

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

HULLY CARVALHO PICOLI

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM COPRODUTO DE
COQUERIA FGD E CIMENTO PORTLAND PARA USO
EM CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO**

VITÓRIA
2020

HULLY CARVALHO PICOLI

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM COPRODUTO DE
COQUERIA FGD E CIMENTO PORTLAND PARA USO EM
CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires.

Coorientadora: Prof^a. Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira.

VITÓRIA

2020

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

P598e Picoli, Hully Carvalho, 1993-
Estabilização de solos com coproduto de coqueria FGD e
cimento Portland para uso em camadas de pavimentação / Hully
Carvalho Picoli. - 2020.
144 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. Solos. 2. Pavimentos. 3. Resíduos industriais. I. Pires,
Patrício José Moreira. II. Teixeira, Jamilla Emi Sudo Lutif. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV.
Título.

CDU: 624

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM COPRODUTO DE COQUERIA FGD E CIMENTO PORTLAND PARA USO EM CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO

Hully Carvalho Picoli

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

Aprovada no dia **17 de julho de 2020** por:

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires
Orientador - UFES

Prof^a. Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira
Coorientadora - UFES

Prof. Dr. Ronaldo Pilar
Examinador interno – UFES

Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Examinador interno - UFES

Prof. Dr. Guilherme José Cunha Gomes
Examinador externo - UFOP

Vitória – ES, 17 de julho de 2020.

AGRADECIMENTOS

Nessa jornada, de crescimento pessoal e profissional, contei com a presença e o suporte de diversas pessoas. Portanto, esta conquista é o resultado de um esforço em conjunto e tenho eterna gratidão a todos que participaram desse processo.

Agradeço a Deus, por, primeiramente, me permitir essa realização. Por estar presente em todos os momentos da minha vida, inclusive neste projeto. Por me guiar e dar a força necessária para eu enfrentar todos os obstáculos e alcançar meus objetivos. Por ser minha rocha e meu acalento nas atribuições, e o motivo das minhas vitórias. E à Maria, nossa mãe, por estar sempre à frente com a sua interseção.

Aos meus amados pais, Jailton e Tâmara, que sempre acreditaram e confiaram em mim, me apoiaram e fizeram de tudo, sem medir esforços, para eu conquistar os meus sonhos. Meu pai, guerreiro, e minha mãe, meu porto seguro. Obrigada pelo amor incondicional. Aos meus irmãos, Pedro e Bernardo, pelo carinho, amor e por me fazer querer ser sempre o melhor exemplo para vocês. Agradeço pelo apoio e pela paciência, principalmente na reta final.

Ao meu namorado, Cezar, por todo amor, confiança, companheirismo, amizade e incentivo desde o início e em todos os momentos. Por me acompanhar e auxiliar no laboratório nos finais de semana.

Minha gratidão ao professor Dr. Patrício Pires, meu orientador, pela oportunidade deste trabalho e por me confiar esta pesquisa; pela paciência e suporte nesta caminhada; pelo empenho com o desenvolvimento do laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFES e com a promoção de novas pesquisas; obrigada por tudo, sem você este trabalho não seria possível. À minha coorientadora, professora Ph.D. Jamilla Teixeira, por apresentar correções, soluções e caminhos, sempre nos incentivando a buscarmos e oferecermos o melhor de nós. Ao professor Dr. Rômulo Castello, com o qual tive o meu primeiro contato com a geotecnia na graduação, e com sua didática e sabedoria me fez apaixonar por essa área da engenharia. A todos vocês a minha admiração e o meu agradecimento por todo o conhecimento compartilhado.

Aos meus colegas de mestrado, o nosso grupo da “escória”, Priscila, Bárbara, Yago, Lucas e Sidneidy, pelos momentos de descontração - almoços no laboratório, lanches, aniversários surpresas, entre tantos outros -, que tornavam os dias mais leves. E, sobretudo, ao companheirismo e a aprendizagem, que me ajudaram a chegar até aqui.

À empresa Arcelor Mittal Tubarão, por acreditar e valorizar nossa pesquisa, fornecendo o apoio financeiro e materiais necessários para a realização desse estudo. E, também, às empresas ECO 101 e Vila Betume, pelo apoio técnico.

Meu agradecimento aos técnicos do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFES, Sidneidy, Natália e Rafael, e aos técnicos externos, Leonaldo, Deiverson e Bruno, pelo auxílio braçal e técnico, além do aprendizado adquirido. Agradeço também o auxílio das monitoras, dos alunos de iniciação científica e voluntários, Thayna, Nathália, Aline, Karen, Viviane, Yasmin, Brunella, Igor, Paulo e, especialmente, ao Leonardo, pela realização dos ensaios de classificação MCT.

Aos meus prezados familiares e amigos, pelo carinho e pela presença em minha vida. Por fim, obrigada a todos aqueles que de alguma maneira contribuíram para essa realização.

RESUMO

PICOLI, Hully Carvalho. **Estabilização de solos com coproduto de coqueria FGD e cimento Portland para uso em camadas de pavimentação**. 2020. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020.

Coprodutos industriais estão sendo vastamente utilizados como forma alternativa de estabilizantes de solos, possibilitando a inserção dos resíduos como insumo na construção civil, diminuindo o uso de recursos naturais, e a queda do descarte desses materiais. O processo de dessulfurização de gases de combustão (*Flue Gas Desulfurization* - FGD) da queima do carvão para controle da emissão de SO₂ nas termelétricas e nas siderúrgicas gera um resíduo, denominado aqui de pó FGD, que possui algumas características físicas e químicas similares aos aditivos utilizados na construção civil, inclusive para a estabilização de solos. Esta dissertação estuda o efeito da incorporação do pó FGD e do cimento Portland ao solo, com o objetivo de avaliar o desempenho do coproduto em conjunto com o cimento e individualmente, para estabilização de um solo laterítico areno-argiloso bem graduado para fins de pavimentação, a fim de minimizar o uso desse aditivo convencional e promover o aproveitamento do pó FGD. Diferentes teores de pó FGD e de cimento foram adicionados ao solo natural não modificado, resultando em misturas solo/cimento/FGD, solo/cimento e solo/FGD. Foram realizados ensaios de caracterização física, química e mineralógica dos materiais individualmente e das misturas, além da caracterização mecânica das misturas. A partir dos resultados, nota-se que a adição do pó FGD e do cimento não causou alterações expressivas nas características físicas do solo, destacando apenas a diminuição da plasticidade. Nos parâmetros mecânicos, a incorporação do pó FGD conferiu aumento expressivo do ISC, tanto em conjunto com o cimento, quanto individualmente. Já os valores de expansão, resultantes do uso do pó FGD, tornam seu uso limitado. Todavia, o uso combinado do pó FGD e cimento possibilitam a redução nos valores de expansão. Portanto, verificou-se a viabilidade técnica de uso do pó FGD na estabilização de solos, tornando possível seu uso como um aditivo sustentável e tecnicamente viável para melhoramento de solos.

Palavras-chave: FGD; Cimento Portland; Estabilização de solos; Pavimentação.

ABSTRACT

PICOLI, Hully Carvalho. **Soil stabilization with FGD co-product coke and Portland cement for use in paving layers**. 2020. Master's Dissertation – Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Espírito Santo, Vitória, 2020.

Industrial co-products are being widely used as an alternative form of soil stabilizers, allowing the insertion of waste as an input in civil construction, decreasing the use of natural resources, and decreasing the disposal of these materials. The flue gas desulfurization (FGD) process of coal burning to control the SO₂ emission in thermoelectric and steel plants generates a residue, called here FGD powder, has some physical and chemical characteristics similar to additives used in civil construction, including soil stabilization. This research assayed the effect of FGD powder and Portland cement incorporating into the soil, with the objective of evaluating the performance of the co-product together with cement and individually, for stabilization of a well-graded sandy soil for paving purposes, in order to minimize the use of this conventional additive and promote the use of FGD powder. Different FGD powder and cement levels were added to the unmodified natural soil, resulting in soil/cement/FGD, soil/cement and soil/FGD mixtures. Physical, chemical and mineralogical characterization tests were performed on individual materials and mixtures, and the mechanical characterization of mixtures. From the results, it's noted that the addition of FGD powder and cement did not cause considerable changes in the physical characteristics of the soil, highlighting only the decrease in plasticity. In the mechanical parameters, the incorporation of the FGD powder resulted in a considerable increase in the CBR, in conjunction with cement and individually. The expansion values, resulting from the FGD powder use, make its use limited. However, the combined use of FGD powder and cement makes it possible to reduce the expansion values. Therefore, the technical feasibility of using FGD powder in soil stabilization, making possible its use as a sustainable and technically viable additive for soil improvement.

Keywords: FGD; Portland cement; Soil stabilization; Paving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das tecnologias FGD.....	26
Figura 2 - Tipos de processos FGD.	27
Figura 3 - Esquema do processo FGD úmido utilizando calcário.....	28
Figura 4 - Esquema do processo FGD seco.	29
Figura 5 - Esquema do processo FGD semisseco.	31
Figura 6 - Difratoograma de raios-X de um pó FGD úmido.....	35
Figura 7- Difratoograma de raios-X de um pó FGD semisseco.....	36
Figura 8 - Difratoograma de raios-X de um pó FGD semisseco.....	36
Figura 9 - Tipos de estrutura de pavimento.....	37
Figura 10 - Esquema da seção transversal do pavimento.....	38
Figura 11 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas.....	39
Figura 12 - Ocorrência de solo de comportamento laterítico no território brasileiro.	40
Figura 13 - MEV de padrão indicativo de solo laterítico.	42
Figura 14 - Arranjo de partículas de quartzo, caulinita (A), óxidos de ferro (B) e matéria orgânica (C) em agregado de Latossolo caulínico.....	45
Figura 15 - Arranjo de partículas de quartzo, gibbsita (A) e óxidos de ferro (B) em agregado de Latossolo gibbsítico.	45
Figura 16 - Trocas catiônicas da argila com a escória de dessulfuração KR. ...	46
Figura 17 - Representação esquemática das etapas de hidratação do cimento Portland.....	53
Figura 18 - Gel de cimento com domínios de partículas de argila encaixadas.	54
Figura 19 - Cimentação nos pontos de contato entre os grãos grosseiros.....	55
Figura 20 - Estrutura do solo-cimento de grãos finos.....	56
Figura 21 - Resultados obtidos por Rashid <i>et al.</i> (2013): (a) RCS e (b) ISC. ...	57
Figura 22 - Resultados obtidos por Furieri (2019): (a) RCS e (b) ISC.....	57
Figura 23 - Relação vazios/cimento expresso em termos da porosidade e do teor volumétrico de cimento.....	59
Figura 24 - Flocculação e aglomeração.....	60
Figura 25 - Mecanismo de estabilização solo-cal.....	61

Figura 26 - Resultados de ISC obtidos por Joel e Agbede (2010) para as misturas de solo/cal e solo/cimento.	63
Figura 27 - Resultados de ISC obtidos por Joel e Agbede (2010) para as misturas de solo/cal/cimento.....	63
Figura 28 – Resultados de IP obtidos por Joel e Agbede (2010).	64
Figura 29 - Resultados obtidos por Gonçalves <i>et al.</i> (2016).....	66
Figura 30 - Resultados obtidos por Oliveira <i>et al.</i> (2019).	66
Figura 31 - Resultados obtidos por Pires <i>et al.</i> (2019).	66
Figura 32 - Resultados obtidos por Prabakar <i>et al.</i> (2003).....	68
Figura 33 - Resultados obtidos por Yadu e Tripathi (2013).....	68
Figura 34 - Resultados obtidos por Santos <i>et al.</i> (2018).	68
Figura 35 - Resultados obtidos por Maia <i>et al.</i> (2014).....	69
Figura 36 - Resultados obtidos por Silva e Carvalho (2017).	70
Figura 37 - Resultados obtidos por Souza <i>et al.</i> (2019).	70
Figura 38 - Resultados obtidos por Leite <i>et al.</i> (2016).....	71
Figura 39 - Materiais utilizados na pesquisa.	72
Figura 40 - Central da SunCoke Energy com detalhe para a área do processo FGD.....	73
Figura 41 - Adição das misturas.....	75
Figura 42 - Ensaio de granulometria do solo.....	77
Figura 43 - Ensaio de massa específica real dos grãos.....	78
Figura 44 - Ensaios de limites de consistência: (a) limite de liquidez, (b) limite de plasticidade, (c) e (d) limite de contração.....	79
Figura 45 - Amostras de solo e pó FGD na mufla para ensaio de teor de matéria orgânica.....	80
Figura 46 - Ensaio de pH.....	81
Figura 47 - Ensaio de difratometria de raios-X.	83
Figura 48 - Ensaios para classificação MCT: (a) Mini-MCV e (b) perda de massa por imersão.	84
Figura 49 - Ensaio de dosagem físico-química de solo-cimento no primeiro dia.	86
Figura 50 - Ensaio de dosagem físico-química de solo-cimento no oitavo dia: (a) 2%, (b) 3% e (c) 4% de teor de cimento.....	86

Figura 51 - Ensaio de compactação: (a) compactação manual e (b) amostras de umidade.....	87
Figura 52 - Ensaio de ISC e expansão: (a) imersão dos cilindros e (b) penetração dos corpos de prova.....	88
Figura 53 - Ensaio de expansibilidade.....	89
Figura 54 - Curvas granulométricas das amostras.....	90
Figura 55 - Massa específica real dos grãos das amostras.	92
Figura 56 - Limites de consistência das amostras.....	93
Figura 57 - Atividade das amostras.....	95
Figura 58 - Potencial hidrogeniônico (pH) das amostras.....	96
Figura 59 - Difratoograma de raios-X do solo.....	101
Figura 60 - Difratoograma de raios-X do cimento.....	102
Figura 61 - Difratoograma de raios-X do pó FGD.....	102
Figura 62 - Ábaco de Casagrande do SUCS.....	104
Figura 63 - Ábaco MCT.	107
Figura 64 - Variação do volume em função do teor de cimento e de pó FGD.....	108
Figura 65 - Curvas de compactação das amostras.	109
Figura 66 - Curvas de compactação das misturas de solo/cimento/FGD.....	110
Figura 67 - Curvas de compactação das misturas de solo/cimento e solo/FGD.	110
Figura 68 - Umidade ótima das amostras.....	111
Figura 69 - Massa específica aparente seca máxima das amostras.....	111
Figura 70 - Índice de suporte Califórnia (ISC) das amostras.....	113
Figura 71 - Comparativo entre os valores de ISC para as misturas de solo/cimento/FGD.....	114
Figura 72 - Comparativo entre os valores de ISC para as misturas de solo/cimento e solo/FGD.	114
Figura 73 - Expansão das amostras.....	116
Figura 74 - Expansibilidade das amostras.....	117
Figura 75 - Índice de suporte Califórnia (ISC) do solo como função da relação vazios/aditivo expresso em termo da porosidade e do teor volumétrico do aditivo.	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Granulometria do pó FGD.	33
Tabela 2 - Composição química do pó FGD.	34
Tabela 3 - Granulometria das amostras.	91
Tabela 4 - Análise química de complexo sortivo das amostras.	98
Tabela 5 - Resultados do ensaio de fluorescência de raios-X das amostras.	100
Tabela 6 - Quantificação de fases das amostras.	101
Tabela 7 - Classificação SUCS das amostras.	105
Tabela 8 - Classificação AASHTO das amostras.	106
Tabela 9 - Classificação MCT das amostras.	107
Tabela 10 - Dados para aplicação da metodologia baseado em Foppa (2005) e Consoli <i>et al.</i> (2007).	119

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo do uso do pó FGD em aplicações de bases e sub-bases estabilizadas nos EUA.....	25
Quadro 2 - Características mecânicas dos solos lateríticos areno-argilosos (LA').	43
Quadro 3 - Programa Experimental.....	76

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Atividade Coloidal
ACAA	<i>American Coal Ash Association</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Cimento Portland
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
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 Raios-X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
ES	Espírito Santo
EUA	Estados Unidos da América
FGD	<i>Flue Gas Desulfurization</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FRX	Fluorescência de Raios-X
HBR	<i>Highway Research Board</i>
IAB	Instituto Aço Brasil
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LA'	Laterítico Arenoso-argiloso
LC	Limite de Contração
LG	Laterítico Argiloso

LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MCT	<i>Tropical Compact Miniature</i>
MCV	<i>Moisture Condition Value</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
RS	Resistente aos Sulfatos
SC	Areia Argilosa
SDA	<i>Spray Dryer Absorber</i>
SM	Areia Siltosa
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
WCA	<i>World Coal Association</i>
WSA	<i>World Steel Association</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	JUSTIFICATIVA DO TEMA	17
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos Específicos	19
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	PROCESSO DE GERAÇÃO DO PÓ FGD	21
2.1.1	Processos de FGD	25
2.1.1.1	Processo FGD Úmido	27
2.1.1.2	Processo FGD Seco	29
2.1.1.3	Processo FGD Semisseco	30
2.1.2	Características Físicas, Químicas e Mineralógicas do pó FGD	32
2.2	PAVIMENTAÇÃO	37
2.3	PROPRIEDADES DOS SOLOS	39
2.3.1	Solos Lateríticos	39
2.3.2	Influência da Fração Argila nas Propriedades dos Solos	43
2.4	ESTABILIZAÇÃO E MELHORAMENTO DE SOLOS	47
2.4.1	Solo-cimento e Solo Melhorado com Cimento	50
2.4.2	Estabilização de Solo com Cimento	51
2.4.3	Estabilização de Solo com Cal	59
2.4.4	Solo Melhorado com Coprodutos Industriais	64
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	72
3.1	MATERIAIS	72
3.1.1	Solo	73
3.1.2	Pó FGD	73
3.1.3	Cimento	74
3.2	MÉTODOS	74
3.2.1	Etapa I – Caracterização Física, Química e Mineralógica	77
3.2.1.1	Granulometria por Peneiramento e Sedimentação	77
3.2.1.2	Massa Específica Real dos Grãos	77
3.2.1.3	Limites de Consistência	78
3.2.1.4	Teor de Matéria Orgânica	80
3.2.1.5	Potencial Hidrogeniônico (pH)	81

3.2.1.6	<i>Análise Química de Complexo Sortivo</i>	81
3.2.1.7	<i>Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)</i>	82
3.2.1.8	<i>Difratometria de Raios-X (DRX)</i>	83
3.2.1.9	<i>Classificações</i>	83
3.2.1.10	<i>Dosagem Físico-química de Solo-cimento</i>	85
3.2.2	Etapa II – Caracterização Mecânica	87
3.2.2.1	<i>Compactação</i>	87
3.2.2.2	<i>Índice de Suporte Califórnia (ISC)</i>	88
3.2.2.3	<i>Expansão</i>	89
3.2.2.4	<i>Expansibilidade</i>	89
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	90
4.1	ETAPA I: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MINERALÓGICA.....	90
4.1.1	Granulometria por Peneiramento e Sedimentação	90
4.1.2	Massa Específica Real dos Grãos	92
4.1.3	Limites de Consistência	93
4.1.4	Teor de Matéria Orgânica	96
4.1.5	Potencial Hidrogeniônico (pH)	96
4.1.6	Análise Química de Complexo Sortivo	97
4.1.7	Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)	99
4.1.8	Difratometria de Raios-X (DRX)	101
4.1.9	Classificações	104
4.1.9.1	<i>Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)</i>	104
4.1.9.2	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)</i>	105
4.1.9.3	<i>Tropical Compact Miniature (MCT)</i>	106
4.1.10	Dosagem Físico-química de Solo-cimento	108
4.2	ETAPA II: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	109
4.2.1	Compactação	109
4.2.2	Índice de Suporte Califórnia (ISC)	112
4.2.3	Expansão	115
4.2.4	Expansibilidade	116
4.2.5	Relação Vazios/Aditivo	117
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	120
5.1	CONCLUSÕES.....	120
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	123

REFERÊNCIAS.....	125
------------------	-----

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA

No Brasil, as rodovias são o principal modo de transporte. Embora de grande importância econômica nacional, o transporte rodoviário brasileiro enfrenta graves problemas, tanto em relação ao percentual de vias pavimentadas quanto à baixa qualidade da infraestrutura, apresentando apenas 12,4% da malha rodoviária pavimentada, e destas 59% apresentando algum tipo de problema, sendo classificadas como regular, ruim ou péssima (CNT, 2019). Para minimizar esses problemas são necessários investimentos na área de infraestrutura rodoviária, com investimento em novos materiais e técnicas construtivas, uso de materiais econômicos e sustentáveis, além de estabelecimento de critérios de condições de uso de pavimentos, levando em consideração as mudanças do tráfego que ocorreram ao longo dos anos.

Um pavimento econômico, dentre outros fatores, se torna possível utilizando ao máximo materiais regionais, os quais devem ser analisados em relação a sua disponibilidade e viabilidade técnica de acordo com as condicionantes de projeto (SOLIZ, 2007). O solo é um material complexo e muito variável, por isso nem sempre uma jazida local satisfaz às especificações de utilização em camadas de pavimentação ou um solo adequado se localiza distante da obra, tornando seu uso inviável do ponto de vista econômico e ambiental (BUDNY, 2018).

Surge, assim, a necessidade de estudar técnicas de melhorias das propriedades físicas e químicas de solos locais. Oliveira (2018) citou a estabilização de solos como uma técnica comum, a qual confere melhoria nas características de um solo, modificando sua estrutura para tornar o solo adequado para fins de pavimentação. Dentre os tipos de estabilização destaca-se neste estudo a estabilização química, isto é, a mistura do solo com aditivos (ligantes), sendo os mais utilizados o cimento Portland, cal, materiais betuminosos, resinas, pozolanas, que variam de acordo com o tipo de solo a ser estabilizado.

Todavia, como forma alternativa, tem-se estudado constantemente o uso de coprodutos industriais como estabilizantes (GONÇALVES, 2016), já que há um crescimento constante da geração de resíduos e dos custos para a correta disposição, e com a conscientização ecológica e econômica da sociedade tornou-se imprescindível o estudo para o reuso desses materiais (BRANCO *et al.*, 2004).

Um deles é o resíduo gerado no processo de remoção do SO₂ (dióxido de enxofre) dos gases provenientes da queima do carvão, a dessulfurização dos gases de combustão (*Flue Gas Desulfurization* - FGD) (FRANÇA, 2019), presentes nas termelétricas a carvão e indústrias siderúrgicas. Nesse processo, o SO₂ é separado dos gases por meio da injeção, usualmente, de um reagente alcalino à base de cálcio, em uma torre de pulverização ou diretamente no duto. Esse reagente faz com que o SO₂ seja absorvido, neutralizado e/ou oxidado em um composto sólido, como sulfato ou sulfito de cálcio. O sólido gerado é retido, utilizando um equipamento à jusante, e o gás dessulfurizado segue para a chaminé (USEPA, 2003).

O coproduto gerado é chamado de pó FGD, pois é um pó fino, rico em óxido de cálcio (CaO) e trióxido de enxofre (SO₃). Suas características físicas e químicas, semelhantes ao gesso, indicam seu possível uso na indústria da construção civil (CAILLAHUA, 2013), e há pesquisas que avaliaram a viabilidade deste coproduto para esta aplicação, obtendo resultados satisfatórios.

A *American Coal Ash Association* destacou que o pó FGD já vem sendo amplamente utilizado na fabricação de placa de gesso, sendo empregado em mais de 50% da fabricação desse produto nos Estados Unidos; na agricultura, este material tem sido empregado a fim de melhorar a qualidade e desempenho do solo; na recuperação de minas; e outros estudos apontam o uso deste resíduo na fabricação de cimento (ACAA, 2019). A partir do estudo de Teixeira *et al.* (2018) conclui-se que a adição do FGD possibilitou o aumento da resistência à compressão do concreto, considerando os aspectos mecânicos, para os concretos estudados. Na pesquisa de Mohaupt *et al.* (2018) verificou-se, por meio da análise mineralógica, que o pó FGD possui cristais semelhantes aos existentes em gessos e cimentos, sugerindo seu potencial como matéria-prima alternativa de materiais da construção civil. A FHWA (2016) citou o uso do pó FGD na estabilização de base e sub-base de pavimentos e a necessidade de maiores estudos para melhor aplicação deste coproduto na pavimentação.

Segundo a *World Coal Association* (WCA, 2019), mais de um terço da eletricidade global é gerada em usinas a carvão. O Instituto Aço Brasil expõe que o país produziu 32,6 milhões de toneladas de aço em 2019, ocupando o nono lugar no ranking mundial IAB (2020). Portanto, a geração desse coproduto está em constante crescimento. Só os EUA foram responsáveis pela produção de 35,2 milhões de toneladas no ano de 2013, e tem uma estimativa de aumento de 2% até 2033 (ACAA, 2015). Na China, a estimativa é que até 2020 essa produção alcance 90 milhões de toneladas de pó FGD (CAILLAHUA, 2013). Segundo a SunCoke Energy (2015), uma empresa do Espírito Santo produz 25 mil toneladas de pó FGD por ano.

Nesse cenário de escassez de solos adequados para utilização em camadas de pavimentação e necessidade de aproveitamento dos resíduos, aliados à busca incessante de economia nos processos construtivos, uma possível solução está sendo a utilização de coprodutos industriais no processo de estabilização química do solo para fins de pavimentação. Beneficiando, assim, os geradores do resíduo, as empresas de construção e o usuário final, além de contribuir com a sustentabilidade.

Diante disso, nesta dissertação foi feito um estudo da adição do pó FGD sozinho e em conjunto com o cimento Portland em solos regionais objetivando a estabilização de solos para aplicação em camadas de pavimentação, tendo em vista minimizar o uso de aditivos convencionais e promover um aproveitamento do pó FGD na construção civil.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o efeito do pó FGD (puro ou em conjunto com cimento Portland) como estabilizantes de solos para fins de pavimentação, analisando os parâmetros físicos, químicos e mecânicos de misturas selecionadas.

1.2.2 Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral da pesquisa, são traçados os objetivos específicos, que são eles:

- Encontrar o teor ótimo de adição de pó FGD em solos, avaliando os efeitos da incorporação de cimento e de pó FGD, alterando o teor desses aditivos para

misturas do tipo solo melhorado com cimento, maximizando o uso do coproduto e minimizando o uso do cimento;

- Avaliar os efeitos da incorporação dos estabilizantes nas características dos solos naturais;
- Avaliar os efeitos da adição de diferentes combinações de pó FGD e cimento Portland no desempenho de misturas de solos estabilizados;
- Inferir sobre os melhores teores e combinações de adição de pó FGD e cimento Portland levando em consideração os parâmetros técnicos normativos de solos para fins de pavimentação e questões de sustentabilidade.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para o desenvolvimento da pesquisa, a dissertação está dividida nos 5 capítulos descritos:

- Capítulo 1: Corresponde à introdução, sendo apresentadas as justificativas e a relevância do tema escolhido, assim como os objetivos pretendidos nesta pesquisa.
- Capítulo 2: Apresenta uma revisão bibliográfica, com referenciais teóricos e pesquisas já realizadas, como base para a compreensão de resultados encontrados e o desenvolvimento do presente estudo. Focando nos processos de geração do pó FGD, na estabilização de solos e na sua utilização na pavimentação.
- Capítulo 3: Trata do programa experimental, apresentando os materiais e métodos, detalhando as técnicas utilizadas para obtenção dos resultados.
- Capítulo 4: São apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios.
- Capítulo 5: Expõe as conclusões, por meio das análises mais relevantes da pesquisa, e as sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema desta dissertação.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho contempla uma melhor descrição do processo de geração do pó FGD e apresenta alternativas de técnicas normalmente utilizadas para melhoramento de solos para fins de pavimentação, bem como características relevantes de solos e aditivos utilizados em pavimentação. Neste capítulo ainda são apresentados resultados de melhoramento de solos por meio da utilização de coprodutos industriais.

2.1 PROCESSO DE GERAÇÃO DO PÓ FGD

Na queima de combustíveis fósseis, como produtos derivados do petróleo e carvão, são emitidos gases que podem gerar contaminações, como dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x) (CASTRO, 2016). Dentre os contaminantes, o dióxido de enxofre (SO_2) é considerado o mais perigoso, sendo o principal precursor da chuva ácida, causando a corrosão de construções e bens materiais e a contaminação de águas e solos, além de causar danos à saúde dos seres vivos (SANTOS, 2007). Segundo a *Statistical Review of World Energy* da BP (2019), o carvão mineral é o combustível fóssil mais abundante do mundo.

Um dos usos do carvão é como combustível para geração de energia elétrica e térmica. As usinas a carvão geraram 38% da eletricidade mundial em 2018 (WCA, 2019), e, de acordo com a *International Energy Agency*, para o mesmo ano a geração de energia à carvão cresceu 2%, atingindo o nível mais alto de todos os tempos, aumentando 1,1% a demanda mundial por esse combustível (IEA, 2019).

O carvão também é utilizado em indústrias siderúrgicas para a produção de aço, que fornece bens para o desenvolvimento da sociedade, ou seja, insumos para a construção civil, meios de transportes, telecomunicações, e vários outros setores. Segundo a WCA (2019), 70% do aço produzido utiliza o carvão.

O Instituto Aço Brasil explica que a produção do aço é realizada, basicamente, a partir do minério de ferro, do carvão e da cal, e pode ser dividida em quatro etapas: preparação da carga, redução, refino e laminação (IAB, 2020). É na etapa de preparação da carga, na coqueria, que o carvão, como matéria-prima, é transformado

em coque, o qual é enviado ao alto-forno para a produção do ferro-gusa e utilizado como principal agente redutor e combustível (CONAMA, 2011).

Além do produto final, também é formado o denominado gás de coqueria, constituído de material particulado e gases, como SO_x (óxidos de enxofre) e NO_x (óxidos de nitrogênio), que após recolhido e tratado, pode ser aproveitado como combustível na própria coqueria ou em processos subsequentes, devido ao seu poder calorífico. Todavia, algumas dessas substâncias apresentam risco, são poluentes e nocivas, e, por isso, necessitam de tratamento especial (COSTA, 2002). O CONAMA (2011) determina o limite máximo de emissão do SO_2 na coqueificação em indústrias siderúrgicas de 800 mg/Nm^3 , em condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

Para freiar a emissão de SO_2 há técnicas que podem ser utilizadas. O ideal é o uso de combustíveis de alta qualidade, com baixo teor de enxofre, de no máximo 0,5%, segundo Barrenetexa *et al.* (2003). Mas também pode ser realizada a remoção das impurezas do carvão antes da combustão, por meio de procedimentos físicos e mecânicos, ou a dessulfurização dos gases da combustão (SANTOS, 2007).

Como no Brasil o carvão, em geral, é mais rico em enxofre, de acordo com Junior *et al.* (2006), chegando a um teor de 7,8% na cidade de Sapopema-PR, o mais viável é atuar sobre os gases da emissão, a fim de eliminar os dióxidos de enxofre produzidos na combustão (SANTOS, 2007). A técnica mais utilizada no controle da emissão do dióxido de enxofre é a dessulfurização dos gases da combustão (FGD). Esse processo surgiu nos Estados Unidos e Japão no início da década de 70, e nos anos 80 já estava sendo empregado na Europa e se expandido pelo mundo. A tecnologia de FGD tem se destacado por sua alta eficiência, bom custo-benefício e possibilidade de aproveitamento de subprodutos gerados (CÓRDOBA, 2015).

Esse processo ocorre, de modo geral, com a condução dos gases da combustão a uma unidade (absorvedor, lavador ou purificador), em que há a interação com um meio absorvente, geralmente o Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio), e a partir da reação com o dióxido de enxofre (SO_2) é gerado um material com sulfito de cálcio (CaSO_3) e/ou sulfato de cálcio (CaSO_4), dependendo do tipo de processo, e é denominado pó FGD (PEREIRA, 2019). Juntamente com o dióxido de enxofre, outros compostos

podem ser removidos durante o processo, como HCl (ácido clorídrico), HF (ácido fluorídrico), material particulado fino e algumas toxinas do ar, que também estarão na composição dos coprodutos gerados (CAILLAHUA, 2013).

Segundo Walia e Dick (2018), é produzido mais de 120 milhões de toneladas de pó FGD por ano. No Brasil não há dados exatos sobre a geração desse coproduto, entretanto, Teixeira (2019) estima a produção de 1,2 bilhão de toneladas por ano, se todas as instalações de queima de carvão utilizarem o processo FGD no controle da emissão do dióxido de enxofre.

Parte do coproduto pó FGD também é gerado na fabricação do coque na indústria do aço, a qual cresce todo ano com o aumento do mercado desse produto. Em 2018, segundo a *World Steel Association*, a produção global do aço atingiu 1,8 bilhões de toneladas, com um aumento de 4,6% em relação ao ano de 2017, e o Brasil ocupou o 9º lugar do ranking mundial de produtores de aço, com uma produção de 34,7% milhões de toneladas (WSA, 2019). Como consequência da larga escala de produção de aço, tem-se a alta produção dos subprodutos, incluindo o pó FGD. Para cada tonelada de aço são gerados 607 kg de resíduos (IAB, 2018), que variam de acordo com a matéria-prima utilizada e os processos empregados na fabricação.

Nas coquearias, de acordo com os dados coletados pela SunCoke Energy (2020), foram gerados cerca de 170,6 milhões de toneladas de coproduto pó FGD mundialmente em 2019, com um aumento de 19,7% em relação ao ano anterior, e somente 60,6 milhões de toneladas dessa produção foi reciclada. O estado do Espírito Santo é o 3º maior produtor de aço do Brasil e, conseqüentemente, grande gerador do pó FGD, sendo responsável pela geração de 25 mil toneladas no ano de 2014 (SUNCOKE ENERGY, 2015).

Portanto, com essa crescente produção do coproduto e seu incompleto aproveitamento, é inviável o seu descarte direto em aterros sanitários, tanto no âmbito econômico quanto no ambiental. Com essas questões e as crescentes restrições impostas pelos órgãos ambientais, se torna necessário realizar estudos para avaliar a eficiência desse produto e inserí-lo no mercado, atribuindo-lhe valor.

A *American Coal Ash Association* destacou o estudo da aplicação do gesso FGD (coproduto gerado no processo FGD úmido) para reduzir o escoamento do fósforo no cultivo de terras (ACAA, 2015). Watts *et al.* (2016) estudaram a aplicação do gesso

FGD como material alternativo à madeira, na confecção de leitos em indústrias de frango. Loureiro *et al.* (2008) e Truman *et al.* (2010) estudaram a aplicação do gesso FGD como fertilizante e corretivo de solo.

A indústria da construção civil possui o maior potencial para a reutilização de resíduos oriundos de outras indústrias (SCRIVENER, 2016). Teixeira (2019) afirmou que o motivo é a composição desses coprodutos, que possuem substâncias aptas a serem utilizadas na construção civil, além das características dos próprios materiais dessa indústria, que têm a capacidade de encapsular os contaminantes presentes nos coprodutos. E, como a composição do pó FGD é semelhante a dos materiais da construção civil, já vem sendo realizadas várias pesquisas com a finalidade de encontrar uma aplicabilidade de seu uso como material da construção.

Sweet (2001) apontou o uso do coproduto pó FGD nos Estados Unidos, chamado de gesso sintético pela autora, na fabricação de placas de gesso acartonado (*dry wall*), devido às suas características não perigosas. Há também estudos da viabilidade técnica da substituição parcial ou total do gesso natural pelo gesso FGD como aditivo retardador do cimento Portland (CAILLAHUA E MOURA, 2018) e em placas à base de gesso resistentes ao fogo (LI *et al.*, 2015; LEIVA *et al.*, 2010). Teixeira (2019) estudou a produção de concretos com a incorporação do pó FGD. Mohaupt *et al.* (2018) pesquisaram sobre a utilização do pó FGD em tijolos de solo-cimento. Li *et al.* (2010) estudaram o uso desse produto no material de enchimento de betume em asfalto na construção de estradas.

De acordo com FHWA (2016), o coproduto pó FGD pode ser utilizado na estabilização de base e sub-base de pavimentos, podendo ser aplicado individualmente, caso satisfaça os requisitos necessários, ou em conjunto com um estabilizante (cimento Portland, cal, cinzas volantes), para que atenda aos critérios de resistência e durabilidade. O pó FGD já foi empregado em base estabilizada, juntamente com outros estabilizantes, em, pelo menos, quatro estados dos EUA, e apresentou um desempenho bem-sucedido (Quadro 1). A *Federal Highway Administration* ressaltou que apesar dos resultados satisfatórios encontrados com a aplicação do pó FGD, este é um material ainda incomum, por isso são necessárias pesquisas para conhecer melhor suas características e efeitos causados no solo, a fim de desenvolver bases estabilizadas de qualidade.

Quadro 1 - Resumo do uso do pó FGD em aplicações de bases e sub-bases estabilizadas nos EUA.

Estado	Número de projetos estimados	Período	Tipos de projetos	Observações
Flórida	Pelo menos 12	1977-89	Estacionamentos Estradas privadas Estradas do condado	Desempenho satisfatório. Sem preocupações de congelamento e degelo.
Pensilvânia	Pelo menos 1	1977	Estrada secundária do estado	Desempenho bem-sucedido. Ciclos severos de congelamento e descongelamento.
Texas	Pelo menos 2	1993	Estrada privada Estrada de teste	Desempenho bem-sucedido até o momento. Exposição à umidade e secagem.
Ohio	Pelo menos 1	1995	Estrada de usina Estrada de teste	Desempenho bem-sucedido. Ciclos severos de congelamento e descongelamento.

Fonte: Adaptado de FHWA (2016).

Para a utilização do resíduo do processo FGD como coproduto é importante conhecer suas características físicas, químicas e mineralógicas, que variam, além de outros fatores, com o tipo de processo de dessulfurização utilizado.

2.1.1 Processos de FGD

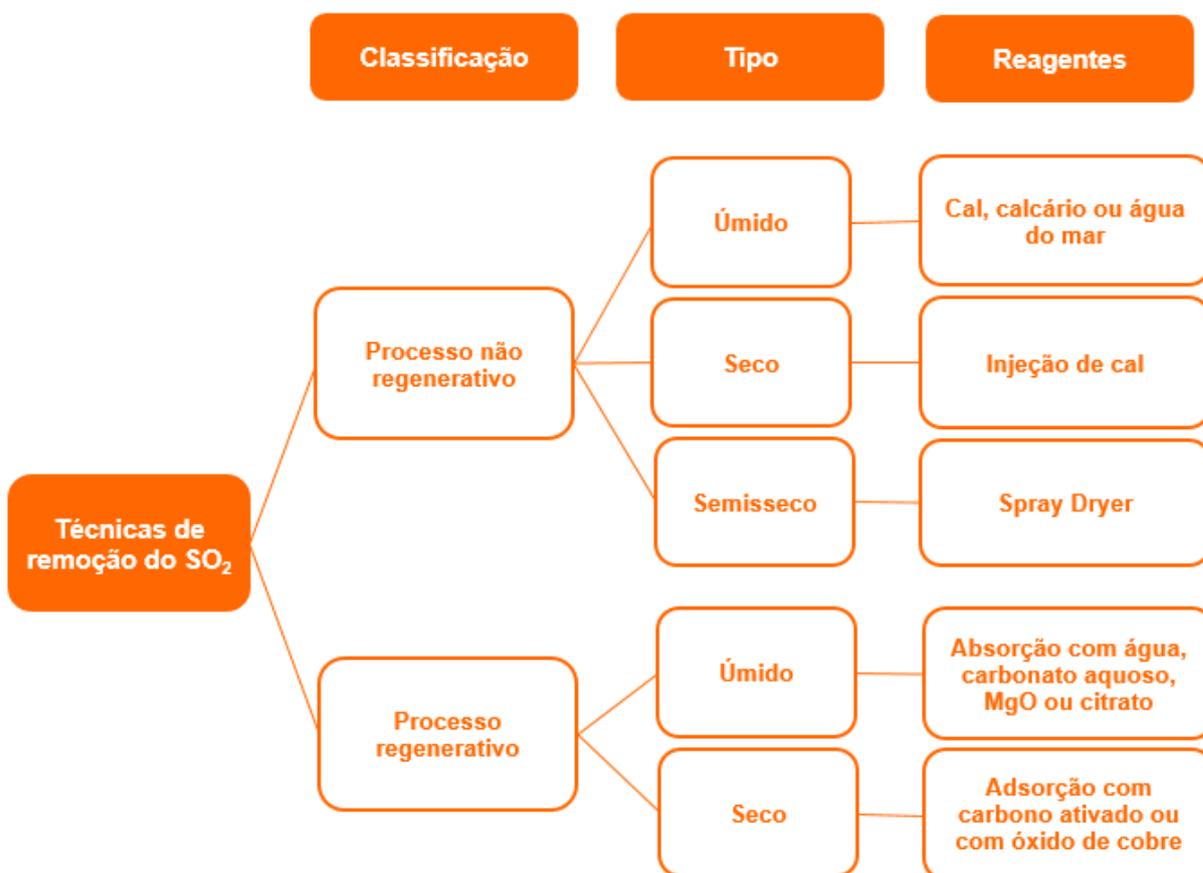
As técnicas de FGD variam de acordo com o destino do reagente absorvente ou adsorvente utilizado, podendo ser classificadas em não regeneráveis e regeneráveis (SANTOS, 2007):

- Processos não regenerativos: Geram um produto com possível valor comercial, como o gesso, ou um resíduo com elevado teor de sulfitos, sulfatos e cinzas volantes. Esses processos podem ser divididos em via úmida, via seca e via semisseca.

- Processos regenerativos: Possibilidade de recuperação do agente químico que permite a fixação e/ou conversão do SO_2 e de geração de um produto com valor comercial, em que o enxofre original pode aparecer combinado de formas distintas do SO_2 concentrado.

Na Figura 1 está apresentado um fluxograma com a classificação, tipo e reagentes utilizados em cada processo.

Figura 1 - Classificação das tecnologias FGD.

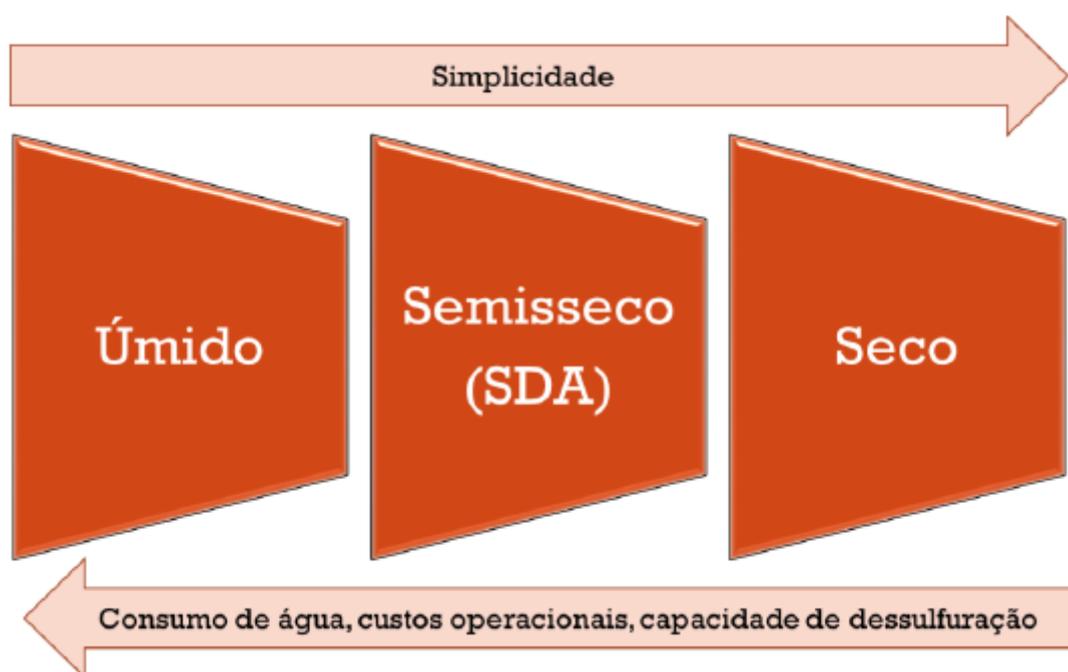


Fonte: Adaptado de Cooper e Alley (1994).

As técnicas classificadas em úmida, semisseca e seca, do processo não regenerativo, se diferenciam, principalmente, pelo método de utilização do reagente e pelo teor de água utilizada. No processo úmido, convencionalmente, utiliza-se uma lama à base de calcário com alta quantidade de água. Em contrapartida, no método semisseco uma suspensão de cal com alta concentração de sólidos é aplicada, enquanto que no processo seco é feita a injeção de pó sem umidade diretamente no equipamento (USEPA, 2003; LIMA, 2018). A Figura 2 mostra o acréscimo ou a redução das características do processo de acordo com a técnica empregada.

Lima (2018) explicou, que quanto maior o teor de água no processo maior é a capacidade de dessulfurização, pelo fato de ser na fase aquosa que ocorre a reação que retém o enxofre. Por outro lado, o alto consumo de água dessa técnica a torna mais onerosa, além da maior complexidade no tratamento dos efluentes. Sendo assim, é preciso analisar as vantagens e desvantagens de cada técnica. Para um melhor entendimento, cada uma dessas técnicas estão descritas na Figura 2.

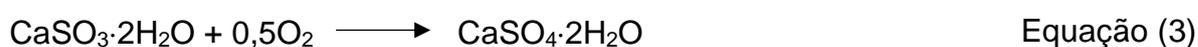
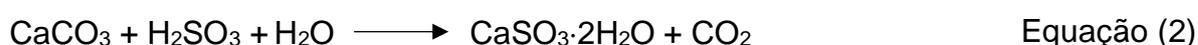
Figura 2 - Tipos de processos FGD.



Fonte: Lima (2018).

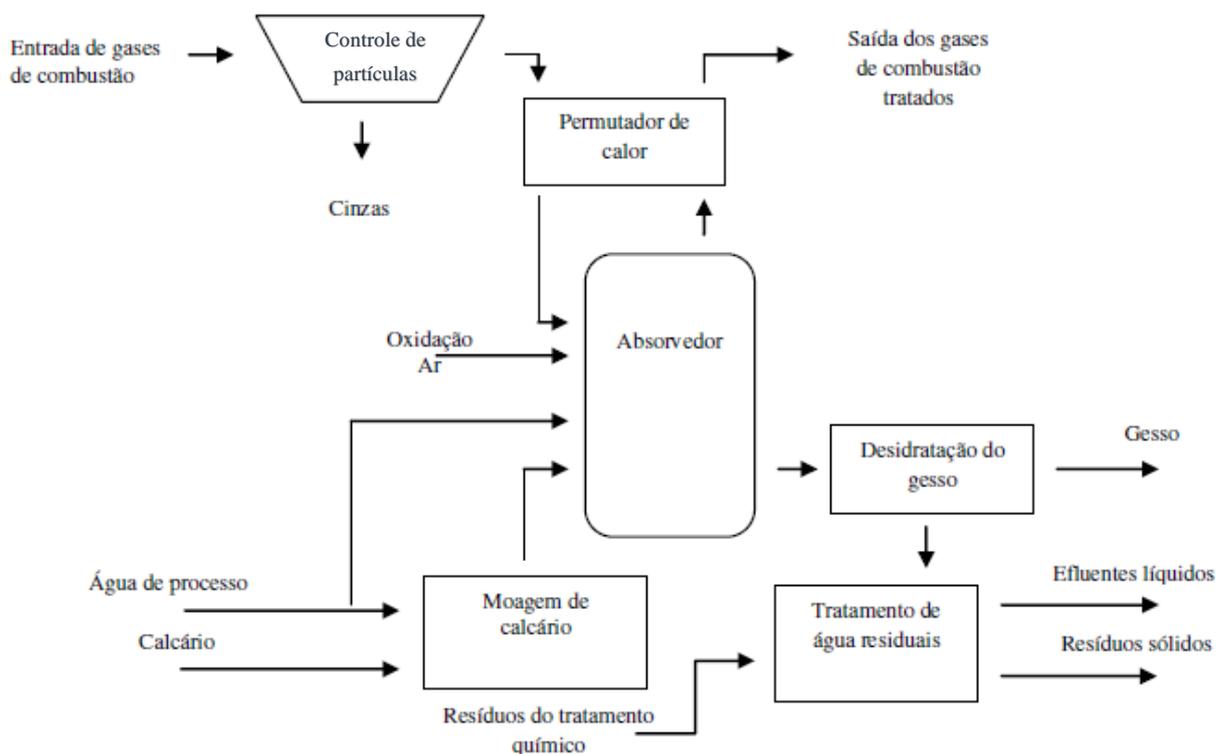
2.1.1.1 Processo FGD Úmido

Nesse processo, esquematizado na Figura 3, os gases de combustão são conduzidos ao absorvedor, em que o SO_2 é removido por meio da sua reação com uma suspensão aquosa do reagente inserido, que pode ser calcário (CaCO_3) ou cal (CaO) (ALVES, 2013). As reações globais que ocorrem no processo FGD úmido utilizando calcário estão apresentadas nas Equações 1, 2 e 3:



A partir da Equação 2 nota-se que é formado o sulfito de cálcio dihidratado ($\text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). No entanto, é comum realizar a oxidação forçada com a injeção de ar, vista na Equação 3, que gera o denominado (para esse tipo de processo) gesso FGD, sendo a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) um de seus compostos (CARPENTER, 2012).

Figura 3 - Esquema do processo FGD úmido utilizando calcário.



Fonte: Adaptado de Alves (2013).

A tecnologia de dessulfurização úmida era a mais utilizada no mundo no ano de 2000, estando presente em 87% do mercado global de dessulfurização de gases de combustão (SOUD, 2000). A dessulfurização úmida com calcário é predominante, devido à alta disponibilidade e ao preço baixo desse reagente (DEPRIESTE e GAIKWAD, 2003), à faixa de utilização, que permite sua instalação em plantas em que o carvão tem o teor de enxofre de até 3,5%, com uma alta confiabilidade, desempenho e eficiência na remoção do SO_2 , atingindo mais de 90%, além de gerar um coproduto (gesso FGD), que pode ser empregado na construção civil (CREVECOEUR e SMITH, 2009; CAILLAHUA, 2013).

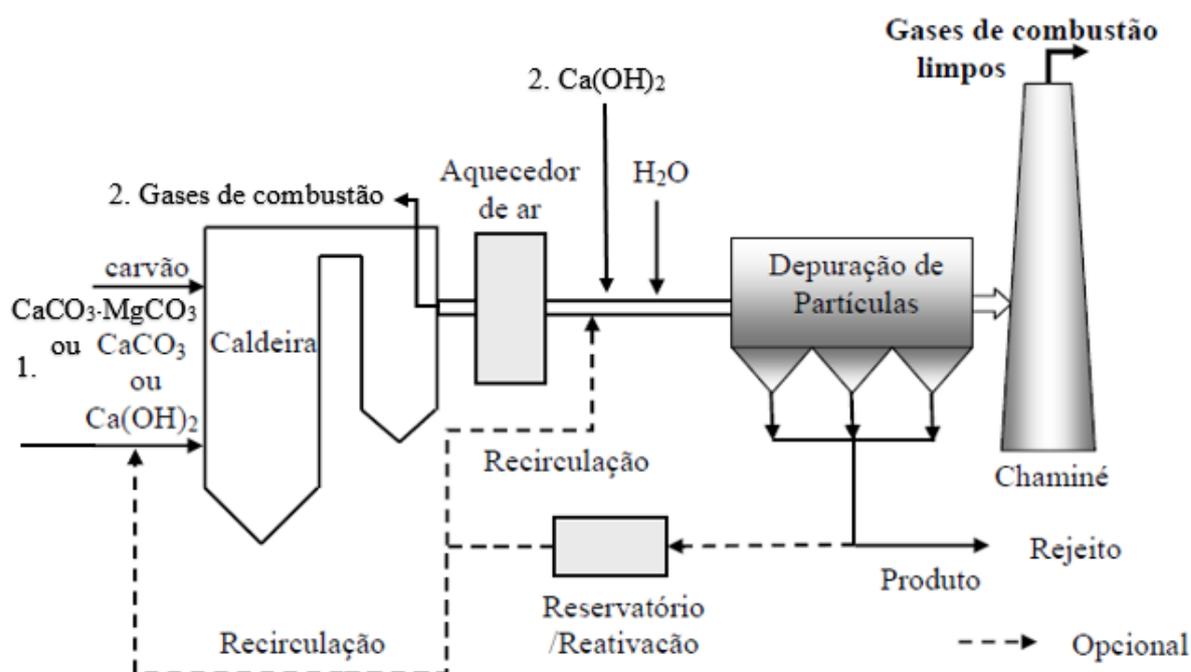
Por outro lado, essa técnica possui características que limitam a sua aplicação, como o alto custo de instalação e operação, elevada quantidade de efluentes líquidos gerados, que requerem tratamento antes de serem lançados ao meio ambiente

(FRANÇA, 2019), consumo de água muito superior às outras técnicas (CREVECOEUR e SMITH, 2009).

2.1.1.2 Processo FGD Seco

Esse tipo de processo de dessulfurização ocorre com a injeção de absorvente seco alcalino, podendo ser feita diretamente na caldeira, em duto posterior ou em sistemas híbridos, dependendo do reagente, e é apresentado na Figura 4. Se o processo começar logo na caldeira (1), o reagente, que pode ser calcário (CaCO_3), cal (Ca(OH)_2) ou dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), sofre calcinação em uma temperatura de 1100°C a 1250°C , e ali ocorre a remoção do SO_2 . Se ocorrer nos dutos (2), é feita a injeção de cal sobre os gases de combustão logo após a passagem pelo aquecedor de ar, a uma temperatura de 10°C a 15°C (SANTOS, 2007; BRINKMANN *et al.*, 2016). No sistema híbrido, a injeção do reagente é feita simultaneamente na caldeira e nos dutos, podendo alcançar uma eficiência de remoção acima de 90% (SANTANA, 1996). A injeção de água, junto com o reagente, ajuda no processo de remoção do enxofre (SRIVASTAVA, 2001).

Figura 4 - Esquema do processo FGD seco.



Fonte: Adaptado de Villanueva (2003).

Segundo França (2019), a injeção diretamente na caldeira é a mais utilizada. Esse sistema é altamente recomendado quando se trabalha com carvão de alta qualidade,

baixo teor de enxofre e/ou quando há baixa disponibilidade de espaço, usualmente usinas de pequeno porte (CASTELLAN *et al.*, 2003).

O processo gera produtos sólidos e cinzas volantes, que são separadas da corrente gasosa pelo depurador de partículas. Devido à sua alta alcalinidade, o resíduo/subproduto gerado pode ser empregado na fabricação de cimento ou na estabilização/solidificação de outros resíduos (CASTELLAN *et al.*, 2003). As reações típicas para um sistema seco de injeção direta de calcário na caldeira estão apresentadas nas Equações 4, 5 e 6:



Uma desvantagem dessa técnica é a baixa eficiência na remoção do enxofre, menor que 75%. Apesar disso, a tecnologia de FGD seco se diferencia dos outros processos por apresentar um menor consumo energético, a necessidade de menor espaço físico para instalação, um processo mais simples e de menor custo operacional, já que consome baixa quantidade de água e não há formação de resíduos líquidos (JIANG *et al.*, 2011; FRANÇA, 2019).

2.1.1.3 Processo FGD Semisseco

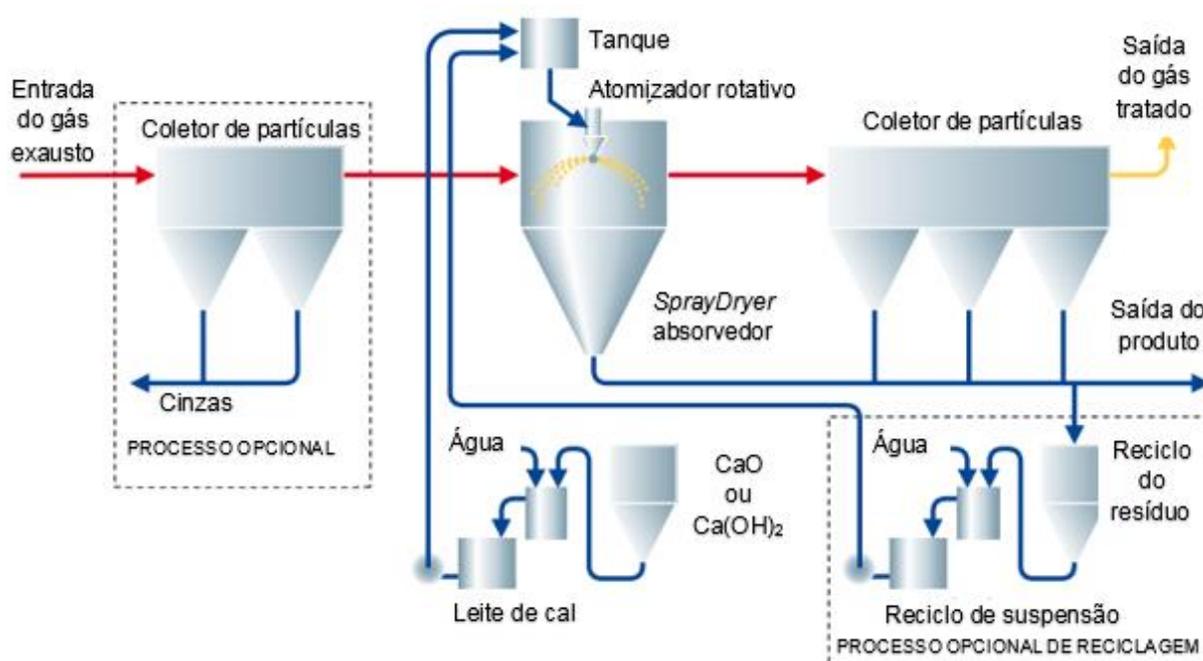
O processo FGD semisseco, também chamado de *Spray Dryer Absorber* (SDA), possui características que se situam entre os processos úmido e seco. Esse sistema ocupa o segundo lugar de mais popular, correspondendo a 11% das instalações mundiais, e é o mais empregado em instalações de pequeno a médio porte, podendo trabalhar com carvão de teor de enxofre abaixo de 1,5% e ter uma eficiência de 90% a 95% de remoção do SO₂ (ZHENG *et al.*, 2002; JHONSON, 2010).

Nessa técnica (Figura 5) é preparado o leite de cal, que consiste na agitação de óxido de cálcio (CaO) ou hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) com água em excesso, que é injetado na torre absorvedora (*Spray Dryer*) por meio do atomizador rotativo. Pode ocorrer uma etapa opcional, em que esse produto é misturado com as cinzas do processo, a fim de reduzir o consumo específico do absorvente (CaO). No absorvedor,

o leite de cal entra em contato com os gases de combustão e é atomizado por meio dos aspersores, formando uma nuvem de gotículas do reagente que irá interagir com o SO_2 . No contato entre as gotas e os gases ocorre ao mesmo tempo transferência de calor e de massa, além de reação (HILL e ZANK, 2000).

O próprio calor dos gases de combustão é responsável pela evaporação da água, e com isso há a formação de um pó seco constituído de hidróxido de cálcio não convertido e produtos da reação com o dióxido de enxofre, sulfito de cálcio (CaSO_3) e sulfato de cálcio (CaSO_4). Esse pó é arrastado pelo fluxo de gás e coletado por filtros de manga ou precipitadores eletrostáticos (SANTANA, 2018; CASTRO *et al.*, 2017). Como processo opcional, o resíduo pode ser reciclado e injetado novamente no absorvedor para aumentar a utilização do reagente (SANTOS, 2015).

Figura 5 - Esquema do processo FGD semisseco.



Fonte: Adaptado de GEA (2020).

Os sistemas das reações estão apresentadas nas Equações 7, 8 e 9:



Com a evaporação da água era para serem formados os compostos CaSO_3 e CaSO_4 , entretanto o processo de secagem não é totalmente eficiente, além de ocorrer a oxidação do CaSO_3 em CaSO_4 na presença do oxigênio, e por isso compostos hidratados podem ser gerados, como $\text{CaSO}_3 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (sulfito de cálcio hemihidratado ou *hannebachite*), $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (sulfato de cálcio hemihidratado ou *bassanita*) e $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (sulfato de cálcio dihidratado ou *gipsita*) (WRIGHT e KHATIB, 2016).

O método semisseco possui vantagens em relação ao processo úmido tradicional, que são: o coproduto gerado é sólido e seco, facilitando seu manuseio, além de não necessitar da etapa de tratamento de água, por não gerar efluentes líquidos; menos problemas de corrosão e incrustação, o que gera economia nos materiais utilizados; espaço reduzido necessário para a planta; menor consumo energético e baixos custos de implantação, com uma redução de 30% a 50% em relação ao sistema úmido. Todavia, o processo semisseco possui uma limitação quanto à eficiência da remoção do SO_2 , sendo mais eficaz no tratamento de gases da queima de carvão com menores teores de enxofre (CÓRDOBA, 2015; SCALA *et al.*, 2004).

2.1.2 Características Físicas, Químicas e Mineralógicas do pó FGD

Segundo Henkels e Gaynor (2010), as características do coproduto pó FGD dependem do tipo de processo de dessulfurização, do carvão utilizado e do tipo de indústria. Nesse item serão abordadas essas características, com ênfase no processo semisseco, que será o tipo de coproduto estudado nesta pesquisa.

No estudo feito por Mohaupt *et al.* (2018) verificou-se, por meio da análise mineralógica, que o pó FGD semisseco possui cristais semelhantes aos existentes em gessos e cimentos, sugerindo seu potencial como matéria-prima alternativa de materiais da construção civil. Esse coproduto também apresentou granulometria semelhante ao da argila, podendo permitir maior empacotamento, melhor coesão, o que evita segregações. O autor concluiu, a partir da caracterização do coproduto, que ele pode servir para material de enchimento para fabricação de tijolos solo-cimento. E, também, possui potencial para utilização em artefatos cerâmicos queimados, devido à baixa perda ao fogo apresentada pelo coproduto.

Tsimas e Tsimas (2005) citaram que alguns dos coprodutos do processo FGD provenientes do processo semisseco possuem além de propriedades pozolânicas, propriedades de aglomerante hidráulico.

A granulometria é uma característica que varia expressivamente com o tipo de processo de dessulfurização (WRIGHT e KHATIB, 2016) e na Tabela 1 estão apresentados valores encontrados na literatura para o coproduto pó FGD gerado nos processos semisseco e úmido. De acordo com FHWA (2016) e Grosche (2019), as partículas do processo úmido são maiores que as do semisseco. Walker *et al.* (2002) e EPRI (2007) também apresentam uma granulometria da classe dos siltes para o pó FGD semisseco, e este último ainda diz que esse material possui uma elevada área superficial, devido ao tamanho das partículas, garantindo uma maior ativação química.

Tabela 1 - Granulometria do pó FGD.

	Granulometria	
	Pó FGD semisseco	Pó FGD úmido
FHWA (2016)	90% - dimensão de silte 8,5% - dimensão de argila 1,5% - dimensão de areia	81% - dimensão de silte 16,5% - dimensão de areia 2,5% - dimensão de argila
Grosche (2019)	90% < 90 μm	90% < 193,812 μm
Walker <i>et al.</i> (2002)	2 - 75 μm	1 - 50 μm
EPRI (2007)	2 - 75 μm	-

Fonte: Elaborado pela autora.

Segundo EPRI (2007), o processo FGD semisseco gera um coproduto com massa específica variando de 2,09 g/cm³ a 2,84 g/cm³, enquanto Wright e Katib (2016) e FHWA (2016) disseram que esse parâmetro se situa entre 2,25 g/cm³ e 2,6 g/cm³, não variando com os tipos de processos e produtos utilizados.

Kost *et al.* (2005) explicaram que o pH do coproduto FGD varia, não somente com o tipo de processo de dessulfurização, mas principalmente pelo reagente utilizado. Os mesmos autores sugeriram que a presença de óxidos e hidróxidos de cálcio e magnésio são responsáveis pelo valor alto de pH para a maioria do coproduto gerado. O processo semisseco gera um pó FGD em que o pH varia de 9 a 13, segundo Heebink *et al.* (2007), convergindo com os resultados encontrados por Mohaupt *et al.* (2018), 12,1, Teixeira (2019), 13, e Grosche (2019), 9,7 e 12,1. Enquanto no processo úmido, Pease *et al.* (2017) citaram que o pH pode variar de 5 a 8. Todavia, quando os

produtos entram em contato com a água e o dióxido de carbono, ocorre a carbonatação, que os converte em carbonatos, aumentando, assim, do valor do pH da solução aquosa.

Na Tabela 2 está apresentada a composição química do pó FGD para diferentes processos de dessulfurização no Brasil e em outros países. Como pode ser visto, os compostos mais presentes no coproduto, em geral, são o óxido de cálcio (CaO) e o trióxido de enxofre (SO₃), correspondendo a um teor de 40% a 90% do total dos compostos, aproximadamente, dependendo do tipo de processo e das características individuais. No processo semisseco de Santana (2018) e Liu *et al.* (2009), o composto óxido de ferro (Fe₂O₃) se sobressai ao SO₃, e no processo úmido de Wu e Naik (2002), os compostos óxido de silício (SiO₃) e óxido de alumínio (Al₂O₃) também se destacam.

Tabela 2 - Composição química do pó FGD.

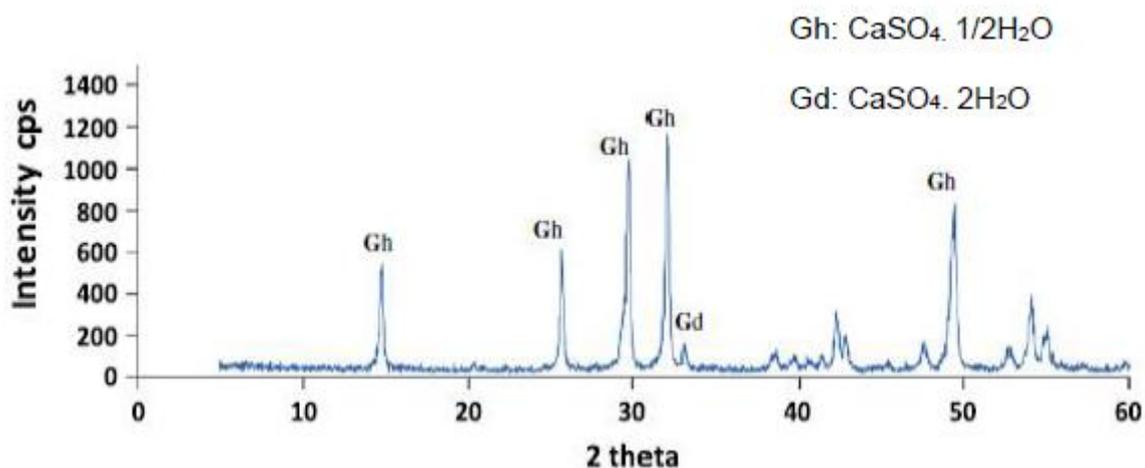
	Mohaupt <i>et al.</i> (2018)	Teixeira (2019)	Santana (2018)	Zaremba <i>et al.</i> (2018)	Liu <i>et al.</i> (2009)	Caillahua e Moura (2018)	Wu e Naik (2002)
	Processo Semisseco	Processo Semisseco	Processo Semisseco	Processo Semisseco	Processo Semisseco	Processo Úmido	Processo Seco
	Brasil	Brasil	Brasil	Polônia	China	Brasil	EUA
CaO	39,48	37,8	35,4	44,32	32,89	45,87	26,4
SO ₃	45,4	28,9	7,9	40,15	9,93	48,0	19,7
MgO	0,3	0,1	-	0,2	2,49	0,1	3,6
P ₂ O ₅	0,12	-	-	-	-	0,2	-
SiO ₂	0,23	0,2	24	0,33	3,96	1,2	27,5
Fe ₂ O ₃	0,1	0,2	22,9	0,28	13,6	0,3	3
Al ₂ O ₃	0,07	< 0,1	5,4	0,42	2,38	0,1	15,1
K ₂ O	0,06	0,1	2,1	-	-	0,1	-
Na ₂ O	< 0,05	-	-	-	-	-	1,1
Cl	7,9	-	-	5,11	-	-	-
TiO ₂	< 0,05	-	1,9	-	-	-	-
Perda por Calcinação (1000°C)	6,07	26,57	-	-	22,5	3,80	2,2

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 6, na Figura 7 e na Figura 8 estão apresentados difratogramas de raios-X (DRX) de diferentes processos FGD. Caillahua e Moura (2013) afirmaram que o coproduto pó FGD originário do processo úmido é um material cristalino e de elevada pureza de sulfato de cálcio dihidratado, na maioria das vezes, devido ao seu processo de formação. Essa afirmação é coerente com resultados da literatura, como o coproduto estudado por Sadique *et al.* (2012), em que o mineral predominante é o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

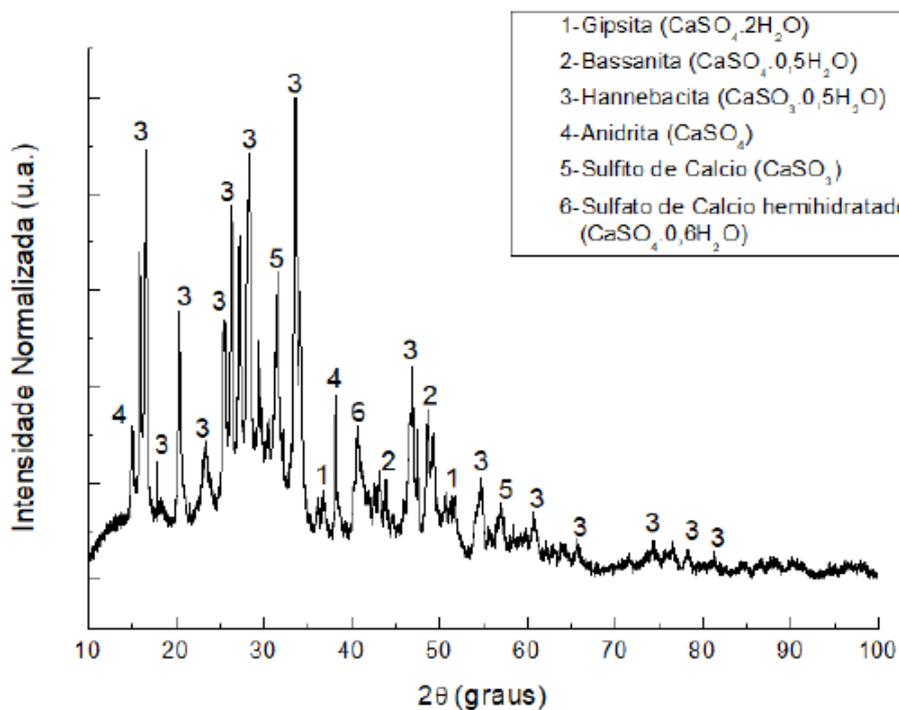
Coerente ao que Wright e Khatib (2016) citaram, os minerais predominantes do coproduto pó FGD do processo semisseco de Mohaupt *et al.* (2018) são a *hennebachite* (sulfito de cálcio hemihidratado), em primeiro lugar, a bassanita (sulfato de cálcio hemihidratado) e a gipsita (sulfato de cálcio dihidratado), seguido da anidrita (sulfato de cálcio) e sulfito de cálcio. Na pesquisa de Zaremba *et al.* (2008), o pó FGD semisseco é constituído majoritariamente pela *hennebachite* ($\text{CaSO}_3 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) e a anidrita (CaSO_4), sendo encontrado também outros minerais, como a sinjarita ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), a portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e a calcita (CaCO_3). Já no estudo do pó FGD semisseco de Prado *et al.* (2005), o mineral predominante foi o $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (bassanita), com picos menos intensos de anidrita (CaSO_4) e gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sem a presença de $\text{CaSO}_3 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, sugerindo que ocorreu a oxidação desse mineral. Esses resultados conferem com os autores, os quais comentaram que, apesar das variações na composição desse coproduto, ele sempre será formado majoritariamente pelo $\text{CaSO}_3 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (WU *et al.*, 2013; SU *et al.*, 2013).

Figura 6 - Difratograma de raios-X de um pó FGD úmido.



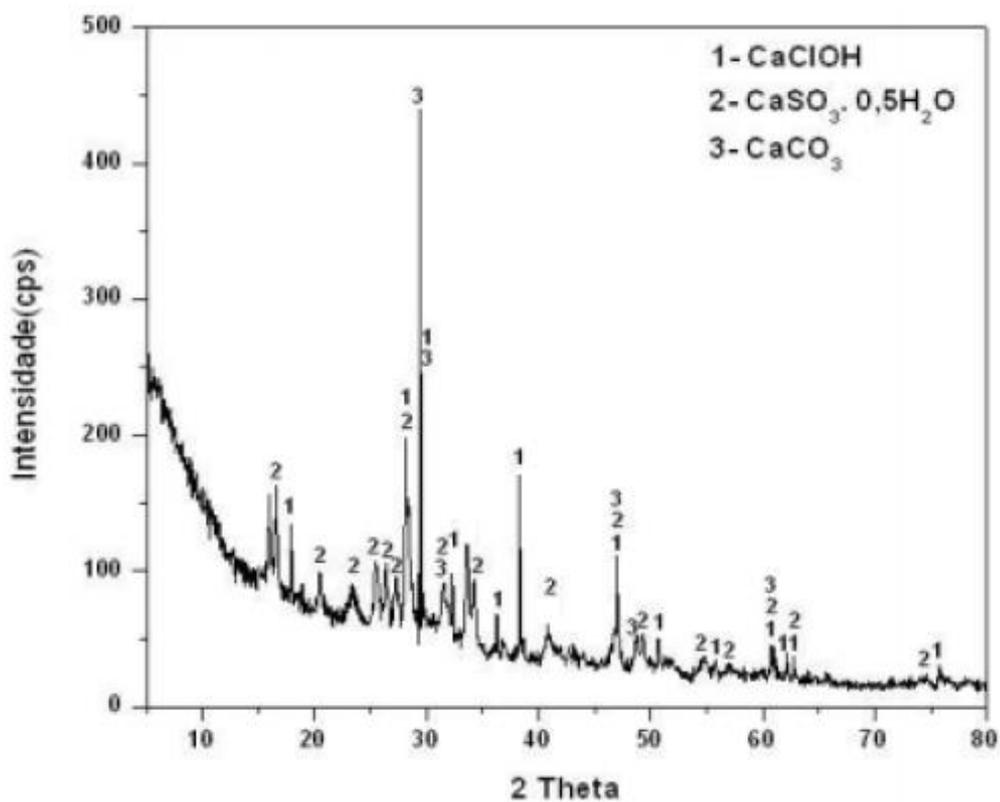
Fonte: Sadique *et al.* (2012).

Figura 7- Difratoograma de raios-X de um pó FGD semisseco.



Fonte: Mohaupt *et al.* (2018).

Figura 8 - Difratoograma de raios-X de um pó FGD semisseco.



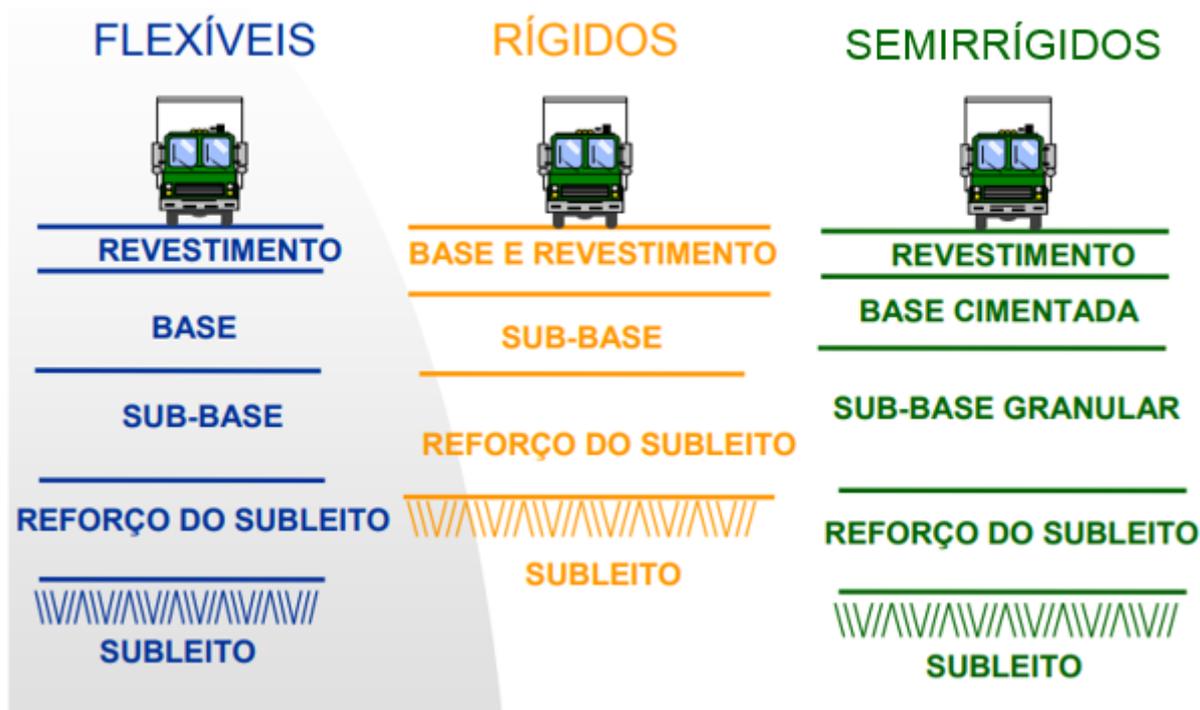
Fonte: Teixeira (2019).

2.2 PAVIMENTAÇÃO

O Manual de Pavimentação (DNIT, 2006) define pavimento como uma superestrutura composta por um sistema de camadas, que são assentadas sobre uma infraestrutura, denominada de subleito. Em outras palavras, o pavimento é uma estrutura de camadas consecutivas, constituídas de materiais de diferentes resistências e deformabilidades. Os pavimentos podem ser classificados em flexível, semirrígido e rígido, e estão ilustrados na Figura 9:

- Flexível: Todas as camadas sofrem deformação elástica expressiva, devido ao carregamento aplicado e, com isso, a carga é distribuída em parcelas, aproximadamente, equivalentes entre as camadas;
- Semirrígido: Consiste em uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias, como uma camada de solo-cimento ou solo-cal, revestida por uma camada asfáltica;
- Rígido: O revestimento tem uma rigidez elevada em relação às camadas inferiores, e, por isso, absorve praticamente todos os esforços provocados pelo carregamento aplicado.

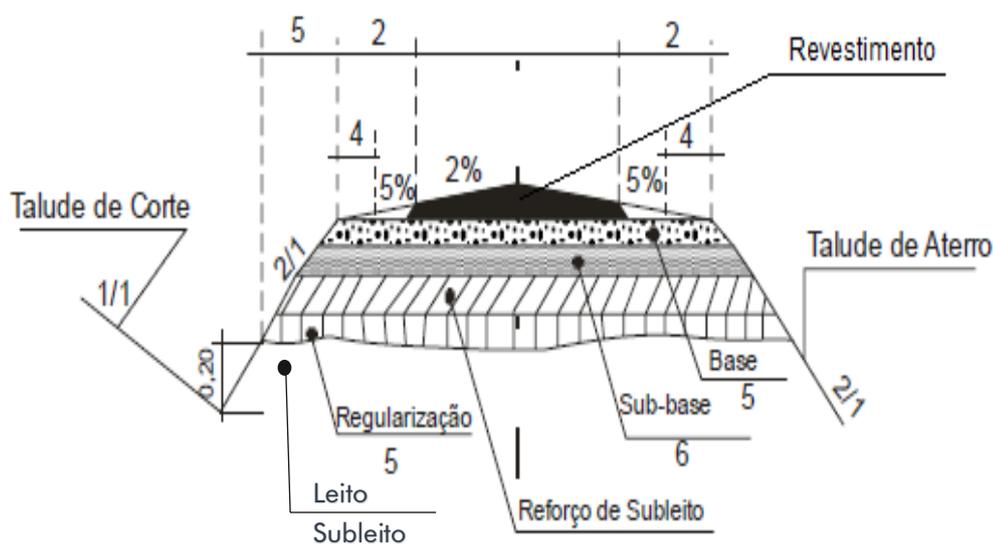
Figura 9 - Tipos de estrutura de pavimento.



O DNIT (2006) descreve cada camada constituinte do pavimento, que estão esquematizadas na Figura 9 e na Figura 10:

- Subleito: Terreno de fundação do pavimento;
- Leito: Superfície obtida pela terraplanagem;
- Regularização: Pode ser considerada uma camada ou não, que acima do leito o regulariza para receber as próximas camadas;
- Reforço do subleito: Camada de espessura constante, com características geotécnicas inferiores à da camada superior, mas melhores que a do subleito;
- Sub-base: Camada complementar à base, quando esta não puder ser construída diretamente sobre a camada de regularização;
- Base: Abaixo do revestimento, essa camada tem a função de resistir e distribuir os esforços causados pelo tráfego;
- Revestimento: Esta é a camada que recebe diretamente o tráfego de veículos e é constituída de material nobre.

Figura 10 - Esquema da seção transversal do pavimento.



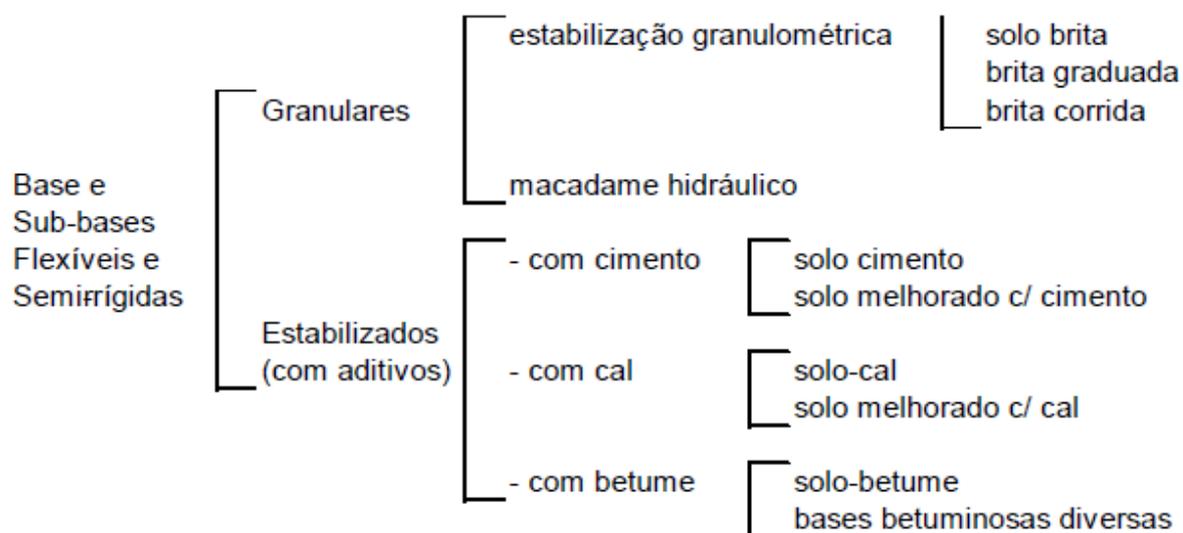
Fonte: Adaptado de DNIT (2006).

De uma maneira geral, a camada de revestimento tem a função de receber diretamente o tráfego e transmitir essas solicitações às camadas de fundação. Por sua vez, as camadas de base e sub-base devem apresentar condições adequadas para a execução do pavimento, especialmente em termos de uniformidade, suportar as solicitações transmitidas pela camada superficial, controlar a expansibilidade do

solo e contribuir para a drenagem das águas na superfície e no interior do pavimento (CRUZ, 2004).

As bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas são classificadas em granulares e estabilizadas, que estão descritas na Figura 11 (DNIT, 2006).

Figura 11 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas.



Fonte: DNIT (2006).

A adição de estabilizantes no solo visa aumentar suas características mecânicas, conferindo mais resistência e durabilidade, tornando-o mais eficiente quanto ao uso em camadas de base e sub-base. Tendo em vista a necessidade de pavimentos de alta qualidade, em conjunto com a busca pela sustentabilidade e economia, procura-se materiais alternativos capazes de satisfazer esses requisitos e é crescente o estudo sobre eles e sua utilização na pavimentação.

2.3 PROPRIEDADES DOS SOLOS

2.3.1 Solos Lateríticos

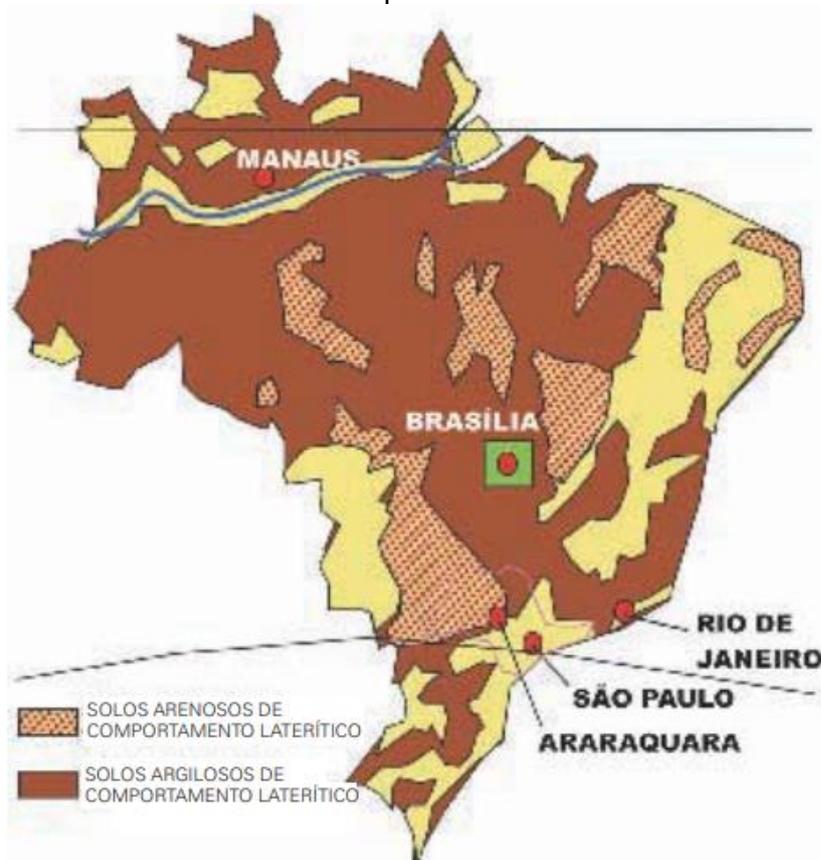
Os solos tropicais são aqueles formados numa faixa tropical ou em região de clima tropical úmido, e devem possuir propriedades de processos geológicos e/ou pedológicos típicos dessa região e peculiaridades que os diferenciem dos solos típicos de regiões temperadas (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

A partir das práticas da engenharia verificou-se que, devido às peculiaridades dos solos tropicais, as técnicas convencionais de classificação aplicadas a esse tipo de solo são ineficientes, pois os classificam como inadequados para aplicação na

pavimentação, não inferindo corretamente as propriedades mecânicas dos solos. Diante disso, foi desenvolvida uma nova metodologia de classificação, com o objetivo de aproveitar mais apropriadamente esse tipo de solo com fins de utilização em pavimentos de baixo custo (COZZOLINO e NOGAMI, 1993; BERNUCCI *et al.*, 2006). Essa metodologia foi proposta por Nogami e Villibor (1981), especialmente para uso em obras viárias; é denominada de MCT, devido ao fato de basear-se na obtenção de propriedades em corpos de prova de dimensões miniatura (diâmetro inferior a 50 mm), compactados apropriadamente e destinados especialmente a solos tropicais; e classifica-os em duas grandes classes mais frequentes, que são os solos de comportamento lateríticos e os de comportamento não lateríticos (COZZOLINO e NOGAMI, 1993).

Em destaque nesta dissertação, os solos lateríticos ocupam a maior parte do território do Brasil (MELO, 2011), como visto na Figura 12. Apresentam elevada resistência, baixa expansibilidade, apesar da plasticidade, e baixa deformabilidade (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Figura 12 - Ocorrência de solo de comportamento laterítico no território brasileiro.



Fonte: Villibor *et al.* (2009).

Os solos lateríticos são formados a partir de um intenso processo de intemperismo em solos residuais de zonas tropicais e úmidas, e ocupam as camadas mais superficiais. Possuem uma macroestrutura aparentemente homogênea e isotrópica, e são caracterizados pela cor, em que predominam os tons de vermelho e amarelo. Mineralogicamente, a fração areia e pedregulho apresenta alta resistência mecânica e química, e o mineral predominante é o quartzo; na fração argila, o mineral mais frequente é a caulinita e os compostos por hidróxidos e óxidos de ferro (hematita, goetita) e alumínio (gibbsita) (NOGAMI e VILLIBOR, 1983; COZZOLINO e NOGAMI, 1993; OLIVEIRA *et al.*, 1992). A combinação desses componentes forma agregações estáveis na presença de água, pois os hidróxidos e óxidos hidratados encobrem os argilominerais, reduzindo a capacidade de absorção de água pelos argilominerais e atuando como agentes cimentantes naturais entre as partículas (BERNUCCI, 1995).

Esse mesmo autor citou que os solos lateríticos não apresentam uma distribuição granulométrica típica, porém há uma tendência de grande parte das partículas serem menores que 2 mm. Cazzolino e Nogami (1993) explicaram que os grãos mais finos desse solo estão agregados, formando uma massa de aspecto esponjoso, em que os elementos que a constituem parecem “pipocas” (Figura 13). Em escala macroscópica nota-se a presença de torrões, que podem ser muito resistentes à ação da água, e alta quantidade de vazios preenchidos de ar, que justifica a baixa massa específica aparente e a alta permeabilidade.

Takeda (2006) fez um estudo com diversas amostras de solos tropicais e por meio do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) identificou padrões que podem identificar os solos de acordo com sua gênese laterítica ou não laterítica. Nos solos lateríticos espera-se encontrar um material com aspecto cimentado (Figura 13), devido ao acobertamento da caulinita pelos hidróxidos e óxidos de ferro e alumínio, corroborando com a explicação de Bernucci (1995).

Ainda no estudo do mesmo autor foram identificados os argilominerais presentes na fração fina dos solos, por meio do ensaio de difratometria de raios-X (DRX). Nos solos lateríticos identificou-se a presença de argilominerais menos ativos, como os do grupo da caulinita, que ocorreu exclusivamente ou em conjunto com a gibbsita, sendo este de ocorrência restrita aos solos lateríticos, corroborando com as constatações feitas por Nogami e Villibor (1995).

Figura 13 - MEV de padrão indicativo de solo laterítico.



Amostra 26 – LA' - Intermediária

Fonte: Takeda (2006).

É importante conhecer as características mecânicas no estado natural e no estado compactado do solo. Na natureza, os solos lateríticos geralmente são não saturados, com alto índice de vazios e, conseqüentemente, com baixa capacidade de suporte. Todavia, nas obras de pavimentação o que interessa, essencialmente, são as características após a compactação, e quando devidamente compactado o solo laterítico adquire alta capacidade de suporte e baixa perda dessa capacidade quando imerso em água (FERREIRA *et al.*, 1999; SANTOS, 2006).

Os solos lateríticos são subdivididos, de acordo com Nogami e Villibor (1995), em: LA - Solos Lateríticos Arenosos; LA' - Solos Lateríticos Areno-argilosos; e LG' - Solos Lateríticos Argilosos. Os solos lateríticos areno-argilosos (LA') são conhecidos, pedologicamente no Brasil, como Latossolos arenosos e solos podzólicos ou podzolizados arenosos (textura média). São solos de tons vermelho e amarelo, pouco sujeitos à erosão e que trincam quando expostos às intempéries. As características mecânicas estão apresentadas no Quadro 2. Nota-se que após a compactação esse tipo de solo é atrativo para utilização em bases e sub-bases de pavimentos, e, usualmente, apresenta excelente comportamento em estruturas de pavimento econômico. A plasticidade desse solo é uma característica desejada, pelo fato de representar um solo coesivo, o que é essencial para o seu bom desempenho (NOGAMI e VILLIBOR, 1995; JHONSTON, 2010; BERNUCCI, 1999).

Quadro 2 - Características mecânicas dos solos lateríticos areno-argilosos (LA').

Estado Natural	Depois de Compactado
Baixa massa específica aparente seca	Elevada capacidade de suporte (ISC)
Baixa capacidade de suporte	Elevado módulo de resiliência
Risco de colapso quando imerso em água	Baixa permeabilidade
	Baixa contração por perda de umidade
	Razoável coesão
	Baixa expansão

Fonte: Elaborado pela autora.

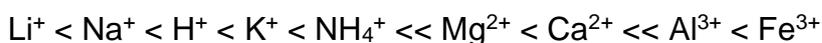
2.3.2 Influência da Fração Argila nas Propriedades dos Solos

A fração argila compõe o plasma do solo e consiste na fração ativa que participa de praticamente todas as reações físico-químicas. Os minerais da fração argila possuem características, como: estado coloidal com a presença de cargas elétricas; adsorção de íons; retenção de água; plasticidade e pegajosidade; capacidade de floculação; variação de volume, conforme a umidade; e influência na cor e agregação dos solos (PORTELINHA, 2008).

Essa fração é constituída por partículas menores que $2\mu\text{m}$, compostas, majoritariamente, por silicatos de alumínio hidratados (argilominerais) associados a outros constituintes, como óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, produtos amorfos (de ferro, alumínio e sílica), carbonatos de cálcio, quartzo microcristalino, entre outros. O comportamento físico-químico apresentado pelas argilas é devido à extensa superfície específica e às cargas elétricas negativas na superfície dos seus constituintes (principalmente os argilominerais), sendo essencial no mecanismo de estabilização de solos (NÓBREGA, 1995).

Portelinha (2008) explicou que as cargas negativas predominantes na superfície da argila atraem íons positivos (cátions), que se mantêm na face das partículas por ligações fracas, podendo ser facilmente substituídos por outros. Nesse processo, chamado de troca catiônica, os íons, denominados de permutáveis, podem ser classificados quanto à facilidade de atração, que depende da valência dos cátions em solução. Ou seja, íons de maior valência têm preferência aos íons de valência inferior. Little (1995) apresentou uma ordem de adsorção preferencial dos cátions comuns

associados ao solo, dada pela série a seguir, em que o cátion da direita substitui o cátion da esquerda:



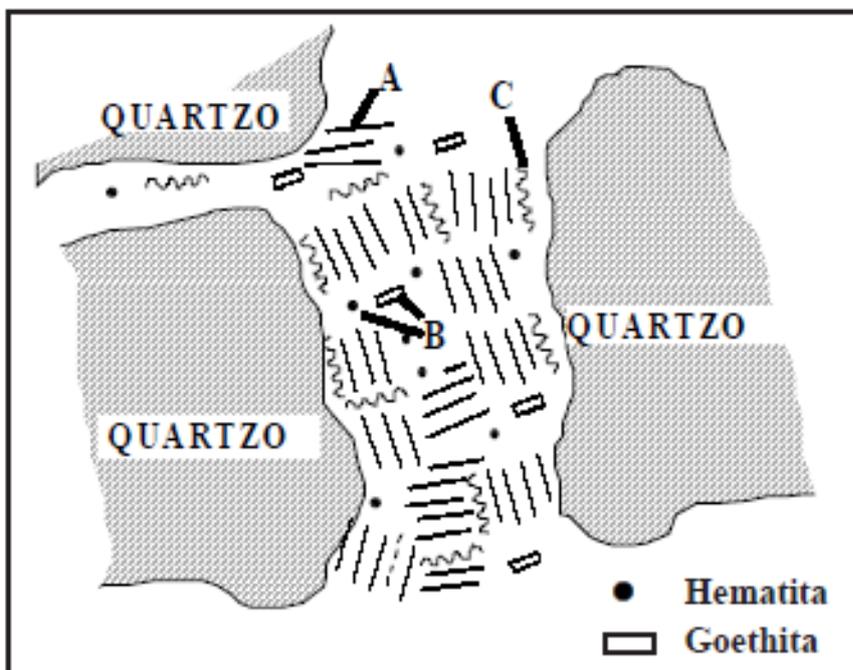
Além da estrutura atômica dos minerais constituintes da fração argila, as propriedades macroscópicas do solo dependem do tamanho, da forma e da disposição das partículas cristalinas uns em relação aos outros. Visto que esses parâmetros influenciam no desenvolvimento e nas características da superfície específica total da fase sólida e em todos os fenômenos que ocorrem na interface das fases sólida e líquida (TESSIER e PEDRO, 1984).

Ferreira *et al.* (1999) afirmaram que os principais minerais da fração argila dos Latossolos brasileiros são a caulinita, a gibbsita, a goehtita e a hematita, em diferentes proporções. A partir da pesquisa realizada concluiu-se que a caulinita e a gibbsita são os principais constituintes mineralógicos responsáveis pelo desenvolvimento da estrutura dos Latossolos estudados. E propuseram um modelo de agregação, modificando o modelo elaborado por Emerson (1959), adequando-o às condições de solos tropicais.

No modelo caulínítico (Figura 14), a distribuição dos grãos de quartzo em relação ao plasma é porfirogrânica, ou seja, os grãos estão envolvidos num plasma denso e contínuo, com pouca tendência ao desenvolvimento de microestrutura, devido ao ajuste face a face das placas de caulinita. Portanto, nos Latossolos caulíníticos, a microestrutura se desenvolve na forma de blocos, originando solos com maior densidade, maior proporção de poros pequenos e menor permeabilidade.

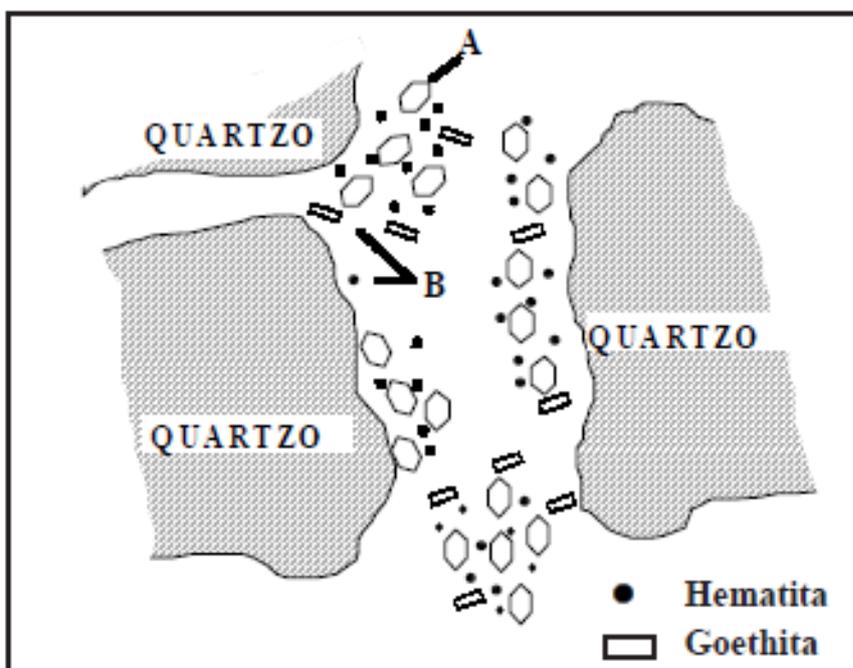
Já no modelo gibbsítico (Figura 15), a distribuição dos grãos em relação ao plasma é de forma aglutinada (estrutura micropédica bem definida), isto é, o desenvolvimento da microestrutura tem predomínio de poros de empacotamento compostos. Desse modo, o desenvolvimento da microestrutura é do tipo granular, com pequenos grânulos soltos (consequência da falta do ajuste que ocorre no modelo caulínítico), formando um solo com menor densidade, maior proporção de poros grandes e maior permeabilidade.

Figura 14 - Arranjo de partículas de quartzo, caulinita (A), óxidos de ferro (B) e matéria orgânica (C) em agregado de Latossolo caulinitico.



Fonte: Ferreira *et al.* (1999).

Figura 15 - Arranjo de partículas de quartzo, gibbsita (A) e óxidos de ferro (B) em agregado de Latossolo gibbsítico.



Fonte: Ferreira *et al.* (1999).

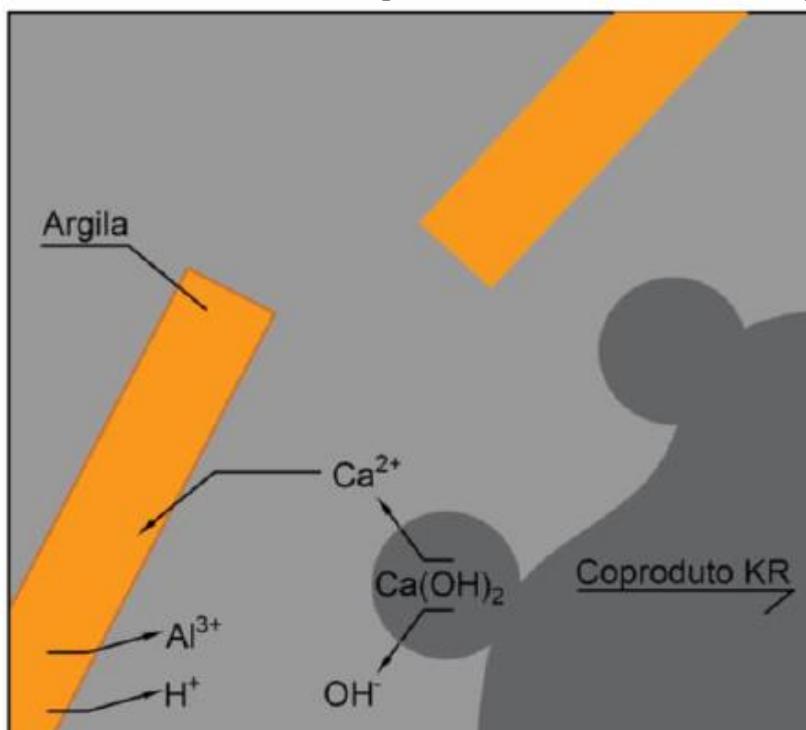
Rodrigues (1992) explicou que os argilominerais participam ativamente na estabilização do solo, com diferentes intensidades. Os minerais caulinita e ilita são mais suscetíveis à estabilização com o cimento do que a montmorilonita, que é um

argilomineral expansivo e inibe a hidratação e o endurecimento do cimento, sendo necessário alto teor desse material para a estabilização; e verificou-se que a gibbsita responde bem à cal, podendo retardar a estabilização de determinados solos lateríticos.

Segundo a mesma autora, os cátions presentes nos argilominerais influenciam o ganho da resistência: os íons alcalinos podem provocar o endurecimento, enquanto os íons ácidos podem causar o retardamento do desenvolvimento da resistência pela neutralização da cal liberada e hidrólise dos produtos cimentantes. Ela também explica que argilominerais ativos são mais adequados à estabilização com cal, enquanto os menos ou nada ativos, como a ilita e a caulinita, respectivamente, respondem melhor ao cimento.

Bridi (2020) estudou o efeito do teor de finos na estabilização de solos e concluiu que, quanto maior a quantidade de argila no solo maior será a ocorrência de trocas catiônicas orientadas por Ca^{2+} (cátion dissolvido do material estabilizante) com os cátions dissolvidos da argila, contribuindo para a estabilização do solo. Esse mecanismo de estabilização está apresentado na Figura 16 em um modelo elaborado pelo autor de interação solo-KR, sendo o KR um coproduto gerado na produção do aço.

Figura 16 - Trocas catiônicas da argila com a escória de dessulfuração KR.



Fonte: Bridi (2020).

2.4 ESTABILIZAÇÃO E MELHORAMENTO DE SOLOS

O melhoramento de solos pode ser considerado uma das técnicas mais antigas e intrigantes da Engenharia Civil. Já se fazia uso dessa técnica, há mais de 3000 anos, na construção dos templos da antiga Babilônia. Eram também utilizados pelos chineses, madeira, bambu ou palha para reforçar o solo (CRISTELO, 2001).

O mesmo autor explicou que para solucionar sucessivamente os problemas relacionados aos solos de fundação são fundamentais as técnicas de melhoramento de solos. Uma dessas técnicas é o melhoramento permanente com adição de materiais ao solo natural, que é chamada de estabilização de solos.

Na estabilização o solo é corrigido, modificando suas propriedades para que ocorra a melhora do seu comportamento de acordo com as necessidades de sua aplicação na engenharia (VILLIBOR, 1982). A estabilização de um solo quando aplicada à pavimentação, segundo Budny (2018), consiste em torná-lo capaz de resistir e suportar as cargas e os esforços sofridos pelo pavimento em decorrência do tráfego e, também, as ações erosivas de agentes naturais sob as condições mais adversas de solicitação consideradas no projeto.

Dominar as técnicas de estabilização pode diminuir o tempo de execução da obra, tornando viável a industrialização do processo construtivo e um empreendimento menos oneroso. Aliado com a utilização de aditivos disponíveis na região, que antes eram somente resíduos e se tornaram insumos (BUDNY, 2018).

Medina e Motta (2004) citaram as propriedades de engenharia em que objetivam alterar na estabilização de solos: resistência ao cisalhamento, diminuindo sua sensibilidade às mudanças ambientais, principalmente à umidade; permeabilidade, aumentando-a ou diminuindo-a; e compressibilidade, reduzindo-a. Características que afetam as propriedades do solo, que são de suma importância em um pavimento, como a expansibilidade, a resistência e a durabilidade.

A estabilização de solos pode ser realizada por meio de processos físico, mecânico ou químico, podendo ser adaptados e combinados para uma melhor solução do problema (SOLIZ, 2007). A grande variabilidade de solos faz com que cada método seja bem-sucedido apenas para alguns tipos de solo e não para todos. Como as características de um solo se alteram em poucos metros de distância, a escolha do

tipo de estabilização é de acordo com o número e tipo de solos sobre os quais se mostraram eficaz. Deve-se levar em conta que a estabilização não é necessariamente um processo infalível, que melhora toda e qualquer propriedade do solo. Enfim, a escolha do tipo de estabilização depende do custo, da finalidade da obra, das características de cada material e das propriedades do solo a serem alteradas (INGLES e METCALF, 1972 apud CRISTELO, 2001; LOPES, 2011).

a) Estabilização Granulométrica

A estabilização granulométrica é um processo físico, em que é feita a composição de solos ou solos e agregados, de modo que as misturas garantam a resistência pelo contato grão a grão das partículas maiores e os vazios entre essas partículas sejam preenchidos por um material mais fino, conferindo ao solo uma maior densidade e uma menor permeabilidade (GONDIM, 2008). Macêdo (2004) concluiu que nesse tipo de estabilização o solo é melhorado modificando sua composição natural, seja por meio da mistura de dois ou mais solos ou pela retirada de uma das frações do solo, obtendo, assim, um solo bem graduado, que satisfaz os requisitos de projeto.

Portanto, os solos coesivos de baixa resistência podem ser estabilizados com a adição de material granular, enquanto os solos arenosos, instáveis devido à falta de ligações entre as partículas, podem ser estabilizados com a adição de material fino. A correção granulométrica de solos argilosos, por meio de material granular em conjunto com a estabilização química, deve ser feita a fim de garantir que as partículas fiquem em contato e que a fração fina seja suficiente para reagir com os agentes estabilizadores, pois ela sofre importantes modificações na estabilização com cal e cimento, por exemplo, devido à ação química desses materiais. Também pode ser feita a correção granulométrica da fração silto-argilosa para redução da plasticidade, por meio da adição de solo pouco plástico ao solo de alta plasticidade (CRISTELO, 2001).

b) Estabilização Mecânica

Budny (2018) citou que a estabilização mecânica por compactação tem por finalidade conferir ao solo utilizado na camada de pavimentação condição de densificação máxima relacionada a uma energia de compactação e a uma umidade ótima. Em outras palavras, Santos *et al.* (1995) descreveram a compactação como um processo de tratamento de um solo, a fim de reduzir sua porosidade pela aplicação contínua de cargas, pressupondo que a redução do volume de vazios influencia no ganho de

resistência mecânica. A compactação é genericamente utilizada conjuntamente a todos os outros procedimentos de estabilização (MACÊDO, 2004).

c) Estabilização Química

Na estabilização química, a incorporação de uma determinada quantidade de aditivos faz com que a estrutura do solo sofra alterações por meio de reações físico-químicas entre os grãos do solo e dos materiais adicionados, que criam uma matriz que cimenta ou envolve os grãos. Essas modificações são suficientes para conferir melhorias nas características físicas e mecânicas do solo, tornando-o adequado para fins de pavimentação. Há diversos tipos de aditivos que podem ser utilizados como estabilizantes de solo, desde produtos industrializados até subprodutos ou resíduos industriais (FRANÇA, 2003; OLIVEIRA, 1994).

Para garantir a viabilidade do uso dos agentes estabilizadores, eles devem possuir características, como: adequação para uma alta diversidade de solos; efeito estabilizador permanente; disponibilidade em grande escala e a preço baixo; facilidade de transporte e armazenamento; comportamento relativamente não tóxico e não corrosivo (SHERWOOD, 1993).

Cruz (2004) citou que o cimento, a cal e o betume são os estabilizadores que mais satisfazem esses requisitos e, portanto, são os mais utilizados, e são chamados de estabilizadores primários. Além de outros produtos, que estão sendo objeto de pesquisas para essa utilização. Há outros materiais que, individualmente, não causam o efeito esperado no solo, mas misturados a cal ou ao cimento, por exemplo, produzem um efeito satisfatório, e são chamados de agentes estabilizadores secundários ou ativadores (SHERWOOD, 1993).

Cada aditivo interage com o solo de forma particular, seja por meio da cimentação, de uma modificação da mineralogia, pela troca de íons, pela precipitação, pela polimerização, entre outros. Por isso, conhecer o princípio de atuação do material adicionado, como também do solo a ser melhorado, são essenciais para uma estabilização eficaz (NÓBREGA, 1995).

Dentre os estabilizantes, os mais comuns são o cimento Portland e a cal hidratada. Com relação a estabilização com cimento Portland, recomendada para solos arenosos, a adição deste aglomerante ao solo pode dar origem a dois tipos de estabilização química, o solo-cimento e o solo melhorado com cimento. Além do

cimento Portland, a estabilização química pode ocorrer com uso da cal (recomendada para solos argilosos) ou coprodutos industriais. Os mecanismos de estabilização variam de acordo com a quantidade de estabilizante e as propriedades modificadas.

2.4.1 Solo-cimento e Solo Melhorado com Cimento

Segundo a *Portland Cement Association*, o solo-cimento é uma mistura altamente compactada, composta por solo, cimento e água, que dá origem a um material estrutural em que o teor do aglomerante incorporado é capaz de conferir características mecânicas e de durabilidade, que tornam o solo apto a ser utilizado em camadas de pavimentos (PCA, 2019). A quantidade de cimento adicionada depende das características finais a serem atendidas (PINTO, 2000). De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), para ocorrer essa melhora expressiva da resistência, o percentual de cimento adicionado varia de 6% a 10%, que resulta em um material duro, cimentado, de acentuada rigidez à flexão.

Já o solo melhorado com cimento é um material melhorado, em que é adicionado um teor menor de cimento, de 2% a 4%, de acordo com a norma ES 142 (DNIT, 2010), incapaz de alcançar as mesmas propriedades de um solo-cimento, mas apenas um leve acréscimo da resistência. Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), ocorre, essencialmente, a modificação do solo referente à sua plasticidade e à sensibilidade à água, sem cimentação acentuada, e é considerado flexível. Também visa corrigir a expansibilidade e a capacidade de carga do solo (PEREIRA, 1970).

Gorski (2010) explicou que quando o teor de cimento é mais elevado, a ação aglutinante deste aditivo, o qual forma núcleos interligados distribuídos pela massa de solo, é o que causa o aumento da resistência mecânica. Já para teores mais baixos de cimento, este aditivo promove a floculação das partículas de argila, modificando a fração argilosa do solo, que diminui sua plasticidade, aumentando ou não a resistência mecânica.

O teor do agente estabilizante não é o único fator a influenciar o grau de cimentação, mas também a densidade, a forma e a natureza superficial das partículas são importantes nesse processo. Segundo pesquisas, misturas com uma mesma quantidade de cimento, mas com solos de densidades diferentes, produziram resistências distintas. Isso ocorre pelo fato de que no solo mais denso a cimentação

se desenvolve com mais eficiência, por existir maior número de pontos de contato entre as partículas (CONSOLI *et al.*, 2007; SANDRONI e CONSOLI, 2010).

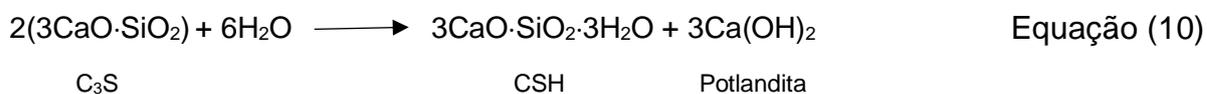
Dias (2012) explicou que quase todos os solos podem ser utilizados na mistura solo e cimento, com algumas exceções, como os solos orgânicos (com teor de matéria orgânica acima de 2%) e as argilas altamente plásticas. Solos granulares são os mais indicados, porém alguns solos com maior percentual de finos e baixa plasticidade também são estabilizados com essa técnica, todavia, é necessário um maior teor de cimento para alcançar a resistência desejada. A presença excessiva de sais, principalmente os sulfatos, também prejudica a mistura solo-cimento, pois impede que haja uma adequada hidratação do cimento, causando a ele expansão, fissuração, amolecimento e desintegração.

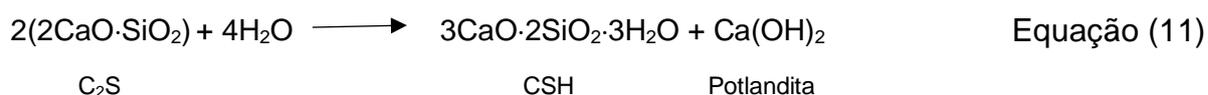
2.4.2 Estabilização de Solo com Cimento

Nóbrega (1995) explicou que os processos de estabilização do solo com cimento podem ser divididos em primário e secundário. O processo primário inclui as reações de hidratação do cimento, enquanto no processo secundário ocorrem as reações entre os compostos gerados pela hidratação do cimento e as partículas do solo, em que a fração argila possui papel fundamental.

O cimento é um aglomerante hidráulico e é constituído por componentes minerais anidros, que provocam a hidratação e o seu endurecimento em contato com a água. Os minerais mais presentes nesse material, originários do clínquer, são: o silicato tricálcico ou alita ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 - \text{C}_3\text{S}$), o silicato dicálcico ou belita ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 - \text{C}_2\text{S}$), o aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}_3\text{A}$) e o ferroaluminato tetracálcico ou ferrita ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{C}_2\text{AF}$), sendo a alita o mineral predominante (PEREIRA, 2012).

Segundo Nóbrega (1995), a reação do cimento com a água ocorre, primeiramente, com uma reação dos constituintes individuais, e posteriormente há uma interreação de parte dos constituintes liberados ou dissolvidos. As principais reações (simplificadas) de hidratação do cimento Portland estão descritas e explicadas nas Equações 10 e 11, segundo Nóbrega (1995) e Coutinho (2006).





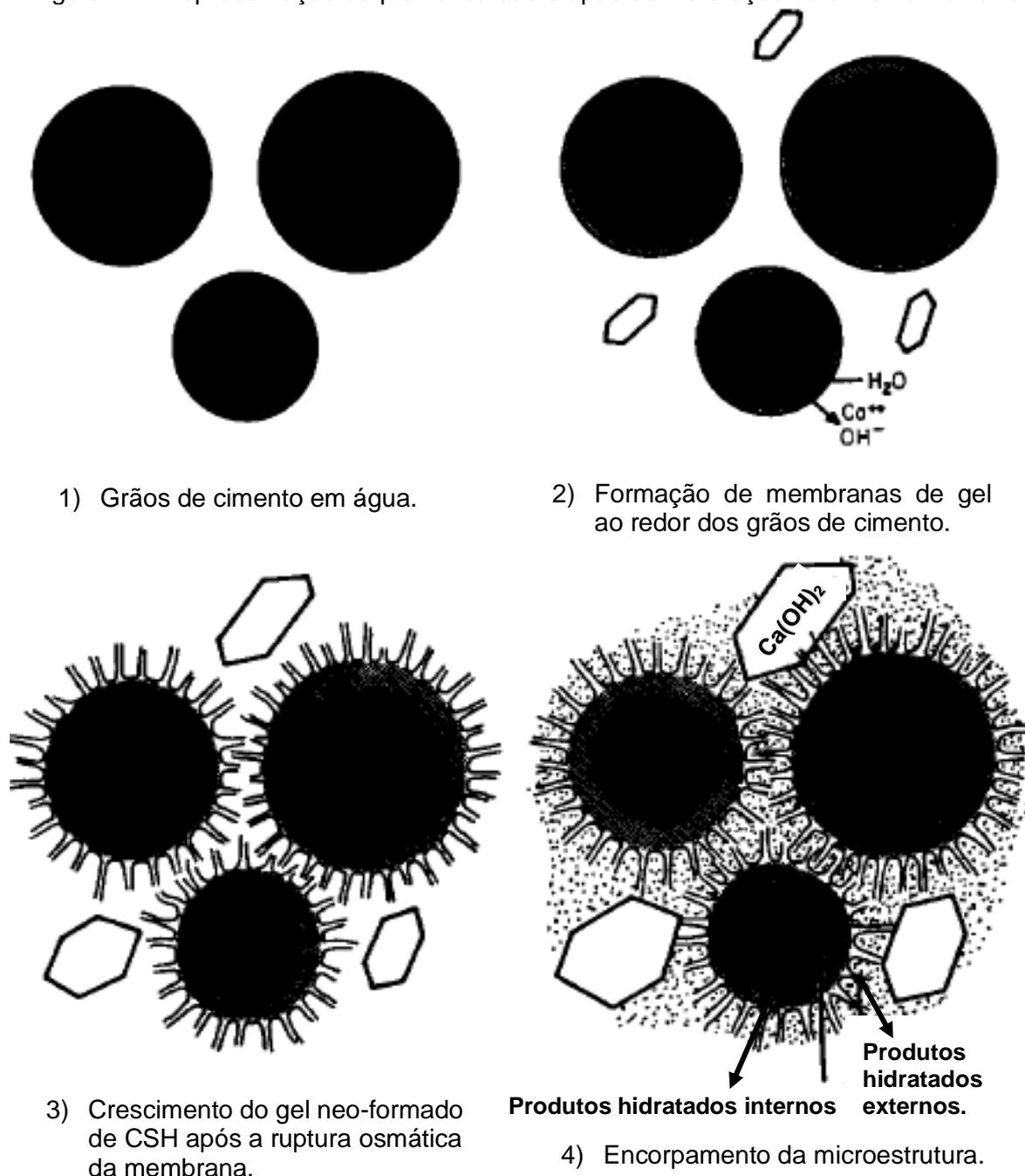
Nos primeiros minutos e rapidamente ocorre a reação do C_3A com a água e é formado o aluminato tricálcico hidratado (C_3AH_6). Para retardar essa reação é adicionado o gesso natural ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - gipsita), que reage lentamente com o C_3A , formando a etringita (trissulfoaluminato), a qual se encontra na forma de cristais prismáticos de seção hexagonal. Após, aproximadamente, 24 horas o gesso é totalmente consumido, transformando a etringita, juntamente com o C_3A hidratado que ainda não foi consumido, em monossulfoaluminato de cálcio. Os sulfoaluminatos constituem entre 15% a 20% do volume sólido da pasta hidratada.

Na reação do C_3S e do C_2S com a água (Equações 10 e 11, respectivamente), o hidróxido de cálcico é expelido e silicatos de cálcio hidratados são formados, sendo pouco cristalizados ou na forma de gel. Esse produto é chamado de CSH, é o maior responsável pelas propriedades da pasta e pela resistência no cimento endurecido, e aparecem como fibras mal cristalizadas ou com um padrão reticular. Os cristais de hidróxido de cálcio (portlandita) formam grandes cristais prismáticos hexagonais (Figura 17). O CSH representa cerca de 50% a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento hidratada, enquanto o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ constitui cerca de 20% a 25% do volume sólido da pasta.

O C_3A também reage com o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do C_3S e do C_2S , dando origem ao aluminato tetracálcio hidratado (C_4AH_{13}). A hidratação do C_4AF ocorre no mesmo período, porém pouco mais lentamente, que a hidratação do C_3A , e a sua reação com a água e o hidróxido de cálcio gera o ferroaluminato de cálcio hidratado.

Por fim, o processo de hidratação pode ser resumido, como apresentado na Figura 17: os silicatos de cálcio hidratados (CSH) se cristalizam nos primeiros minutos, se agrupam em fibras e o número de cristais finos e pontiagudos aumenta com o tempo; a portlandita se apresenta na forma de cristais hexagonais, os quais se empilham em “agregados” compactos, criando pontes entre os grãos parcialmente hidratados; portanto, o entrelaçamento contínuo das fibras é o que fornecerá a resistência a longo prazo ao cimento.

Figura 17 - Representação esquemática das etapas de hidratação do cimento Portland.



Fonte: Adaptado de Double (1980 apud RODRIGUES, 1992).

O segundo estágio do processo de estabilização do solo com cimento pode ser dividido em efeito primário e efeito secundário, como explicado por Bezerra (1976), Rodrigues (1992) e Vitali (2008).

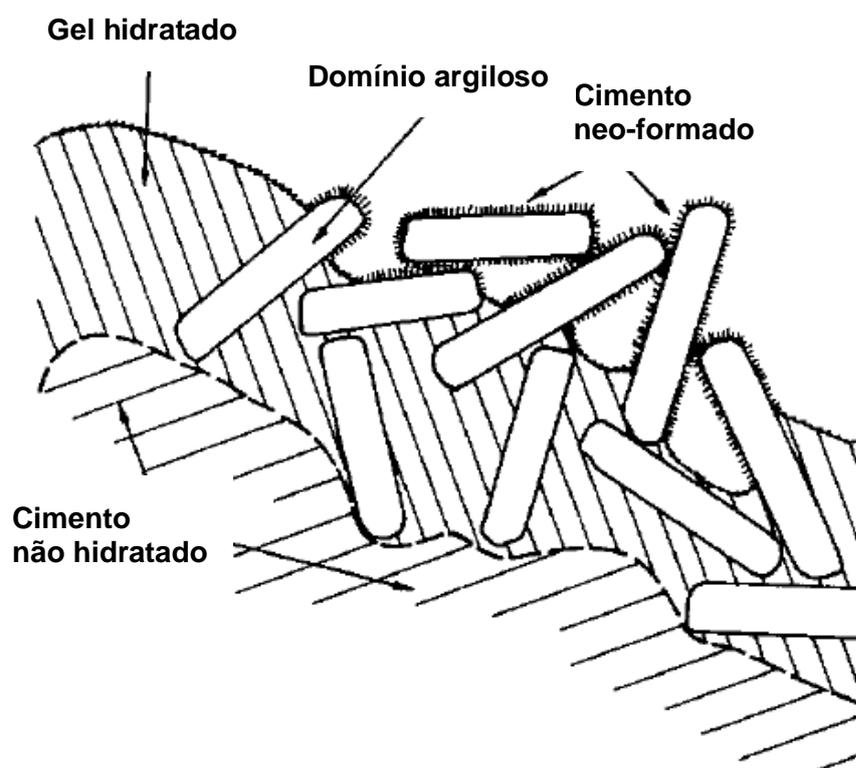
No efeito primário ocorre a dissociação da cal hidratada em cátions de cálcio e ânions de hidroxilas (Equação 12). Cátions de cálcio trocam de base com íons ligados às partículas dos argilominerais, enquanto outros ligam-se entre si, neutralizando as cargas negativas da argila. Com isso, as partículas de argila estão prontas para

flocular, alterando a estrutura do solo e diminuindo a sua plasticidade. Por sua vez, o gel de cimento hidratado pode se encaixar ao redor da massa floculada, fornecendo fortes ligações nas interfaces argila-cimento. Ou seja, cada partícula de cimento é encoberta por uma camada de domínios de partículas de argila encaixadas.

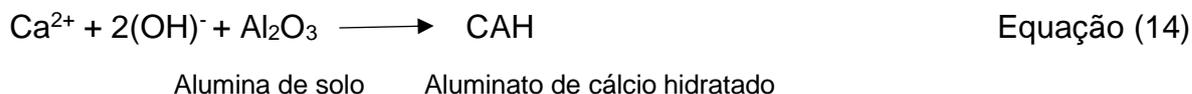
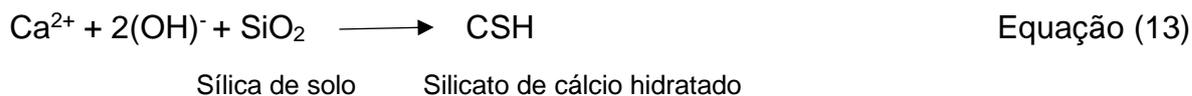


No efeito secundário há um aumento do valor do pH, que faz com que as hidroxilas ataquem os argilominerais e componentes amorfos da argila, causando a dissociação da sílica e alumina na argila, que por sua vez podem combinar com cátions de cálcio, formando silicatos e aluminatos hidratados secundários (Equações 13 e 14, respectivamente), reações estas chamadas de pozolânicas. Esses compostos são um material cimentante secundário (cimento neo-formado), o qual se forma sobre a superfície das partículas (domínios) de argila ou nas proximidades, dando origem aos grãos floculados ligados pelos pontos de contato. Portanto, ocorrem as ligações fortes entre o gel hidratado e as partículas de argila, que são responsáveis pela resistência a longo prazo do solo-cimento. A Figura 18 apresenta um modelo de formação do solo-cimento.

Figura 18 - Gel de cimento com domínios de partículas de argila encaixadas.



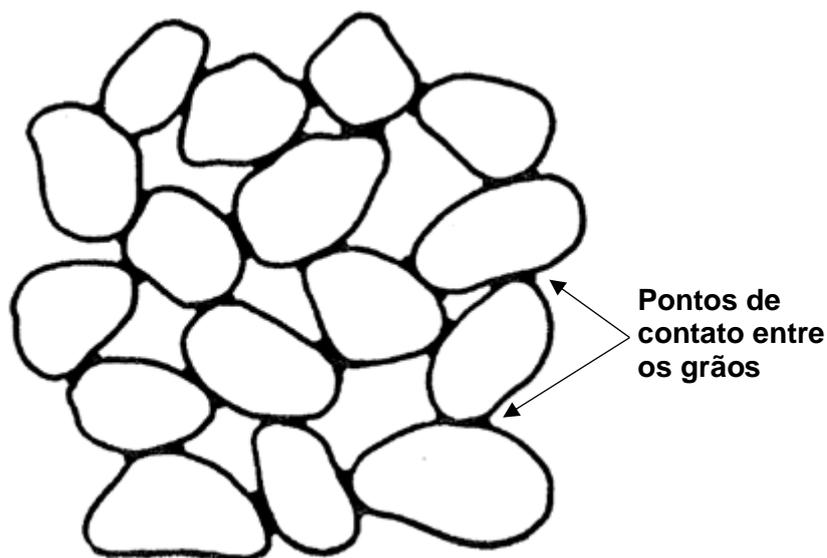
Fonte: Adaptado de Herzog (1967 apud RODRIGUES, 1992).



Há uma diferença da interação do cimento com o solo que ocorre nos solos granulares e nos solos coesivos (argilosos). Segundo Azevedo e Festugado (2017), os produtos das reações primárias são responsáveis pela cimentação dos solos granulares, enquanto a cimentação dos solos argilosos é gerada pelos produtos das reações secundárias. Essa diferença é explicada por Bezerra (1976) e Nóbrega (1995).

Em um solo granular, o gel hidratado de cimento não preenche todos os vazios entre as partículas, há apenas a cimentação dos grãos nos pontos de contato (Figura 19), formando, assim, uma matriz descontínua. Portanto, quanto mais bem graduado for o solo, menor será a quantidade de vazios e maior a superfície de contato interpartículas, aumentando o efeito da cimentação.

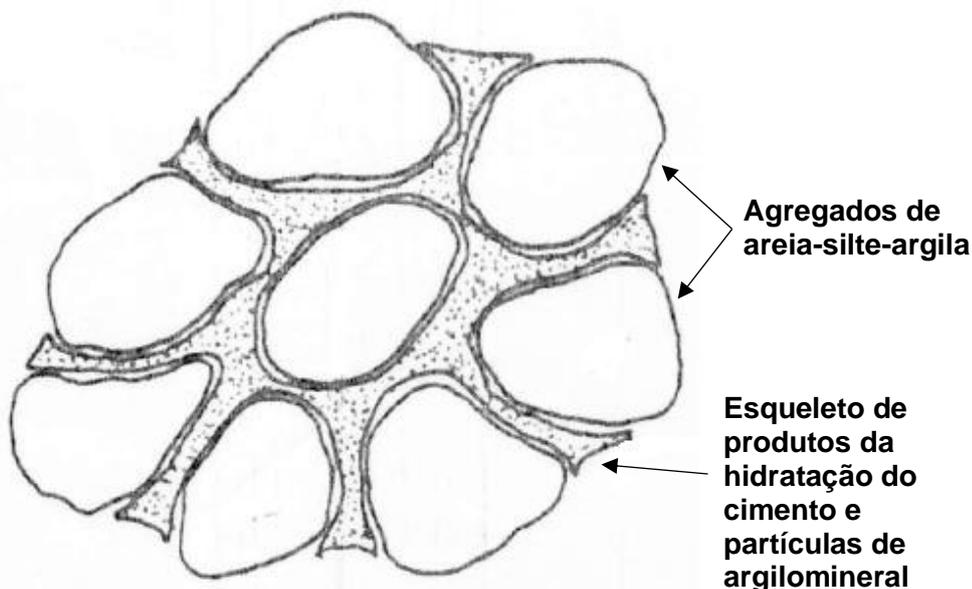
Figura 19 - Cimentação nos pontos de contato entre os grãos grosseiros.



Fonte: Adaptado de Kézdi (1979 apud NÓBREGA, 1995).

Já nos solos coesivos (maior presença de silte e argila), os compostos liberados pela hidratação do cimento criam fortes ligações entre os diversos minerais presentes, formando uma matriz que encobre as partículas de solo, e é desenvolvida uma estrutura celular (Figura 20).

Figura 20 - Estrutura do solo-cimento de grãos finos.



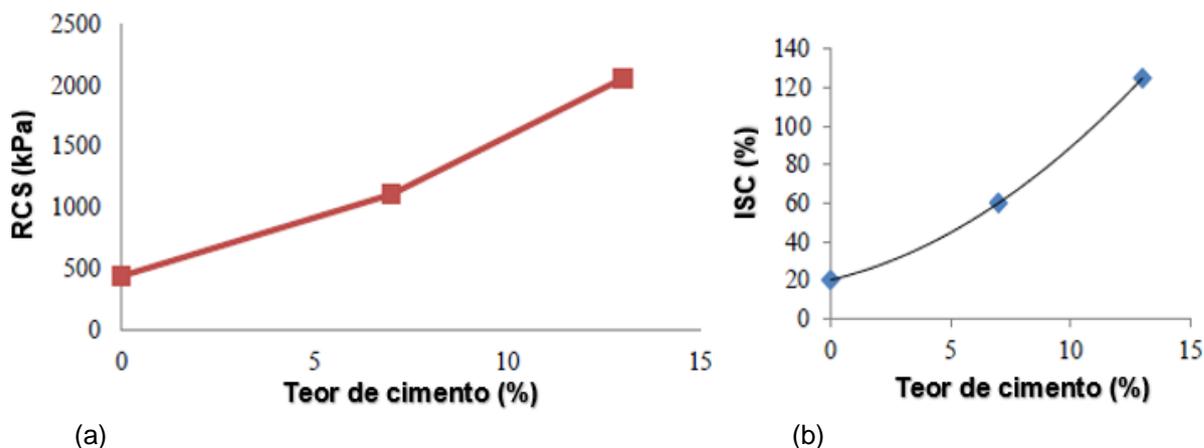
Fonte: Adaptado de Bezerra (1976).

Segundo Ceratti (1991), os solos arenosos bem graduados e com plasticidade de baixa a média são os mais suscetíveis a serem estabilizados com cimento, por necessitarem de baixo teor do aditivo. Enquanto os solos coesivos tendem a exigir maior teor de cimento para a estabilização, devido à maior área específica das partículas (CARDOSO *et al.*, 2016). Portanto, de acordo com Pereira (2012), quanto maior a quantidade de finos em um solo, maior será o teor necessário de cimento para estabilizá-lo.

O cimento é o estabilizante de solos mais conhecido, e há vários estudos que comprovam seu uso potencial em camadas de pavimentação. As pesquisas de Rashid *et al.* (2013) e Furieri (2019) são um exemplo desta aplicação.

Rashid *et al.* (2013) estudaram um solo laterítico, classificado como areia siltosa, estabilizado com diferentes teores de adição (0%, 7% e 13%) de cimento. A resistência à compressão simples (RCS) foi medida por meio do ensaio de compressão uniaxial e a capacidade de suporte pelo ensaio de índice de suporte Califórnia (ISC), cujos resultados estão apresentados na Figura 21. Nota-se que o acréscimo do cimento fornece aumento da RCS e do ISC, e esses valores crescem à medida que há aumento do teor do aditivo, alcançando valores que os tornam aptos para aplicação na pavimentação.

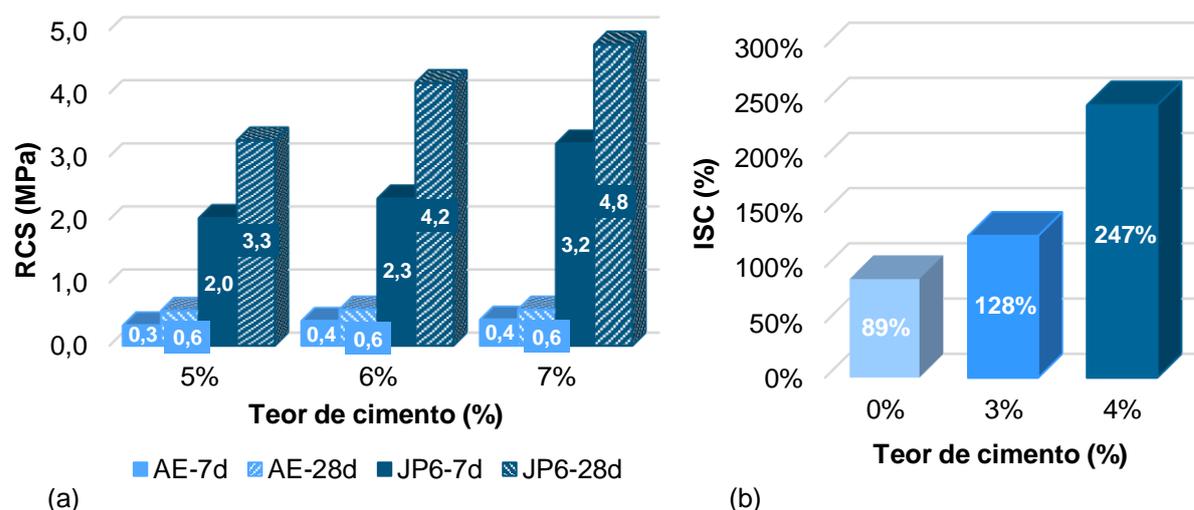
Figura 21 - Resultados obtidos por Rashid *et al.* (2013): (a) RCS e (b) ISC.



Fonte: Adaptado de Rashid *et al.* (2013).

Na pesquisa de Furieri (2019) o cimento, em diferentes porcentagens, foi adicionado a dois tipos de solos: uma argila de alta plasticidade (AE); e um solo laterítico arenoso com presença de pedregulho e argila (JP6), bem graduado e de média plasticidade. A resistência mecânica foi medida por meio do ensaio de resistência à compressão simples (RCS) com 7 e 28 dias de cura para os dois solos, compactados na energia normal; e pelo ensaio de ISC somente para o solo JP6, compactado na energia modificada. Na Figura 22 estão apresentados os resultados dos dois ensaios.

Figura 22 - Resultados obtidos por Furieri (2019): (a) RCS e (b) ISC.



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que os valores de RCS e ISC crescem expressivamente com o aumento do teor de cimento, ambos atingindo resistências adequadas para aplicação em camadas de pavimentos. Quanto à RCS, verifica-se que o solo JP6 alcançou

resistência à compressão muito superior ao solo AE, resultado já esperado, uma vez que os solos arenosos, como é o caso do JP6, são mais suscetíveis à estabilização com o cimento.

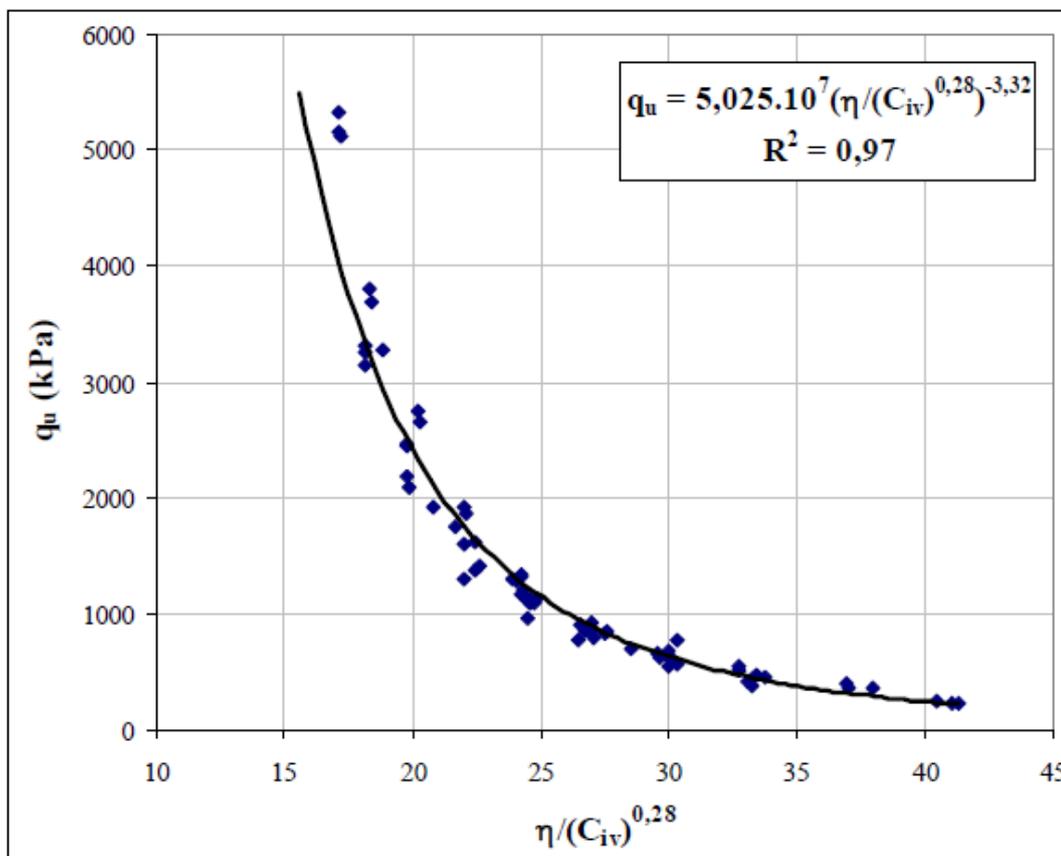
Diversas pesquisas têm estudado a influência dos principais parâmetros (teor de cimento, porosidade da mistura compactada, teor de umidade e energia da moldagem no controle da resistência de solos cimentados. Foppa (2005) e Consoli *et al.* (2007) elaboraram a primeira metodologia racional de dosagem de uma mistura de solo-cimento, relacionando a porosidade (η) e o teor volumétrico de cimento (C_{iv}), que se mostrou adequada para avaliar a resistência à compressão simples para as misturas estudadas. Essa metodologia foi aplicada com resultados positivos em outras pesquisas, como as de Consoli *et al.* (2010a, 2010b, 2011, 2012a, 2012b), Marques *et al.* (2014 e 2016).

Foppa (2005) e Consoli *et al.* (2007) se basearam no estudo de Larnach (1960), o qual foi o único trabalho encontrado por eles, que correlacionava a quantidade de vazios com o teor de cimento para estimar a resistência de solo-cimento. A relação vazios/cimento utilizada por Larnach (1960) foi dada pela razão entre o volume absoluto de vazios (ar + água) (V_v) e o volume absoluto de cimento (V_{ci}). Foppa (2005) e Consoli *et al.* (2007) constataram um excelente grau de precisão por meio dessa relação, todavia eles apresentaram uma forma mais elegante de expressá-la, substituindo o volume de vazios pela porosidade e o volume de cimento pelo teor volumétrico de cimento expresso em porcentagem do volume total, resultando na relação η/C_{iv} .

Para a relação $\eta/C_{iv}^{0,28}$ obteve-se um coeficiente de determinação de 0,97, como apresentado na Figura 23, e os autores afirmaram que o expoente varia e deve ser ajustado de acordo com o tipo de solo e cimento utilizados.

Foppa (2005) ressaltou que os corpos de prova foram moldados com um mesmo teor de umidade, pois este parâmetro influencia consideravelmente a resistência à compressão simples, sendo responsável pelos diferentes arranjos entre as partículas do solo depois de compactado, mesmo mantendo constante a massa específica aparente seca.

Figura 23 - Relação vazios/cimento expresso em termos da porosidade e do teor volumétrico de cimento.



Fonte: Foppa (2005).

Essa metodologia de dosagem é benéfica quanto à rapidez e à confiabilidade em se obter uma previsão da resistência à compressão simples, permitindo escolher o teor de cimento e a energia de compactação apropriados para fornecer uma mistura que atenda a resistência exigida pelo projeto, e auxilia no controle da execução em campo das camadas de solo-cimento (MARQUES *et al.*, 2016; CONSOLI *et al.*, 2007).

2.4.3 Estabilização de Solo com Cal

A cal é um aglomerante aéreo gerado a partir da calcinação de rochas carbonatadas, constituídas, majoritariamente, por carbonato de cálcio e/ou carbonato de cálcio e magnésio, resultando em óxidos de cálcio (CaO) e óxido de cálcio-magnésio (CaO-MgO), respectivamente (GUIMARÃES, 2002).

Segundo Corrêa (2008), a estabilização com cal é mais eficiente quando utilizada em solos finos (siltosos e argilosos) e é caracterizada por duas etapas: a etapa inicial rápida, que dura de horas a dias, e a etapa mais lenta, que pode durar meses ou anos. Na fase inicial ocorrem as reações de trocas catiônicas, floculação e aglomeração das

partículas, compressão de dupla camada elétrica e adsorção da cal, os quais são responsáveis pela ação imediata deste material, promovendo mudanças nas propriedades físicas do solo, como a redução da plasticidade, da expansão e da contração, nas condições de compactação (umidade ótima e densidade máxima), melhoria na trabalhabilidade e aumento na capacidade de suporte. Já na fase lenta ocorrem as reações pozolânicas, responsáveis pelo aumento contínuo da resistência mecânica da mistura, devido à formação de produtos cimentantes; e reações de carbonatação, que são prejudiciais, visto que elas reduzem a quantidade de cal disponível para produzir as reações pozolânicas (NÓBREGA, 1995; CASTRO, 1995; JUNIOR, 2011).

No efeito imediato, quando a cal entra em contato com o solo, em meio aquoso, é formado o hidróxido de cálcio (Equação 15) e parte dele se dissolve, fornecendo íons Ca^{2+} e OH^- (Equação 16) e um aumento no pH do solo, que eleva a capacidade de troca catiônica. O cátion Ca^{2+} dissolvido substitui cátions de menor valência na superfície da argila, devido a divalência dos cátions de cálcio, que têm preferência aos cátions de valência unitária. Com isso, os cátions se aglomeram na superfície do argilomineral, provocando a floculação, que causa alterações na textura da argila, pois sua estrutura plana e paralela é transformada em uma orientação aleatória (Figura 24). Os flocos formados crescem, devido ao encontro com outros cristais em solução e com outros flocos, fazendo com que a adsorção da cal continue, e se acumulam em outros locais mais acessíveis dos flocos, principalmente na sua superfície externa. Essa cal adsorvida age como um cimento “amorfo” ou reage quimicamente com o SiO_2 e o Al_2O_3 da argila, ocorrendo, assim, a estabilização dos agregados (PORTELINHA, 2008; RODRIGUES, 1992; LITTLE, 1995; VILLARIM, 1995; PRUSINSKI e BHATTACHARJA, 1999).

Figura 24 - Floculação e aglomeração.

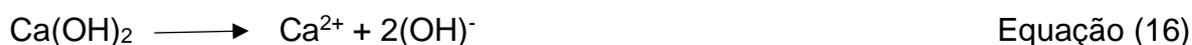


Partículas de argila não estabilizadas



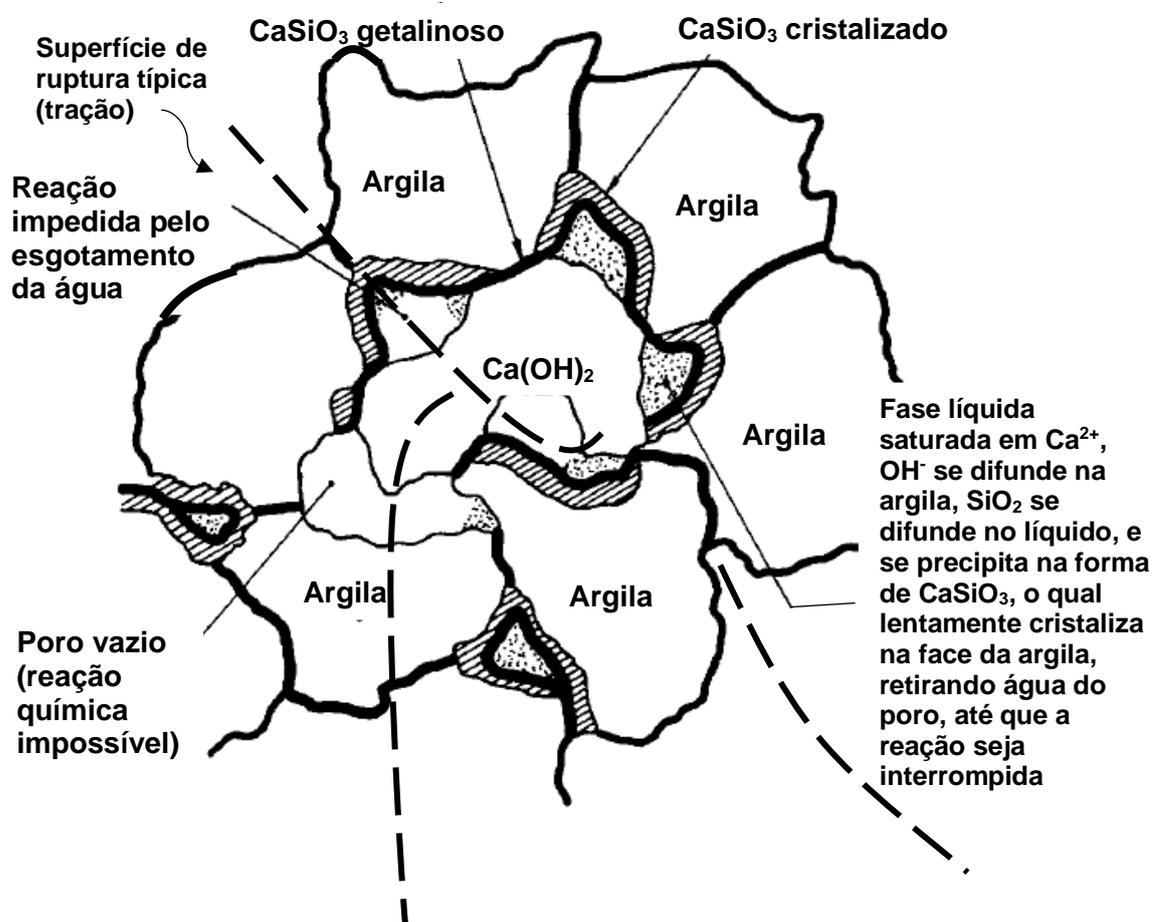
Partículas de argila após a floculação/aglomeração

Fonte: Adaptado de Prusinski e Bhattacharja (1999).



O efeito a longo prazo da estabilização de solo-cal se processa pela ação cimentante ou reação pozolânica, que ocorre lentamente e do mesmo modo que na estabilização solo-cimento, explicado no item anterior e nas Equações 13 e 14. Essas reações formam géis silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio e não cessa enquanto houver Ca(OH)_2 reagindo e sílica disponível no solo. Os géis silicatos cobrem e ligam as partículas de argila, bloqueando os vazios, e são cristalizados lentamente, se transformando em silicatos hidratados de cálcio bem definidos (Figura 25). Os cristais formam estruturas com um alto grau de entrelaçamento, promovendo a cimentação entre os grãos de solo (INGLES e METCALF, 1972 apud LOVATO, 2004; PORTELINHA, 2008).

Figura 25 - Mecanismo de estabilização solo-cal.



Fonte: Adaptado de Ingles e Metcalf (1972 apud LOVATO, 2004).

Segundo Cruz (2004), a cimentação nas misturas solo-cal ocorre mais lentamente do que a hidratação do cimento Portland, podendo ser favorecida por condições climáticas quentes e acelerada por meio de aditivos adequados.

A carbonatação é uma reação de ação imediata, que ocorre com a combinação do óxido de cálcio do hidróxido com o anidrido carbônico presente nas bolhas de ar nos poros do solo e da cal hidratada, formando o carbonato de cálcio (Equação 17), reação inversa da produção da cal a partir do calcário. O produto formado é um novo corpo sólido, o qual se entrelaça com os outros constituintes do solo e compacta o sistema. A cal envolvida nesse processo pode ser da parcela que não foi utilizada nos processos anteriores ou essa reação pode acontecer antes de a cal reagir com o solo, o que reduzirá a quantidade de cal disponível para a estabilização, prejudicando o ganho de resistência da mistura, visto que o composto formado é um cimentante fraco (CRUZ, 2014; CORRÊA, 2008; LOVATO, 2004).

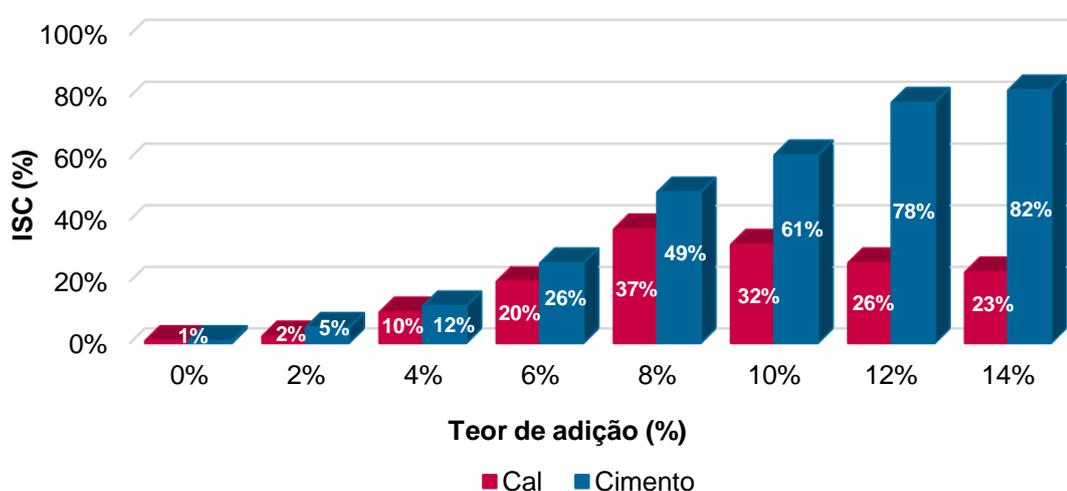


Nóbrega (1995) explicou que, por vezes, é necessário utilizar a cal em conjunto com o cimento para estabilizar determinados tipos de solos. Uma dessas situações é quando a adição da cal causa mudanças nas propriedades dos solos, mas não é capaz de aumentar a resistência a ponto de serem utilizados em camadas de pavimentação, por isso é adicionado uma pequena quantidade de cimento, para aumentar a resistência e torná-los aptos ao uso. Outro caso é quando o solo é plástico e somente a adição do cimento não é capaz de alterar essa propriedade e não é possível obter uma mistura eficiente de solo-cimento, com isso a cal é utilizada como um pré-tratamento do solo para a estabilização com o cimento. Portanto, nas adições em conjunto de cal e cimento, geralmente a cal tem a função de melhorar as características dos materiais para oferecer uma melhor eficiência da mistura do solo com o cimento e melhor trabalhabilidade; enquanto a função do cimento é produzir os materiais ligantes para aumentar a resistência e a capacidade de suporte efetiva.

Como exemplo de estabilização com cal e cimento tem-se a pesquisa de Joel e Agbede (2010), que estudaram a adição desses estabilizantes em um solo argiloso de alta plasticidade, empregando diferentes teores dos aditivos, resultando em

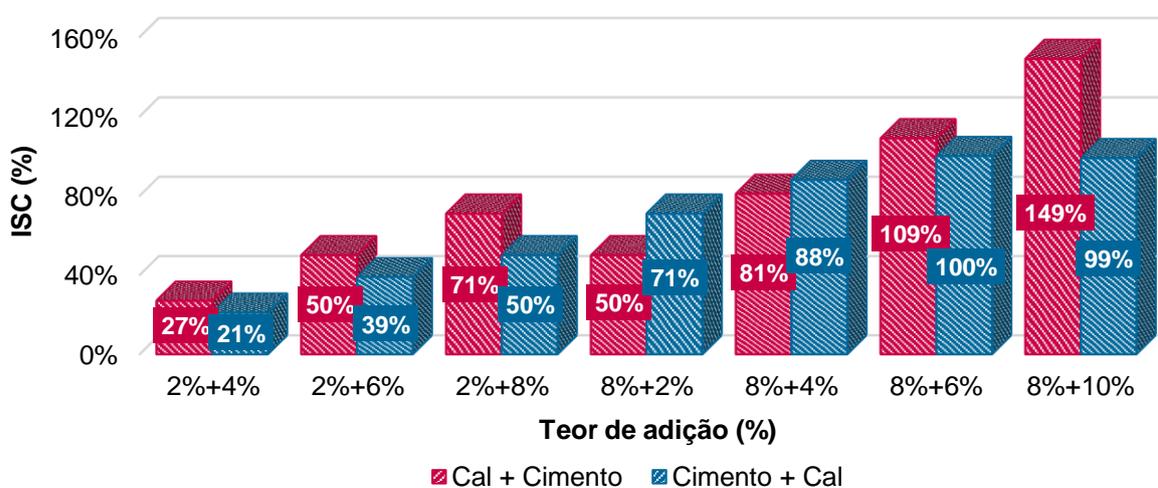
misturas de solo/cal, solo/cimento e solo/cal/cimento, sendo que para estas últimas, hora foi mantido o teor de cal alterando o teor de cimento e hora fazendo o inverso. A resistência mecânica das misturas foi determinada por meio do ensaio de índice de suporte Califórnia (ISC) e os resultados estão apresentados na Figura 26 e na Figura 27. Vê-se que a incorporação desses materiais aumentou a resistência do solo. E na Figura 28 estão os resultados de índice de plasticidade (IP), e observa-se que a adição dos aditivos diminuiu a plasticidade do solo.

Figura 26 - Resultados de ISC obtidos por Joel e Agbede (2010) para as misturas de solo/cal e solo/cimento.



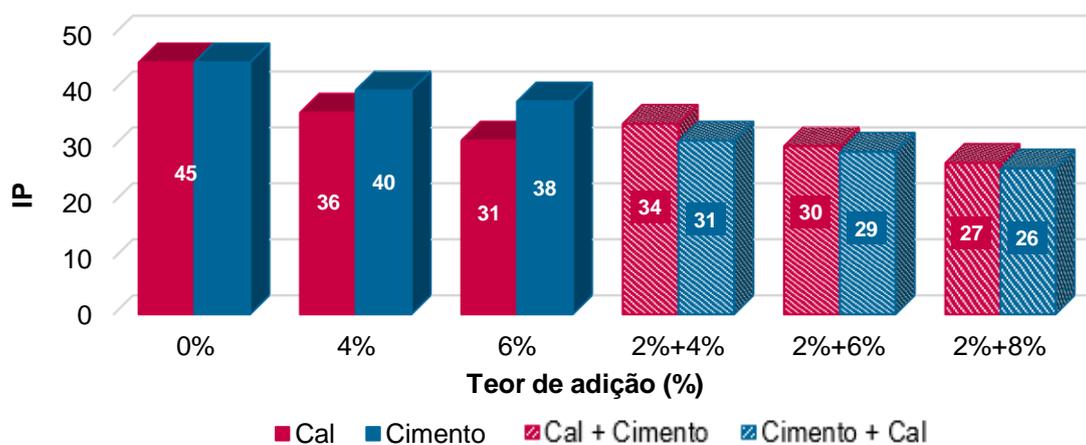
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 27 - Resultados de ISC obtidos por Joel e Agbede (2010) para as misturas de solo/cal/cimento.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 28 – Resultados de IP obtidos por Joel e Agbede (2010).



Fonte: Elaborado pela autora.

Quanto às misturas com apenas um aditivo (Figura 26), nota-se que o cimento causa maior efeito na estabilização do solo estudado, resultando em valores de ISC superiores aos fornecidos pela cal, principalmente para os teores acima de 8%, em que a adição da cal passa a diminuir o valor de ISC, enquanto o ISC das misturas com cimento continua crescendo. Analisando as misturas com os dois aditivos (Figura 27), é aparente esse maior efeito estabilizante do cimento, uma vez que quando a porcentagem do cimento é maior que o da cal, os valores de ISC são superiores, ocorrendo o contrário quando o teor da cal é maior. Por outro lado, observa-se que a cal é o material entre os dois aditivos que causa maior queda da plasticidade (Figura 28), isso ocorre tanto comparando as misturas de solo/cal e solo/cimento, quanto as misturas de solo/cal/cimento, em que esse efeito tem maior visibilidade quando o teor de cal é maior que do cimento.

2.4.4 Solo Melhorado com Coprodutos Industriais

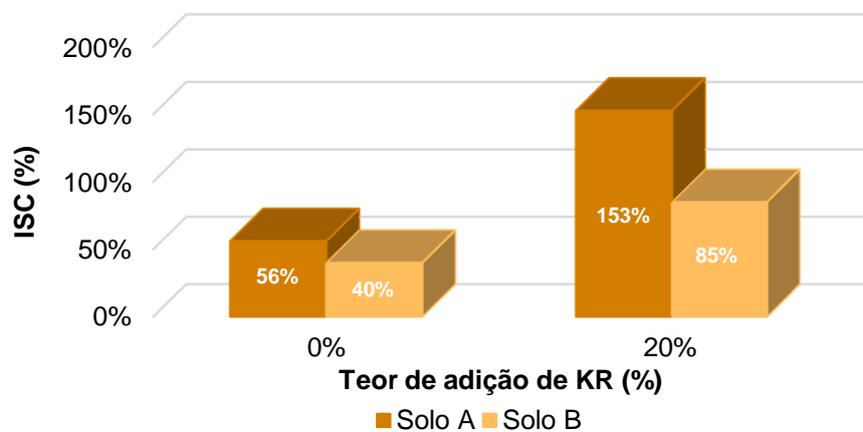
Os resíduos industriais estão em constante crescimento, sendo gerados por diversos tipos de indústrias e, por isso, são bastantes variados, com diferentes características e quantidades. Deste modo, o aproveitamento de resíduos tem caráter fundamental, principalmente em países em desenvolvimento, uma vez que subprodutos, antes indesejáveis e descartados, se tornam insumos para novas aplicações, diminuindo os impactos ambientais e contribuindo para a sustentabilidade, por meio da redução do uso de recursos naturais não renováveis e da diminuição de aterros; além do benefício econômico para o gerador, por meio da redução dos custos de descarte desse

material e venda desse produto, e para o consumidor e usuário, já que esses coprodutos têm menor valor que materiais convencionais, tornando o produto final menos oneroso. Para isso é imprescindível a busca por técnicas e meios de aplicar esses materiais (LUCAS e BENATTI, 2008; SIMIÃO, 2011; CARRARO, 1997).

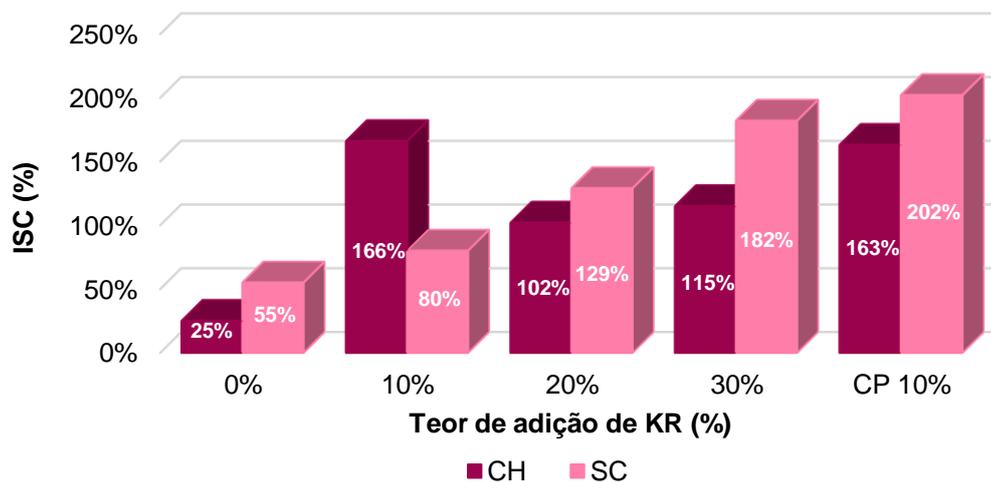
Uma solução tecnológica de baixo custo é a aplicação desses coprodutos industriais como aditivos químicos, a fim de melhorar as características geotécnicas dos solos para utilização em camadas de pavimentos, solucionando a problemática da pavimentação de baixa qualidade e da escassez de solos de adequada resistência mecânica, como também retirando os resíduos industriais do meio ambiente e aplicando-os na engenharia rodoviária. Para entender os mecanismos envolvidos na ação desses aditivos e os efeitos causados no solo é necessário o desenvolvimento de programas experimentais de laboratório e de campo, de modo a garantir que esses materiais alternativos apresentem e forneçam aos solos as propriedades exigidas pelas normas técnicas (MACHADO *et al.*, 2017).

Diante disso, um número crescente de pesquisas já vem sendo realizado, avaliando os efeitos e comprovando a viabilidade técnica de variados coprodutos industriais aplicados no melhoramento de solos para camadas de pavimentação.

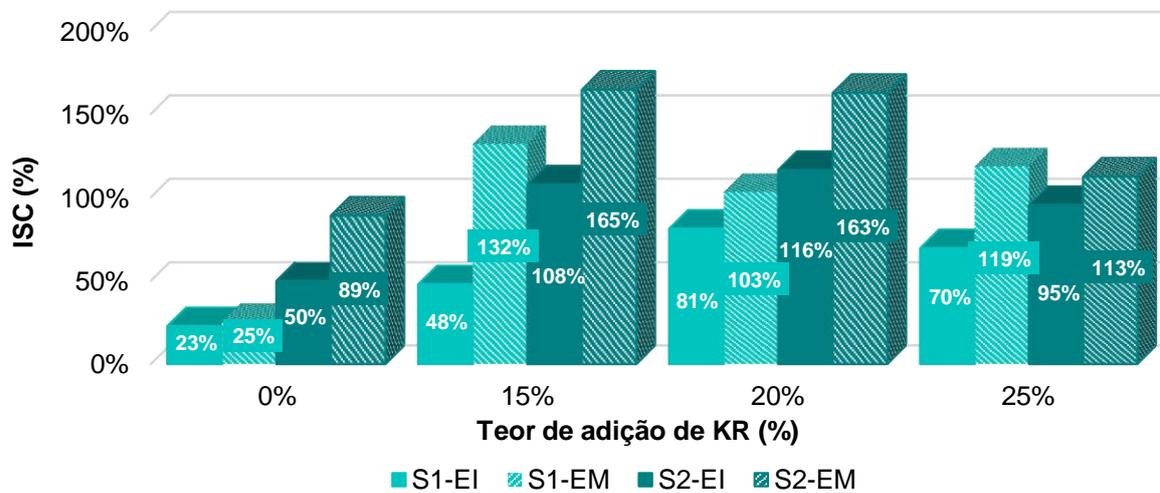
A escória de dessulfuração KR, proveniente da indústria do aço, tem se mostrado promissora no melhoramento de solos. Gonçalves *et al.* (2016), Oliveira *et al.* (2019) e Pires *et al.* (2019) avaliaram o desempenho mecânico da estabilização do solo com adição do KR, por meio do ensaio de índice de suporte Califórnia (ISC). Gonçalves *et al.* (2016) utilizaram dois tipos de solos em sua pesquisa, uma areia siltosa bem graduada com pedregulho de coloração avermelhada (Solo A) e uma areia argilosa com pedregulho de coloração amarelada (Solo B), e para a compactação foi empregada a energia Proctor modificada; como também Oliveira *et al.* (2019), que estudaram um solo argiloso tropical amarelado (CH) e uma areia argilosa rosada (SC), utilizando a energia Proctor modificada na compactação; e Pires *et al.* (2019), os quais trabalharam com um solo argiloso de alta plasticidade (S1) e um solo arenoso com presença de pedregulho e argila, de média plasticidade e bem graduado (S2), compactados na energia Proctor intermediária (EI) e modificada (EM). O teor de KR adicionado variou em cada pesquisa e os resultados estão apresentados na Figura 29, na Figura 30 e na Figura 31, respectivamente.

Figura 29 - Resultados obtidos por Gonçalves *et al.* (2016).

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 30 - Resultados obtidos por Oliveira *et al.* (2019).

Fonte: Elaborado pela autora.

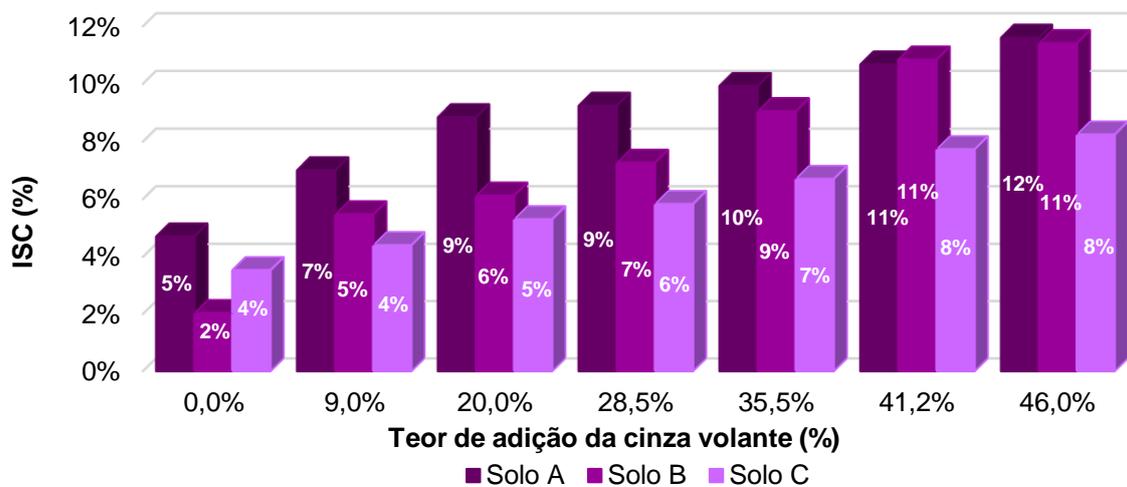
Figura 31 - Resultados obtidos por Pires *et al.* (2019).

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se que o valor do ISC varia com o teor da escória KR, com a energia de compactação e com o tipo de solo. O aumento do teor do coproduto fornece aumento do ISC, até um certo ponto, quando alcança o teor ótimo; quanto maior a energia de compactação maior o ISC; e quanto ao solo, percebe-se que os solos arenosos resultam em valores maiores de ISC com a adição do KR. Portanto, com o aumento da resistência do solo, quanto à capacidade de suporte, conclui-se que esse coproduto é um material alternativo e solução para uma estabilização de solos ecológica, tornando possível seu uso em camadas de pavimentos e indicando uma possível substituição do tradicional cimento Portland por esse coproduto.

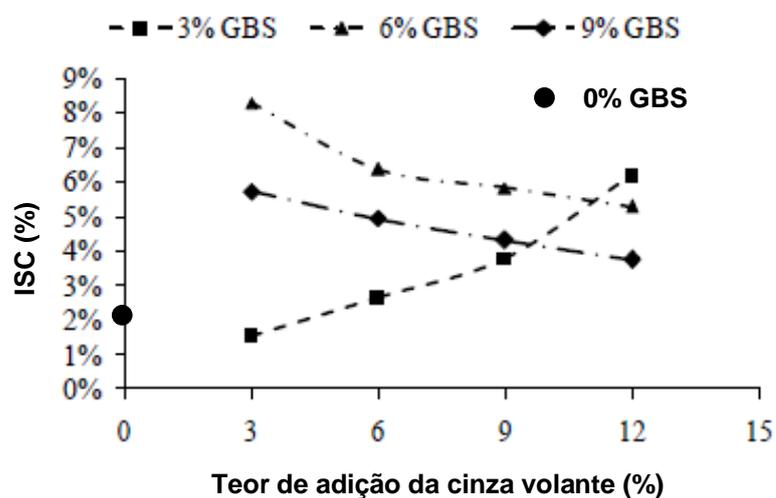
As cinzas volantes, geradas na queima do carvão em termelétricas e indústrias siderúrgicas, estão sendo utilizadas na engenharia geotécnica, sobretudo no melhoramento de solos para aplicação em rodovias. As cinzas volantes de Classe C podem ser utilizadas individualmente com o solo, devido às suas propriedades cimentantes, enquanto as de Classe F podem ser utilizadas em conjunto com um agente cimentício (cal, cimento). Esse coproduto tem sido usado com sucesso para melhorar as características de resistência do solo, principalmente a resistência à compressão e ao cisalhamento dos solos; para estabilizar aterros; no controle das propriedades de expansão dos solos; como agente secante na redução da umidade ótima do solo, permitindo a compactação (FHWA, 2003).

Pesquisas analisaram o efeito da incorporação das cinzas volantes no solo, individualmente e/ou em conjunto com outros tipos de coprodutos, medindo a resistência mecânica, por meio do ensaio de ISC. Prabakar *et al.* (2003) estudaram a adição da cinza volante com diferentes teores em três tipos de solos: argila de baixa compressibilidade – CL (Solo A), silte orgânico de baixa compressibilidade – OL (Solo B) e silte de alta compressibilidade – MH (Solo C). No estudo de Yadu e Tripathi (2013) foi adicionado a um solo mole quatro teores diferentes de cinza volante (CV) e para cada um deles três diferentes teores da escória granulada de alto forno (GBS), resultando em doze misturas; embora o tipo de solo utilizado nesta pesquisa não se aplica à base e à sub-base de pavimentos, o estudo mostra uma possibilidade de uso do coproduto no melhoramento de solo mole para outras aplicações. Santos *et al.* (2018) estudaram um solo arenoso não laterítico com a incorporação de cinza volante (CV) e de escória oxidante de aciaria elétrica (EAF). Os resultados obtidos em cada pesquisa estão apresentados na Figura 32, Figura 33 e Figura 34, respectivamente.

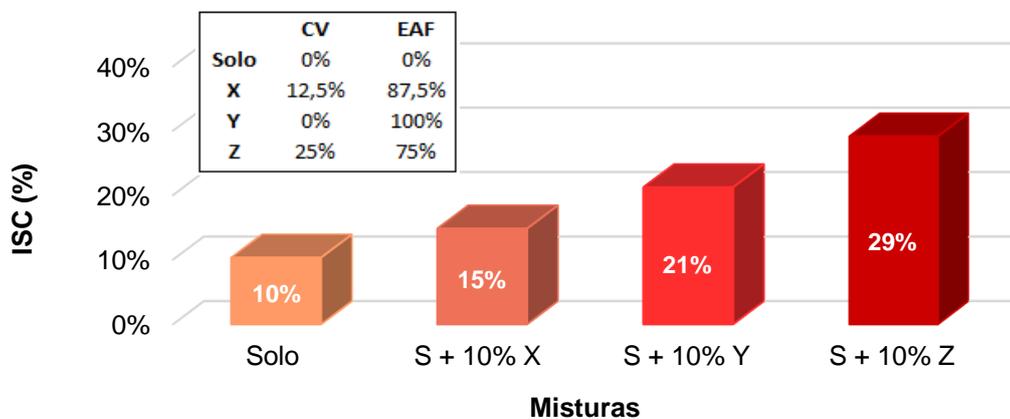
Figura 32 - Resultados obtidos por Prabakar *et al.* (2003).

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 33 - Resultados obtidos por Yadu e Tripathi (2013).



Fonte: Adaptado de Yadu e Tripathi (2013).

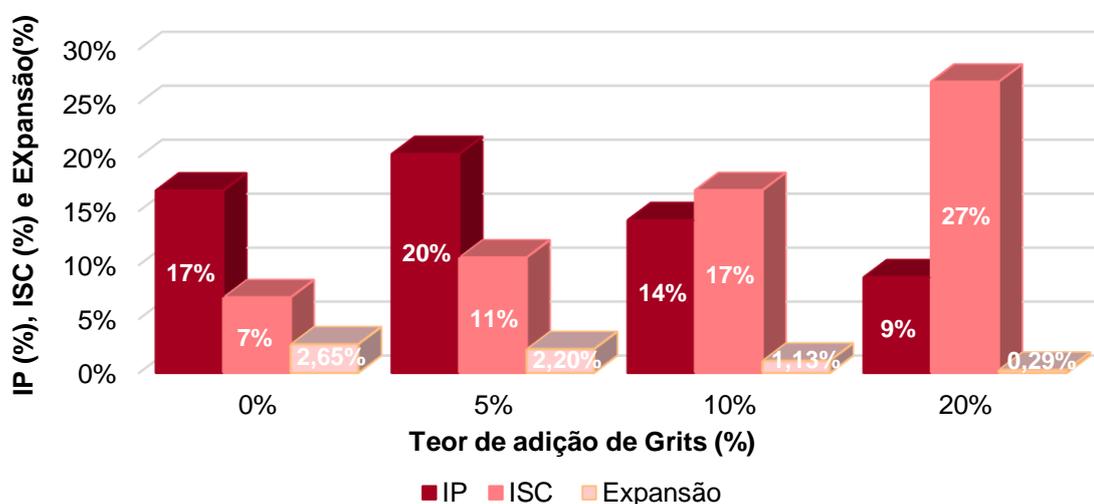
Figura 34 - Resultados obtidos por Santos *et al.* (2018).

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que em todas elas a adição dos coprodutos causou melhora nas características do solo, aumentando, assim, a capacidade de suporte. Na pesquisa de Prabakar *et al.* (2003) o acréscimo do teor da CV causou aumento do ISC e maior efeito no Solo B, visto que o ISC alterou de 2% no solo puro para 11% na mistura com maior teor de adição. No estudo de Yadu e Tripathi (2013) observa-se que a incorporação dos coprodutos aumenta o ISC do solo até certo ponto, com isso a mistura com melhor resultado não é a com maior porcentagem de aditivo, mas a com 3% de CV e 6% de GBS. Santos *et al.* (2018) obtiveram resultados positivos com a adição de CV e EAF ao solo, e foi a mistura Z que causou maior efeito no ISC.

Maia *et al.* (2014) pesquisaram sobre a incorporação do Grits (resíduo da fábrica de celulose, composto, majoritariamente, por óxido de cálcio), com diferentes teores, em um solo arenoso com finos e pedregulho. A partir dos resultados, apresentados na Figura 35, nota-se que esse coproduto melhora o solo, alterando suas propriedades. Ao mesmo tempo que o acréscimo do teor de Grits diminui os valores de índice de plasticidade (IP) e da expansão, a capacidade de suporte (ISC) do solo aumenta.

Figura 35 - Resultados obtidos por Maia *et al.* (2014).

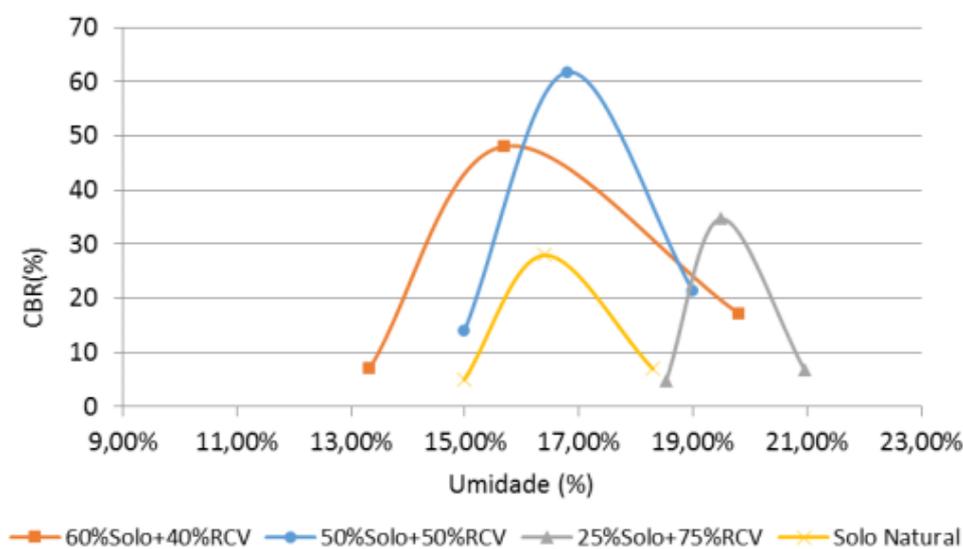


Fonte: Elaborado pela autora.

Silva e Carvalho (2017) e Souza *et al.* (2019) estudaram misturas de um solo siltoso e um solo areno-siltoso, respectivamente, com resíduo de cerâmica vermelha (RDV) proveniente da indústria de produção de blocos cerâmicos, que foi fragmentado manualmente com um soquete de compactação até obter uma graduação granular determinada, e substituiu parcialmente o solo em diferentes proporções. No estudo de Silva e Carvalho (2017) as amostras foram compactadas com a energia Proctor

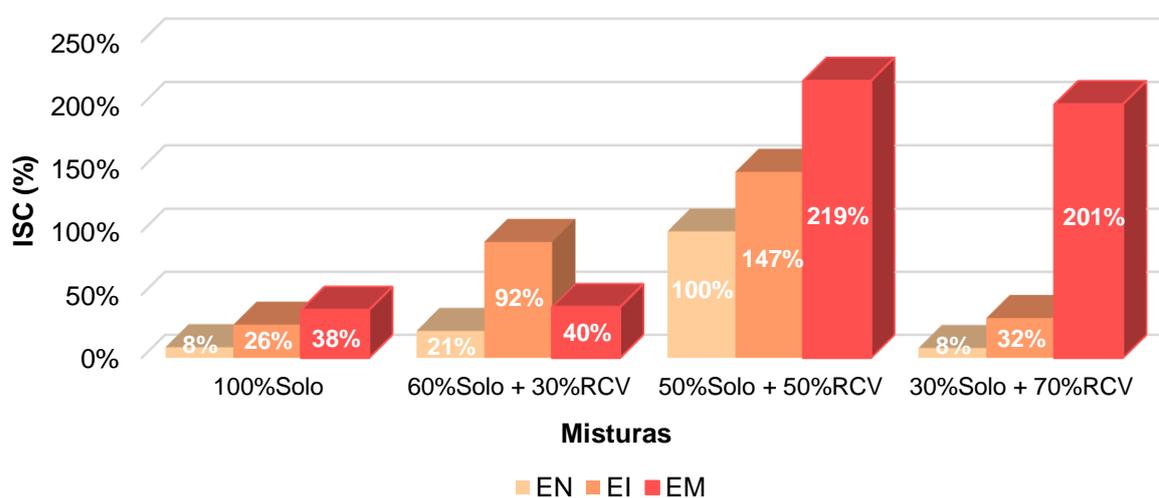
intermediária, enquanto na pesquisa de Souza *et al.* (2019) a compactação foi realizada nas energias Proctor normal (EM), intermediária (EI) e modificada (EM). Os resultados dos ensaios de ISC (CBR) das pesquisas estão apresentados na Figura 37 e na Figura 37, respectivamente.

Figura 36 - Resultados obtidos por Silva e Carvalho (2017).



Fonte: Silva e Carvalho (2017).

Figura 37 - Resultados obtidos por Souza *et al.* (2019).



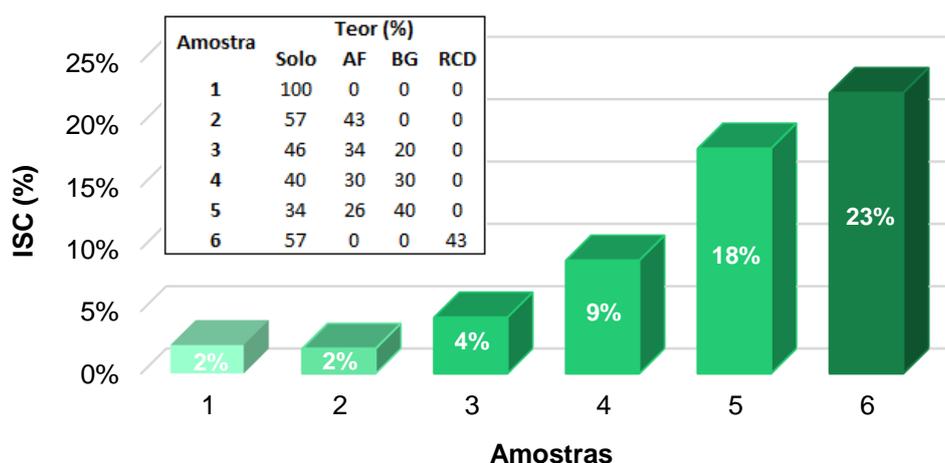
Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com a Figura 36 e a Figura 37, a substituição parcial do solo pelo RCV causou aumento na resistência, medido por meio do ensaio de ISC (CBR), sendo a mistura ideal aquela com 50% de cada material, além de causar a melhoria de outras características do solo, como a queda da expansão. Nota-se ainda que o solo utilizado na pesquisa de Souza *et al.* (2019) foi mais suscetível à estabilização com o RCV,

visto que os valores alcançados de ISC foram consideravelmente maiores que os dos outros autores; e que o ISC aumentou com o aumento da energia de compactação.

Na pesquisa de Leite *et al.* (2016), um solo classificado como pedregulho siltoso (composto majoritariamente por areia) foi parcialmente substituído por diferentes teores e combinações de resíduo de demolição de pavimentos (asfalto fresado – AF, com maior parte de agregado miúdo), brita graduada (BG) e resíduo de construção e demolição (RCD de classe A - resíduos de concreto e tijolos). Como apresentado na Figura 38, o uso dos materiais com o solo aumentou a sua capacidade de suporte, exceto o asfalto fresado, que causou uma leve queda do ISC. Nota-se que quanto maior o teor de brita graduada, maior o ISC, e a mistura com o RCD foi a que obteve maior resistência entre todas estudadas. Os materiais alternativos também diminuíram os valores de expansão do solo.

Figura 38 - Resultados obtidos por Leite *et al.* (2016).



Fonte: Elaborado pela autora.

O melhoramento de solos com a aplicação do coproduto FGD foi citado anteriormente e, também, a necessidade de maiores estudos para ampliação do seu uso em camadas de pavimentação, que é o tema desta pesquisa.

CAPÍTULO 3

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A metodologia desta pesquisa consiste em um programa experimental, por meio de ensaios laboratoriais, a fim de alcançar os objetivos descritos. A partir dos ensaios realizados foi estudado o comportamento mecânico das misturas de solo melhorado com diferentes teores de cimento e pó FGD.

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados nesta pesquisa estão apresentados na Figura 39 e nos itens seguintes.

Figura 39 - Materiais utilizados na pesquisa.



Fonte: Autora.

3.1.1 Solo

O solo foi coletado na jazida localizada no km 373 da BR-101 Sul, no município de Iconha-ES. O solo dessa jazida de empréstimo, denominado de JP6, foi o escolhido para esta dissertação por, de acordo com o estudo de Furieri (2019) e de outros pesquisadores, apresentar resultados satisfatórios quando adicionado o cimento para o melhoramento do solo. Assim, conhecendo esses resultados positivos, pôde-se ter um embasamento para a adição do pó FGD, além do cimento.

3.1.2 Pó FGD

O coproduto pó FGD utilizado nesse estudo é gerado no processo FGD da SunCoke Energy, localizado na empresa ArcelorMittal Tubarão no município da Serra-ES e foi fornecido por esta empresa. A tecnologia empregada na dessulfurização de gases nesta empresa é a semisseca e na Figura 40 o processo é enumerado na planta real da coqueria.

Figura 40 - Central da SunCoke Energy com detalhe para a área do processo FGD.



Fonte: Adaptado por Teixeira *et al.* (2018) da SunCoke (2015).

Teixeira *et al.* (2018) descreveu o processo, em que os efluentes atmosféricos gerados na queima do carvão mineral na coqueificação são conduzidos a uma torre absorvedora (1), que é o local onde a solução de hidróxido de cálcio é lançada (6). O contato desses produtos, os efluentes e a solução geram os subprodutos, que são

retidos em filtros de manga (2) e armazenados para destinação (5), enquanto o gás tratado (dessulfurizado) é liberado nas chaminés (4).

3.1.3 Cimento

O Cimento Portland CP III – 40 – RS foi o selecionado a ser utilizado nesta pesquisa e foi adquirido pelo Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFES. Este cimento é comumente empregado em obras de pavimentação para estabilização de solos e foi escolhido por ser o mesmo utilizado na pesquisa de Furieri (2019). De acordo com a norma NBR 16697/18 (ABNT, 2018), a proporção em massa para composição desse tipo de cimento é: 65% - 25% de clínquer e gesso, 35% - 75% de escória granulada de alto-forno e 0% - 10% de material carbonático. Este é o cimento mais ecológico de todos produzidos no Brasil, pelo fato de preservar as jazidas naturais de matéria-prima, já que aproveita o rejeito das indústrias siderúrgicas (escória de alto-forno), minimizando o impacto ambiental tanto na indústria siderúrgica quanto na do cimento, reduzindo também, expressivamente, a emissão de CO₂ na atmosfera durante o processo (CSN, 2016).

3.2 MÉTODOS

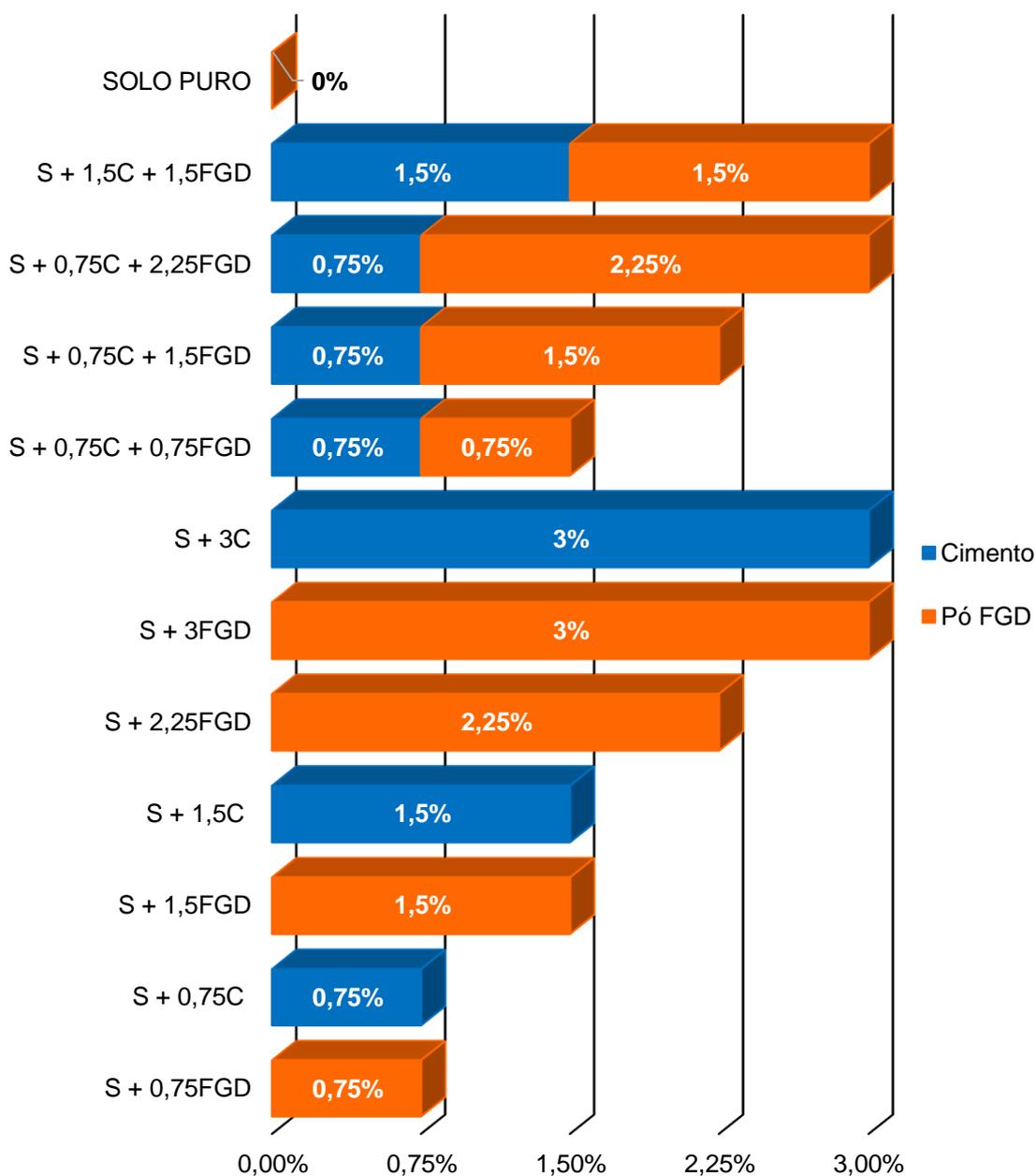
O programa experimental foi dividido em duas etapas:

- Etapa I: caracterização física, química e mineralógica do solo, do cimento, do pó FGD e das misturas;
- Etapa II: caracterização mecânica do solo e das misturas.

Foram estudadas doze misturas (Figura 41), mantendo a quantidade de solo e alterando o teor de adição de cimento e de pó FGD (em relação ao peso seco de solo), com o objetivo de minorar o uso do cimento e maximizar o uso do pó FGD, associado aos parâmetros de desempenho mecânico. Inicialmente foi feita uma adição total de 3%, considerando que este foi um teor de cimento satisfatório utilizado na pesquisa de Furieri (2018), uma adição com metade de cada aditivo e outra diminuindo pela metade o teor de cimento. Posteriormente reduziu-se 0,75% o teor de adição total, sempre mantendo os 0,75% de cimento na mistura, sendo uma delas com 2,25% e outra com 1,5% de adição total. E, também, foram estudadas as misturas com os aditivos individualmente (solo/cimento e solo/FGD), para efeito comparativo e para analisar a influência de cada material nas misturas solo/cimento/FGD.

As misturas estão detalhadas na Figura 41, especificando os teores de adição de cada uma delas. Os materiais serão representados por: S (solo JP6), C (cimento CP III – 40 – RS) e FGD (pó FGD). No Quadro 3 está apresentado o programa experimental, detalhando os ensaios que foram realizados em cada etapa e suas respectivas normas.

Figura 41 - Adição das misturas.



Fonte: Autora.

Quadro 3 - Programa Experimental.

Etapa	Ensaio	Norma	Amostra
I	Granulometria por Peneiramento e Sedimentação	NBR 7181/16 (ABNT, 2016)	Solo, Pó FGD e Misturas
	Massa Específica Real dos Grãos	NM 52/09 (ABNT, 2009) NM 53/09 (ABNT, 2009)	
	Limites de Liquidez	NBR 6459/17 (ABNT, 2017)	Solo e Misturas
	Limites de Plasticidade	NBR 7180/16 (ABNT, 2016)	
	Limites de Contração	NBR 7183/82 (ABNT, 1982)	
	Teor de Matéria Orgânica	NBR 13600/96 (ABNT, 1996)	Solo e Pó FGD
	Potencial Hidrogeniônico (pH)	Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017)	Solo, Cimento e Pó FGD
	Análise Química de Complexo Sortivo	Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017)	
	Espectometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)		
	Difratometria de Raios-X (DRX)		
	Mini-MCV	ME 258/94 (DNER, 1994)	Solo, S+3C e S+3FGD
	Perda de Massa por Imersão	ME 256/94 (DNER, 1994)	
	Dosagem Físico-Química de Solo-cimento	ME 414/19 (DNIT, 2019)	Solo/cimento e Solo/FGD
II	Compactação	NBR 7182/16 (ABNT, 2016)	Solo e Misturas
	Índice de Suporte Califórnia (ISC)	NBR 9895/16 (ABNT, 2016)	
	Expansão	NBR 9895/16 (ABNT, 2016)	
	Expansibilidade	ME 160/12 (DNIT, 2012)	Solo, S+3C e S+3FGD

Fonte: Autora.

3.2.1 Etapa I – Caracterização Física, Química e Mineralógica

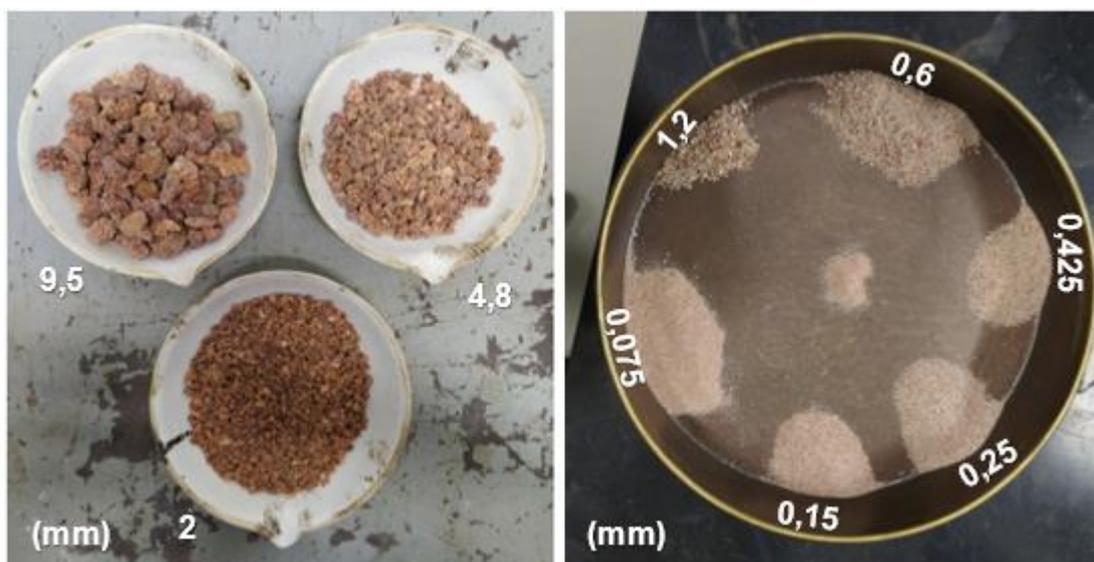
Nessa etapa foi realizada a caracterização física, química e mineralógica do solo, do cimento e do pó FGD individualmente, de forma a estudar as características de cada material. E a caracterização física das misturas, a fim de analisar as mudanças ocorridas na granulometria e na plasticidade causadas pela incorporação dos materiais.

3.2.1.1 Granulometria por Peneiramento e Sedimentação

O ensaio de granulometria completa foi realizado para o solo puro, o pó FGD e as misturas, conforme orientação da norma NBR 7181/16 (ABNT, 2016).

Na Figura 42 estão exemplificadas as frações granulométricas do solo ensaiado, com as frações retidas nas peneiras indicadas nos peneiramentos grosso e fino.

Figura 42 - Ensaio de granulometria do solo.



Fonte: Autora.

3.2.1.2 Massa Específica Real dos Grãos

O ensaio de massa específica real dos grãos foi realizado para as amostras de solo, pó FGD e misturas, das frações passantes e retidas na peneira de nº 4 (4,8 mm), por meio das normas NM 52/09 e NM 53/09 (ABNT, 2009), respectivamente. Na Figura 43 está apresentada a etapa de remoção dos vazios do solo, por meio da bomba à vácuo, no ensaio de massa específica real dos grãos.

Figura 43 - Ensaio de massa específica real dos grãos.



Fonte: Autora.

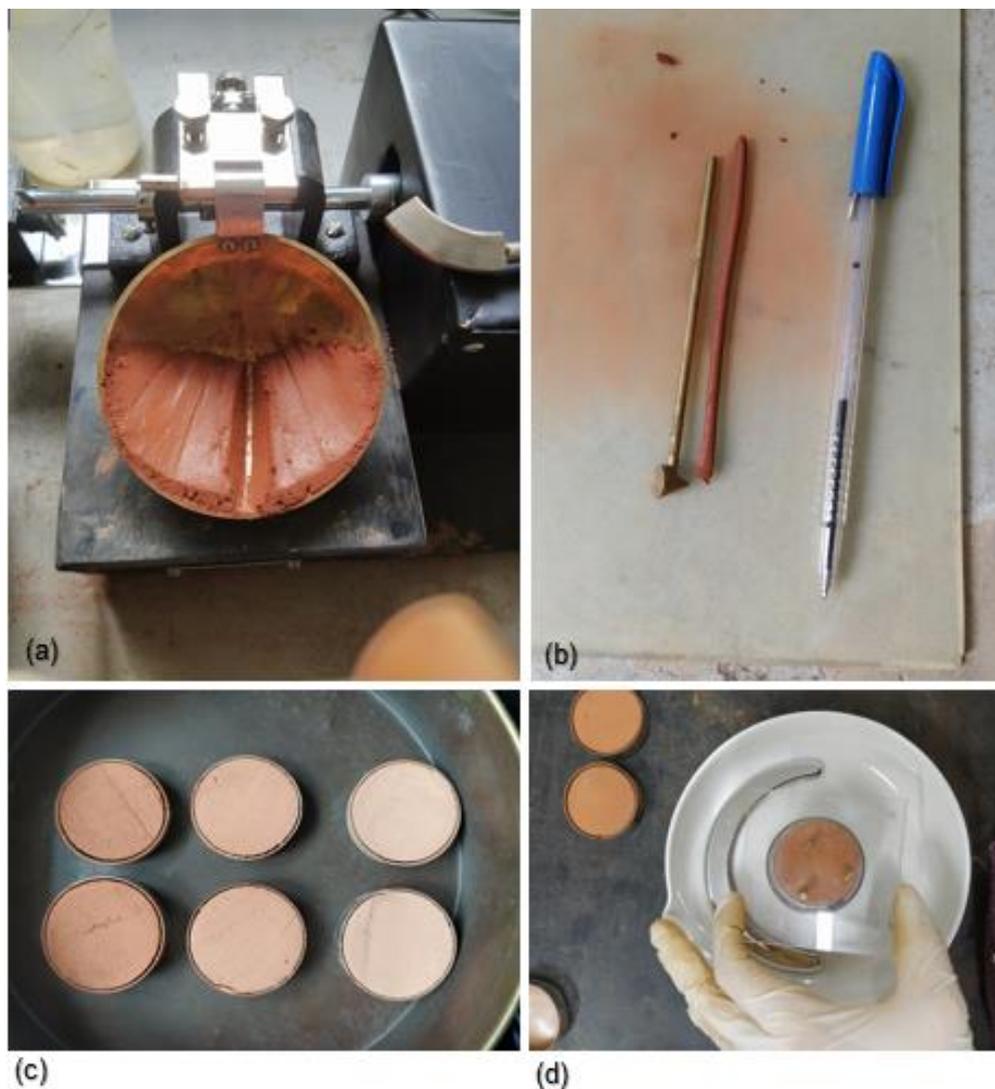
3.2.1.3 Limites de Consistência

Também conhecidos como Limites de Atterberg, os ensaios de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e limite de contração (LC) permitem determinar os limites de consistência do solo, por meio das normas NBR 6459/17 (ABNT, 2017), NBR 7180/16 (ABNT, 2016) e NBR 7183/82 (ABNT, 1982), respectivamente. A consistência do solo é gerada pelas manifestações de forças físicas de adesão e coesão, que atuam segundo a variação de umidade, e descreve um estado físico do solo, ou seja, o grau de ligação entre as partículas (VASCONCELOS *et al.*, 2010).

O limite de liquidez é o valor de umidade no qual o solo passa do estado líquido para o estado plástico, ou seja, ele perde a capacidade de fluir, podendo ainda ser moldado e conservar sua forma. O limite de plasticidade é o teor de umidade no qual o solo passa do estado plástico para o estado semissólido e começa a se fraturar em determinada condição. E o limite de contração é o valor de umidade no qual o solo

passa do estado semissólido para o estado sólido, isto é, o teor no qual não ocorre mais decréscimo de volume mesmo se continuar perdendo umidade (ALVES, 2010).

Figura 44 - Ensaio de limites de consistência: (a) limite de liquidez, (b) limite de plasticidade, (c) e (d) limite de contração.



Fonte: Autora.

Os ensaios de LL, LP e LC (Figura 44) foram realizados para as doze misturas. Com esses ensaios pôde-se obter os índices de plasticidade (IP) de todas elas, por meio da diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, e ele representa a dimensão da gama de valores de umidade na qual o solo apresenta um comportamento moldável (DIAS, 2012).

Adicionalmente realizou-se o cálculo da atividade coloidal (AC), definida por Skempton (1953) como a razão entre o índice de plasticidade e a porcentagem da fração argila

(grãos com diâmetros menores que 0,002 mm) constituinte do solo, para cada mistura. Este parâmetro indica o potencial de variação de volume ou da atividade da argila, que varia entre inativa, normal e ativa, e ajuda a conhecer, por via indireta, a composição mineralógica da fração argila, com os valores conhecidos da atividade dos principais argilominerais.

3.2.1.4 Teor de Matéria Orgânica

Neste trabalho foi determinado o teor de matéria orgânica do solo e do pó FGD (Figura 45), conforme orientação da norma NBR 13600/96 (ABNT, 1996).

Figura 45 - Amostras de solo e pó FGD na mufla para ensaio de teor de matéria orgânica.



Fonte: Autora.

O teor de matéria orgânica do solo é um dado importante, visto que este influencia na resistência da mistura solo/cimento. De acordo com o estudo de Ruver *et. al* (2014), a resistência do solo-cimento cai consideravelmente com o aumento do teor de matéria orgânica, sendo 2% o maior teor estudado na pesquisa. A matéria orgânica interfere nas reações químicas essenciais que fornecem o melhoramento das características mecânicas da mistura, como o impedimento da hidratação do cimento, responsáveis pela resistência desse material.

3.2.1.5 Potencial Hidrogeniônico (pH)

O ensaio de determinação do pH foi realizado para amostras de solo, cimento e pó FGD, pelo método em água (Figura 46), conforme o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017).

Figura 46 - Ensaio de pH: (a) solo e (b) cimento CP III.



(a)

(b)

Fonte: Autora.

O objetivo do ensaio é determinar a acidez, neutralidade ou alcalinidade/basicidade do material, em uma escala com valores de 0 a 14, sendo 7 o valor neutro. Qualquer valor abaixo de 7 representa um grau de acidez e acima de 7 o pH está alcalino/básico. Quanto mais distante do 7, para menos ou para mais, mais ácido ou básico ele será, respectivamente. Esse parâmetro tem influência nas trocas catiônicas, e consequentemente nas reações de interação solo-estabilizante.

3.2.1.6 Análise Química de Complexo Sortivo

O ensaio de análise química de complexo sortivo foi realizado para as amostras de solo, cimento e pó FGD, além da cal hidratada tipo I (CHI) para efeito comparativo, conforme o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017). Os resultados desse ensaio apresentam as concentrações de hidrogênio (H), alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), sódio (Na), enxofre (S), fósforo (P), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn). Como também a soma de bases; a

capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva; a CTC total; o índice de saturação do cálcio, magnésio, potássio e sódio; e a saturação de bases.

Segundo a EMBRAPA (2017), o complexo sortivo de um solo consiste no conjunto de partículas trocadoras de íons desse material. Os íons carregados positivamente, são denominados de cátions, como o cálcio (Ca^{2+}), o magnésio (Mg^{2+}), o potássio (K^+), o sódio (Na^+), o alumínio (Al^{3+}), o ferro (Fe^{2+}), o manganês (Mn^{2+}), o cobre (Cu^{2+}), o zinco (Zn^{2+}) e o hidrogênio (H^+). A capacidade de troca catiônica é a capacidade do solo de manter esses cátions, os quais são mantidos pela argila carregada negativamente e pelas partículas de matéria orgânica no solo, por meio de forças eletrostáticas (partículas negativas do solo atraem os cátions positivos). Os cátions na CTC das partículas do solo são facilmente trocáveis com outros cátions, portanto a CTC de um solo representa a quantidade total de cátions trocáveis que o solo pode adsorver. Esta é uma propriedade importante na estabilização de solos.

Ainda de acordo com a EMBRAPA (2017) tem-se que a soma de bases trocáveis (S) é o somatório dos teores das bases de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ ; a CTC efetiva é determinada no pH natural do solo e é calculada somando-se as quantidades trocáveis dos cátions já inclusos na soma de bases trocáveis (S) e Al^{3+} . O valor da CTC total é o total de cargas negativas que o solo pode adsorver, isto é, a capacidade de trocas total de cátions, e é determinado pela soma da CTC efetiva e H^+ , que também pode ser apresentada como a soma entre o valor S e a acidez potencial (H^+ + Al^{3+}). E a porcentagem de saturação indica a proporção da CTC do solo que é preenchida pelas bases trocáveis, e é calculada pela razão entre a soma de bases e a CTC total.

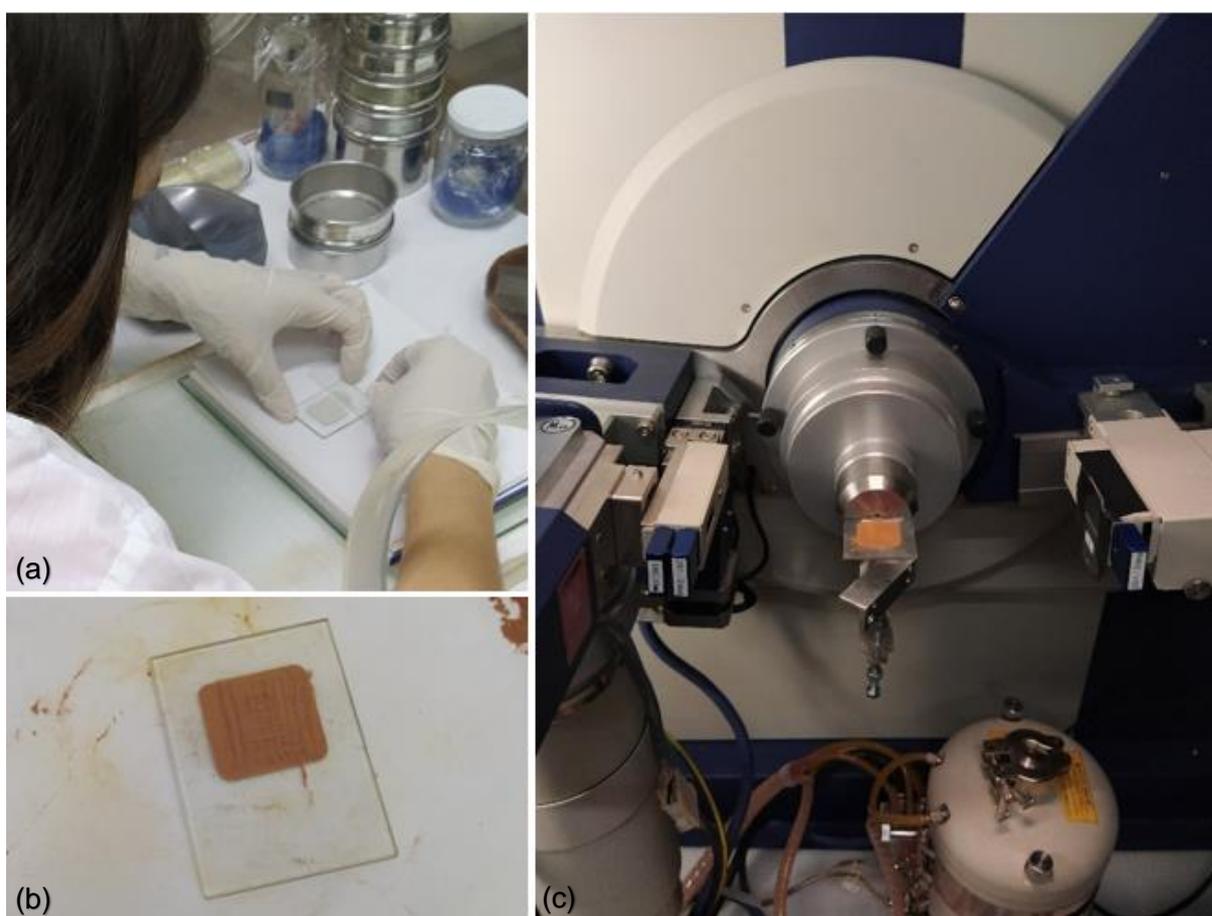
3.2.1.7 Espectometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)

Foi feita uma análise específica do solo, do cimento e do pó FGD, avaliando suas composições químicas, pelo ensaio de espectrometria por fluorescência de raios-X, realizado de acordo com o manual do equipamento DWS Philips de modelo PW 2404. Esse ensaio fez uma determinação quantitativa dos elementos atômicos e apresentou os resultados em função de óxidos.

3.2.1.8 Difractometria de Raios-X (DRX)

Para compreender e prever o comportamento dos materiais é preciso conhecer sua mineralogia, que é obtida por meio do ensaio mineralógico de difratometria de raios-X. Amostras de solo, cimento e pó FGD moídas no almofariz até atingir o diâmetro máximo de 0,075 mm foram submetidas a esse ensaio, sendo dispostas sobre uma fina lâmina de vidro e utilizando o equipamento difratômetro de raios-X de marca Rigaku e modelo Ultima IV, com alvo de molibdênio (Mo) (Figura 47).

Figura 47 - Ensaio de difratometria de raios-X: (a) e (b) preparação da amostra na lâmina de vidro e (c) amostra no equipamento para o ensaio.



Fonte: Autora.

3.2.1.9 Classificações

A partir dos ensaios de caracterização física, pôde-se classificar as misturas de acordo com dois tipos de sistemas de classificação tradicionais: Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e *Highway Research Board* (HBR), adotado pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

Além da classificação convencional, foi feita a classificação do solo pelo método MCT (*Tropical Compact Miniature*), por meio da norma CLA 259/96 (DNER, 1996). As misturas S+3C e S+3FGD também foram classificadas, para analisar o efeito da incorporação dos materiais e foi escolhida essa porcentagem de adição, de 3%, por ser a maior aqui estudada e apresentar maior alteração das características. O sistema MCT de classificação dos solos identifica as diferenças entre os tipos de solos tropicais e prevê suas qualidades, classifica os solos tropicais em lateríticos e não lateríticos (saprolíticos) e foi desenvolvido especialmente para estudar solos empregados em obras viárias, como já explicado anteriormente.

Figura 48 - Ensaio para classificação MCT: (a) Mini-MCV e (b) perda de massa por imersão.



Fonte: Autora.

A classificação pelo método MCT é feita por meio dos ensaios Mini-MCV e perda de massa por imersão (Figura 48), por meio das normas ME 258/94 e ME 256/94 (DNER, 1994), respectivamente, que determinam o comportamento laterítico ou não do solo e as propriedades dos grupos integrantes.

3.2.1.10 Dosagem Físico-química de Solo-cimento

O ensaio de dosagem físico-química de solo-cimento define o teor mínimo de cimento necessário para estabilizar completamente um determinado solo. Esse método é baseado na interação elétrica entre as partículas de cimento e argila e gera alterações volumétricas, como visto na Figura 50.

Rodrigues (1992) explica que as partículas de cimento se comportam eletricamente carregadas na mistura e causam um aumento da condutividade elétrica da massa solo-cimento compactada. O conjunto dessa interação com coloides carregados negativamente e da hidratação do cimento geram mudanças físico-químicas ligeiras no sistema. E, assim, ocorrem variações volumétricas consideráveis na presença de água, e a partir delas é possível determinar o teor de cimento que produz a mistura estável.

O ensaio foi realizado conforme a norma ME 414/19 (DNIT, 2019). Em cada proveta, contendo a mesma quantidade de solo, foi adicionado um teor distinto de cimento com variação de 1%, iniciando com o teor de 0% (solo puro) até o de 4% (Figura 49). As misturas foram homogeneizadas com água destilada e a cada 24 horas era feita a agitação. Após o repouso de, pelo menos, 2 horas realizava-se a leitura do volume ocupado pelo sedimento nas provetas. No oitavo dia o ensaio foi finalizado, com a obtenção de leituras iguais ou decrescentes por dois dias consecutivos em cada proveta, que é a regra de finalização do ensaio. O teor de cimento que resulta na maior variação volumétrica é indicativo de mistura estável, que conduz à estabilização completa do solo. Nas mesmas proporções, o ensaio foi realizado substituindo-se o cimento pelo pó FGD, que também foi finalizado com 8 dias. A variação volumétrica é calculada por meio da Equação 18.

$$\Delta V (\%)_{\text{teor}} = (V_{\text{máx (teor)}} - V_{\text{máx (0\%)}}) / V_{\text{máx (0\%)}} \quad \text{Equação (18)}$$

Em que:

$\Delta V(\%)_{\text{teor}}$ Variação volumétrica percentual para cada teor de cimento;

$V_{\text{máx (teor)}}$ Volume máximo lido na proveta para cada teor de cimento;

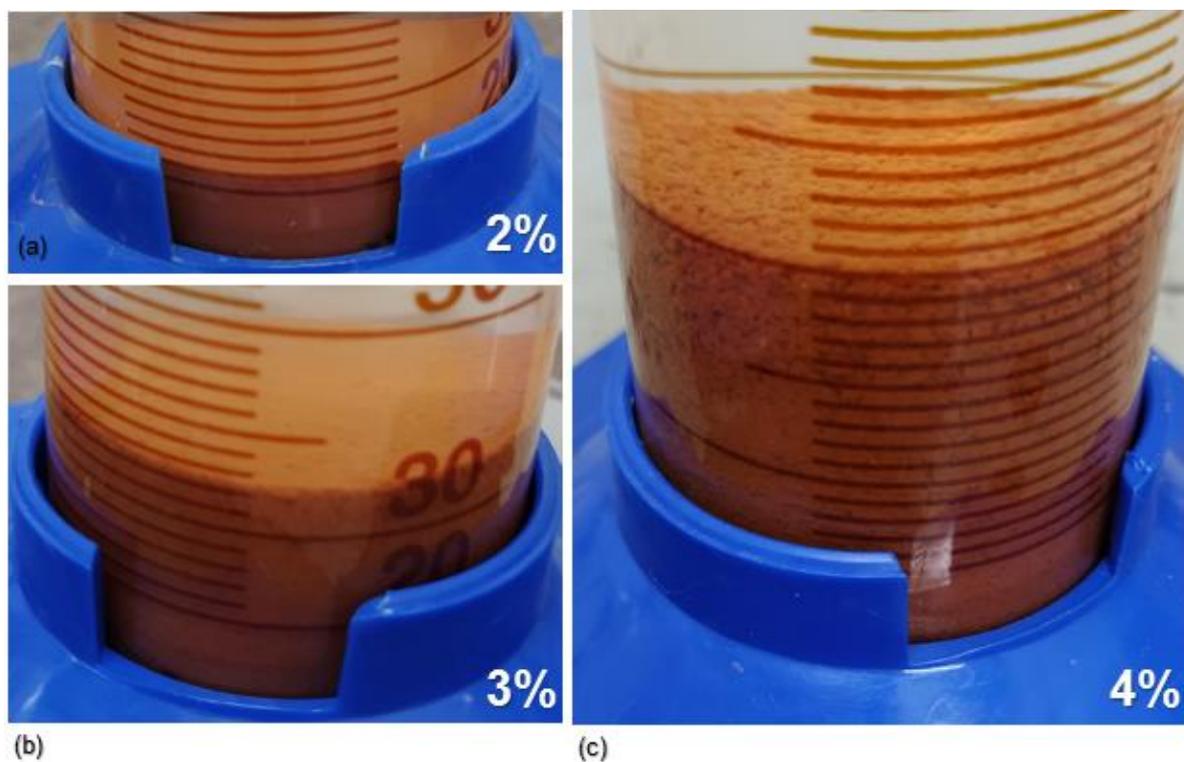
$V_{\text{máx (0\%)}}$ Volume máximo lido na proveta para o solo puro.

Figura 49 - Ensaio de dosagem físico-química de solo-cimento no primeiro dia.



Fonte: Autora.

Figura 50 - Ensaio de dosagem físico-química de solo-cimento no oitavo dia: (a) 2%, (b) 3% e (c) 4% de teor de cimento.



Fonte: Autora.

Este ensaio não foi realizado com o objetivo de determinar o teor de cimento a ser estudado, pois a pesquisa trata de estabilização do tipo solo melhorado com cimento e não do tipo solo-cimento, o qual a norma se aplica, e o teor encontrado seria maior do que o utilizado em solo melhorado com cimento. O real objetivo foi avaliar a variação de volume à medida em que o teor de estabilizante cresce, comparando o comportamento do cimento e do pó FGD. E a variação do teor escolhida foi de 1% para os valores ficarem mais próximos dos teores utilizados nesta dissertação.

3.2.2 Etapa II – Caracterização Mecânica

Feita a caracterização completa dos materiais e das misturas, foi, então, estudado o efeito da incorporação do pó FGD e do cimento nos parâmetros mecânicos. Para isso foram realizados os ensaios mecânicos de compactação, índice de suporte Califórnia (ISC), expansão e expansibilidade.

3.2.2.1 Compactação

O ensaio de compactação tem por finalidade determinar a umidade ótima e a massa específica aparente seca, dados fundamentais e necessários para a moldagem dos corpos de prova que serão submetidos ao ensaio de ISC e expansão, e foi realizado conforme a norma NBR 7182/16 (ABNT, 2016).

Figura 51 - Ensaio de compactação: (a) compactação manual e (b) amostras de umidade.



Fonte: Autora.

Para cada mistura, das doze ensaiadas, foram moldados cinco corpos de prova em cinco teores de umidades diferentes, compactados manualmente na energia Proctor intermediária (5 camadas de 26 golpes cada), utilizando cilindros e soquetes do tipo grande (Figura 51).

3.2.2.2 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

O ensaio de índice de suporte Califórnia (ISC) avalia a resistência do solo para fins de pavimentação. O ISC é determinado pela relação entre a pressão necessária para penetrar um pistão cilíndrico padronizado em um corpo de prova saturado de um determinado solo e a pressão necessária para penetrar o mesmo pistão em uma brita graduada padrão.

Este ensaio foi realizado conforme orientação da norma NBR 9895/16 (ABNT, 2016) e foram utilizados os mesmos corpos de prova do ensaio de compactação das 12 misturas. Após a moldagem, os cilindros ficaram imersos num tanque com água por 4 dias (Figura 52a). Dado esse período realizou-se o rompimento das amostras, por meio da penetração com um pistão cilíndrico (Figura 52b).

Figura 52 - Ensaio de ISC e expansão: (a) imersão dos cilindros e (b) penetração dos corpos de prova.



Fonte: Autora.

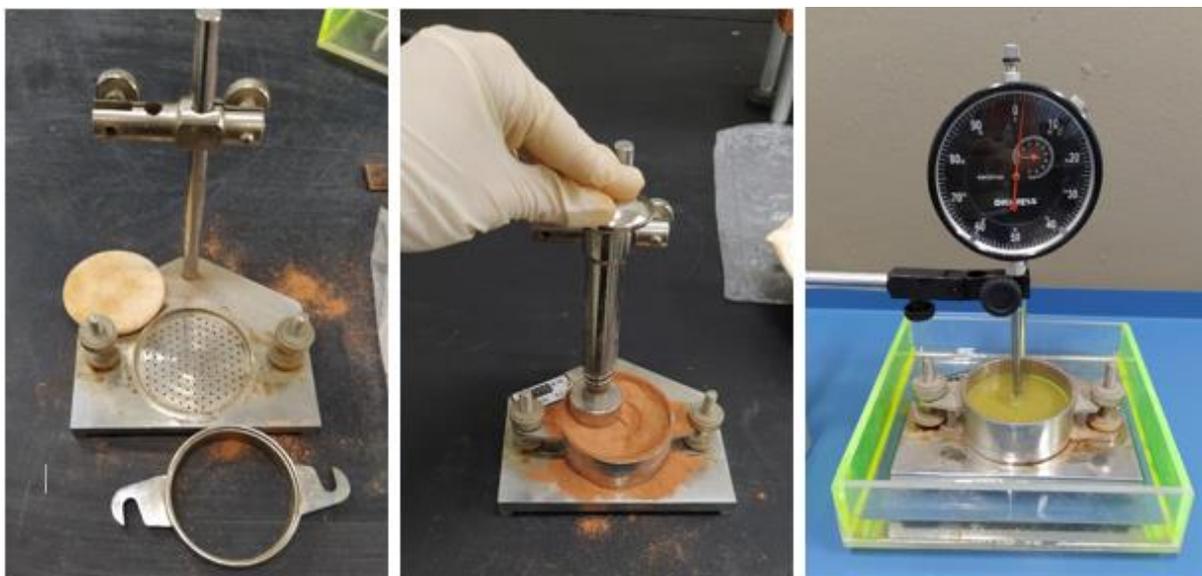
3.2.2.3 Expansão

No ensaio de expansão, realizado conforme a norma NBR 9895/16 (ABNT, 2016), foram feitas leituras dos extensômetros a cada 24 horas nos cilindros imersos em água (Figura 52a) das doze misturas, a partir do momento de imersão até o dia do ensaio de penetração, após sua saturação completa com os 4 dias imersos, determinando, assim, o valor da expansão de cada amostra.

3.2.2.4 Expansibilidade

O ensaio de expansibilidade (Figura 53), realizado por meio da norma ME 160/12 (DNIT, 2012), foi feito para as mesmas amostras da classificação MCT (SOLO PURO, S+3C e S+3FGD) e é um dos parâmetros a serem atendidos por solos lateríticos utilizados em base de pavimentação. Neste ensaio é determinada a variação de volume do solo, compactado seco, quando em contato com a água absorvida por capilaridade. O teor de 3% foi o maior utilizado nesta pesquisa e, portanto, representaria uma possível maior variação volumétrica neste ensaio.

Figura 53 - Ensaio de expansibilidade.



Fonte: Autora.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

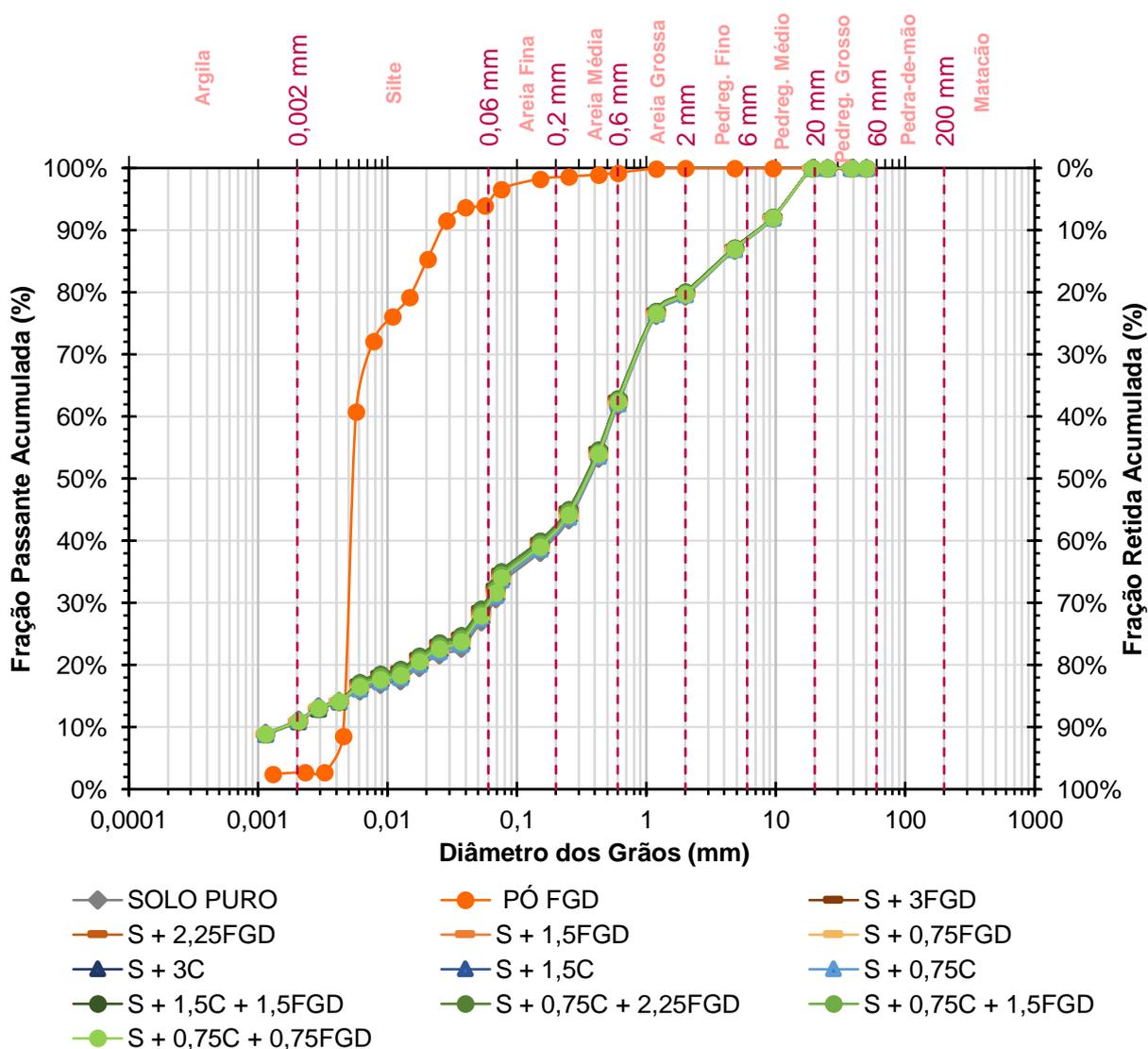
Neste capítulo são apresentados todos os resultados e as principais discussões realizadas no desenvolvimento desta pesquisa.

4.1 ETAPA I: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MINERALÓGICA

4.1.1 Granulometria por Peneiramento e Sedimentação

Na Figura 54 estão apresentadas as curvas granulométricas do solo, do pó FGD e das misturas estudadas nesta dissertação.

Figura 54 - Curvas granulométricas das amostras.



Fonte: Autora.

Na Tabela 3 está apresentada a composição granulométrica das amostras, de acordo com as faixas convencionais existentes na engenharia geotécnica e peneiras utilizadas: areia, silte, areia fina, areia média, areia grossa, pedregulho fino e pedregulho grosso.

Tabela 3 - Granulometria das amostras.

Tamanho dos Grãos	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedr. Fino	Pedr. Médio	Pedr. 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
SOLO PURO	11,1%	17,7%	12,0%	21,0%	17,7%	8,7%	11,9%	0,0%
PÓ FGD	2,7%	91,8%	4,0%	0,8%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%
S+1,5C+1,5FGD	10,8%	19,9%	11,8%	20,4%	17,1%	8,4%	11,5%	0,0%
S+0,75C+2,25FGD	10,8%	19,9%	11,8%	20,4%	17,1%	8,4%	11,5%	0,0%
S+0,75C+1,5FGD	10,9%	19,4%	11,8%	20,5%	17,3%	8,5%	11,6%	0,0%
S+0,75C+0,75FGD	11,0%	18,8%	11,9%	20,7%	17,4%	8,5%	11,7%	0,0%
S+3C	10,8%	19,9%	11,8%	20,4%	17,1%	8,4%	11,5%	0,0%
S+3FGD	10,8%	19,9%	11,8%	20,4%	17,1%	8,4%	11,5%	0,0%
S+2,25FGD	10,9%	19,4%	11,8%	20,5%	17,3%	8,5%	11,6%	0,0%
S+1,5C	11,0%	18,8%	11,9%	20,7%	17,4%	8,5%	11,7%	0,0%
S+1,5FGD	11,0%	18,8%	11,9%	20,7%	17,4%	8,5%	11,7%	0,0%
S+0,75C	11,0%	18,3%	11,9%	20,8%	17,5%	8,6%	11,8%	0,0%
S+0,75FGD	11,0%	18,3%	11,9%	20,8%	17,5%	8,6%	11,8%	0,0%

Fonte: Autora.

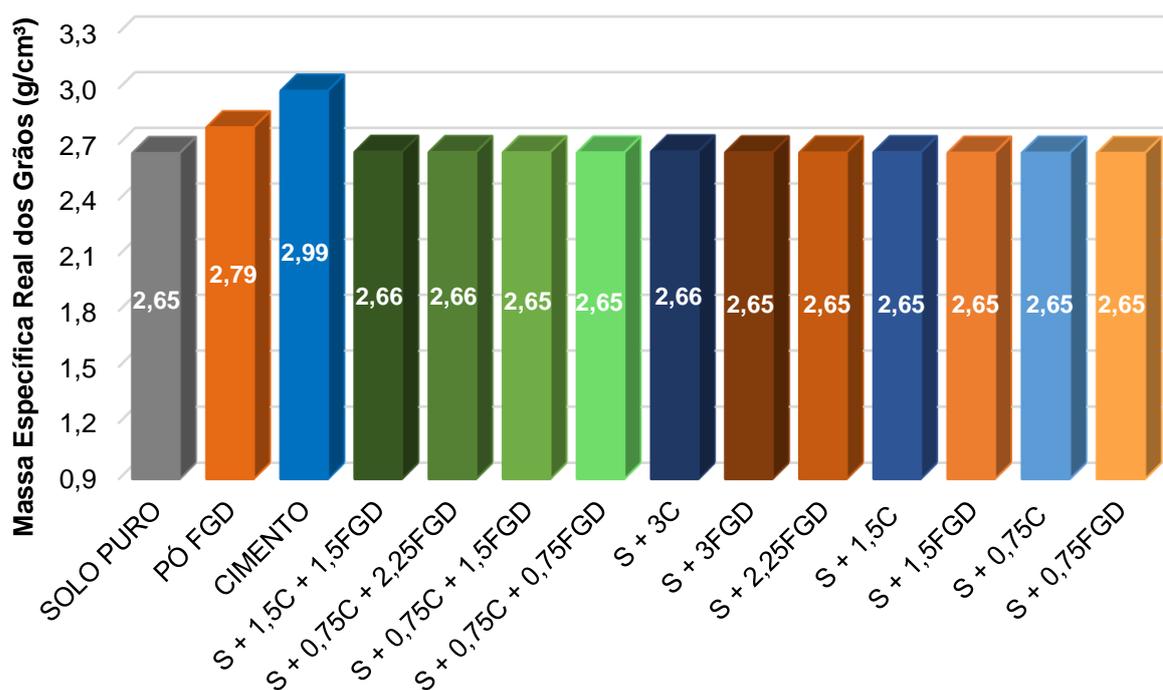
A partir dos resultados, tem-se que o solo é um material bem-graduado e é constituído em pouco mais da metade (59,3%) por material grosso, de dimensões de: areia média, areia grossa, pedregulho médio e pedregulho grosso; e os 40,7% restantes estão distribuídos nas faixas granulométricas de areia fina, silte a argila. O pó FGD é constituído, majoritariamente, por partículas de dimensão de silte (91,8%), por 4% de partículas de dimensão de areia fina e 2,7% de partícula de dimensão de argila, sendo, assim, um pó muito fino, corroborando com os valores encontrados na literatura, principalmente com FHWA (2016).

Nota-se que a adição do pó FGD e do cimento no solo praticamente não alterou a curva granulométrica. Isso ocorreu devido à baixa porcentagem dos aditivos nas misturas. Mesmo que quase imperceptível, houve um decréscimo, em todas as faixas granulométricas, exceto no silte, com o aumento do teor de adição, pelo fato de os aditivos serem constituídos em menor quantidade que o solo pelos grãos dessas granulometrias. Já na faixa granulométrica de silte, o aumento da adição causa um acréscimo pouco mais perceptível no valor dessa faixa, já que os aditivos são constituídos por mais de 90% dessa granulometria, valor muito maior que do solo.

4.1.2 Massa Específica Real dos Grãos

Na Figura 55 estão apresentados os valores de massa específica do solo, do pó FGD, do cimento e das misturas.

Figura 55 - Massa específica real dos grãos das amostras.



Fonte: Autora.

Nota-se que o solo possui o menor valor de massa específica entres os materiais estudados, de 2,65 g/cm³, sendo um valor característico de solos. E o cimento CP III, é o que possui o valor mais alto, de 2,99 g/cm³, e foi encontrado na literatura.

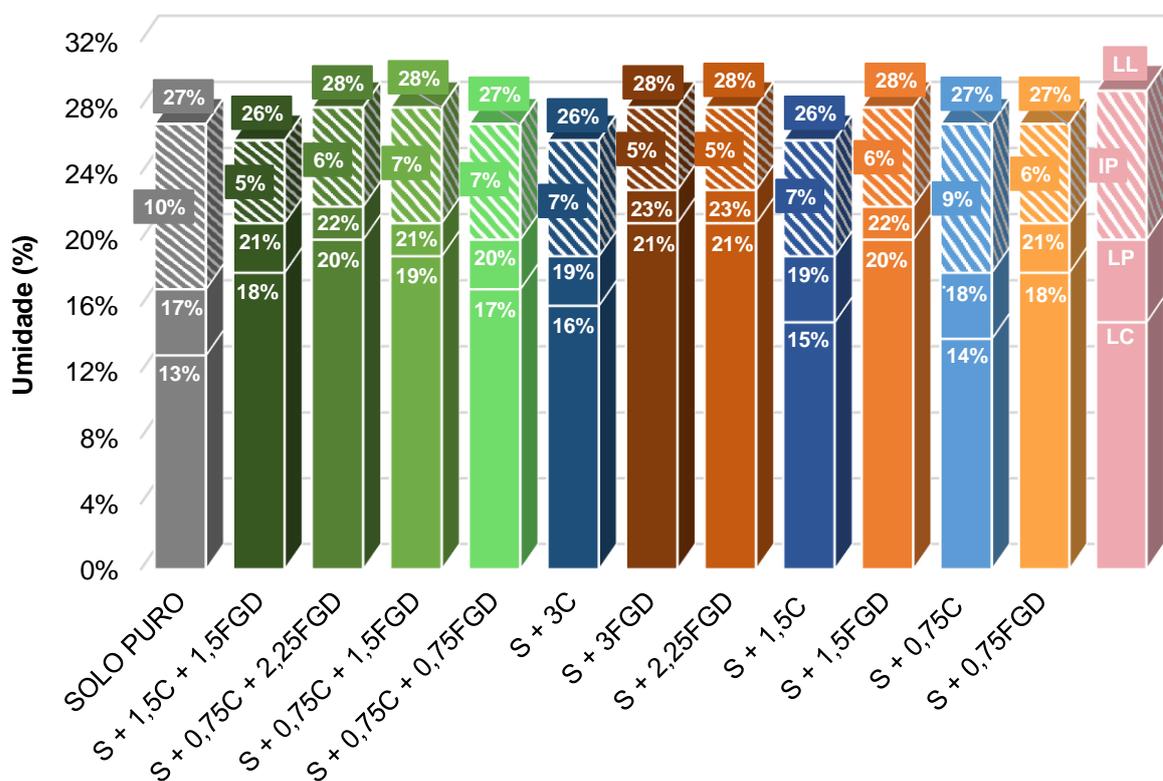
No meio termo está o pó FGD, com um valor de 2,79 g/cm³, permanecendo dentro do intervalo citado por EPRI (2007) para pó FGD oriundo do processo semisseco. Entretanto está acima do valor citado por outros autores, como Wright e Katib (2016)

e FHWA (2016), que varia entre 2,2 g/cm³ a 2,6 g/cm³ para todos os tipos de processos. O valor encontrado nesta pesquisa é diferente do encontrado no estudo de Teixeira (2019), que trabalhou com o pó FGD disponibilizado pela mesma empresa desta pesquisa. Essa divergência está relacionada ao tipo de amostragem e ao diferente método de ensaio usado, apresentado no Quadro 3, visto que em outros trabalhos, como o de Moura (2020) e Cunha (2020), os quais utilizaram o material da mesma amostragem e o mesmo método de ensaio desta pesquisa, foram obtidos valores bem próximos, de 2,75 g/cm³ por ambos. Pode-se dizer que a incorporação dos aditivos não causou alteração dessa grandeza física nas misturas, uma vez que o teor de adição é muito baixo.

4.1.3 Limites de Consistência

Na Figura 56 são apresentados os valores de limites de consistência - limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e limite de contração (LC) - e o índice de plasticidade (IP) do solo e das misturas, e na Figura 57 estão apresentados os valores de atividade da fração argila das amostras.

Figura 56 - Limites de consistência das amostras.



Fonte: Autora.

Observa-se que a adição de cimento e pó FGD não causa uma alteração expressiva no limite de liquidez das amostras, diferente do efeito nos limites de plasticidade e contração, em que a mudança é notável.

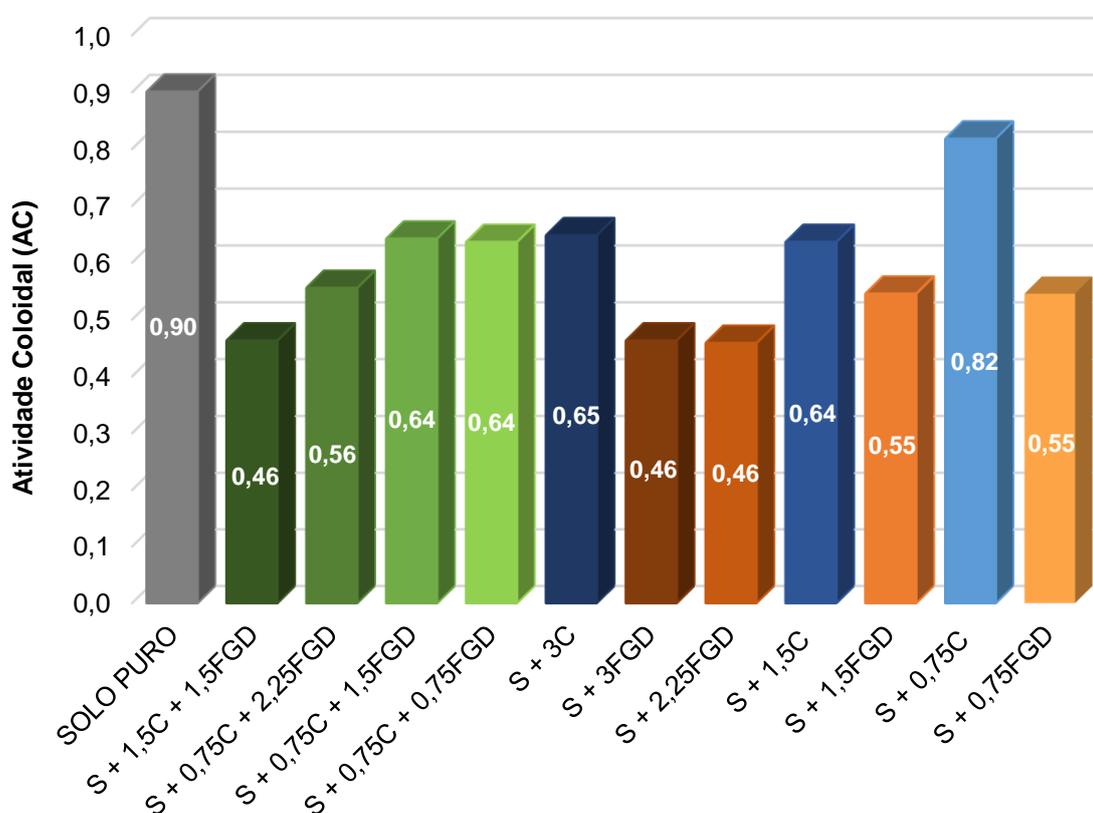
Nota-se que o LL das amostras contendo apenas cimento foi inferior ao do solo puro (exceto a composição S+0,75C). Por outro lado, observa-se um acréscimo do LL das composições contendo apenas FGD (exceto S+0,75FGD). Em relação ao LP e LC, os dois aditivos causaram o aumento dessas grandezas, sendo que o pó FGD gerou um acréscimo maior que o cimento. Com a permanência dos valores de LL e o aumento dos valores de LP houve uma queda no valor de IP com a adição dos aditivos, mais acentuada com a presença do pó FGD. Esse aumento do LP é relevante, visto que nas misturas S+1,5C+1,5FGD, S+3FGD e S+2,25FGD, ele reduz 50% do IP, e esse é um processo importante na estabilização do solo; segundo Show *et al.* (2003), quanto menor o IP menos água é necessária para o solo atingir o estado plástico e mais resistente será o material.

Esses resultados são coerentes com a literatura, a qual diz que o cimento diminui a plasticidade do solo, devido a ação modificadora da fração argilosa com a adição desse estabilizante (ALMEIDA *et al.*, 2015). Nos estudos de Almeida *et al.* (2015) e Cardoso *et al.* (2016), em acordo com Pereira (1970), a incorporação do cimento causa um decréscimo do LL, aumento do LP e, conseqüentemente, uma queda do IP, equivalente ao que ocorre nesta pesquisa.

Cruz (2004) explicou que este comportamento é devido às reações de hidratação do cimento, em que ocorrem trocas entre os íons presentes nas partículas de argila, causando a alteração da distribuição das cargas elétricas. Por meio dessa alteração, as partículas de argila se atraem, levando à sua flocculação, e ao adquirirem maiores dimensões há perda de plasticidade e coesão. Cunha (1992) também explicou que as reações de troca de cátions podem causar alterações nas propriedades de plasticidade do solo. Portanto, o efeito do pó FGD na plasticidade similar ao do cimento, porém mais expressivo, pode ser explicado pelo fato de esse coproduto apresentar um maior valor de capacidade de troca catiônica (CTC), como será apresentado no item 4.1.6, aumentando, assim, o comportamento do solo quanto à sua plasticidade.

De acordo com a Figura 57, nota-se que a queda do valor do IP (numerador), quando adicionado cimento e/ou pó FGD, causa a queda da atividade das amostras, visto que a porcentagem da fração argila (denominador) das amostras praticamente não varia. Os valores de atividade das amostras de SOLO PURO e S+0,75C não diferem consideravelmente entre si, pois a queda do IP nesse teor de adição de cimento é inexpressiva, e as duas amostras são classificadas como argilas normais, pois se encontram entre os valores de 0,75 e 1,25. As demais amostras são classificadas como argilas inativas, por atingirem valores menores que 0,75.

Figura 57 - Atividade das amostras.



Fonte: Autora.

A classificação de atividade da fração argila do solo, como normal, indicaria que este é constituído majoritariamente por argilominerais do tipo ilita, que é caracterizado por ter uma atividade normal. Todavia, este não é o resultado encontrado no ensaio de DRX, como será apresentado no item 4.2.8, mostrando a importância do ensaio de DRX para a determinação dos argilominerais presentes em uma amostra.

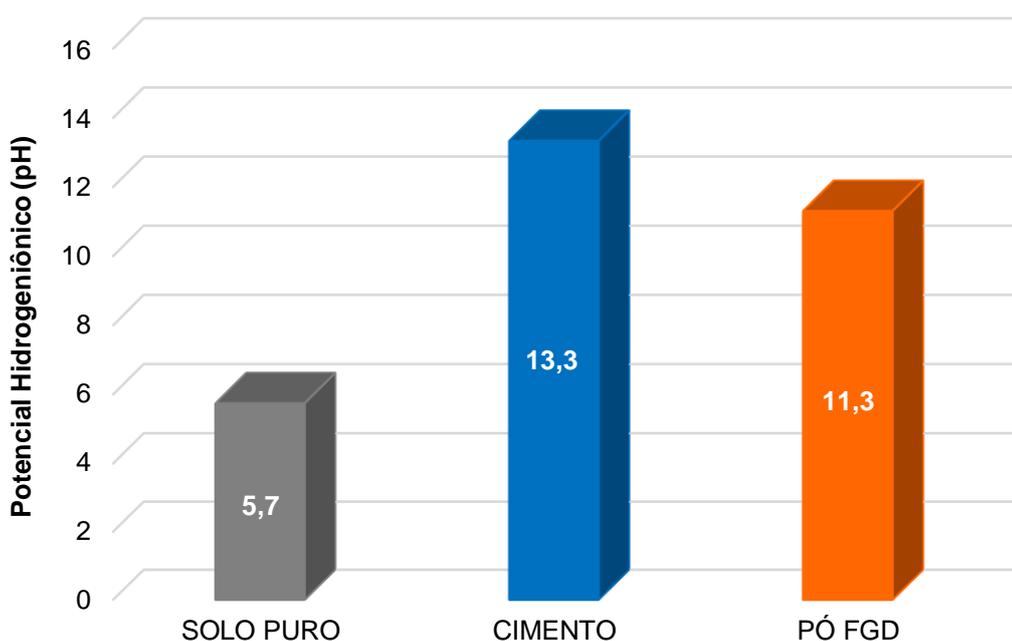
4.1.4 Teor de Matéria Orgânica

O teor de matéria orgânica do solo é de 2,82% e do pó FGD é de 1,80%. Valores razoáveis, porém, segundo Dias (2012), somente são aceitáveis para a estabilização com cimento, solos com menos de 2% de matéria orgânica. Entretanto, a estabilização do solo estudado com cimento e pó FGD foi muito satisfatória, como será apresentado posteriormente, tornando o valor encontrado aceitável para esta pesquisa. Esses teores de matéria orgânica encontrados nos materiais também influencia a perda de massa por calcinação, como será visto no resultado do ensaio de FRX.

4.1.5 Potencial Hidrogeniônico (pH)

Na Figura 58 estão apresentados os valores de pH para as amostras de solo, cimento e pó FGD.

Figura 58 - Potencial hidrogeniônico (pH) das amostras.



Fonte: Autora.

A partir dos resultados, o solo foi classificado como ácido, com um pH baixo de 5,7, típico de solos lateríticos. A natureza ácida dos solos lateríticos é associada ao grau de lixiviação e à pluviosidade, devido ao seu processo de formação, que ocorre a partir de uma intensa laterização (intemperismo) em regiões tropicais e úmidas, onde há altas temperaturas e grande quantidade de chuva, as quais causam a lixiviação de bases e a permanência de hidróxidos e óxidos de ferro e alumínio (SANTOS, 2006).

Barreto (2015) verificou em seu estudo uma tendência de crescimento da acidez com o aumento do teor de Fe_2O_3 no solo. Conhecido por ser básico (alcalino), o cimento é o material que possui o maior pH entre as três amostras, com um valor de 13,3. O pó FGD apresenta um pH básico, de 11,3, muito superior ao do solo e abaixo, mas próximo, ao do cimento. Esse valor está coerente com a literatura, que apresenta uma variação de 9 a 13 para processo semisseco, segundo Heebink *et al.* (2007), e é confirmado pelos resultados encontrados em outras pesquisas já citadas anteriormente.

Não foi determinado o pH das misturas (solo com adição de cimento e/ou pó FGD), todavia é esperado, devido ao teor básico dos aditivos e de acordo com as reações de estabilização e pesquisas realizadas, que haja a correção do pH do solo, com o aumento deste valor.

4.1.6 Análise Química de Complexo Sortivo

Os resultados do ensaio de análise química de complexo sortivo do solo, do cimento, do pó FGD e da cal estão apresentados na Tabela 4 e são discutidos baseado em Bridi (2020). Na amostra de solo observa-se que o valor da soma de bases (S) é inferior ao valor da CTC efetiva, que é inferior ao valor da CTC total, indicando que há a presença de ambos os cátions Al^{3+} e H^+ na composição da acidez potencial, composta em sua maior parte pelo cátion de hidrogênio. O alto teor de cátions H^+ indica o comportamento ácido, e está de acordo com o resultado de pH já apresentado.

Para as amostras de cimento, pó FGD e cal obtiveram-se valores iguais e expressivos de soma de bases (S), CTC efetivo e CTC total para cada material. Os valores do cimento estão similares aos valores da cal, já os valores do pó FGD são consideravelmente superiores a esses dois. A igualdade dos valores de S, CTC efetivo e CTC total para cada amostra sinaliza a ausência da contribuição dos cátions Al^{3+} e H^+ na acidez potencial. Resultado já esperado, de acordo com os valores de pH básico determinados anteriormente. Vale ressaltar que o cátion básico predominante na soma de bases é o Ca^{2+} , constituindo 99% da soma de bases do pó FGD, e com índice de saturação de quase 100% para todos esses aditivos.

Tabela 4 - Análise química de complexo sortivo das amostras.

	Solo	Cimento	Pó FGD	Cal
Hidrogênio (H) (cmol _c /dm ³)	1,3	0,0	0,0	0,0
Hidrogênio (H) (pH)	5,1	12,4	12,1	12,4
Alumínio (Al) (cmol _c /dm ³)	0,4	0,0	0,0	0,0
Alumínio (Al) (mg/dm ³)	36,0	0,0	0,0	0,0
Cálcio (Ca) (cmol _c /dm ³)	0,2	59,7	96,2	59,8
Cálcio (Ca) (mg/dm ³)	40,1	11963,9	19278,5	11983,9
Magnésio (Mg) (cmol _c /dm ³)	0,1	0,1	0,1	0,1
Magnésio (Mg) (mg/dm ³)	12,2	12,2	12,2	12,2
Potássio (K) (cmol _c /dm ³)	0,0	3,6	0,4	1,3
Potássio (K) (mg/dm ³)	10,0	1422,0	170,0	490,0
Sódio (Na) (cmol _c /dm ³)	0,0	3,9	0,3	0,1
Sódio (Na) (mg/dm ³)	2,0	890,0	70,0	30,0
Enxofre (S) (mg/dm ³)	60,0	969,0	1315,0	26,0
Fósforo (P) (mg/dm ³)	1,0	1,0	1,0	1,0
Boro (B) (mg/dm ³)	0,3	0,2	0,6	0,2
Cobre (Cu) (mg/dm ³)	0,1	0,2	0,3	0,2
Ferro (Fe) (mg/dm ³)	122,0	20,0	15,0	11,0
Manganês (Mn) (mg/dm ³)	2,0	1,0	1,0	1,0
Zinco (Zn) (mg/dm ³)	0,2	0,2	0,5	0,1
Soma de Bases (cmol _c /dm ³)	0,3	67,3	97,0	61,3
Capacidade de Troca Catiônica Efetiva (cmol _c /dm ³)	0,7	67,3	97,0	61,3
Capacidade de Troca Catiônica Total (pH 7,0) (cmol _c /dm ³)	2,0	67,3	97,0	61,3
Índice de Saturação Ca (%)	9,9	94,1	99,4	97,8
Índice de Saturação Mg (%)	4,9	0,2	0,2	0,2
Índice de Saturação K (%)	1,3	5,7	0,5	2,0
Índice de Saturação Na (%)	0,4	6,1	0,3	0,2
Saturação de Bases (%)	16,4	100,0	100,0	100,0

Fonte: Autora.

Dentre as várias características do pó FGD similares as do cimento e da cal, pode-se reafirmar a hipótese de semelhança dos efeitos do pó FGD no solo e que a interação solo-FGD, assim como as misturas de solo/cimento/FGD, pode ocorrer por meio dos mesmos processos físico-químico conhecidos nestes materiais, como as trocas catiônicas e as reações pozolânicas.

No processo de estabilização com o cimento ocorrem, em primeiro lugar, as reações de hidratação e logo após as trocas catiônicas, que geram os agentes cimentantes (VITALI, 2008). E na estabilização com a cal ocorrem, primeiramente, as reações imediatas de trocas catiônicas com os argilominerais, seguida pela floculação e aglomeração das partículas de argila (GUIMARÃES, 2002).

Mesmo que a análise de complexo sortivo não tenha sido realizada para as misturas, é possível prever o seu comportamento na presença da água. Na mistura do pó FGD com solo e água, parte do coproduto é dissolvido por um mecanismo difuso na água dos poros, que fornece íons negativos OH^- , os quais neutralizam os cátions ácidos Al^{3+} e H^+ do solo, aumentando o seu pH. Além dos ânions, a dissolução do pó FGD fornece uma grande concentração de cátions Ca^{2+} , que serão adsorvidos na superfície dos argilominerais por meio das trocas catiônicas, semelhante ao que ocorre na interação solo-KR, apresentado na Figura 16.

4.1.7 Espectometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)

Os resultados do ensaio de FRX dos três materiais são apresentados na Tabela 5. Os elementos presentes nos materiais são apresentados na forma de óxidos.

Os elementos mais presentes no solo são o óxido de alumínio (Al_2O_3), o óxido de ferro (Fe_2O_3), e o dióxido de silício (SiO_2). A presença de Al_2O_3 e Fe_2O_3 é característica de solos lateríticos. De acordo com Santos (1975), o teor de Al_2O_3 indica a presença de alumínio na argila, que está em grande parte formando argilominerais e parte constituindo minerais primários e de óxidos e hidróxidos de alumínio, sendo a gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) o mais comum deles. O teor de Fe_2O_3 sinaliza a presença de minerais de ferro, como a hematita e a goethita, que são os mais comuns. E o teor de SiO_2 indica a presença de silicatos, que são os argilominerais, as micas e os feldspatos; e de sílica livre, que é proveniente do quartzo e de amorfos.

O cimento tem como elemento mais abundante o óxido de cálcio (CaO), seguido do dióxido de silício (SiO₂), os quais dão origem aos principais compostos do cimento Portland, como o silicato tricálcico (alita - 3CaO·SiO₂) e o silicato dicálcico (belita - 2CaO·SiO₂). Além da presença, em menor quantidade, de Al₂O₃ e Fe₂O₃, que podem originar o aluminato (Ca₃Al₂O₆) e ferroaluminato (Ca₂AlFeO₅) (NEVILLE, 1997).

Tabela 5 - Resultados do ensaio de fluorescência de raios-X das amostras.

Componente	Solo	Pó FGD	Cimento
Al ₂ O ₃	41,65%	<0,1%	8,17%
CaO	0,05%	56,40%	50,19%
Cr ₂ O ₃	<0,01%	<0,01%	<0,01%
Fe ₂ O ₃	13,08%	0,12%	1,38%
K ₂ O	0,73%	0,04%	0,53%
MgO	0,12%	0,55%	4,25%
MnO	0,02%	<0,01%	0,22%
Na ₂ O	<0,1%	<0,1%	<0,1%
P ₂ O ₅	0,43%	0,17%	0,20%
SiO ₂	19,80%	0,38%	30,38%
TiO ₂	2,38%	<0,01%	0,41%
ZrO ₂	0,32%	-	-
SO ₃	-	25,09%	2,49%
ZnO	-	0,02%	<0,01%
V ₂ O ₅	-	<0,01%	<0,01%
F	-	<0,1%	<0,1%
Perda por Calcinação (1000°C)	21,33%	17,08%	1,29%

Fonte: Autora.

No pó FGD o óxido de cálcio (CaO) é o elemento mais predominante, assim como no cimento, e é proveniente da lama de cal utilizada no processo de dessulfurização; em segundo lugar está o trióxido de enxofre (SO₃), que é removido da corrente gasosa no processo de FGD; os dois elementos correspondem a 81,5% do total de componentes do material. A presença dos demais óxidos indica a eficiência da remoção dos outros contaminantes dos gases de combustão, além do SO₂ (Mohaupt *et al.*, 2018). Os

elementos presentes no pó FGD estão coerentes com a maioria dos encontrados na literatura e apresentados na Tabela 2. Os valores de perda por calcinação do solo e do pó FGD são relativamente altos, e podem ser explicados pelo teor de matéria orgânica presente nesses materiais.

4.1.8 Difractometria de Raios-X (DRX)

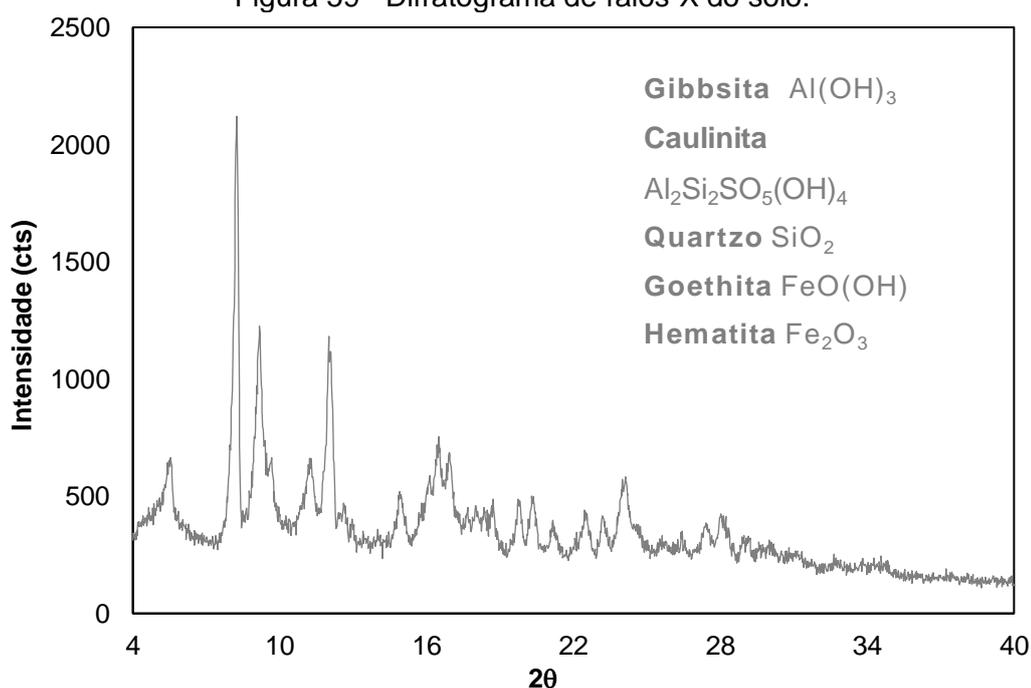
Por meio da análise do DRX foi possível determinar os minerais presentes no solo, no cimento e no pó FGD e os difratogramas de raios-X das amostras estão apresentados na Figura 59, na Figura 60 e na Figura 61, respectivamente. Na Tabela 6 é apresentada a quantificação das fases de cada uma delas.

Tabela 6 - Quantificação de fases das amostras.

Solo		Cimento		Pó FGD	
Gibbsita	40,2%	Alita	46,2%	<i>Hannebachite</i>	31,3%
Caulinita	26,3%	Gehlenita	22,6%	Portlandita	28,1%
Quartzo	17,1%	Calcita	16,7%	Calcita	27,8%
Goethita	9,2%	Akermanita	6,2%	Sinjarita	12,8%
Hematita	7,1%	Dolomita	4,1%		
		Anidrita	4,2%		

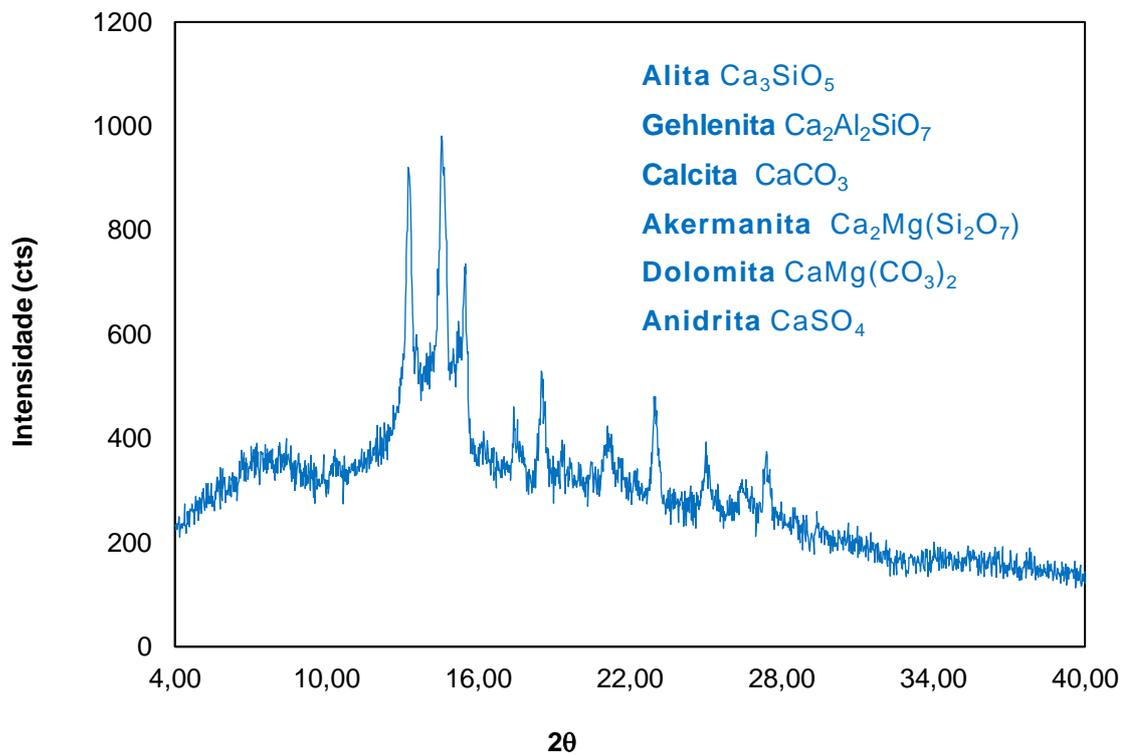
Fonte: Autora.

Figura 59 - Difractograma de raios-X do solo.



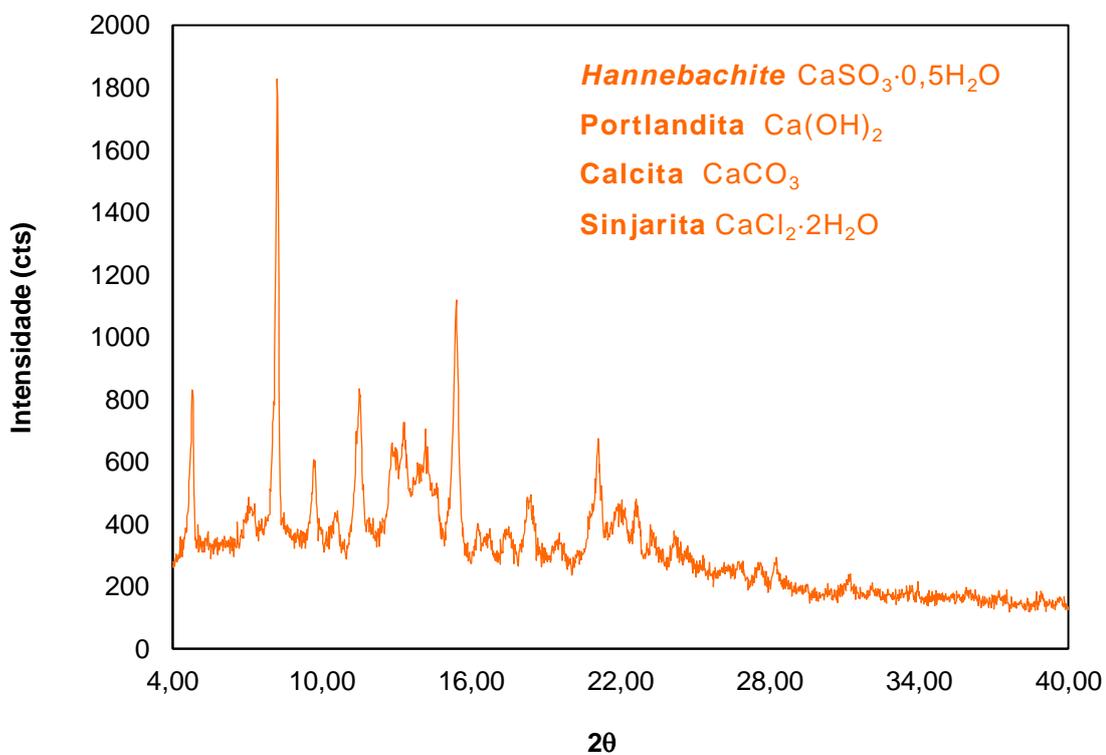
Fonte: Autora.

Figura 60 - Difratoograma de raios-X do cimento.



Fonte: Autora.

Figura 61 - Difratoograma de raios-X do pó FGD.



Fonte: Autora

No DRX do solo (Figura 59) a presença dos minerais gibbsita, caulinita, goethita e hematita está de acordo com Ferreira *et al.* (1999), os quais citaram que esses são os principais minerais da fração argila dos Latossolos brasileiros, além da presença do mineral quartzo, também característico de solos lateríticos. A maior quantidade de gibbsita no solo corrobora com a pesquisa dos mesmos autores, que estudaram diversos solos lateríticos e observaram que a maioria dos Latossolos são gibbsíticos; além de poder explicar a granulometria do solo, que de acordo com o modelo elaborado pelos autores, o desenvolvimento da microestrutura de um solo gibbsítico é do tipo granular. Esses resultados complementam e confirmam o que foi encontrado no ensaio de FRX.

No cimento (Figura 60), os minerais encontrados foram Ca_3SiO_5 (alita ou silicato tricálcico), $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ (gehlenita), CaCO_3 (calcita ou carbonato de cálcio), $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$ (akermanita), $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomita) e CaSO_4 (anidrita ou sulfato de cálcio). A presença majoritária de alita, originária do clínquer, que é a base do cimento, corrobora com a literatura, a qual diz que esta é a fase mineral principal e característica do cimento Portland (BATTAGIN, 2015). As fases cristalinas de gehlenita e akermanita são oriundas da adição da escória de alto forno ao cimento, e são consideradas as fases mineralógicas ideais para a atividade hidráulica das escórias (BATTAGIN e SCANDIUZZI 1990). A calcita e dolomita são provenientes do calcário, principal matéria-prima do cimento. A anidrita é procedente do gesso adicionado ao cimento, e se origina da desidratação da gipsita durante o processo quando a temperatura atinge 100°C (BATTAGIN, 2015).

Como visto na Figura 61, os minerais presentes no pó FGD são: $\text{CaSO}_3 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (*hannebachite* ou sulfito de cálcio hemihidratado), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandita, que é a forma natural do hidróxido de cálcio), CaCO_3 (calcita ou carbonato de cálcio) e $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (sinjarita ou cloreto hidratado de cálcio), corroborando com resultados encontrados na literatura para coproduto FGD proveniente do processo semiseco apresentados anteriormente. A presença majoritária de sulfito de cálcio hemihidratado indica que não houve a oxidação forçada no processo, característica dos processos semisecos. A presença de cloretos é proveniente do carvão utilizado como matéria-prima na coqueificação, como citado por Li *et al.* (2015). A portlandita é o hidróxido de cálcio que não reagiu; e a calcita é o hidróxido de cálcio carbonizado, ou seja, quando ocorre

a conversão incompleta do Ca(OH)_2 na presença de CO_2 , é formado o CaCO_3 (ZAREMBA *et al.*, 2008).

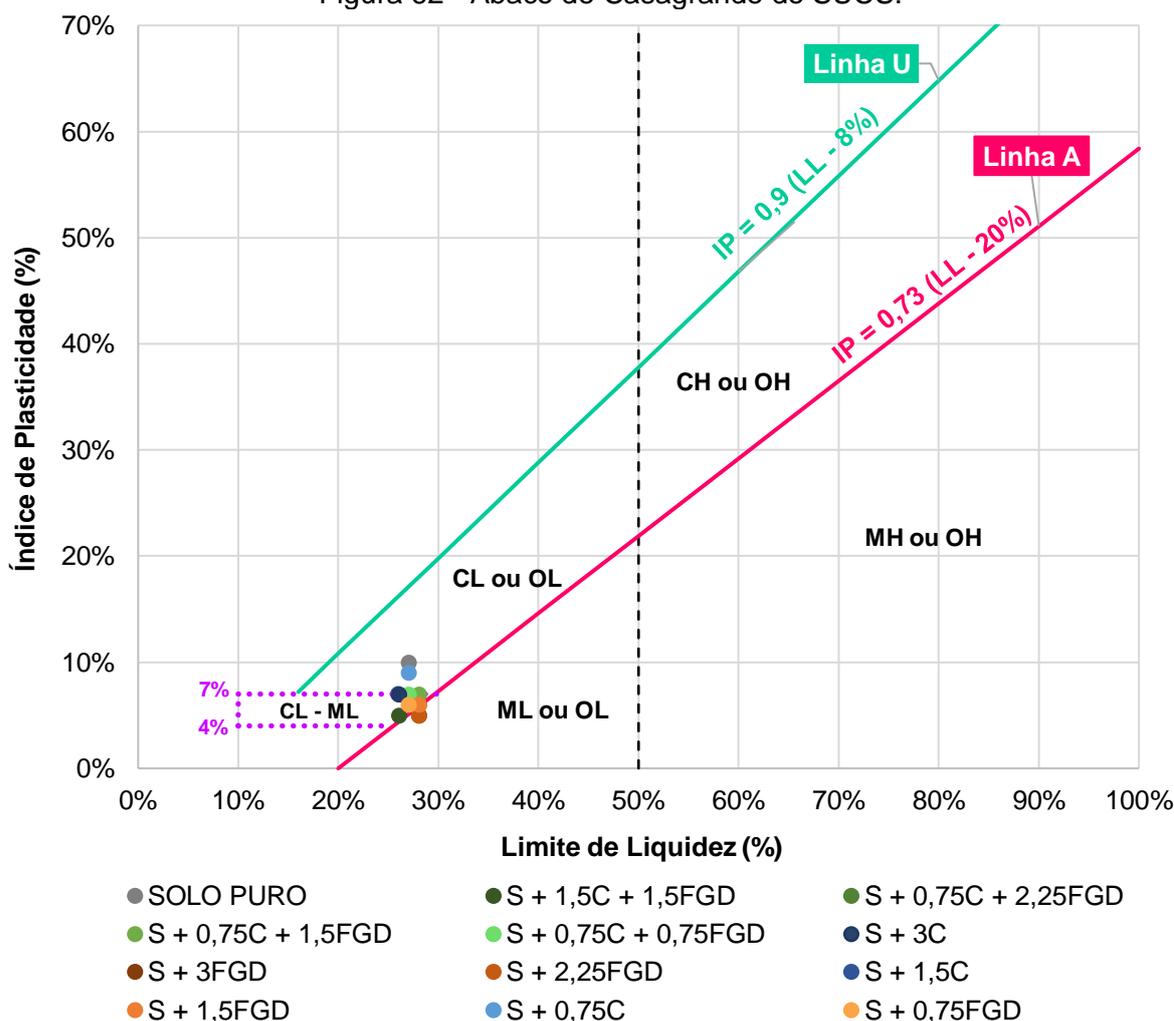
4.1.9 Classificações

Os materiais foram classificados segundo o *Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)*, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* e *Tropical Compact Miniature (MCT)*.

4.1.9.1 Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)

A Figura 62 apresenta o ábaco de Casagrande utilizado no SUCS, e nele os pontos correspondentes às misturas, que são utilizados para a classificação segundo esta metodologia. E a Tabela 7 apresenta a classificação de cada mistura e sua respectiva descrição dos materiais que predominam.

Figura 62 - Ábaco de Casagrande do SUCS.



Fonte: Autora.

O solo puro foi classificado como areia argilosa (SC), uma mistura bem graduada de areia e argila, e a incorporação do cimento e do pó FGD causou uma mudança, devido à queda do IP, pouco expressiva na classificação. Todavia, nota-se que os maiores teores de pó FGD individualmente (S+3FGD e S+2,25FGD) alteraram a classificação para areia siltosa (SM), enquanto as demais misturas tiveram uma classificação dupla de areia argilo-siltosa (SC-SM), exceto a mistura com o menor teor de cimento (S+0,75C), que permaneceu como areia argilosa (SC).

Tabela 7 - Classificação SUCS das amostras.

Misturas	Identificação	Descrição
SOLO PURO	SC	Areia Argilosa
S + 1,5C + 1,5FGD	SC - SM	Areia Argilo-siltosa
S + 0,75C + 2,25FGD	SC - SM	Areia Argilo-siltosa
S + 0,75C + 1,5FGD	SC - SM	Areia Argilo-siltosa
S + 0,75C + 0,75FGD	SC - SM	Areia Argilo-siltosa
S + 3C	SC - SM	Areia Argilo-siltosa
S + 3FGD	SM	Areia Siltosa
S + 2,25FGD	SM	Areia Siltosa
S + 1,5C	SC - SM	Areia Argilo-siltosa
S + 1,5FGD	SC - SM	Areia Argilo-siltosa
S + 0,75C	SC	Areia Argilosa
S + 0,75FGD	SC - SM	Areia Argilo-siltosa

Fonte: Autora.

4.1.9.2 American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

Na Tabela 8 estão apresentados o índice de grupo, a classificação das misturas, segundo a AASHTO, e suas respectivas descrições dos materiais predominantes.

O solo e todas as misturas foram classificados como A-2-4, sendo constituídos em sua maioria por areia e areia argilosa ou areia siltosa. O índice de grupo indica o comportamento geral do solo como subleito, e o valor encontrado (zero) para todas as amostras os classificam com um ótimo desempenho de suporte.

Tabela 8 - Classificação AASHTO das amostras.

Misturas	Índice de Grupo	Identificação	Descrição
SOLO PURO	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa
S + 1,5C + 1,5FGD	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa
S + 0,75C + 2,25FGD	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa
S + 0,75C + 1,5FGD	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa
S + 0,75C + 0,75FGD	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa
S + 3C	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa
S + 3FGD	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa
S + 2,25FGD	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa
S + 1,5C	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa
S + 1,5FGD	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa
S + 0,75C	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa
S + 0,75FGD	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa

Fonte: Autora.

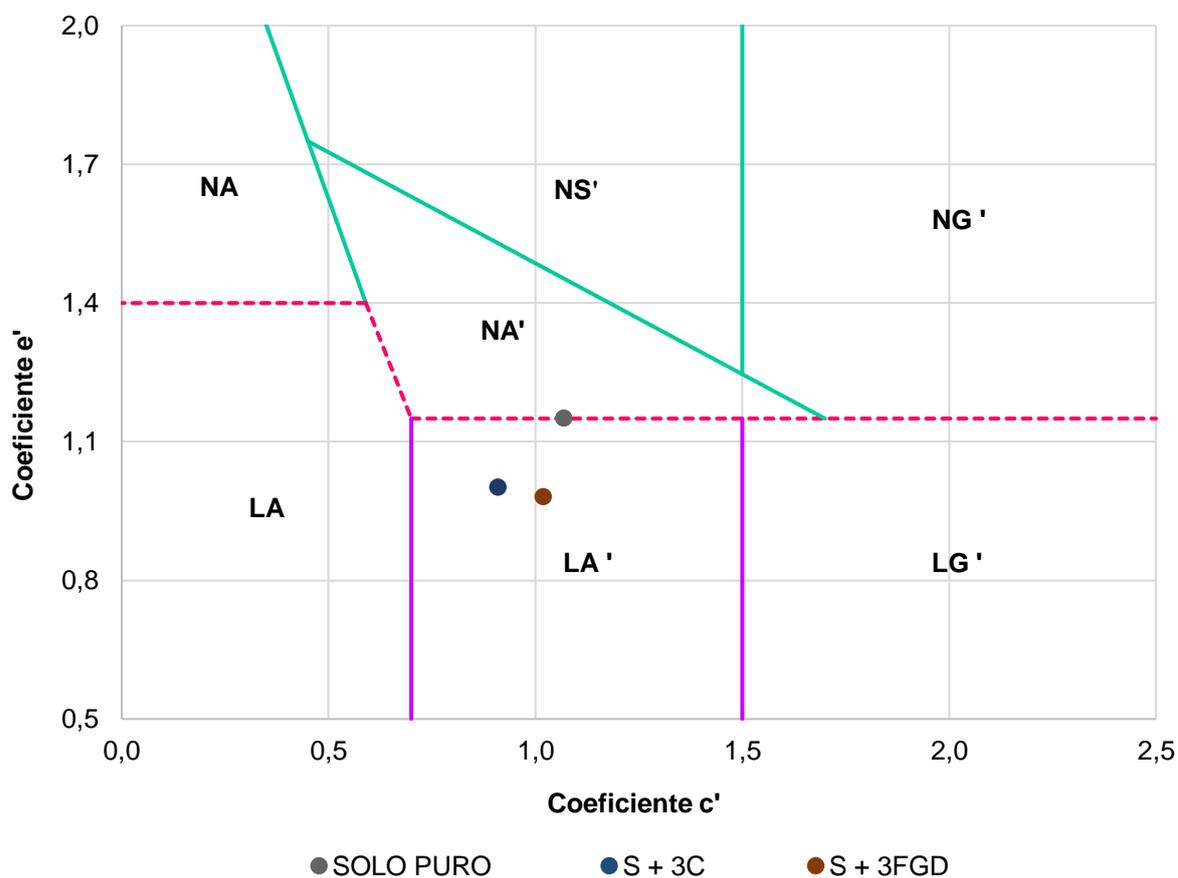
4.1.9.3 Tropical Compact Miniature (MCT)

A Figura 63 apresenta o ábaco do MCT, critério de classificação segundo essa metodologia, e os pontos correspondentes às amostras submetidas à essa classificação. Na Tabela 9 é apresentada a classificação MCT das amostras, sua respectiva descrição dos materiais predominantes e os valores de perda de massa por imersão.

O solo puro foi classificado como uma areia argilosa laterítica (LA'), da mesma maneira que as misturas também seriam, caso fossem naturais; a adição do cimento e do pó FGD acentuou o caráter laterítico do solo, como visto na Figura 38. Mesmo que o ponto correspondente ao solo puro no gráfico se localizou sobre a linha que separa os solos de grupos lateríticos dos não lateríticos, a norma CLA 259/96 (DNER, 1996) impõe parâmetros para que seja possível determinar o tipo de solo, que nesse caso foi laterítico. Resultado reafirmado diante das características do solo obtidas pelos ensaios de granulometria completa, FRX e DRX, que mostraram ser um solo arenoso, com a presença, principalmente, de óxido de ferro e alumínio, e minerais característicos de solos lateríticos.

Segundo os dados diversos dos grupos de solos lateríticos determinados por Nogami e Villibor (1995), o solo LA' pode ser classificado como SC pelo método de SUCS e como A-2 ou A-4 pelo método de AASHTO, portanto o solo estudado está de acordo com esses dados.

Figura 63 - Ábaco MCT.



Fonte: Autora.

Tabela 9 - Classificação MCT das amostras.

Amostras	Classificação MCT	Descrição	Perda de Massa por Imersão (Pi)
SOLO PURO	LA'	Areia Argilosa Laterítica	96
S + 3C	LA'	Areia Argilosa Laterítica	18
S + 3FGD	LA'	Areia Argilosa Laterítica	35

Fonte: Autora.

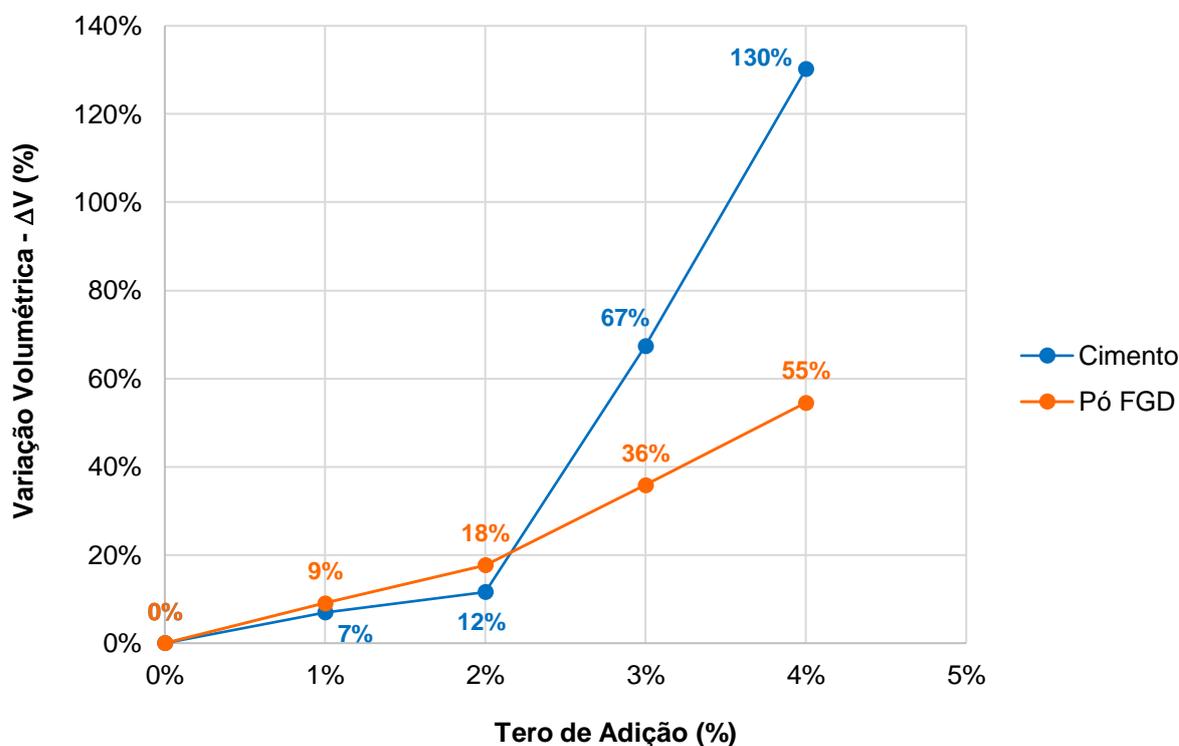
Devido ao fato de o solo ser arenoso e com isso ocorrer menor coesão, a perda de massa por imersão do solo puro é alta. Já na mistura S+3C, o cimento confere uma aglomeração das partículas do solo, tornando esse resultado muito menor em

comparação ao do solo puro. A adição do pó FGD também conferiu uma aglomeração das partículas do solo na mistura S+3FGD, diminuindo expressivamente a perda de massa por imersão, todavia esse valor foi maior que na mistura S+3C, podendo ser justificada pela característica expansiva do pó FGD (como será apresentado no item 4.2.3), que possivelmente gerou fissuras no corpo de prova em contato com a água, facilitando a sua desintegração quando imerso.

4.1.10 Dosagem Físico-química de Solo-cimento

A Figura 64 apresenta os resultados de variação de volume (ΔV) em função do teor de adição, tanto para o cimento quanto para o pó FGD.

Figura 64 - Variação do volume em função do teor de cimento e de pó FGD.



Fonte: Autora.

Observa-se que para os primeiros teores de adição, 1% e 2%, o pó FGD causou uma variação volumétrica pouco maior que o cimento, já para os teores de 3% e 4%, o cimento gerou uma variação volumétrica expressivamente maior que o pó FGD. A Figura 50 mostra a variação volumétrica nas provetas, para os teores de 2%, 3% e 4% de cimento.

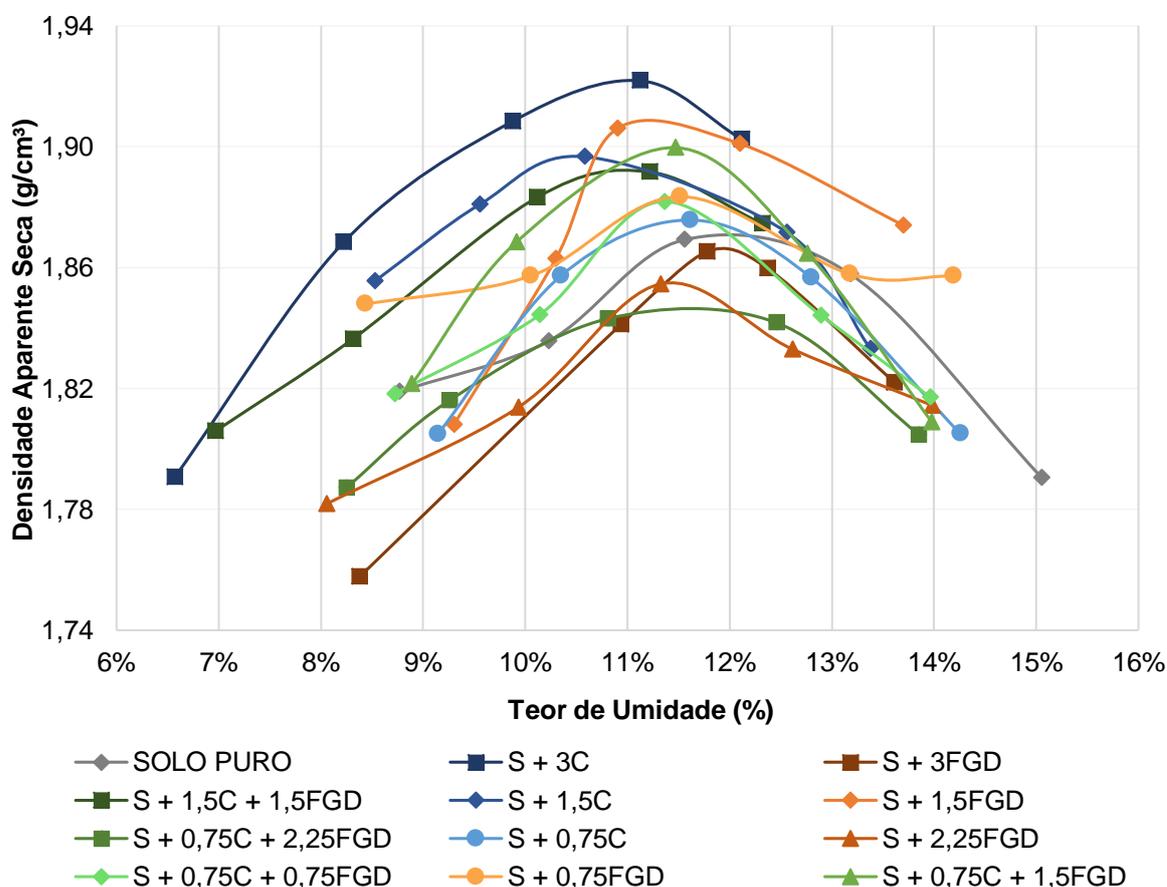
Portanto, a partir do teor de 3%, a interação elétrica do cimento com as partículas argilosas do solo produz uma maior mudança físico-química no sistema que o pó FGD, e, conseqüentemente, uma maior variação volumétrica. Enquanto nos teores abaixo de 3%, essa interação elétrica do cimento e do pó FGD com as partículas de argila são mais semelhantes, de acordo com o próximo valor da variação volumétrica para os dois materiais.

4.2 ETAPA II: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

4.2.1 Compactação

As curvas de compactação de todas as amostras estão apresentadas na Figura 65; na Figura 66 estão apresentadas as curvas de compactação das misturas de solo/cimento/FGD e na Figura 67 estão apresentadas as curvas de compactação das misturas de solo/cimento e solo/FGD, como também as curvas de saturação; na Figura 68 estão apresentados os valores de umidade ótima; e na Figura 69 os valores de massa específica aparente seca máxima.

Figura 65 - Curvas de compactação das amostras.



Fonte: Autora.

Figura 66 - Curvas de compactação das misturas de solo/cimento/FGD.

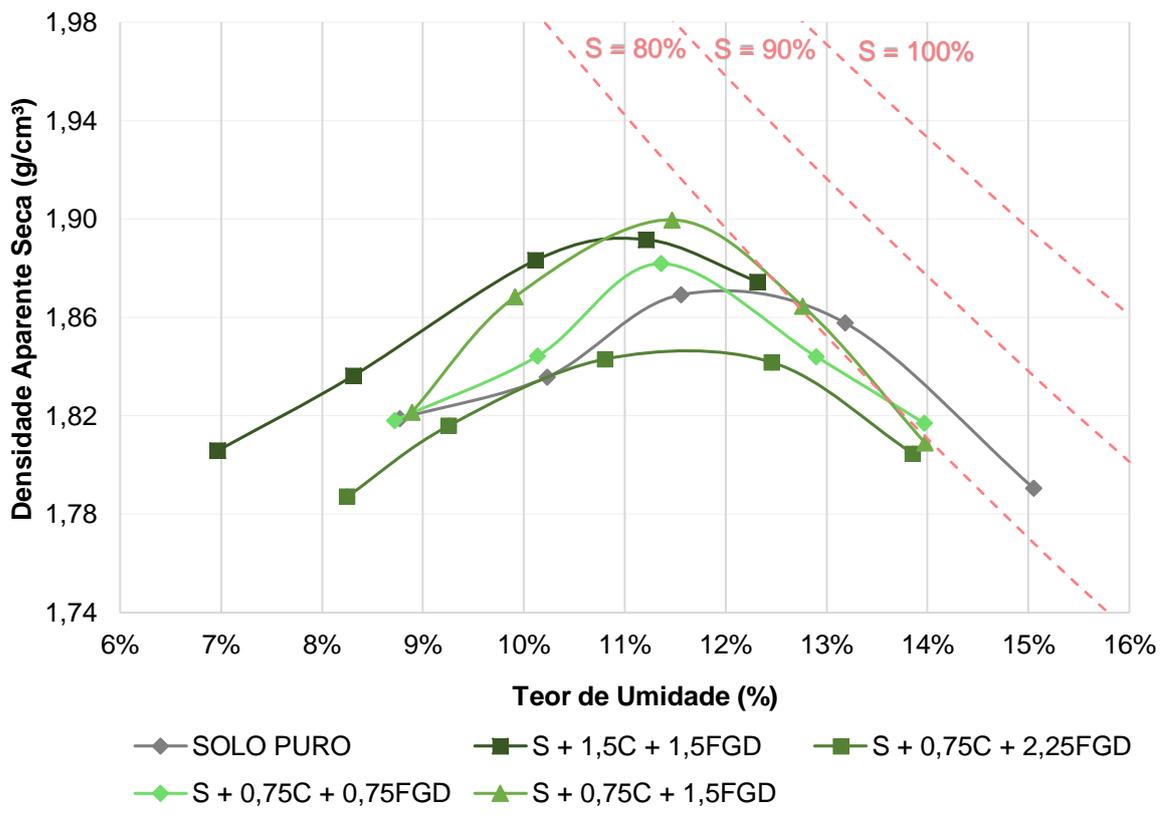


Figura 67 - Curvas de compactação das misturas de solo/cimento e solo/FGD.

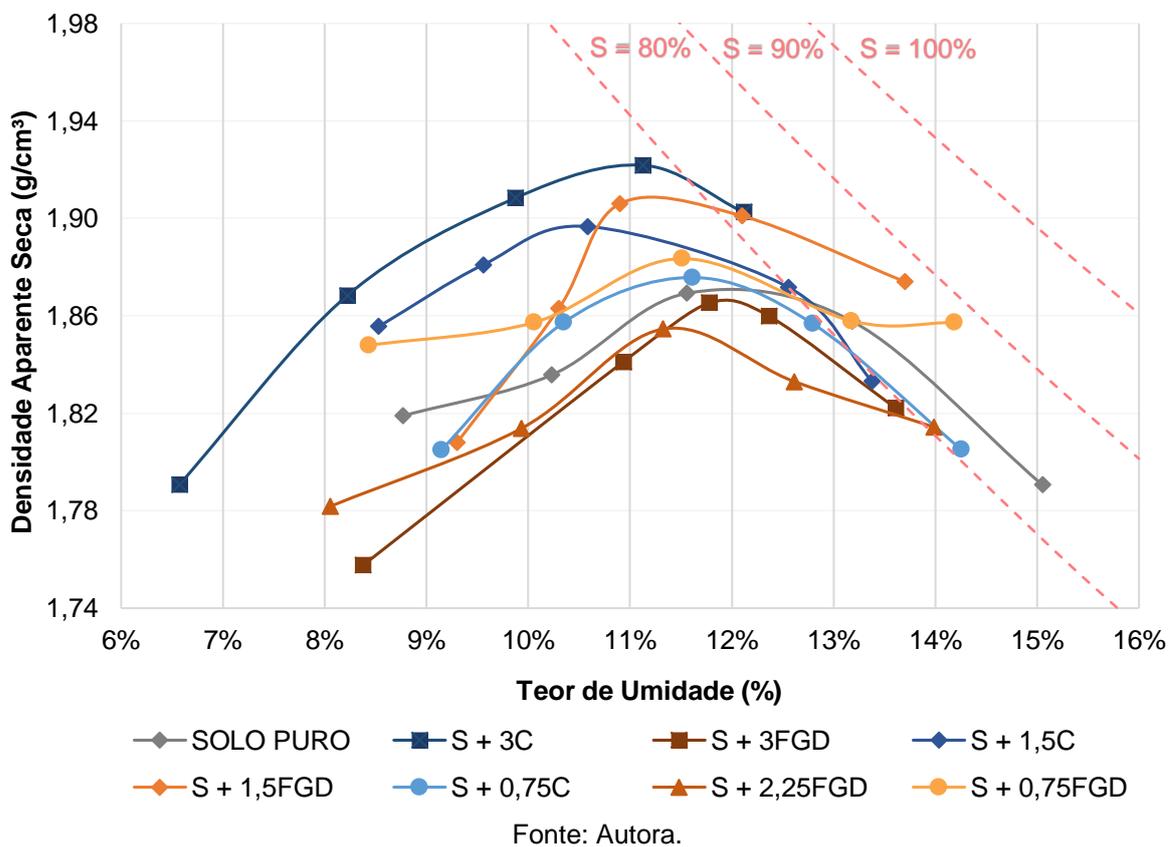
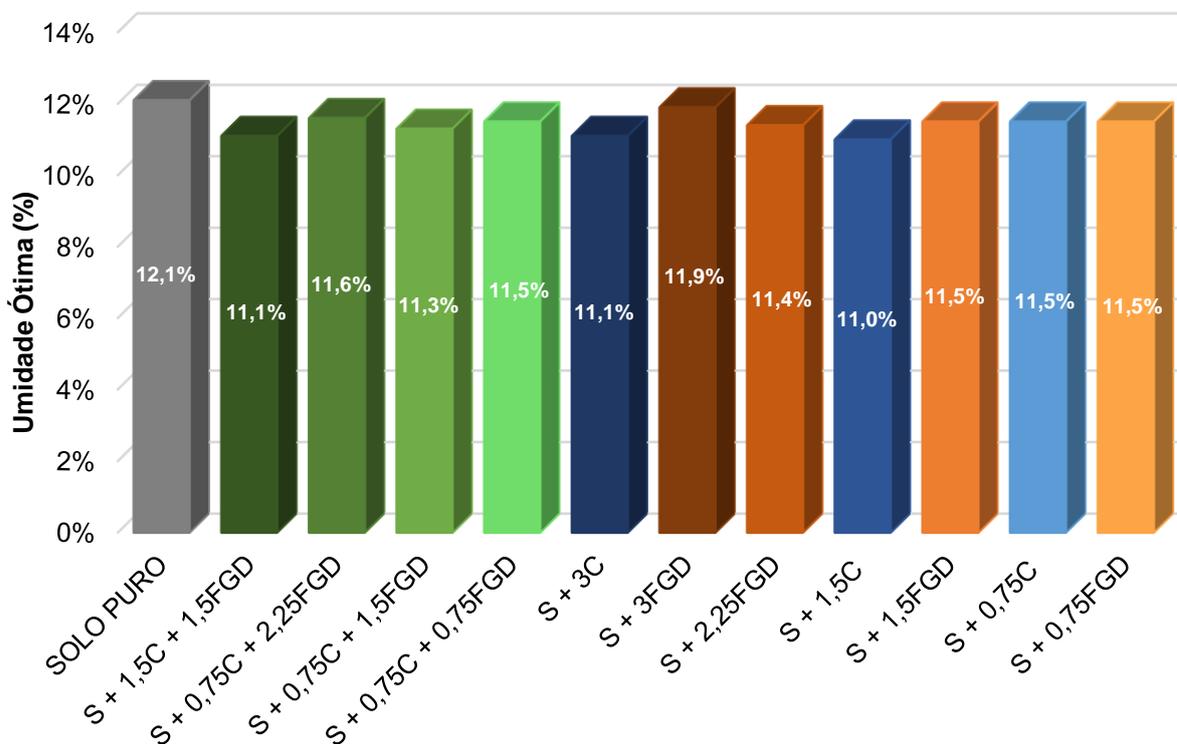
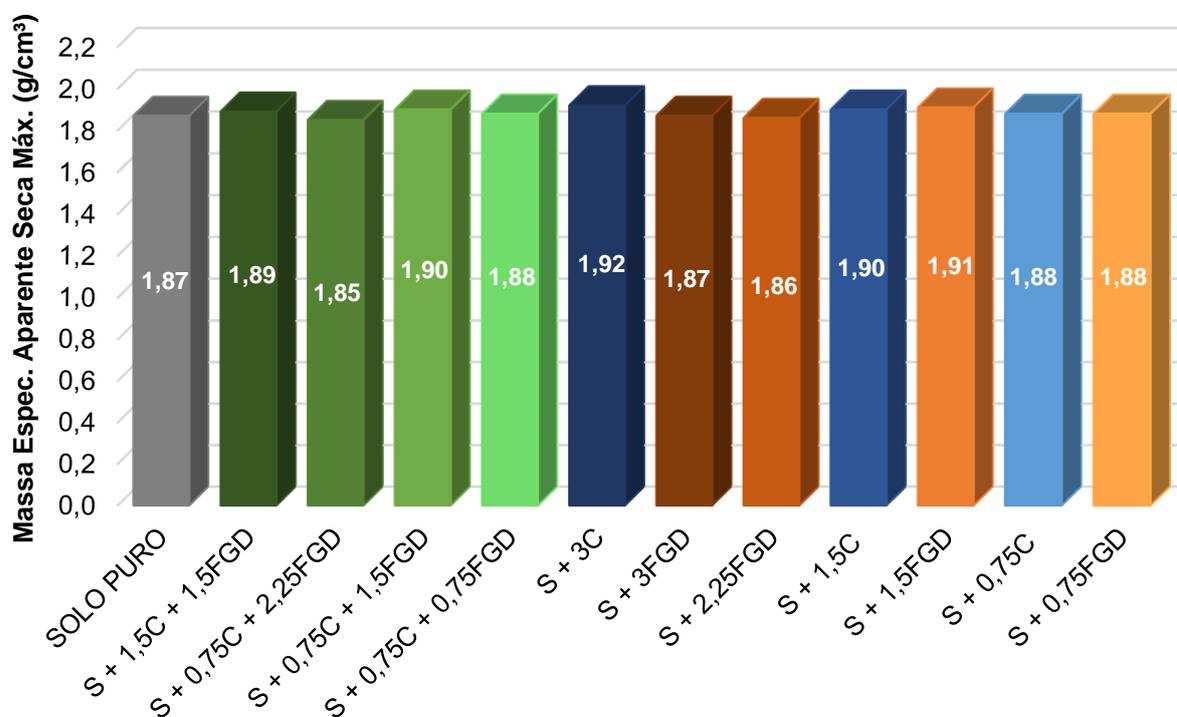


Figura 68 - Umidade ótima das amostras.



Fonte: Autora.

Figura 69 - Massa específica aparente seca máxima das amostras.



Fonte: Autora.

Nota-se que a adição de cimento e pó FGD não gera uma variação expressiva de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima. Todavia, observa-se uma

diminuição da umidade com o acréscimo dos aditivos, mais notável para os maiores teores de cimento, diferente do esperado, já que este aditivo é hidrofílico e exigiria uma maior quantidade de água. Baseado em Nóbrega (1995), esse resultado pode ser explicado pela interação do cimento com o solo: em um solo granular, a cimentação ocorre somente nos pontos de contato, entretanto num solo bem graduado, com considerável fração fina, como neste caso, essas partículas preenchem os vazios, portanto mais extensa será a superfície de contato interpartículas e maior o efeito da cimentação; essa cimentação gera um efeito químico na superfície, que diminui a afinidade da argila com a água e a sua capacidade de retenção, e, por isso, diminui também a umidade ótima do solo. E, como a quantidade de vazios diminui, menos água é necessária para preenchê-los.

Por outro lado, a maioria das misturas com adição de cimento e/ou pó FGD resultou em uma massa específica aparente seca máxima maior que a do solo puro. Essa mudança pode ser atribuída ao efeito combinado da alteração da graduação do solo na compactação e as diferenças de massa específica real dos grãos dos estabilizadores e do solo (CUNHA, 1992), e nesse caso o cimento e o pó FGD apresentam maiores valores de densidade que o solo.

Os resultados da diminuição da umidade ótima e o leve acréscimo da massa específica aparente seca máxima com a incorporação dos aditivos são coerentes com os estudos de Arrivabeni *et al.* (2018), Pereira (2012), Almeida *et al.* (2015), em que a adição do cimento ao solo causou esses mesmos efeitos.

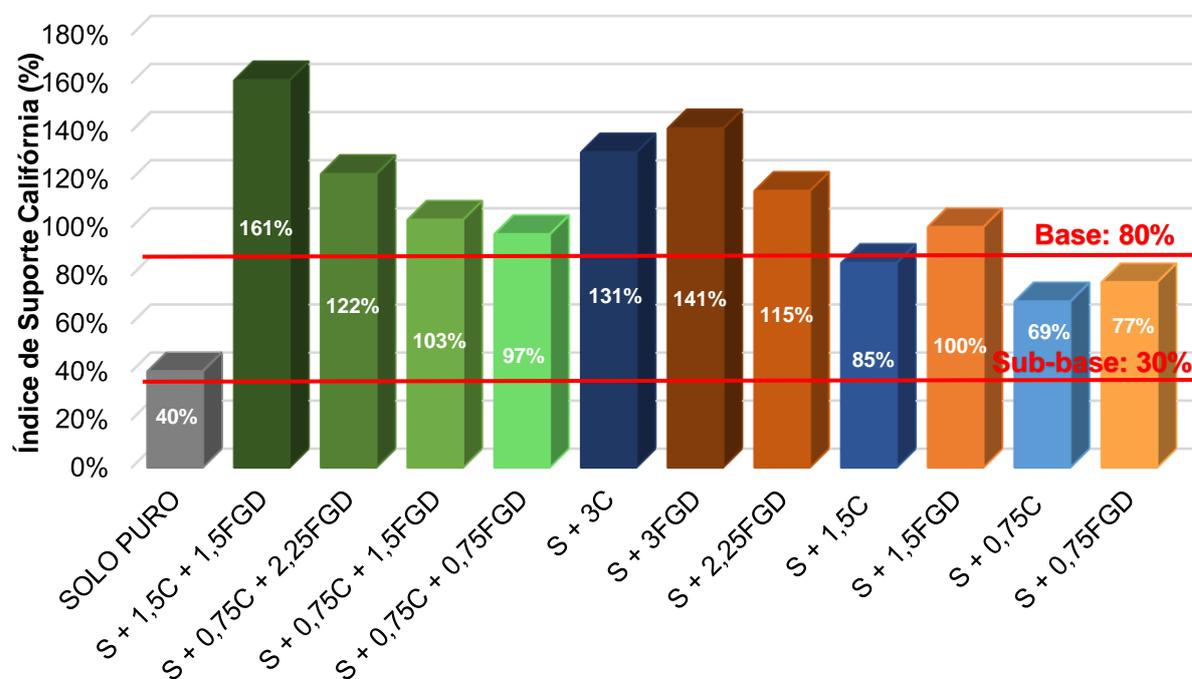
4.2.2 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

Os valores encontrados de ISC das 12 amostras estão apresentados na Figura 70. Para efeito comparativo e uma melhor visualização dos resultados, na Figura 71 estão apresentados os resultados das misturas com os dois aditivos (solo/cimento/FGD) e na Figura 72 os resultados das misturas com os aditivos individualmente (solo/cimento e solo/FGD).

Com os resultados da Figura 70 nota-se que a incorporação do cimento e do pó FGD, quando adicionados juntos ou separados, aumentam expressivamente o valor de ISC do solo em todas as misturas estudadas, e somente as misturas com o menor teor de aditivo, S+0,75C e S+0,75FGD, além do SOLO PURO, não alcançaram o ISC mínimo de 80% para utilização em camada de base, imposto pela norma ES 142/10 (DNIT,

2010). Entretanto, de acordo com a norma ES 140/10 (DNIT, 2010), essas misturas podem ser utilizadas em sub-bases, uma vez que o valor mínimo de ISC é 30%.

Figura 70 - Índice de suporte Califórnia (ISC) das amostras.



Fonte: Autora.

Analisando as misturas com os dois aditivos (solo/cimento/FGD), na Figura 71, observa-se o crescimento da resistência à medida que se aumenta o teor total de aditivo, adicionando mais pó FGD e mantendo a mesma quantidade de cimento, deixando claro o bom desempenho dos aditivos empregados conjuntamente. Entretanto, o maior valor de ISC, dentre todas as misturas estudadas, foi a da S+1,5C+1,5FGD, evidenciando o poder estabilizante do cimento, que fez o ISC atingir, de 103%, correspondente à mistura S+0,75C+1,5FGD, para 161%, correspondente à mistura S+1,5C+1,5FGD, com o aumento de 0,75% desse aditivo.

A partir da Figura 72 nota-se que nas misturas com apenas um aditivo, também há o aumento da resistência do solo com o acréscimo do teor de cimento e de pó FGD. Observa-se que, para os mesmos teores de adição, as misturas de solo/FGD alcançaram maiores resistências do que as misturas de solo/cimento, resultado surpreendente, visto que o cimento é um convencional estabilizante de solos e o esperado eram valores superiores desse aditivo em relação ao pó FGD. Uma explicação possível pode ser o maior valor de CTC do pó FGD em comparação ao cimento, que potencializa a estabilização do solo.

Figura 71 - Comparativo entre os valores de ISC para as misturas de solo/cimento/FGD.

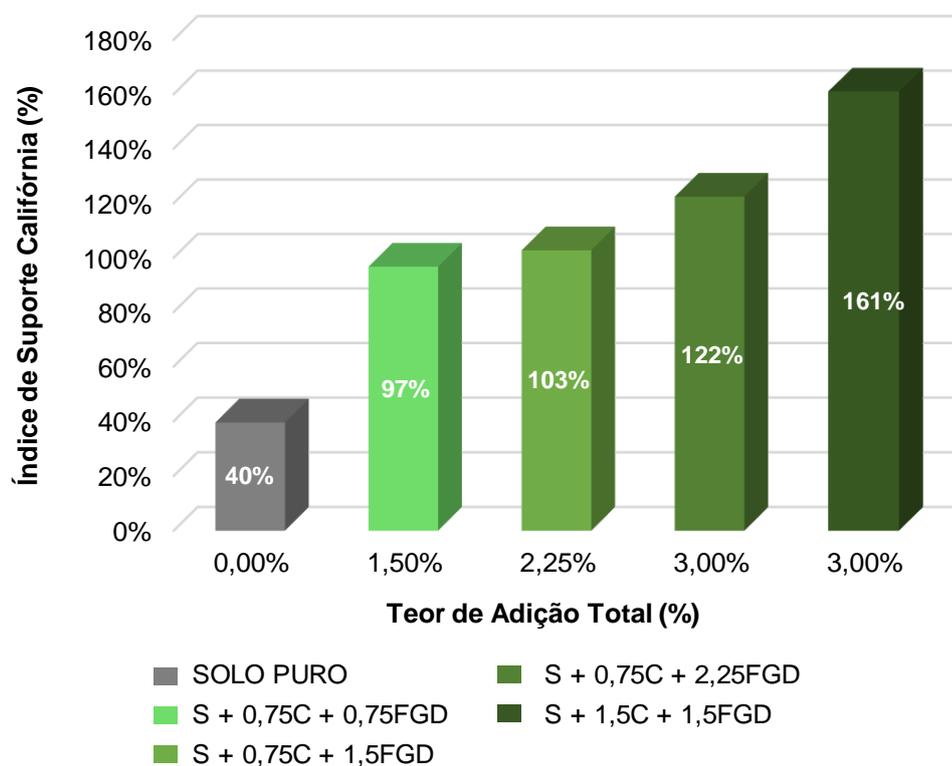
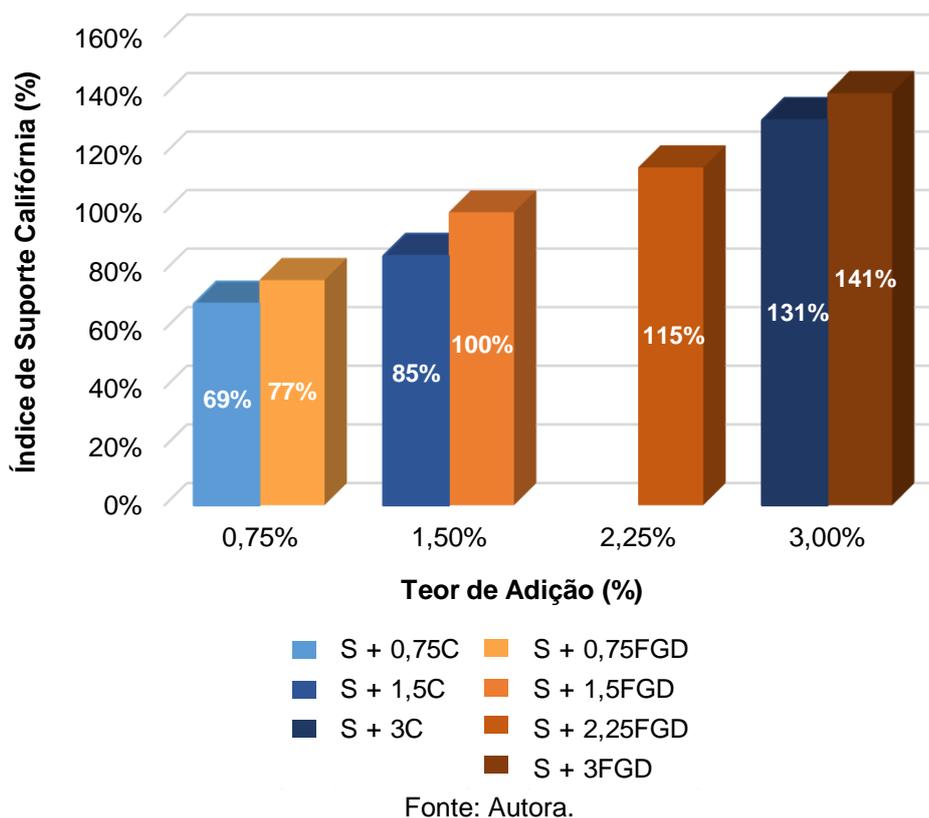


Figura 72 - Comparativo entre os valores de ISC para as misturas de solo/cimento e solo/FGD.



Comparando com o estudo de Joel e Agbede (2010), apresentado anteriormente, os valores de ISC obtidos neste trabalho, com a adição de cimento e pó FGD, foram expressivamente superiores aos encontrados pelos autores, com a adição de cimento e cal, tanto com os aditivos em conjunto quanto individualmente. Isso pode ser explicado devido ao tipo de solo, já que o cimento tem maior potencial estabilizante em solos arenosos, como é o caso do solo utilizado nesta pesquisa. Os resultados superiores das misturas de solo/FGD em comparação às de solo/cimento indicam que o pó FGD também tem uma boa interação com solos arenosos, e difere do trabalho citado, em que foi o cimento que forneceu maior ganho de resistência ao solo; resultado interessante, visto que o pó FGD possui similaridades à cal, e esta tem melhor desempenho na estabilização de solos finos.

Comparando as misturas com os dois aditivos e as misturas com apenas um aditivo, observa-se que as misturas de solo/FGD alcançaram maiores valores de ISC que as misturas de solo/cimento/FGD, para um mesmo teor de adição total. Por exemplo, a mistura S+0,75C+2,25FGD resultou em um ISC de 122%, enquanto a mistura S+3FGD alcançou um ISC de 141%. Somente a mistura S+1,5C+1,5FGD contrariou esses resultados, com 161% de ISC, ultrapassando o valor da mistura S+3FGD, devido ao maior teor de cimento.

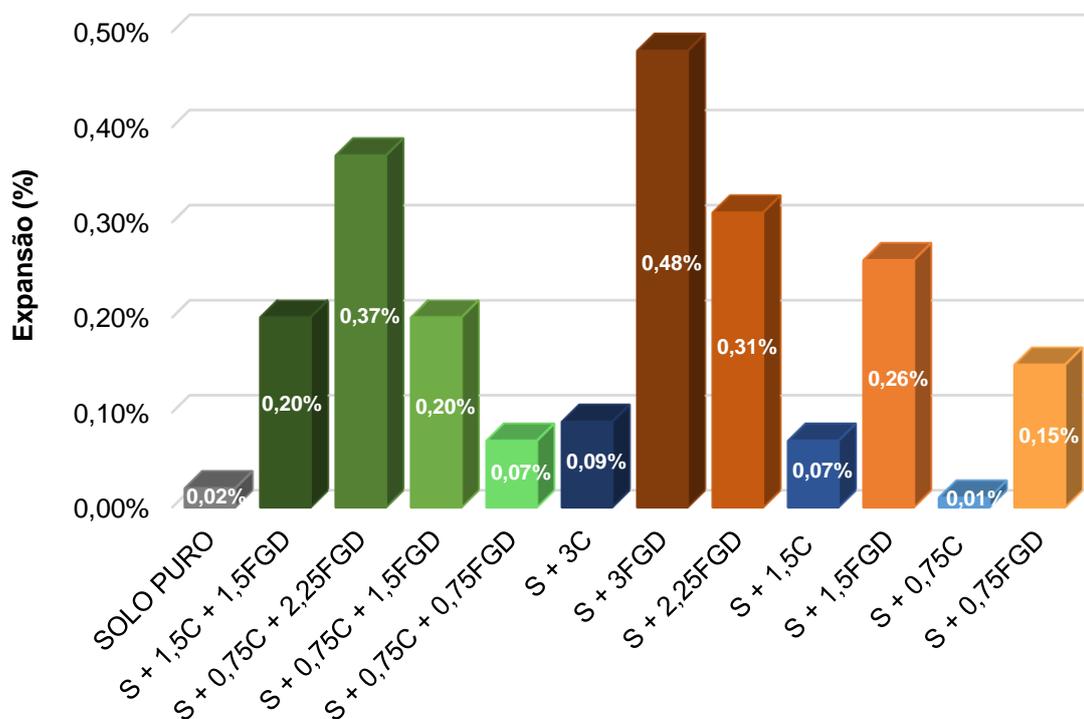
4.2.3 Expansão

A Figura 73 apresenta os valores de expansão na umidade ótima das amostras ensaiadas. O valor de expansão nas misturas de solo/cimento e solo/FGD são diretamente proporcionais ao teor de adição. Nota-se que o cimento não gerou expansões expressivas no solo, devido à sua natureza mineralógica, enquanto o pó FGD mostrou-se um material expansivo, evidenciado pela mistura S+3FGD, com um valor de 0,48% de expansão, estando no limite imposto pela norma ES 142/10 (DNIT, 2010), cujo valor máximo é de 0,5% para aplicação em camadas de base. Enquanto, para as camadas de sub-base, o valor máximo é de 1%, segundo a norma ES 140/10 (DNIT, 2010), tornando seu uso mais viável nessa situação.

Nas misturas de solo/cimento/FGD a expansão aumenta com o acréscimo do teor de pó FGD. Observa-se que a substituição parcial do pó FGD por cimento diminui a expansão da mistura, como pode ser visto pela queda desse valor de 0,48% da

mistura S+3FGD para 0,37% da mistura S+0,75C+2,25FGD e para 0,20% da mistura S+1,5C+1,5FGD.

Figura 73 - Expansão das amostras.



Fonte: Autora.

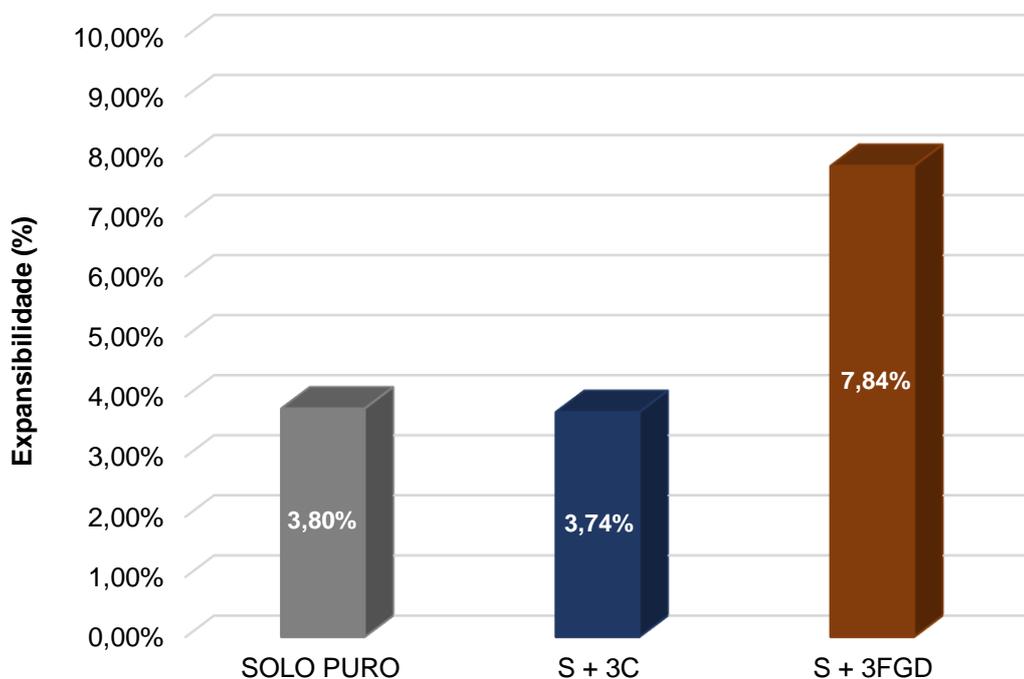
Uma hipótese para a expansão do pó FGD seria o fato da área superficial desse material ser maior que a do solo e, por isso, ter uma capacidade elétrica elevada, provocando a atração de moléculas de água e cátions hidratados, causando a expansão. Outra hipótese é a ausência de SiO_3 no pó FGD para, em conjunto com o CaO , reagir com a água, causando a expansão com o excesso desta. E outra seria que na hidratação do cimento é formado o Ca(OH)_2 , e como o pó FGD já é constituído desse mineral, a adição da água causa um excesso desta, originando a expansão.

4.2.4 Expansibilidade

A Figura 74 apresenta os valores de expansibilidade das amostras submetidas a este ensaio. Obteve-se valores praticamente iguais para o solo puro e a mistura S+3C, 3,80% e 3,74%, respectivamente, como ocorreu no ensaio de expansão. Por outro lado, o valor encontrado para a mistura S+3FGD foi mais que o dobro das outras amostras, 7,84%, compactuando com os altos valores de expansão das misturas com o pó FGD. Todavia, ainda é um valor aceitável, de acordo com a norma ES 098/07

(DNIT, 2007), que determina o valor máximo de 10% de expansibilidade para solos lateríticos.

Figura 74 - Expansibilidade das amostras.



Fonte: Autora.

4.2.5 Relação Vazios/Aditivo

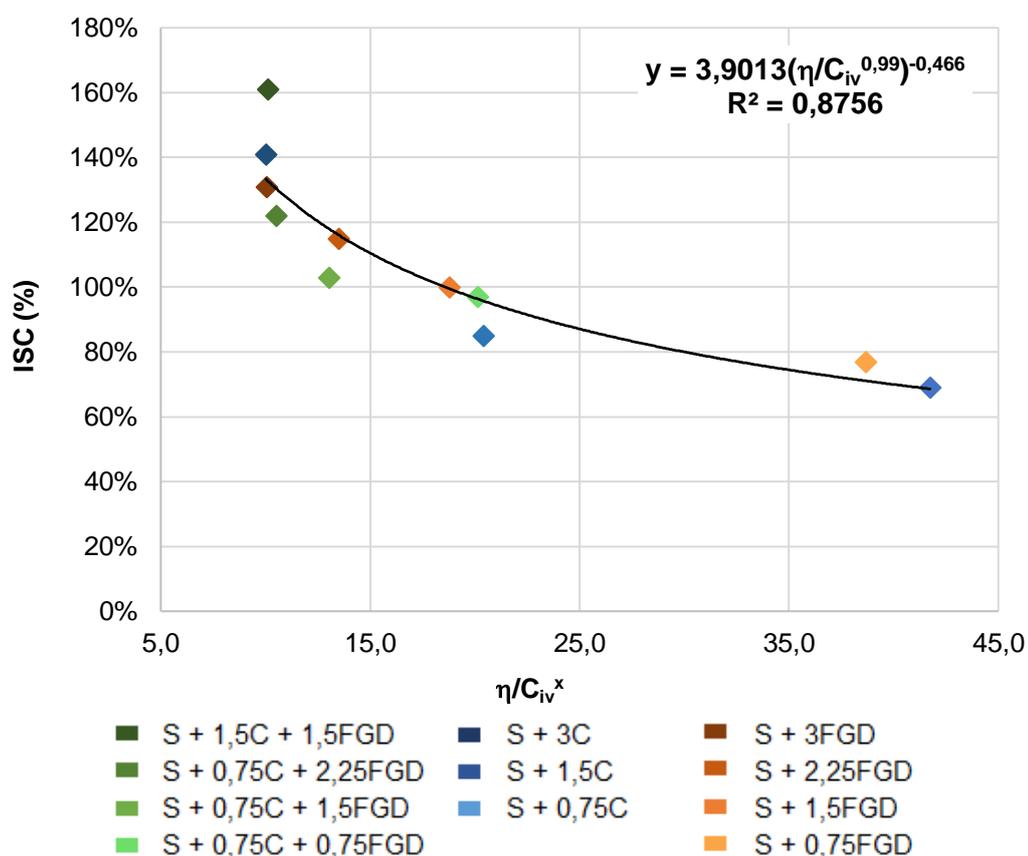
Com o objetivo de desenvolver uma metodologia de previsão do ISC em função do teor de aditivo, os resultados do ensaio de compactação e ISC, na umidade ótima, foram aplicados na metodologia de Foppa (2005) e Consoli *et al.* (2007), sendo nesse caso, ao invés da resistência à compressão simples, o índice de suporte Califórnia (ISC) expresso em função da razão entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de aditivo (cimento e pó FGD) (C_{iv}). Na Figura 75 está apresentado o modelo aplicado e na Tabela 10 estão apresentados os dados utilizados nesta aplicação.

Como citado por Consoli *et al.* (2007), o expoente (x) do teor volumétrico de aditivo (C_{iv}) varia de acordo com os tipos de materiais da mistura, e, nesta dissertação, o que mais se adequou foi o valor de 0,99, determinado por sucessivas tentativas até encontrar o que melhor se ajustava, resultando em um R^2 de 0,8756.

No gráfico da Figura 75 observa-se que há uma tendência de crescimento do ISC com o decréscimo da relação vazios/aditivo. Nesta metodologia aplicada pode-se afirmar que a relação η/C_{iv}^x varia, essencialmente, em função do teor de aditivo, uma vez que

há pouca variação da porosidade, devido às umidades aproximadas e à utilização da mesma energia de compactação (Proctor intermediária). Portanto, quanto maior o teor de aditivo maior o valor de ISC encontrado.

Figura 75 - Índice de suporte Califórnia (ISC) do solo como função da relação vazios/aditivo expresso em termo da porosidade e do teor volumétrico do aditivo.



Fonte: Autora.

A partir da metodologia proposta pode ser possível prever e controlar o valor de ISC em função do teor de aditivo. Isto é, para alcançar um desejável ISC, a quantidade de aditivo que deve ser adicionada é determinada por meio do gráfico.

Nota-se que a distribuição dos pontos mostra um notável grau de conformação (R^2) com o modelo elaborado pelos autores em que esta metodologia foi baseada. Aplicar essa metodologia não foi o objetivo central deste trabalho, portanto, é necessário um estudo específico para obter melhores resultados e elaborar uma metodologia específica para a previsão de ISC em função da relação vazios/aditivo.

Tabela 10 - Dados para aplicação da metodologia baseado em Foppa (2005) e Consoli *et al.* (2007).

Misturas	C (%)	γ_s (g/cm ³)	$\omega_{\text{ótima}}$ (%)	γ_d (g/cm ³)	ISC (%)	η (%)	C_{iv} (%)	x	η/C_{iv}^x
SOLO PURO	0,00	2,65	12,1	1,873	40	29,32	0,00	0,99	-
S + 1,5C + 1,5FGD	3,00	2,66	11,1	1,892	161	28,87	2,76	0,99	10,10
S + 0,75C + 2,25FGD	3,00	2,66	11,6	1,847	122	30,56	2,80	0,99	10,52
S + 0,75C + 1,5FGD	2,25	2,65	11,3	1,900	103	28,3	2,09	0,99	13,02
S + 0,75C + 0,75FGD	1,50	2,65	11,5	1,882	97	29,98	1,38	0,99	20,15
S + 3C	3,00	2,66	11,1	1,922	131	27,74	2,66	0,99	10,05
S + 3FGD	3,00	2,65	11,9	1,866	141	29,58	2,85	0,99	10,02
S + 2,25FGD	2,25	2,65	11,4	1,855	115	30,00	2,14	0,99	13,50
S + 1,5C	1,50	2,65	11,0	1,898	85	28,38	1,33	0,99	20,42
S + 1,5FGD	1,50	2,65	11,5	1,910	100	27,92	1,43	0,99	18,78
S + 0,75C	0,75	2,65	11,5	1,876	69	29,2	0,67	0,99	41,74
S + 0,75FGD	0,75	2,65	11,5	1,883	77	28,94	0,71	0,99	38,66

Fonte: Autora.

Em que:

- C Teor de adição em massa (%);
- γ_s Massa específica real dos grãos / Densidade relativa (g/cm³);
- $\omega_{\text{ótima}}$ Umidade ótima (%);
- γ_d Massa específica aparente seca (g/cm³);
- ISC Índice de suporte Califórnia (%);
- η Porosidade (%);
- C_{iv} Teor de adição em volume (%);
- x Expoente;
- C_{iv}^x Relação vazios/aditivo.

CAPÍTULO 5

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, por meio dos ensaios laboratoriais, foi possível caracterizar os materiais (solo, cimento e pó FGD) individualmente, e entender os efeitos da adição do cimento e do pó FGD no solo estudado a partir da discussão dos resultados obtidos nos parâmetros físicos, químicos e mecânicos, chegando às seguintes conclusões:

Quanto à granulometria, pode-se dizer que a incorporação do cimento e do pó FGD não causou alteração granulométrica no solo, visto que o teor de adição é muito baixo. Do mesmo modo que não alterou os valores de massa específica real dos grãos do solo.

Quanto aos limites de consistência, a incorporação do cimento e do pó FGD causou uma queda da plasticidade do solo, mais acentuada na presença do pó FGD, podendo ser explicado pelo maior potencial de trocas catiônicas do pó FGD com os argilominerais do solo. Os valores dos limites de plasticidade e contração se mostraram diretamente proporcionais aos teores dos aditivos, enquanto os valores de índice de plasticidade foram inversamente proporcionais, e, por outro lado, não houve alteração notável nos limites de liquidez. Ou seja, quanto maior a porcentagem de adição, maiores os valores de LP e LC e menores os valores de IP. Também houve uma queda na atividade da argila das amostras, devido à queda do IP, que causou a mudança da atividade da fração argila do solo de normal para ativa, com a incorporação dos aditivos, e somente a mistura S+0,75C permanecendo normal, por essa adição não causar efeitos expressivos.

Quanto ao pH, o solo foi classificado como ácido, característica típica de solos tropicais, devido ao seu processo de formação, enquanto o pó FGD foi classificado como básico, do mesmo modo que o cimento. Essas características favorecem o processo de estabilização do solo, visto que o pH dos materiais influencia as trocas catiônicas da mistura.

Quanto à capacidade de troca catiônica (CTC), a incorporação do pó FGD ao solo causou efeito semelhante ao da cal, já conhecido. Essa adição, em solução aquosa, eleva o pH da mistura e facilita as trocas catiônicas. Os ânions OH^- , dissolvidos do pó FGD, neutralizam os cátions ácidos Al^{3+} e H^+ , oriundos da dissolução da superfície da argila do solo, enquanto os cátions Ca^{2+} , também dissolvidos do pó FGD, são adsorvidos na superfície dos argilominerais, substituindo cátions de menor valência presentes na argila. Sendo assim, um valor alto de CTC total e de cátions Ca^{2+} disponíveis possibilita maiores interações de trocas catiônicas orientadas por Ca^{2+} . Como o pó FGD possui essas características e em grande quantidade, esse mecanismo de estabilização é válido e eficaz.

Quanto à composição química dos materiais, pôde-se identificar os elementos que fazem parte da estabilização química de solos. O solo é constituído, em sua maioria, por Al_2O_3 , SiO_2 e FeO_3 , os quais estão envolvidos nos processos de trocas catiônicas e reações pozolânicas, em conjunto com o elemento de CaO presentes na maior parte do pó FGD e do cimento. E o SiO_2 , presente no cimento, juntamente com CaO , dão origem aos principais compostos do cimento, responsáveis por sua hidratação.

Quanto à composição mineralógica, a presença de determinados minerais evidencia a capacidade de estabilização. O solo é formado, majoritariamente, por minerais de gibbsita e calcita, os quais são favoráveis à estabilização com cimento. No cimento foi identificado a presença predominante da alita, maior responsável pelas reações de hidratação do cimento. E o pó FGD é composto em grande parte pela portlandita, o qual participa das reações de trocas catiônicas e reações pozolânicas.

Quanto às classificações do solo e das misturas: no método SUCS, a adição do cimento e do pó FGD alterou a classificação do solo de areia argilosa (SC) para areia argilo-siltosa (SC-SM) para a maioria das misturas, e para areia siltosa (SM) para as duas misturas com maiores teores do pó FGD individuais, somente a mistura com menor teor de cimento individual permaneceu com a mesma classificação do solo puro; no método de AASHTO, a incorporação dos aditivos não causou mudanças na classificação, e todas as amostras foram classificadas como A-2-4, constituídas em sua maioria por areia e areia argilosa ou areia siltosa, e índice de grupo zero, indicando um ótimo desempenho de suporte; e no método MCT, a adição do pó FGD e do cimento intensificou a classificação laterítica do solo, sendo todas as três misturas ensaiadas classificadas como uma areia argilosa laterítica (LA'), corroborando com as

propriedades dos solos obtidas nos ensaios de caracterização física e química. As classificações do solo nos métodos tradicionais estão de acordo com a classificação MCT.

Quanto à compactação, a adição do cimento e do pó FGD diminuiu a umidade ótima de todas as misturas, mais evidenciado com a presença de cimento, e aumentou, quase que imperceptível, a massa específica aparente seca máxima de quase todas as misturas.

Quanto ao índice de suporte Califórnia (ISC), a incorporação do cimento e do pó FGD propiciou um aumento expressivo na resistência para todas as misturas, devido aos mecanismos de estabilização, como as reações de hidratação, trocas catiônicas e reações pozolânicas; podendo ser utilizadas em camadas de base, com ISC maior que 80%; somente as misturas S+0,75C e S+0,75FGD, além do SOLO PURO, não alcançaram essa resistência, entretanto, ainda podem ser empregadas nas camadas de sub-base, onde o ISC mínimo é de 30%. O valor de ISC é diretamente proporcional ao teor de adição, quanto maior o teor de adição, maior a resistência. Nas misturas de solo/cimento/FGD, o aumento do teor de pó FGD, aumenta o ISC. Analisando as misturas com os aditivos individualmente (solo/cimento e solo/FGD), nota-se que a adição do pó FGD causa um maior acréscimo de ISC do que o cimento, acréscimo maior até que nas misturas de solo/cimento/FGD com mesmo teor de adição total, somente não ultrapassando a mistura S+1,5C+1,5FGD, por conter um teor considerável de cimento, além do pó FGD. Diante deste âmbito, é possível afirmar que a incorporação do cimento e do pó FGD, juntos ou individualmente, estabilizam o solo tornando-os aptos para uso em camadas de pavimentação.

Quanto à expansão, a adição do cimento ao solo causa um mínimo aumento deste parâmetro, enquanto o pó FGD causa um acréscimo expressivo, chegando a 4,8% na mistura S+3FGD, no limite imposto em norma, que é de 0,5% para camadas de base. O aumento da expansão é diretamente proporcional ao teor de aditivo. Nas misturas de solo/cimento/FGD, o cimento diminui em partes a expansão da mistura causada pelo pó FGD. Essa característica expansiva do pó FGD pode limitar seu uso nas camadas de pavimentação, porém, em conjunto com o cimento, a mistura se torna adequada.

Quanto à expansibilidade, a adição do cimento causou uma leve queda em relação ao solo puro, por outro lado, o pó FGD causou um acréscimo de mais da metade do valor de expansibilidade do solo, confirmando sua característica expansiva, entretanto, o valor alcançado não ultrapassou o limite imposto em norma.

Diante de todos os resultados e conclusões obtidas, pode-se sugerir os melhores teores de adição para a utilização em camadas de base, levando em consideração os parâmetros técnicos, econômicos e sustentáveis. Quanto à técnica, a mistura escolhida seria a S+1,5C+1,5FGD, que obteve o maior valor de capacidade de suporte, de 161%, e expansão de 0,2%, entretanto não seria econômica e sustentavelmente viável, visto que ainda utiliza-se considerável teor de cimento e o objetivo é reduzir o uso deste aditivo. Quanto à economia e à sustentabilidade, a mistura S+1,5FGD seria uma boa escolha, pois utiliza um teor médio de pó FGD e não há a presença do cimento; entretanto é recomendável um teor de aditivo capaz de permitir uma boa homogeneidade, de maneira a evitar zonas com diferentes propriedades, que afetaria negativamente o desempenho; portanto essa mistura pode não ser a ideal, mas sim uma com um teor maior de aditivo. Então, pode-se sugerir as misturas S+0,75C+2,25FGD, S+0,75C+1,5FGD e S+2,25FGD como adequadas, visto que alcançaram valores de ISC consideráveis, há pouco ou nenhum uso do cimento, o teor de adição é razoável para uma boa homogeneização em campo e atingiram valores de expansão aceitáveis. Todavia, a escolha ideal dos teores de aditivo para a melhor mistura depende do objetivo a ser atingido e das especificações de projeto de cada obra em particular.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados satisfatórios da ação do pó FGD na estabilização de solos para camadas de pavimentação e da pouca disseminação deste produto para este uso, se torna necessário o estudo mais aprofundado deste material, a fim de abranger seu emprego nessa área da engenharia, com isso sugere-se pesquisas futuras:

- Avaliar a ação do pó FGD em misturas do tipo solo-cimento, determinando a resistência à compressão simples, em diferentes tempos de cura;
- Analisar o efeito do pó FGD em diferentes tipos de solos, inclusive quanto à diferentes granulometrias;

- Realizar uma caracterização química detalhada e sofisticada das misturas de solo com pó FGD, a fim de entender melhor os mecanismos envolvidos na estabilização e elaborar um modelo de interação solo-FGD;
- Quantificar a influência individual de variáveis de interesse, como o teor de pó FGD, porosidade da mistura compactada e o teor de umidade sobre a resistência à compressão simples do solo-FGD e sobre o ISC do solo melhorado com FGD;
- Propor um método de dosagem das misturas de solo-FGD.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13600/96**: Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16697/18**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459/16**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180/16**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181/16**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7182/16**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7183/82**: Determinação do limite e relação de contratação de solos. Rio de Janeiro, 1982.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9895/16**: Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NM 52/09**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NM 53/09**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ACAA - American Coal Ash Association. **Beneficial use of coal combustion products - An American recycling success story**. 2019. Disponível em: <https://www.acaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/ACAA-Brochure-Web.pdf>. Acesso em: 07 de junho de 2019.

ACAA - American Coal Ash Association. **Production and use of coal combustion products in the U.S.** 2015. 48 p. Disponível em: <https://www.acaa->

usa.org/Portals/9/Files/PDFs/ReferenceLibrary/ARTBA-final-forecast.compressed.pdf. Acesso em 05 de maio de 2020.

ALMEIDA, G. B. de O.; CASAGRANDE, M. D. T.; CAVALCANTE, E. H. Estudos experimentais de um solo aditivado com cimento Portland para aplicação em camadas de pavimentos. **Ebook: From Fundamentals to Applications in Geotechnics**. Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, p. 87-94, Buenos Aires - Argentina, 2015.

ALVES, L. M. **Ensaio e Caracterização de Materiais**. Plasticidade e Consistência dos Solos, Unidade 4. 2010. Disponível em: <https://lucasmximoalves.wordpress.com/ensaio-e-caracterizacao-de-materiais/>. Acesso em: 21 de maio de 2020.

ALVES, M. S. **Controle de qualidade do gesso – produto do processo de dessulfuração dos gases de combustão na Central Termoelétrica do Pego**. Relatório de Estágio de Mestrado. Instituto Politécnico de Tomar, Portugal, 2013.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Carvão Mineral**. 2019. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao\(2\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao(2).pdf). Acesso em: 3 de maio de 2020.

ARRIVABENI, B. S.; MACHADO, C. C.; SILVA, C. H. de C.; SANT'ANNA, G. L. **Estabilização granulométrica e química de solo de estradas florestais através do uso de cimento**. Anuário do Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio de Janeiro, v. 41, p. 410-415, Rio de Janeiro, 2018.

AZEVEDO, M. B.; FESTUGATO, L. **Estabilização de sum solo residual de arenito Botucatu com cimento e fibra: obtenção de parâmetros preliminares de projeto de maneira simplificada**. IX Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul GEORS 2017, p. 14-24, Caxias do Sul – UCS, 2017.

BARRETO, E. C. G. **Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de solo mole do Porto de Santana, no Amapá**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) - **Livro Concreto: Ciência e Tecnologia**, 1ª ed., v. 2, Cap. 6, 2015.

BATTAGIN, A. F., SCANDIUZZI, L. A utilização da escória granulada de alto forno como agregado miúdo. Associação Brasileira de Cimento Portland. **Boletim nº 35**, p.75-76, São Paulo, 1990.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA, 2006. 504 f. il.

BERNUCCI, L. L. B. **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

BARRENETXEA, C. O.; SERRANO, A. P.; DELGADO, M. N. G.; VIDAL, F. J. R.; BLANCO, J. M. A. **Contaminación Ambiental: Una visión desde la Química**. 1. ed. Madrid: Thomson Editores, Spain, 2005. 682p.

BEZERRA, R. L. **A durabilidade de solos lateríticos estabilizados com cimento e aditivos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1976.

BP. **Statistical Review of World Energy**. 68th edition. UK, 2019. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>. Acesso em: 19 de março de 2020.

BRANCO, V. T. F. C.; VASCONCELOS, K. L.; MOREIRA, H. S.; PINHEIRO, J. H. M.; SOARES, J. B. **Utilização de resíduos na pavimentação**. In: ICTR 2004 – Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, Florianópolis, 2004.

BRIDI, L. O. **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. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020.

BRINKMANN, T.; SANTOJA, G. G.; YÜKSELER, H.; ROUDIER, S.; SANCHO, L. **Best Available Techniques Reference Documents for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management in the Chemical Sector**. EUR 28112 EN, 2016.

BRODNY, J.; TUTAK, M. Analysis of the diversity in emissions of selected gaseous and particulate pollutants in the European Union countries. **Journal of Environmental Management**, v. 231, p. 582-595, 2019.

BUDNY, J. **Verificação do potencial de estabilização de um solo laterítico com uso de ácido fosfórico, ácido cítrico e cinza de casca de arroz**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

CAILLAHUA, M. C. **Avaliação técnica para uso do gesso FGD como aditivo retardador do tempo de pega em cimento Portland**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

CAILLAHUA, M. C.; MOURA, F. J. Technical feasibility for use of FGD gypsum as an additive setting time retarder for Portland cement. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 7, n. 2, p.190-197, 2018.

CARDOSO, J. G. F. G.; ALMEIDA, G. B. de O.; CASAGRANDE, M. D. T. **Análise de estabilização química de solo argiloso com cimento pra uso na pavimentação**. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG 2016, Belo Horizonte, 2016.

CARPENTER, A. M. **Low water FGD Technologies**. London: IEA Clean Coal Centre. Nov. 2012. 73 p.

CARRARO, J. A. H. **Utilização de resíduos industriais na estabilização de um solo residual de arenito**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

CASTELLAN, J. L.; CHAZAN, D. T.; ÁVILA, M. L. **Dessulfuração em Termoelétricas a Carvão O Caso da Usina de Candiota II**. In: II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CINETEL), Salvador, p. 330–338, 2003.

CASTRO, R. de P. V. de. **Caracterização de sólidos e desenvolvimento de metodologia analítica para monitoramento de tratamento oxidativo de resíduos sólidos de dessulfurização de gases exaustos de termoelétrica a carvão**. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

CASTRO, F. J. C. de O. **Contribuição ao Conhecimento e à Determinação da Reatividade de Solos Sesquióxidos Utilizando o Hidróxido de Cálcio: Aplicação**

ao Processo de Geopolimerização (Estabilização). Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

CASTRO, R. P. V.; MEDEIROS, J. L.; ARAUJO, O. Q. F.; CRUZ, M. A.; RIBEIRO, G. T.; OLIVEIRA, V. R. Fluidized bed treatment of residues of semi-dry flue gas desulfurization units of coal-fired power plants for conversion of sulfites to sulfates. **Energy Conversion and Management**, v. 143, p. 173-187, 2017.

CAZZOLINO, V. M. N.; NOGAMI, J. S. Classificação geotécnica MCT para solos lateríticos. **Solos e Rochas**, p. 77-91, São Paulo, 1993.

CERATTI, J. A. P. **Estudo do comportamento à fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Anuário CNT do Transporte de 2019 – Estatísticas Consolidadas**. Disponível em:

<https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2019/Inicial>. Acesso em: 17 de junho de 2020.

COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. Air pollution Control: A Design Approach. **Waveland: Prospects Heights**, p. 694, 1994.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 436, de 22 de dezembro de 2011. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. **Diário Oficial da União**, Brasília: MMA - Ministério do Meio Ambiente, nº 247, de 26 de dezembro de 2011, p. 304-311. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=660>. Acesso em: 28 de maio de 2020.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M. F.; FESTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 136, p. 759-763, 2010a.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M. F. Variables controlling strength of artificially cemented sand: influence of curing time. **Journal of Materials in Civil Engineering**, ASCE, v. 23, p. 692-696, 2010b.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; CONSOLI, B. S.; MAGHOUS, S. Failure envelope of artificially cemented sand. **Géotechnique**, v. 62, n. 6, p. 543-547, 2012b.

CONSOLI, N. C.; FONSECA, A. V. da; SILVA, S. R.; CRUZ, R. C.; FONINI, A. Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. **Géotechnique**, v. 62, n. 2, p. 177-183, 2012a.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, v. 133, p. 197-205, 2007.

CONSOLI, N. C.; ROSA, D. A.; CRUZ, R. C.; ROSA, A. D. Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil. **Engineering Geology**, v. 122, p. 328-333, 2011.

CORDOBA, P. Status of Flue Gas Desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs. **Fuel**, v. 144, p. 274-286, 2015.

CORRÊA, J. F. **Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

COSTA, M. M da. **Princípios de ecologia industrial aplicados à sustentabilidade ambiental e aos sistemas de produção de aço**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Espírito Santo, Rio de Janeiro, 2002.

COUTINHO, J. de S. **Materiais de Construção 2: 1ª Parte – Ligantes e Caldas**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2006.

CREVECOEUR, S.; SMITH, K. Evaluation of Wet FGD Technologies to meet requirements for post CO₂ removal of Flue Gas streams. In: INTERNATIONAL AIR QUALITY VII CONFERENCE, 7., 2007, Arlington. **Anais eletrônicos [...]** Virginia/EUA: Energy & Environmental Research Center, 2009. Disponível em: <http://www.mass.gov/eea/docs/dep/air/priorities/hazeapd25.pdf>. Acesso em 02 dezembro 2019.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho, Portugal, 2001.

CRUZ, M. de L. S. da. **Novas tecnologias de aplicação de solo-cimento**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho, Portugal, 2004.

CSN – Companhia Siderúrgica Nacional. **Apostila de Cimentos**. 2016. Disponível em: http://www.csn.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&conta=45&tipo=59657. Acesso em: 05 de abril de 2020.

CUNHA, M. F. P. Programa Interlaboratorial, **Apostila Curso de Qualidade em Laboratórios**, IBP, Rio de Janeiro, 1992.

CUNHA, Y. G. **Avaliação das propriedades ambientais do lixiviado e da massa bruta de solos melhorados com coprodutos siderúrgicos obtidos em laboratório por meio de ensaio de coluna**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020.

DEPRIEST, W.; GAIKWAD, R. P. Economics of lime and limestone for control of sulfur dioxide. **Proceedings of Combined Power Plant Air Pollutant Control Mega Symposium**, p. 1–25, 2003.

DIAS, J. J. F. M. S. **Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

DER-PR – Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná. **Tópicos de projetos de pavimentos asfálticos e de cimento Portland**. Programa de Integração e Capacitação. Paraná, 2018. Disponível em: http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/RHTemp/PavimentosFlexiveiseRigidos_LucasAdada.pdf. Acesso em: 05 de abril de 2020.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **CLA 259/96**: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura – Classificação. Rio de Janeiro, 1996.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **ME 256/94**: Solo compactados em equipamento miniatura-determinação da perda de massa por imersão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **ME 258/94**: Solo compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **Manual de Pavimentação**. 3.ed., 274p. (IPR. Publi., 719), Rio de Janeiro. 2006.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **ES 098/07:** Pavimentação – base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2007.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **ES 140/10:** Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **ES 142/10:** Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **ME 160/12:** Solo – Determinação da expansibilidade – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **ME 414/19:** Pavimentação – Solo-cimento – Dosagem físico-química de solo-cimento – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de solo.** 3ªed., Brasília - DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2017.

EPRI – Electric Power Research Institute. **A Review of Literature Related to the Use of Spray Dryer Absorber Material:** Production, Characterization, Utilization Applications, Barriers, and Recommendations. Palo Alto, CA. 2007.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. **Mineralogia da fração argila e estrutura e latossolos da Região Sudeste do Brasil.** R. Bras. Ci. Solo, p. 23:507-514, 1999.

FHWA – Federal Highway Administration (EUA). **Fly ash facts for highway engineers.** Washington DC: U.S. Department of Transportation, 2003. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/fafacts.pdf>. Acesso em: 10 de junho de 2020.

FHWA – Federal Highway Administration (EUA). **User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction.** FGD scrubber material - Material Description. Report FHWA-IF-03-019. Washington DC: U.S. Department of Transportation. 2016. 6 p. Disponível em:

<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/fgd1.cfm>. Acesso em 30 novembro 2019.

FHWA – Federal Highway Administration (EUA). **User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction**. FGD scrubber material - Stabilized Base. Report FHWA-RD-97-148. Washington DC: U.S. Department of Transportation. 2016. 6 p. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/fgd2.cfm>. Acesso em 13 de maio de 2020.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

FRANÇA, I. W.L. **Avaliação do efeito de aditivos na dessulfuração de gases de combustão (FGD) em unidade piloto de SDA**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

FRANÇA, F. C. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto “RBI grade 81”**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

FURIERI, E. C. **Avaliação em laboratório e em campo por meio do simulador linear de tráfego móvel de solos estabilizados com coproduto KR, cimento Portland Blindasolo®**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

GEA. **The Economic Solution for Flue Gas Desulfurization**. GEA Niro Spray Drying Absorption. 2020. Disponível em: https://www.gea.com/en/binaries/flue-gas-cleaning-spray-power-plants-gea_tcm11-34871.pdf. Acesso em: 26 de março de 2020.

GONÇALVES, R. de M. **Incorporação de aciaria KR e polímero PDC em solos para base de pavimentos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

GONÇALVES, R. de M.; IZOTON, S.; PIRES, P. J. M. **Utilização de escória de dessulfuração (KR) em camadas de base e sub-base de pavimentos**. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2016, Belo Horizonte, 2016.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do Baixo Jaguaribe / Estado do Ceará.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

GORSKI, C. M. F. M. **Estabilização de solos argilosos com ligante hidráulico LIPIDUR DS.** Dissertação de Mestrado. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2010.

GROSCHE, L. C. **Síntese de material de valor agregado a partir de coproduto da combustão de carvão: caracterização e aplicação na remediação de efluente aquoso.** Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil.** 2ª Edição. São Paulo: Pini, 2002.

HEEBINK, L.; BUCKLEY, T.; HASSET, D.; ZACHER, E.; HASSET, D.P.; DOCKTER, B. **Current status of spray dryer absorber material characterization and utilization.** In: World of Coal Ash (WOCA) Conference, Northern Kentucky, USA, 2007.

HENKELS, P. J.; GAYNOR, J. C. Characterizing synthetic gypsum for wallboard manufacture. **ACS Division of Fuel Chemistry**, Preprints 41 [2], 569–574, 1996.

HILL, F. F.; ZANK, J. Flue gas desulphurization by spray dry absorption. **Chemical Engineering Processing**, v. 39, p. 45–52, 2000.

IAB – Instituto Aço Brasil. **Anuário Estatístico 2020.** Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: https://institutoacobrasil.net.br/site/wp-content/uploads/2020/06/Anuario_Completo_2020.pdf. Acesso em: 18 de junho de 2020.

IAB – Instituto Aço Brasil. Desempenho ambiental – Coprodutos e resíduos. **Relatório de Sustentabilidade 2018.** Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>. Acesso em: 20 de maio de 2020.

IAB – Instituto Aço Brasil. **Processo Siderúrgico.** 2020. Disponível em: <https://institutoacobrasil.net.br/site/processo-siderurgico/>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2020.

IEA – International Energy Agency. **Coal 2019**. Analysis and Forecasts to 2024. 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/coal-2019>. Acesso em: 18 de março de 2020.

JIANG, Y.; WU, M-C. M.; SU, Q.; LU, M.; LIN, C. **Dry CFB-FGD By-Product Utilization - International Prospectives**. World of Coal Ash (WOCA) Conference. Denver, Colorado, USA, 2011.

JOEL, M.; AGBEDE, I. O. Cement Stabilization of Igumale shale lime admixture for use as flexible pavement construction material. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 15, Bund. O, 2010.

JOHNSON, B. **An Unbiased Comparison of FGD Technologies: Wet, Spray Dry and CDS**. WPCA Conference, Washington D.C., 2010.

JOHNSTON, M.G. **Desempenho de pavimentos com materiais alternativos do Estado do Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

JUNIOR, L. da S. L. **Metodologia de previsão do comportamento mecânico de solos tratados com cal**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

KOST, D. A.; BIGHAM J.M.; STEHOUWER R.C.; BEEGHLY J.H.; FOWLER R.; TRAINA S.J.; WOLFE W.E.; DICK W.A. Chemical and Physical Properties of Dry Flue Gas Desulfurization Products. **Journal Environment Quality**, v. 34, n. 2, p.676, 2005.

LEIVA, C.; ARENAS, C.G.; VILCHES, L.F.; VALE, J.; GIMENEZ, A.; BALLESTEROS, J.C.; PEREIRA, C. Use of FGD gypsum in fire resistant panels. **Waste Management**. 2010; n. 30: 1123–1129.

LI, C.; SU, D.; ZHANG, J. Research on preparation of bitumen filler by desulfurization residues and limestone powder. **Journal of Qingdao Technological University**, 2010.

LI, J.; ZHUANG, X.; LEIVA, C.; CORNEJO, A.; FONT, O.; QUEROL, X.; MOENO, N.; ARENAS, C.; PEREIRA, C. F. Potential utilization of FGD gypsum and fly ash from a Chinese power plant for manufacturing fire-resistant panels. **Construction and Building Materials**, n. 95, p. 910-921, 2015.

LIMA, M. L. B. **Avaliação do emprego de sulfato amônio, ácido cítrico e óxido de magnésio como aditivos na dissolução de cal, visando aplicações em processos de SDA para remoção de enxofre.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

LEITE, C. A. V. G.; NETO, T. F. P.; AGUIAR, M. F. P. de; OLIVEIRA, F. H. L. de. Análise de melhoramento de solo com brita e resíduos de construção e demolição para camadas de pavimentos no estado do Ceará. **Conexões – Ciência e Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 17-23, Fortaleza, 2016.

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

LIU, R. P.; GUO, B.; REN, A.; BIAN, J. F. Studies on characteristics of semi-dry FGD ash from iron industry. **Waste Manag Res.**, v. 28, n. 10, p. 865-871, 2009.

LOPES, L. S. E. **Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas de solo-cinzas de carvão mineral para camadas de base de pavimentos.** Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

LOUREIRO, F. E. L.; MELAMED, R.; NETO E. J. F. **Fertilizantes: agroindústria & sustentabilidade.** Rio de Janeiro: Ministério de Ciência e Tecnologia, CETEM, 2009.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LUCAS, D.; BENATTI, C. T. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 1, n.3, p. 405-418, 2008.

MACÊDO, M. M. **Solos modificados com cimento – efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M.; PORTUGAL, C. R. M. e. **Reações químicas entre solos e resíduos industriais.** In: 7º simpósio Brasileiro sobre Colheita e Transporte Florestal – SIF, 2005.

MAIA, E. S.; SOUSA, M. M. de; AGUIAR, M. F. P. de; OLIVEIRA, F. H. L. de. Estudo do melhoramento de solo com utilização de resíduo de indústria de celulose. **Revista Tecnologia**, v. 35, n. 1 e 2, p. 89-99, Fortaleza, 2014.

MARQUES, S. F. V.; CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L. **Comportamento e normalização de uma mistura areia-cimento em função do tempo de cura**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, 2016.

MARQUES, S. F. V.; CONSOLI, N. C.; SOUSA, J. A. e. Testing cement improved residual soil layers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 3, p. 544-550, 2014.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Apostila de estabilização de solos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MELO, V. da S. **Classificação e estabilização de solos lateríticos do estado da Paraíba e do Rio Grande do Norte**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

MOHAUPT, A. F.; SAGRILLO, V. P. D.; REIS, A. S. **Potencialidades do resíduo do sistema FGD utilizado na dessulfuração de gases de uma coqueria**. In: 73º Congresso Anual da ABM Week. São Paulo, 2018.

MOURA, B. L. R. de. **Avaliação da adesividade ligante-escória sob aspectos físicos, químicos e termodinâmicos e correlação com desempenho mecânico de misturas asfálticas contendo diferentes fíleres melhoradores de adesividade**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Pini, São Paulo, 1997.

NÓBREGA, M. T. de. **Características e mecanismo de estabilização de solos tropicais com cal e cimento em pista experimental**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. 240p., São Paulo, 1995.

OLIVEIRA, C. F.; PIRES, P. J. M.; TEIXEIRA, J. E. S. L. Physical, mechanical, and microstructure investigation of tropical clayey soils stabilized with desulfurization slag for pavement application. **Journal Road Materials and Pavement Design**, 2019.

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

OLIVEIRA, J. A.; SOMACAL, L.; PASSOS, M. C. **Estrada do inferno: uma solução de baixo custo.** Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem – UNP – Laboratório Central, Rio Grande do Sul, 2000.

OLIVEIRA, L. C. D. de. **A estabilização de solos aplicada a habitação, um estudo de misturas solo-cimento.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994.

PCA, Portland Cement Association. **Soil-Cement.** 2019. Disponível em: <https://www.cement.org/cement-concrete-applications/paving/soil-cement>. Acesso em: 28 de março de 2019.

PEASE, R.; RAUCH, A.; LADWIG, K. **Geotechnical Properties of FGD Scrubber Material.** In: World of Coal Ash Conference, Lexington/Kentucky: University of Kentucky, 2017, 14 p.

PEREIRA, A. da S. **Diagnóstico computacional e otimização operacional da unidade de dessulfurização industrial semi-seco (FGD-SDA) em plantas de geração termelétrica.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

PEREIRA, K. L. de A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

PEREIRA, O. A. **Estabilização de Solos: Curso de especialização 108.** Lisboa, Portugal: LNEC, 1970.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** São Paulo, 2000.

PIRES, P. J. M.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; NEPOMUCENO, D. V.; FURIERI, E. C. Laboratory and field evaluation of KR slag-stabilizes soil for paving applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, I.9, 2019.

PORTELINHA, F. H. M. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização**

geotécnica e resistência mecânica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

PRABAKAR, J.; DENDORKAR, N.; MORCHHALE, R. K. Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. **Construction and Building Materials**, 18, p. 263-267, 2004.

PRADO, J. M. do; RODRIGUES, L. M.; SILVA, S. N. da. **Caracterização do subproduto da FGD (Flue Gas Desulfurization) da combustão do carvão.** In: VII Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão. Universidade Federal do Pampa, 2005.

PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, S. Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. **Transportation Research Record**, v. 1652, p. 215-227, 1999.

RASHID, A. S. A.; ZAINUDIN, Z.; NOOR, N. M.; YAACOB, H. Effect of stabilized laterite on California Bearing Ratio (CBR) and Unconfined Compressive Strength (UCS). **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 18, Bund. X, 2013.

RODRIGUES, M. da G. M. **Contribuição ao estudo do método físico-químico de dosagem do solo-cimento.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1992.

RUVER, C. A., CRISTOT, A.; MACHADO, C. R. **Influência da Matéria Orgânica na Estabilização de Solos Tratados com Cimento.** In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG 2014), Goiânia, 2014.

SADIQUE, M.; NAGEIM, H. A.; ATHERTON, W.; SETON, L.; DEMPSTER, N. A new composite cementitious material for construction. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 846-855, 2012.

SANDRONI, S. S.; CONSOLI, N. C. **Sobre a prática da engenharia geotécnica com dois solos difíceis: os extremamente moles e os expansivos.** In: XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG 2010), Anais Eletrônicos: 8ª Palestra (PA08), Gramado, 2010.

SANTANA, E. R. R. de. **Dióxido de enxofre: impacto ambiental e dessulfuração – caso aplicado aos gases da combustão do carvão Recreio em leito fluidizado.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SANTANA, R. A. de A. **Avaliação do uso dos subprodutos da dessulfurização semi-seca dos gases da combustão da termelétrica do Pecém como insumo para a construção civil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

SANTOS, A. L.; PITANGA, H. N.; SILVA, A. C. B.; SILVA, T. O. da. Caracterização do comportamento mecânico de misturas de solo-escória de aciaria-cinza volante visando a aplicação em pavimentação. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.7, n.1, p. 16-29, 2018.

SANTOS, E. F dos. **Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SANTOS, M. A. G. **Estudo analítico dos processos de tratamento de água e de dessulfuração dos gases de combustão da central termoeletrica do Pego**. Relatório de Estágio de Mestrado. Instituto Politécnico de Tomar, Portugal, 2015.

SANTOS, P. S. **Tecnologia de Argilas**, v. 1, Editora Edgar Blücher, São Paulo, 1975.

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

SANTOS, M., LIMA, D.; BUENO, B. **Estabilização dos solos com cal e betume**. In: 6º Reunião de pavimentação urbana. Santos, 1995.

SCALA, F.; D'ASCENZO, M.; LANCIA, A. Modeling flue gas desulfurization by spraydry absorption. **Separation and Purification Technology**, v. 34, n. 1–3, p. 143–153, 2004.

SCRIVENER, K.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. Eco-efficient cements: Potential, economically viable, solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry. **Paris: UN Environment**, 2016.

SHERWOOD, P. T. **Soil Stabilization with Cement and Lime – State of the Art Review**. Transport Research Laboratory, HMSO, London, 1993.

SHOW, K. Y.; TAY, J. H.; GOH, A. T. C. Reuse of incinerator fly ash in soft soil stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 15, n. 4, p. 335-343, 2003.

- SILVA, J. P.S.; CARVALHO, S. B. Uso de resíduos de cerâmica vermelha para o melhoramento de camadas de pavimentos de baixo tráfego em Palmas-TO. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, v. 5, n. 1, p. 41-52, 2017.
- SIMIÃO, J. **Gerenciamento de resíduos sólidos industriais em uma empresa de usinagem sobre o enfoque da produção mais limpa**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- SKEMPTON, A. W. **The colloidal “activity” of clays**. Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, 1, p. 57-61, Switzerland, 1953.
- SOLIZ, V. V. P. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- SLOUD, H. N. **Developments in FGD**. IEA Coal Research, CCC/29, 85 p., 2000.
- SOUZA, W. M. de; RIBEIRO, A. J. A.; XAVIER, A. W. de P.; SANTOS, M. V. dos. Resíduos de cerâmica vermelha com um material ambientalmente sustentável para uso na pavimentação. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, v. 7, n. 2, p. 202-213, 2019.
- SRIVASTAVA, R.K.; JOSEWICZ, W. Flue Gas Dessulfurization: The State of the Art. **Air and Waste Management Assoc.**, 51:1676-1688, 2001.
- SU, Q.; JIANG, Y.; LU, M.; CHEN, Y.; WU, M. **Development of Dry FGD By-Product Utilization as Building Materials in China**. In: World of Coal Ash (WOCA) Conference, Lexington, Kentucky, USA, 2013.
- SunCoke Energy. **Inventário de Resíduos SOL Coqueria Tubarão S/A. Cond. Nº. 09, LO nº 276/2013. Biênio 2014/2015**. Instituto Estadual de Meio Ambiente do Estado do Espírito Santo, 2015.
- SunCoke Energy. **Sustainability Report 2019**. 2020. Disponível em: http://s2.q4cdn.com/280787235/files/doc_downloads/Sustainability/SunCoke_SustainabilityReport2019_Spreads.pdf. Acesso em: 25 de março de 2020.
- SWEET, P. C. Use of coal combustion products in Virginia. In: **International Ash Utilization Symposium**, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, Paper#14, 2001.

TAKEDA, M. de C. **A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

TEIXEIRA, R. A. **Concretos produzidos com adição de resíduo proveniente do sistema de dessulfurização de gases (FGD): avaliação de aspectos mecânicos, ambientais e de durabilidade**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

TEIXEIRA, R. A.; VIEIRA, G. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L. **Reaproveitamento do resíduo proveniente do sistema de dessulfurização de gases (FGD) como aplicação em concretos especiais avaliando características físicas e mecânicas**. Relatório final de pesquisa. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

TESSIER, D.; PEDRO, G. **Recherches sur le rôle des minéraux argileux dans l'organisation et comportement des sols**. In: AFES, Livre Jubilaire du Conquanteenaire, p. 223-235, 1984.

TRUMAN, C.; NUTI, R.; TRUMAN, L.; DEAN, J. **Feasibility of using FGD gypsum to conserve water and reduce erosion from agricultural soil in Georgia**. *Catena*. 2010; n. 81: 234-239.

TSIMAS, S.; TSIMA, A.M. High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n.2, p. 231-237, 2005.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **Air pollution control technology fact sheet**. 2003. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttnca1/cica/files/ffdg.pdf>. Acesso em: 25 de outubro de 2019.

VASCONCELOS, R. F. B.; CANTALICE, J. R. B.; SILVA, A. J. N.; OLIVEIRA, V. S. & SILVA, Y. J. A. B. Limites de consistência e propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 639-648, 2010.

VIEIRA, N. R. **Poluição do Ar: Indicadores ambientais**. Rio de Janeiro. Editora E-papers, 2009. 220 p.

VILLANUEVA, A. L. **Modelado y Simulación de una Unidad de Desulfuración vía Húmeda**. Proyecto Fin de Carrera, Escuela Superior de Ingenieros Industriales, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad de Sevilla, España, 2003.

VILLARIM, S. C. **Estabilização de solos lateríticos com cal: avaliação por um processo de cura acelerado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1995.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S.; CINCERRE, J. R.; SERRA, P. R. M.; NETO, A. Z. **Pavimentos de baixo custo para vias urbanas**. Bases alternativas com solos lateríticos – Gestão de manutenção de vias urbanas. Editora Arte & Ciência, 2ª ed., 196p., São Paulo, 2009.

VILLIBOR, D. F. **Estabilização Granulométrica ou Mecânica**. GRÁFICA EESC – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1982.

VITALI, O. P. M. **Efeito da composição de misturas de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e de resistência**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2008.

WALIA, M. K.; DICK, W. A. Selected soil physical properties and aggregate-associated carbon and nitrogen as influenced by gypsum, crop residue, and glucose. **Geoderma**, v. 320, p. 67-73, 2018.

WALKER, H. W.; TAERAKUL, P.; BUTALIA, T. S.; WOLFE, W. E.; DICK, W. A. Minimization and use of Coal Combustion by-products (CCBs): Concepts and Applications. In: GHASSEMI, A. (Org.). **Handbook of Pollution Control and Waste Minimization**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 421-437.

WATTS, D. B.; HESS, J. B.; BILGILI, S. F.; TORBERT, H. A.; SIBBLEY, J. L.; DAVIS, J. D. Flue gas desulfurization gypsum: Its effectiveness as an alternative bedding material for broiler production. **Journal of Applied Poultry Research**, v. 26, p. 50-59, 2016.

WCA - World Coal Association. **Coal and electricity**. 2019. Disponível em: <https://www.worldcoal.org/coal/uses-coal/coal-electricity>. Acesso em: 17 de março de 2020.

WCA - World Coal Association. **How is Steel Produced?**. 2019. Disponível em: <https://www.worldcoal.org/coal/uses-coal/how-steel-produced>. Acesso em: 17 de março de 2020.

WSA - World Steel Association. **Press Releases**. 2019. Disponível em: <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2019/Global-crude-steel-output-increases-by-4.6--in-2018.html>. Acesso em: Acesso em: 15 de fevereiro de 2020.

WRIGHT, L.; KHATIB, J. M. Sustainability of desulphurised (FGD) waste in construction. In: KHATIB, J. M. **Sustainability of Construction Materials**. 2. ed. United Kingdom: Woodhead Publishing, p. 683-716, 2016.

WU, M. C. M.; JIANG, Y.; SU, Q.; ROBL, T.; JEWELL, R.; BUTALIA, T. S.; ZHANG, W.; WOLFE, W. **Dry FGD by-product characteristics and utilization – international perspective**. 2013.

WU, Z.; NAIK, T. R. Properties of concrete produced from multicomponent blended cements. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1937-1942, 2002.

YADU, L.; TRIPATHI, R. K. Stabilization of soft soil with granulated blast furnace slag and fly ash. **IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 2, 2013.

ZAREMBA, T., MOKROSZ, W., HEHLMANN, J.; SZWALIKOWSKA, A.; STAPINSKI, G. Properties of the wastes produced in the semi-dry FGD installation. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 93, n. 2, p. 439-443, 2008.

ZHENG, Y.; KIIL, S.; JOHNSON, J. E.; ZHONG, Q. Use of spray dry absorption product in wet flue gas desulphurisation plants: pilot-scale experiments. **Fuel**, v. 81, p. 1899-1905, 2002.

ZOU, C.; ZHAO, Q.; ZHANG, G.; XIONG, B. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. **Natural Gas Industry B**, v. 3, n.1, p. 1-11, 2016.