. National Academy of Sciences, National Research Council, 1964.

NETTO, Guido Bonatto; NAKAMURA, Rafael Eiji. Melhoramento de solo com incorporação do coproduto KR e Polímero para uso em base e sub-base de

estradas vicinais. Vitória: 2016. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2016.

OLIVEIRA, Caroline Forestti. Uso de coproduto de dessulfuração de Reator Kambara como agente estabilizante de solos para fins de pavimentação. Vitória: 2018. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos:** 3ª Edição com exercícios resolvidos. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PUERTOS, F. Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas de futuro. **Materiales de Construción**, v. 45, n. 239, 1995.

QUEIROZ, José Renato Cavalcanti; MAROCHOLL, Susana Salazar; BENETTILL, Paula; TANGOLL, Rubens Nisie; JUNIOR, Lafayette Nogueira. **Métodos de caracterização de materiais para pesquisa em odontologia**. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2012.

RAMOS, Luísa Braz da Silva. **Estudo do ganho de resistência e da estabilização química pela adição do coproduto KR no melhoramento de solos argilosos**. Vitória: 2018. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

REICHARDT, Klaus; TIMM, Luís Carlos. **Solo, planta e atmosfera**: conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2004.

RODRIGUES, Maria da Glória Marcondes. **Contribuição ao estudo do método físico-quimico de dosagem do solo-cimento**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1992. Dissertação de Mestrado.

RODRIGUES, Klaus Henrique de Paula. Estudo de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração. Ouro Preto: 2018. Dissertação de

Metrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

ROHDE, Luciana. Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos: Estudo laboratorial. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. Dissertação de Mestrado.

SANTOS, Pérsio de Sousa. **Tecnologia de argilas, aplicada às argilas brasileiras:** Volume 1 – Fundamentos. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1928.

SANTOS, Francisco L.; ALEXANDRE, Carlos A.; COELHO, Renato R. Capítulo 7 – Relações Solo-Água-Planta. Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas, Escola de Ciência e Tecnologia, Universidade de Évora, 2012.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação:** Volume II. São Paulo: Pini, 2001. ISBN 85-7266-125-5.

SANT'ANA, Alexandre Pelisssari. Caracterização tecnológica de misturas soloescória de alto-forno granulada moída para fins rodoviários. Viçosa, 2003.

SILVA, Matheus Francisco. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**. São Carlos, 2016.

SCHRAMA, Frank Nicolaas Hermanus; VAN DEN BERG, Bart. Comparison of Kanbara reactor, magnesium mono-injection and lime-magnesium co-injection for hot metal desulphurization. Millennium Steel: v. 4, n. 1, 2014.

SCHRAMA, Frank Nicolaas Hermanus; BEUNDER, Elisabeth Maria; VAN DEN BERG, Bart; YANG, Yongxiang; BOOM, Rob. Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking. **Ironmaking & Steelmaking**, v. 44, n. 5, p. 333-343, 2017.

SHEN, Weiguo; ZHOU, Mingkai; MA, Wei; HU, Jinqiang CAI, Zhi. Investigation on the application of steel slag–fly ash–phosphogypsum solidified material as road base material. **Journal of Hazardous Materials**, v. 164, n. 1, p. 99-104, 2009.

SHENG, Guanghong; HUANG, Peng; WANG, Shisheng; CHEN, Guangyan. Potential Reuse of Slag from the Kambara Reactor Desulfurization Process of Iron in na Acidic Mine Drainage Treatment. **Journal of Environmental Engineering**, v. 140, n. 7, 2014.

SIDDIQ, Razi Ahmad. Cost, Effectiveness and Utility of Polymer Soil Stabilizers. Oklahoma: 1978. Tese de Doutorado, Faculty of the Graduate College of the Oklahoma, 1978.

SOLIZ, Valeria Vaca Pereira. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. Rio de Janeiro: 2007. Rio de Janeiro, 2007.

SONON, Leticia S.; KISSEL, David E.; SAHA, Uttam. Cation Exchange Capacity and Base Saturation. University of Georgia Extension, 2017.

TANZER, Ricarda; BUCHWALD, Anja; STEPHAN, Dietmar. Effect of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag. **Materials and Structures**.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. Thomas Telford. 1997.

TESSARI, Ciro Loyola; COBE, Rebecca Pezzodipane; PIRES, Patrício José Moreira. **Melhoramento de Solo com Incorporação de Resíduos de Siderurgia**. Belo Horizonte: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG): O Futuro Sustentável do Brasil passa por Minas, 2016.

TODA, Kanako; SATO, Hanura; WEERAKOON, Nilan; OTAKE, Tsubasa; NISHMURA, Satoshi; SATO, Tsutomu. Key Factors Affecting Strength Development of Steel Slag-Dredged Soil Mixtures. **Minerals**, v. 8, n. 5, p. 174, 2018.

TONG, Zhibo; MA, Guojon; CAI, Xun; XUE, Zhengliang; WANG, Wei; ZHANG, Xiang. Characterization and Valorization of Kanbara Reactor Desulfurization Waste Slag of Hot Metal Pretreatment. **Waste Biomass Valor**, 2016.

WANG, Qiang; PEYU, Yan. **Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag**. Construction and Building Materials, v. 24, n. 7, p. 1134-1140, 2010.

WORLD STEEL ASSOCIATION. The White Book of Steel. 2012.

_____. World Steel in Figures 2018. 2018.

ZATTA, Leandro. Caulinita e Haloisita "In-Natura" e Ativadas com Ácidos Minerais como Catalisadores Heterogêneos para Esterificação (M)etílica de Ácidos Graxos. Curitiba, 2010.

ANEXO I
Figura 60 – Curva Mini-MCV da amostra Sa100.

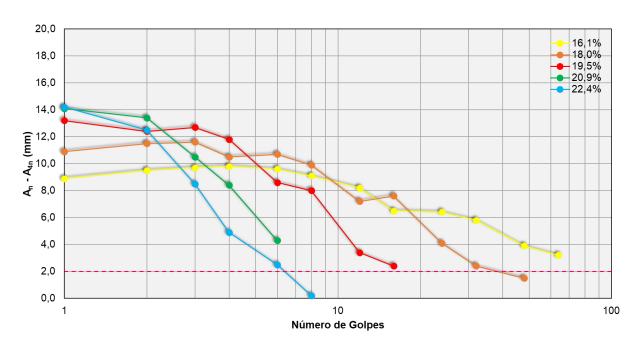
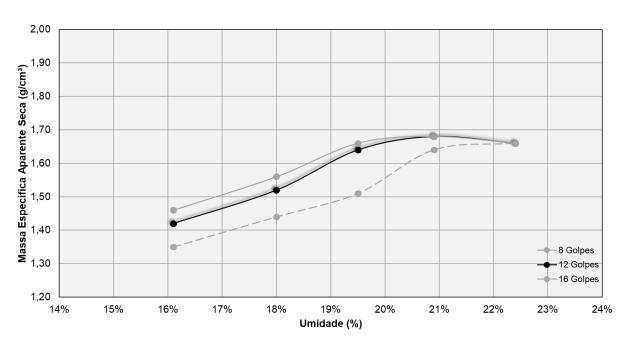
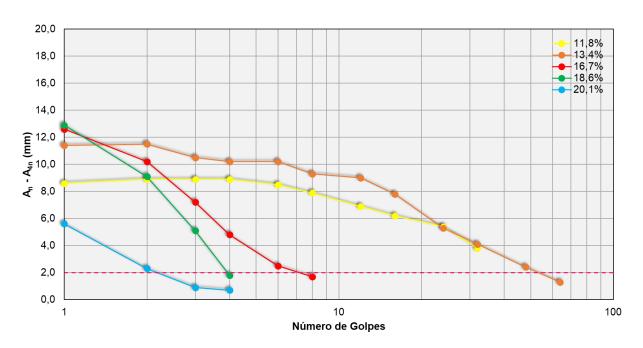


Figura 61 – Curva de Compactação da amostra Sa100.

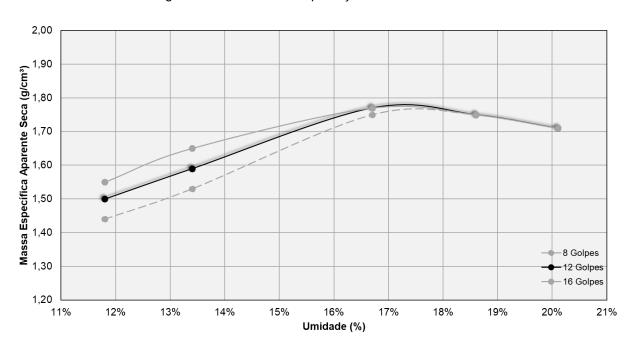


MCV da amostra Sb100.

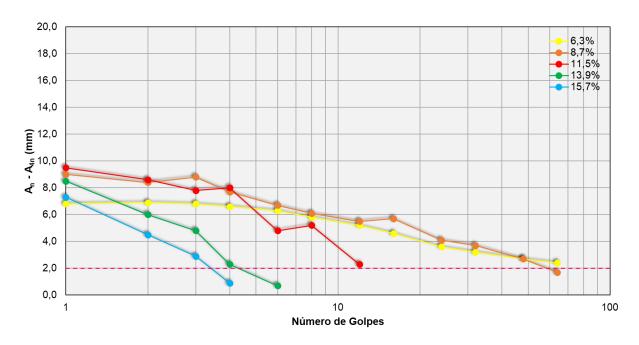


Fonte: Autor.

Figura 62 – Curva de Compactação da amostra Sb100.

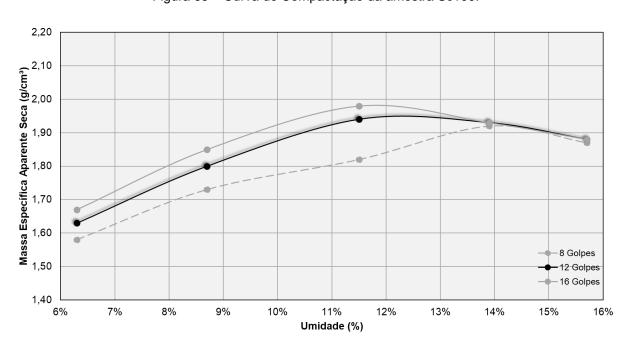


MCV da amostra Sc100.



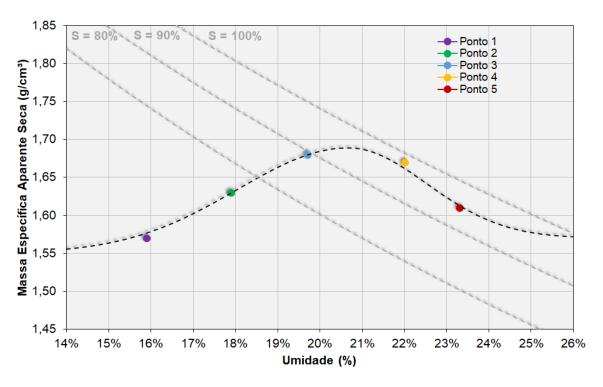
Fonte: Autor.

Figura 63 – Curva de Compactação da amostra Sc100.



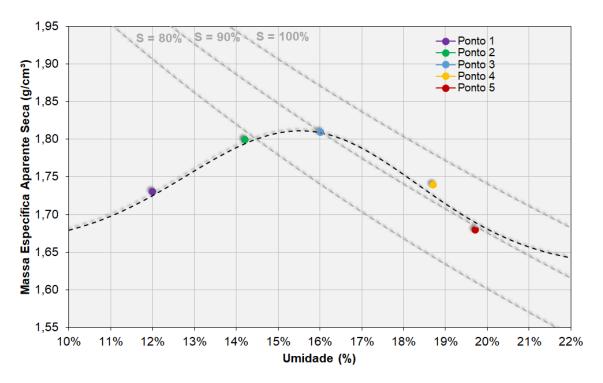
ANEXO II

Figura 64 – Curva de Compactação da amostra Sa100 após 4 dias de imersão.



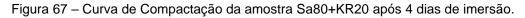
Fonte: Autor.

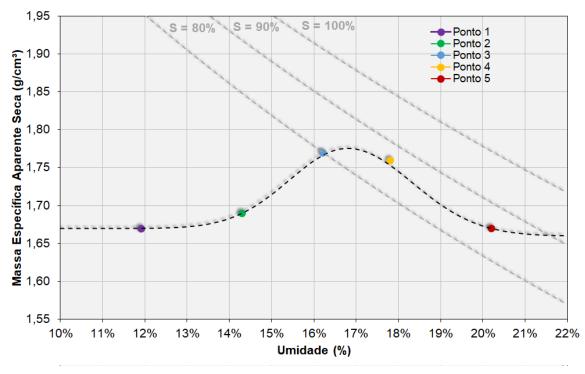
Figura 65 – Curva de Compactação da amostra Sb100 após 4 dias de imersão.



2,10 S = 80% S = 90% S = 100% Ponto 1
Ponto 2
Ponto 3
Ponto 4
Ponto 5 1,70 6% 7% 8% 9% 10% 11% 12% 13% 14% 15% 16% 17% 18% Umidade (%)

Figura 66 – Curva de Compactação da amostra Sc100 após 4 dias de imersão.

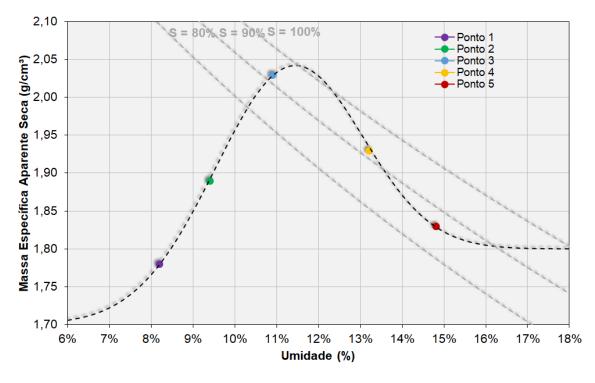




2,00 S = 80% S = 90% S = 100% Ponto 1 Ponto 2 Ponto 3 Ponto 4 Ponto 5 1,60 17% 20% 10% 11% 12% 13% 14% 15% 16% 18% 19% 21% 22% Umidade (%)

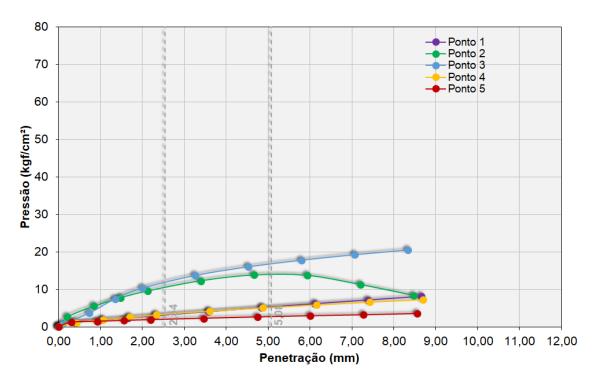
Figura 68 – Curva de Compactação da amostra Sb80+KR20 após 4 dias de imersão.

Figura 69 – Curva de Compactação da amostra Sc80+KR20 após 4 dias de imersão.



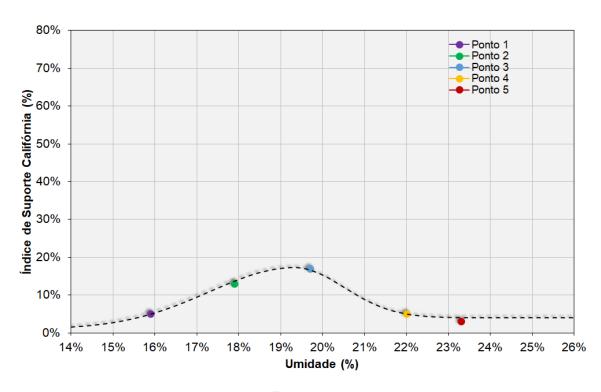
ANEXO III

Figura 70 – Curva Pressão x Penetração da amostra Sa100 após 4 dias de imersão.



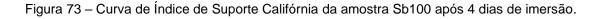
Fonte: Autor.

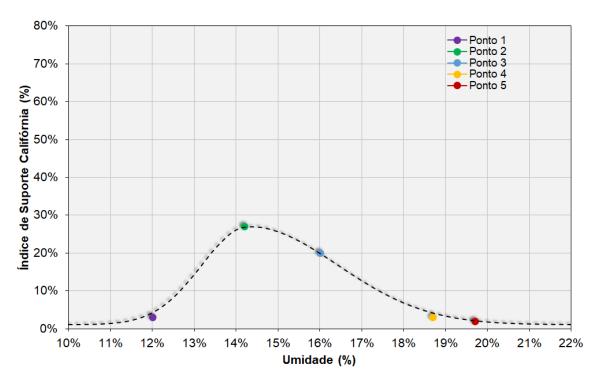
Figura 71 – Curva de Índice de Suporte Califórnia da amostra Sa100 após 4 dias de imersão.



80 Ponto 1 Ponto 2 Ponto 3 Ponto 4 Ponto 5 70 60 Pressão (kgf/cm²) 0 0 05 20 10 0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00 7,00 8,00 9,00 10,00 11,00 12,00 Penetração (mm)

Figura 72 – Curva Pressão x Penetração da amostra Sb100 após 4 dias de imersão.

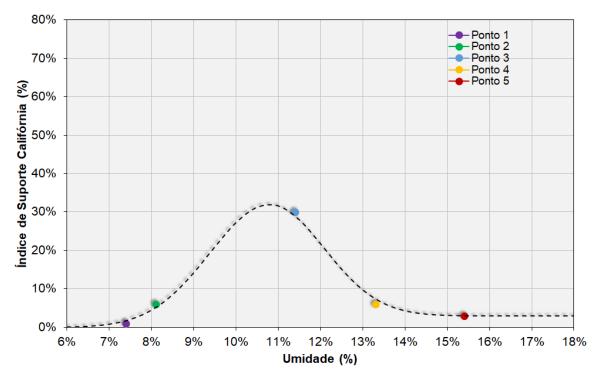




80 Ponto 1 Ponto 2 Ponto 3 Ponto 4 70 Ponto 5 60 Pressão (kgf/cm²) 20 10 7,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00 8,00 9,00 10,00 11,00 12,00 0,00 Penetração (mm)

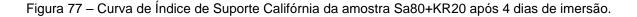
Figura 74 – Curva Pressão x Penetração da amostra Sc100 após 4 dias de imersão.

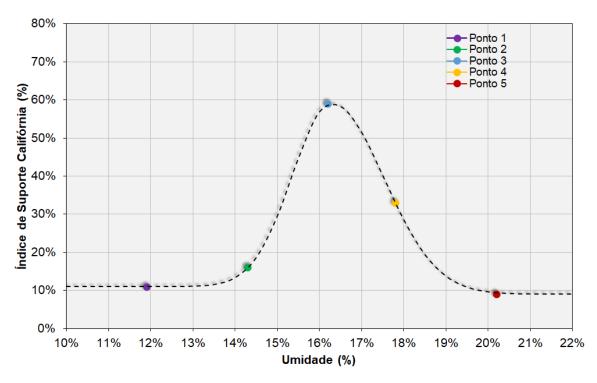




80 -Ponto 1 -Ponto 2 70 Ponto 3 Ponto 4 Ponto 5 60 Pressão (kgf/cm²) 8 0 0 0 20 10 2,00 4,00 5,00 6,00 7,00 0,00 3,00 8,00 9,00 10,00 11,00 12,00 Penetração (mm)

Figura 76 – Curva Pressão x Penetração da amostra Sa80+KR20 após 4 dias de imersão.

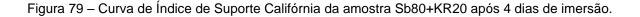


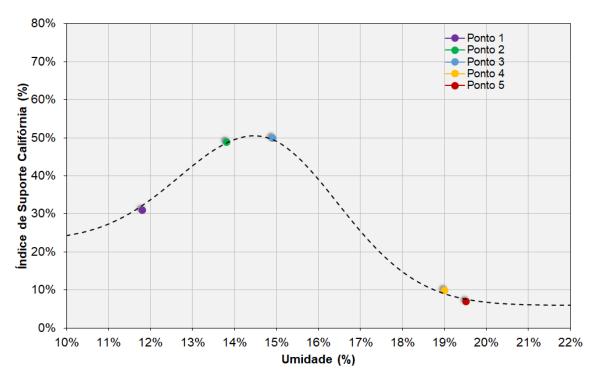


80 Ponto 1 Ponto 2 70 Ponto 3 Ponto 4 Ponto 5 60 Pressão (kgf/cm²) © 0 0 0 20 10 0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00 7,00 8,00 9,00 10,00 11,00 12,00

Figura 78 – Curva Pressão x Penetração da amostra Sb80+KR20 após 4 dias de imersão.

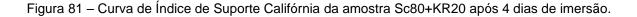
Penetração (mm)

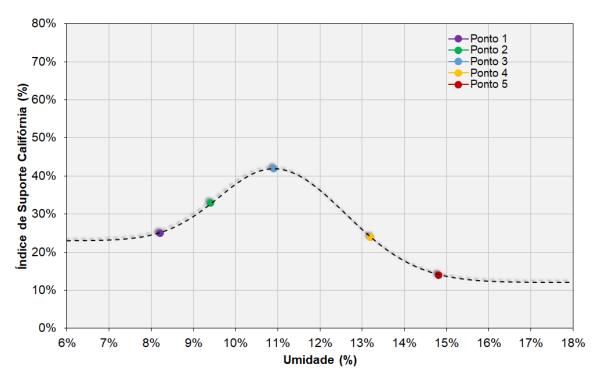




80 Ponto 1 Ponto 2 70 Ponto 3 Ponto 4 Ponto 5 60 Pressão (kgf/cm²) © 0 0 20 10 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00 7,00 8,00 9,00 10,00 11,00 12,00 0,00 1,00 Penetração (mm)

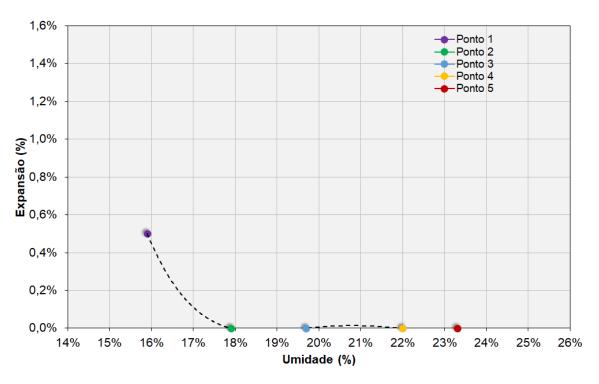
Figura 80 – Curva Pressão x Penetração da amostra Sc80+KR20 após 4 dias de imersão.





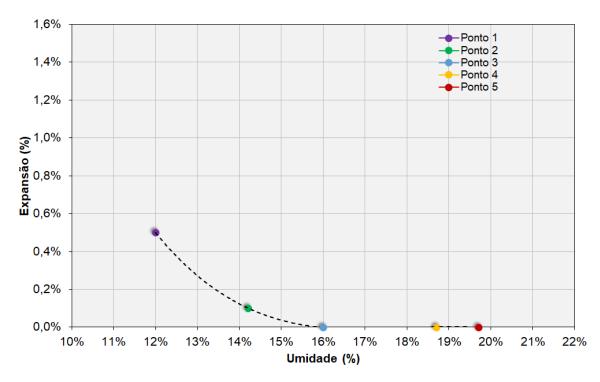
ANEXO IV

Figura 82 – Curva de Expansão da amostra Sa100 após 4 dias de imersão.



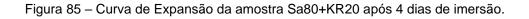
Fonte: Autor.

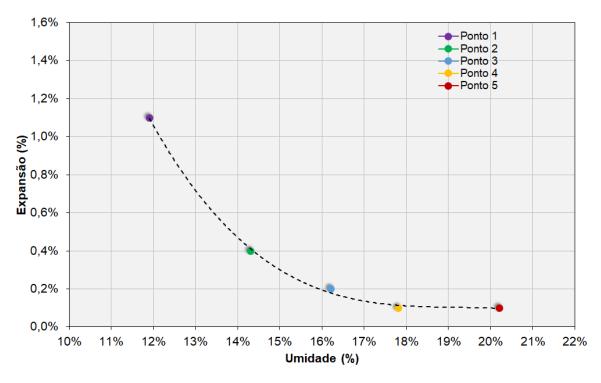
Figura 83 – Curva de Expansão da amostra Sb100 após 4 dias de imersão.



1,6% Ponto 1
Ponto 2 1,4% Ponto 3 -Ponto 4 -Ponto 5 1,2% **Expansão (%)** 88.0 88.0 88.0 6% 0,4% 0,2% 0,0% 12% 13% 6% 7% 9% 10% 8% 11% 14% 15% 16% 17% 18% Umidade (%)

Figura 84 – Expansão da amostra Sc100 após 4 dias de imersão.





1,6% -Ponto 1 Ponto 2 1,4% Ponto 3 Ponto 4 Ponto 5 1,2% 0,4% 0,2% 0,0% 10% 11% 12% 13% 14% 15% 16% 17% 18% 19% 20% 22% Umidade (%)

Figura 86 – Curva de Expansão da amostra Sb80+KR20 após 4 dias de imersão.

