

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

ALANA COSTA MARIN

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO DE BAIXA CONSISTÊNCIA COM RESÍDUO
PROVENIENTE DE PLANTA DE DESSULFURAÇÃO DOS GASES DE
COMBUSTÃO**

**VITÓRIA
2022**

ALANA COSTA MARIN

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO DE BAIXA CONSISTÊNCIA COM RESÍDUO
PROVENIENTE DE PLANTA DE DESSULFURAÇÃO DOS GASES DE
COMBUSTÃO**

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

Orientador: Professor D.Sc. Patrício José
Moreira Pires.

VITÓRIA

2022

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

M337e Marin, Alana Costa, 1997-
Estabilização de solo de baixa consistência com resíduo proveniente de planta de dessulfuração dos gases de combustão / Alana Costa Marin. - 2022.
108 f. : il.

Orientador: Patrício José Moreira Pires.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Solos argilosos. 2. Resíduos industriais. 3. Siderurgia. 4. Sustentabilidade. I. Pires, Patrício José Moreira. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

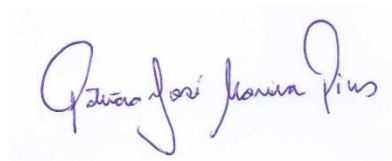
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO DE BAIXA CONSISTÊNCIA COM RESÍDUO
PROVENIENTE DE PLANTA DE DESSULFURAÇÃO DOS GASES DE
COMBUSTÃO**

Alana Costa Marin

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 **29 de novembro de 2022** por:



Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires
Orientador – UFES



Prof. Dr. Ronaldo Pilar
Examinador Interno – UFES



Prof. Dr. Paulo Ricardo de Matos
Examinador externo - UFESM

Aos meus amados pais e à minha amada irmã,

Joana, José Carlos e Amanda.

AGRADECIMENTOS

À Deus toda honra e glória.

À minha mãe que me ensinou a sonhar.

Ao meu pai que me ensinou a ser paciente e esperar o tempo certo desses sonhos se realizarem.

À minha irmã que me ensinou a sonhar grande.

À minha vó Tereza que orou e intercedeu todos os dias para que meus sonhos fossem possíveis.

Aos meus familiares que me apoiaram e estiveram comigo nessa caminhada.

Ao meu orientador Prof. Patrício pela confiança, pelo zelo, por todos os ensinamentos e por acreditar que este trabalho fosse possível.

Ao Prof. Ronaldo, pela paciência em me ensinar e ajudar no desenvolvimento das análises deste trabalho.

Aos meus amigos que sempre torceram por mim. Em especial, Lucas e Murilo por tornarem meus dias mais divertidos.

À Carol, minha amiga, que foi receptiva e companheira desde o primeiro dia que estivemos juntas no laboratório. Que me escutou e me aconselhou tornando minha caminhada mais tranquila.

Aos monitores do laboratório, Carol e Sid, que me ajudaram em todo o trabalho experimental.

À ArcelorMittal, por acreditar na ciência e na nossa pesquisa, fornecendo o apoio financeiro e material.

Ao Prof. Paulo Ricardo, pela ajuda valiosa dada nas análises dos ensaios DRX. Aos monitores e servidores do LEMAC, pelo auxílio no início deste trabalho. Ao Prof. Marcos Tadeu, pela realização do ensaio DRX. Ao laboratório de Oceanografia da Ufes, pela realização do ensaio de granulometria de difração à laser.

À todas as políticas públicas que me fizeram chegar aonde estou hoje.

Por fim, a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para que esse sonho fosse realizado.

RESUMO

MARIN, Alana Costa. **Estabilização de solo de baixa consistência com resíduo proveniente de planta de dessulfuração dos gases de combustão**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

A partir da necessidade de melhorar solos de baixa consistência, pesquisas têm tentado viabilizar a aplicação sustentável de estabilizantes alternativos ao cimento Portland nos processos de estabilização química de solos. Há ampla gama de materiais que podem ser estudados para essa estabilização química por proporcionarem um aumento na resistência ou apenas mantê-la enquanto reduzem diretamente nas quantidades de cimento e indiretamente nas emissões de dióxido de carbono (CO₂). Um desses materiais é o resíduo proveniente de plantas de dessulfuração dos gases de combustão (*Flue-gas Dessulfurization – FGD*) em indústrias que utilizam o carvão mineral na produção de energia, como a siderúrgica. Portanto, este trabalho objetivou avaliar o resíduo FGD na estabilização de um solo argiloso de baixa consistência por meio da incorporação de 15% de estabilizantes em massa de solo seco, individualmente ou junto ao Cimento Portland ou escória granulada de alto forno moída. Para que a incorporação do resíduo fosse avaliada, foram determinados parâmetros físicos como umidade, peso específico aparente seco, limites de liquidez e plasticidade, parâmetros mecânicos como resistência à compressão não confinada e não drenada, e parâmetros microestruturais por meio de ensaios de difratometria de raios X (DRX) sob diferentes idades. Os resultados do estudo mostraram que a incorporação do resíduo FGD tendeu a diminuir a umidade do solo, aumentar o peso específico aparente seco e aumentar a resistência à compressão não confinada, em até 3550 vezes, quando comparados ao solo sem aditivos. Os ensaios de limites de consistência indicaram alterações no solo puro a partir da inserção dos agentes estabilizantes e as análises de DRX indicaram a formação de produtos hidratados e carbonatados responsáveis pelo aumento da resistência mecânica.

Palavras-chaves: resíduo FGD. Estabilização de solos. Solos de baixa consistência.

ABSTRACT

MARIN, Alana Costa. **Very soft soil stabilization by Flue Gas Desulfurization gypsum**. 2022. Dissertation (Master's degree in Civil Engineering) – Postgraduate Program in Civil Engineering, Federal University of Espírito Santo, Vitória, 2022.

Based on the need to improve very soft soils, research have been trying to enable the sustainable application of alternative stabilizers to Portland cement in soil chemical stabilization processes. There is a wide range of materials that can be studied for stabilization by providing an increase in strength or just maintaining it while directly reducing the amounts of cement and indirectly in the emissions of Carbon Dioxide (CO₂). One of these materials is the residue from flue-gas desulfurization (FGD) plants in industries that use coal in energy production, such as steel industry. This research aimed to evaluate the FGD residue in the stabilization of a very soft clay through the incorporation of 15% of stabilizers in dry soil mass, individually or combined with Portland cement or ground blast furnace slag. For the incorporation of the residue to be evaluated, physical parameters such as moisture content, apparent density, liquid and plastic limit, mechanical parameters such as unconfined and undrained compressive strength and microstructural parameters were determined through X-ray diffraction (XRD) analyzes at different curing period. The results showed that the incorporation of FGD residue tended to decrease the soil moisture content, increase the apparent density and increase the resistance to unconfined compressive strength, up to 3550 times, when compared to soil without additives. The liquid and plastic limits tests indicated changes in the pure soil from the insertion of the stabilizing agents and the XRD analyses indicated the formation of hydrated and carbonated products responsible for the increase of mechanical resistance.

Keywords: FGD gypsum. Soil stabilization. Very soft soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático mostrando (a) tetraedro de sílica simples, (b) estrutura em folha de tetraedros de sílica dispostos em uma rede hexagonal, (c) unidade octaédrica simples e (d) a estrutura em folha das unidades octaédricas	22
Figura 2 – Camada de Stern e Camada Difusa (sem escala)	22
Figura 3 - Esquema do processo FGD tipo semiseco ou <i>Spray Dryer</i>	25
Figura 4 – Influência do pH na resistência à compressão não confinada	35
Figura 5 – Influência do teor de água inicial na resistência à compressão não confinada em corpos de prova com idade de 91 dias	36
Figura 6 – Teor de umidade das composições obtidas por Wu <i>et al.</i> (2022)	40
Figura 7 – Densidade seca final das composições obtidas por Wu <i>et al.</i> (2022)	41
Figura 8 – Limite de Liquidez e Plasticidade e Índice de plasticidade dos solos 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e) com a incorporação de Cimento Portland obtidos por Abbey, Ngambi e Coakley (2016).....	43
Figura 9 – Limite de Liquidez e Plasticidade e Índice de plasticidade dos solos 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e) com incorporação de cimento Portland e cinzas volantes obtidos por Abbey, Ngambi e Coakley (2016)	44
Figura 10 – Limite de Liquidez e Plasticidade e Índice de plasticidade dos solos 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e) com incorporação de cimento Portland, cinzas volantes e escória granulada de alto forno obtidos por Abbey, Ngambi e Coakley (2016).....	45
Figura 11 – Índice de Plasticidade para solos estabilizados com cimento Portland obtidos por Abbey, Ngambi e Coakley (2016)	46
Figura 12 – Índice de Plasticidade para solos estabilizados com cimento Portland, cinza volante e escória granulada de alto forno obtidos por Abbey, Ngambi e Coakley (2016)	47
Figura 13 – Limites de consistência de mistura: (a) solo cimento; (b) solo-cal obtidos por Bayat, Asgari e Mousivand (2013)	48
Figura 14 – Resistência à compressão em função do tempo da Argila de Lößtabro estabilizada com diferentes ligantes e composições obtida por Åhnberg e Johansson (2005)	51
Figura 15 – Resistência à compressão em função do tempo da Argila de Linköping estabilizada com diferentes ligantes e composições obtida por Åhnberg e Johansson (2005)	51
Figura 16 – Resistência à compressão em função do tempo da Gytija de Holma estabilizada com diferentes ligantes e composições obtida por Åhnberg e Johansson (2005)	52

Figura 17 - Composição mineralógica da composição solo e resíduo FGD de CFB aos 250 dias obtido por Butalia <i>et al.</i> (2018)	52
Figura 18 – Composição mineralógica da composição solo e cimento Portland 15% de adição obtido por Park <i>et al.</i> (2015)	53
Figura 19 – Composição mineralógica da composição solo, cimento Portland e resíduo FGD 15% de adição obtido por Park <i>et al.</i> (2015).....	53
Figura 20 – Microscopia eletrônica por varredura da composição solo + 3% cimento + 3% resíduo FGD obtido por Maichin <i>et al.</i> (2021).	55
Figura 21 – Materiais utilizados na pesquisa.....	57
Figura 22 – Curva granulométrica dos materiais utilizados	67
Figura 23 – Massa Específica Real dos Grãos dos materiais utilizados	68
Figura 24– Amostra de solo após queima em mufla	70
Figura 25 – Difratoograma dos materiais utilizados	71
Figura 26 – Difratoograma da composição “Solo cimento” aos 8 e 90 dias	73
Figura 27 – Difratoograma da composição “Solo cimento FGD” aos 8 e 90 dias	74
Figura 28 – Difratoograma da composição “Solo FGD” aos 8 e 90 dias	75
Figura 29 – Difratoograma da composição “Solo FGD escória” aos 8 e 90 dias.....	77
Figura 30 – Adição de cal para promover a floculação de uma argila dispersa	78
Figura 31 – Teor de umidade das composições versus tempo	79
Figura 32 – Peso específico aparente seco das composições e solo puro aos 0 e 90 dias.....	81
Figura 33 – Limite de Liquidez das composições <i>versus</i> tempo	82
Figura 34 – Limite de Plasticidade das composições <i>versus</i> tempo	82
Figura 35 – Índice de Plasticidade das composições <i>versus</i> tempo	84
Figura 36– Resistência ao cisalhamento não drenada pelo ensaio de Cone Fall <i>versus</i> tempo	85
Figura 37 – Resistência ao cisalhamento não drenada pelo ensaio de palheta <i>versus</i> tempo	86
Figura 38 – Resistência à compressão não confinada <i>versus</i> deformação axial específica das composições “Solo cimento”	87
Figura 39 – Resistência à compressão não confinada <i>versus</i> Deformação axial específica das composições “Solo cimento FGD”	88
Figura 40 – Resistência à compressão não confinada <i>versus</i> Deformação axial específica das composições “Solo FGD”	88

Figura 41 – Resistência à compressão não confinada <i>versus</i> Deformação axial específica das composições “Solo FGD escória”	89
Figura 42 – Resistência à compressão não confinada média <i>versus</i> tempo	92
Figura 43 - Difratoograma do solo puro, cimento Portland e composições “Solo cimento 8 dias” e “Solo cimento 90 dias”	103
Figura 44 – Difratoograma do solo, cimento Portland, resíduo FGD e composições “Solo cimento FGD 8 dias” e “Solo cimento FGD 90 dias”	104
Figura 45 – Difratoograma do solo, resíduo FGD e composições “Solo FGD 8 dias” e “Solo FGD escória 90 dias”	105
Figura 46 - Difratoograma do solo, resíduo FGD, Escória Granulada de Alto Forno Moída e composições “Solo FGD escória 8 dias” e “Solo FGD escória 90 dias” ...	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa da consistência pela resistência à compressão não confinada	20
Tabela 2 - Análise química e de complexo sortivo do resíduo FGD.....	28
Tabela 3 – Análise de Fluorescência de Raios X do resíduo FGD.....	28
Tabela 4 – Características dos solos estudados por Abbey, Ngambi e Coakley (2016)	39
Tabela 5 – Massa específica aparente seca de solo modificado com Cimento Portland obtidas por Park <i>et al.</i> (2015)	41
Tabela 6 – Massa específica aparente seca de solo modificado com Cimento Portland e resíduo FGD obtidas por Park <i>et al.</i> (2015)	41
Tabela 7 – Limite de Liquidez e Plasticidade obtidos por Picoli (2020)	42
Tabela 8 – Resultados de UCS com período de cura por amostra obtidos por Park <i>et al.</i> (2015)	49
Tabela 9 – Composições de solos estabilizados.....	58
Tabela 10 – Propriedades e referências normativas utilizadas na caracterização dos materiais.....	59
Tabela 11 – Análise granulométrica em função das frações de solo	68
Tabela 12 – Análise Química e de Complexo Sortivo dos Materiais	69
Tabela 13 – Resistência ao cisalhamento não drenada pelo ensaio de compressão não confinada.....	87

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 - Resumo do uso do resíduo FGD em aplicações de bases estabilizadas nos EUA.....	27
Quadro 2 – Resumo dos trabalhos utilizados no referencial teórico	56
Quadro 3 – Procedimentos de moldagem dos corpos de prova ilustrados	62

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
CL – Argila de baixa plasticidade
CP - Cimento Portland
CP V-ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CTC - Capacidade De Troca Catiônica
CFB – Caldeira de Leito Fluidizado Circulante
DRX – Difractometria de Raios X
Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FGD – Dessulfuração dos Gases de Combustão (*Flue-Gas Dessulfurization*)
FHWA - *Federal Highway Administration*
GAF – Escória Granulada de Alto Forno
GAFm – Escória Granulada de Alto Forno moída
IP – Índice de Plasticidade
LL – Limite de Liquidez
LP – Limite de Plasticidade
NBR – Norma técnica Brasileira
pH – Potencial Hidrogeniônico
PFA – Cinza volante
PVC - Policloreto de Vinila
 q_u – Resistência à compressão não confinada
RS – Resistente à sulfatos
S – Solo puro
SC – “Solo cimento”
SCF - “Solo cimento FGD”
SF - “Solo FGD”
SFE - “Solo FGD Escória”
 S_u – Resistência ao cisalhamento não drenado
SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos
UCS - Compressão não confinada
w – umidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	Geral	17
1.1.2	Específicos	17
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Solos de baixa consistência	19
2.2	Microestrutura dos solos	20
2.3	RESÍDUO FGD	23
2.3.1	Caracterização físico-química e mineralógica	27
2.4	ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS	29
2.4.1	Estabilização Química utilizando resíduo FGD	36
2.4.1.1	Aspectos Físicos	39
2.4.1.2	Aspectos Mecânicos	48
2.4.1.3	Aspectos Microestruturais.....	52
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	57
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	59
3.2	PREPARAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	60
3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES.....	64
3.3.1	Análise microestrutural	64
3.3.2	Análise dos aspectos físicos	65
3.3.3	Análise dos aspectos mecânicos	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	67

4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES.....	72
4.2.1	Análise microestrutural das composições de solo	72
4.2.2	Análise dos aspectos físicos das composições de solo.....	78
4.2.2.1	Teor de Umidade	78
4.2.2.2	Peso específico aparente seco	80
4.2.2.3	Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade	81
4.2.3	Análise dos aspectos mecânicos das composições de solo	84
4.2.3.1	Resistência ao cisalhamento não drenada	84
4.2.3.2	Resistência à compressão não confinada.....	87
5	CONCLUSÕES	93
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
	REFERÊNCIAS.....	96
	ANEXO I.....	103

1 INTRODUÇÃO

A estabilização química de solos é uma intervenção realizada em solos cujos parâmetros de resistência não são adequados para o uso na engenharia civil. Esse tipo de estabilização consiste na adição de agentes estabilizantes que tem como objetivo promover reações físico-químicas entre o solo e estabilizante promovendo uma cimentação na matriz do solo alterando sua estrutura inicial.

A estabilização química pode ser feita superficialmente, em melhoramento de solos ou estabilização de base e sub-bases rodoviárias, ou em profundidade, por meio das técnicas de injeções de caldas e cimentos em profundidades, também chamadas de *deep mixing*. A maior diferença entre as duas estabilizações é o tipo de solo a ser melhorado e a quantidade de agente estabilizador adicionado. Solos muito moles ou moles em superfície, quando em obras rodoviárias, podem ser substituídos. Contudo, pela estabilização em profundidade, esses solos, assim como solos ricos em matéria orgânica, podem ser melhorados.

O cimento Portland é o ligante mais utilizado em melhoramento de solos (RODVINIJ, RATCHAKROM, 2021). SNIC (2020) estima que a produção de cimento no Brasil, em 2020, foi de, aproximadamente, 61 milhões de toneladas. Lehne e Preston (2018) afirmam que a produção de cimento Portland é responsável por 8% de toda emissão de CO₂ produzida mundialmente. Dessa forma, há necessidade de desenvolver substitutos ou viabilizar o uso de outros produtos já disponíveis para reduzir o consumo de cimento, inclusive em obras geotécnicas.

Maichin *et al.* (2021) afirmam que, há ampla gama de materiais que podem ser estudados para essa estabilização química, entre eles os coprodutos siderúrgicos. Segundo os autores, esses materiais podem proporcionar um aumento na resistência ou apenas mantê-la enquanto reduzem diretamente nas quantidades de cimento e indiretamente nas emissões de CO₂. Scrivener, John e Gartner (2016) citam que a indústria da construção civil tem grande potencial na reutilização de resíduos advindos de outras indústrias e que esses materiais podem ser utilizados para reduzir a quantidade de cimento Portland utilizado.

Durante o processo de fabricação de uma tonelada de aço bruto produzidos no Brasil em 2020, a indústria siderúrgica chegou a gerar aproximadamente 622 quilogramas de coprodutos (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2020). Alguns desses coprodutos já possuem destinação específica, como a Escória de Alto Forno, utilizada pela indústria cimentícia e as escórias de aciaria que podem ser utilizadas pela indústria da pavimentação. Outros coprodutos gerados no processo de fabricação do aço ainda carecem de estudos que viabilize a sua aplicação no âmbito da engenharia, como o resíduo proveniente do processo de Dessulfuração dos Gases de combustão denominado de *Flue-gas Desulfurization* (FGD).

O resíduo FGD é resultante de um conjunto de tecnologias utilizado para remover o SO₂ dos gases de combustão nas usinas que utilizam a queima do carvão como combustível (CHANDRASEKARAN, 2017). O processo de dessulfuração dos gases funciona com a adsorção do SO₂ em um meio alcalino, normalmente cal e/ou calcário (KOHL; NIELSEN, 1997), resultando em um material rico em CaO e SO₃.

Walia e Dick (2018) estimam que a geração do resíduo FGD, a nível mundial, supera 120 milhões de toneladas por ano. Devido ao grande volume de resíduo gerado e por não possuir uma reutilização amplamente difundida, o gerenciamento deste resíduo nas indústrias ainda compreende na disposição em aterros industriais e sanitários.

Maichin *et al.* (2021) reforçam que a utilização desse resíduo como preenchimento de aterros ou na construção de estradas pode ser uma maneira eficiente de aplicá-lo devido ao volume empregado nessas obras. Além do volume utilizado, a composição química do resíduo também justifica o seu emprego, visto que se assemelha aos produtos já utilizados no escopo da engenharia civil.

O resíduo FGD é um produto já utilizado na agricultura por proporcionar benefícios físicos e químicos aos solos. Devido a sua composição, o resíduo FGD pode proporcionar a troca catiônica entre cátions de Ca²⁺ e Na⁺ no coloide do solo (LI *et al.*, 2018; FRENKEL, GERSTL, ALPEROVITEH, 1989). Além disso, FHWA (2016) reportou o uso desse resíduo para estabilização de bases e sub-bases rodoviárias norte-americanas nas décadas de 80-90.

Atualmente, o resíduo FGD tem sido estudado para a produção de um novo produto cimentício (SCHUBBAR *et al.*, 2018; JAFER *et al.*, 2018a) e para estabilização em sub-base rodoviária (MAICHIN *et al.*, 2021; RODVINIJ, RATCHAKROM, 2021; PICOLI, 2020; FHWA, 2016). O resíduo também foi estudado para a estabilização de solos de baixa consistência, com uma pequena adição de resíduo, e uma análise da microestrutura desses solos foi realizada (PARK *et al.*, 2015; WU *et al.*, 2022). Também foi utilizado para a estabilização de um solo colapsível com alto teor de adição (BUTALIA *et al.*, 2018), porém, os resultados não exploraram a microestrutura do solo modificado com alto teor de adição de resíduo.

De todas as formas, percebe-se carência de estudos que descrevam o comportamento mecânico dos solos de baixa consistência estabilizados com a substituição total ou parcial do Cimento Portland, em teores utilizados em processo de estabilização de solos em profundidade, pelo resíduo FGD, mediados por análises das microestruturas geradas.

Diante disso, neste trabalho é feito um estudo da incorporação do resíduo FGD, seja para substituição total ou parcial do cimento Portland, para a estabilização de um solo de baixa consistência. Este trabalho se apresenta como a primeira etapa de um processo de viabilização do resíduo FGD utilizado para estabilização de solos de baixa consistência em campo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Avaliar a viabilidade técnica do uso do resíduo de Dessulfuração dos Gases de Combustão (FGD) de coqueria de siderurgia como substituto total ou parcial do Cimento Portland para estabilização de um solo argiloso de baixa consistência.

1.1.2 Específicos

- Avaliar o efeito da utilização do resíduo FGD sobre as propriedades físicas dos solos modificados em diferentes idades.
- Avaliar o efeito da utilização do resíduo FGD sobre a resistência ao cisalhamento não drenada dos solos modificados em diferentes idades.

- Avaliar o efeito da utilização do resíduo FGD sobre os a microestrutura dos solos modificados e identificar os produtos das reações que acontecem nos solos modificados em duas idades, 8 dias e 90 dias, por meio da análise de difratometria de raios X.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para o desenvolvimento da pesquisa, a dissertação está dividida em 6 capítulos. O capítulo 2 apresentará uma revisão bibliográfica dos principais temas abordados nesse trabalho: os solos de baixa consistência e sua microestrutura, o resíduo FGD gerado no processo de dessulfuração dos gases de combustão e a estabilização química de solos, expondo trabalhos científicos já desenvolvidos na literatura que servirão de embasamento para o desenvolvimento do tema; o capítulo 3 discorrerá sobre os materiais, o programa experimental e o processo de moldagem de amostras; o capítulo 4 abordará e discutirá os resultados obtidos; e os capítulos 5 e 6 trarão as conclusões da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SOLOS DE BAIXA CONSISTÊNCIA

Alguns solos são considerados problemáticos no âmbito da engenharia por não apresentarem resistência adequada para suportar o que for solicitado. Em alguns casos, se faz necessário o uso de fundações especiais ou alguma técnica de melhoramento de forma a preparar o terreno para lançamento da estrutura desejada. Entender a natureza e a consistência dos solos é fundamental para prevenir problemas de origem geotécnica e direcionar a escolha das melhores alternativas a serem utilizadas em projetos.

Kempfert e Gebreselassie (2006) apresentam critérios, que não necessariamente devem-se cumprir simultaneamente, para definir solos que geralmente requerem técnicas de melhoramento: solos que apresentam uma tendência em fluir, que sejam quase ou totalmente saturados, sensíveis a vibrações, com propriedades tixotrópicas ou com resistência ao cisalhamento não drenada menor ou igual a 40 kN/m². Neste sentido, destacam-se também os solos de baixa consistência ou solos moles. Os autores também definem solo mole como aqueles caracterizados por suportar, somente, o peso próprio e qualquer adição de carga poderá resultar em deformações grandes.

No litoral do Brasil, há diversos depósitos de solos moles formados em ambientes marinhos no Período Quaternário. Esses solos são de caráter sedimentar, formado pelo depósito de material rochoso que sofreu algum tipo de transporte. O processo de decomposição da rocha e o tipo de transporte a qual foi submetido podem influenciar na natureza da micro e macroestrutura do solo e, conseqüentemente, interferir no comportamento (CAMPOS, 2006).

Além disso, vale evidenciar que a umidade natural que o solo se encontra é um fator determinante na consistência. A consistência auxilia na classificação de argilas e siltes indicando como moles aqueles solos que se apresentam como de baixa resistência. Em termos de resistência, a consistência do solo argiloso pode ser classificada em função da resistência à compressão não confinada da argila. Conforme mostrado na Tabela 1, é possível observar que solos com resistência menores que 25 kPa são

considerados solos muito moles (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996). Em termos de resistência ao cisalhamento não drenada, devido à relação desta ser metade da resistência à compressão não confinada, solos muito moles apresentam valores menores que 12,5 kPa. (MITCHELL; SOGA, 2005).

Tabela 1 – Estimativa da consistência pela resistência à compressão não confinada

Consistência	Resistência, kPa
Muito Mole	< 25
Mole	25 - 50
Média	50 - 100
Rija	100 - 200
Muito rija	200 - 400
Dura	> 400

Fonte: Terzaghi, Peck e Mesri (1996).

Além disso, outro fator influente na consistência dos solos é o teor de matéria orgânica. Para Kazemian (2018) solos com mais de 20% de teor de matéria orgânica são considerados solos orgânicos e teores maiores que 75% são considerados turfosos. As áreas onde as turfas estão presentes são caracterizadas por serem de solos saturados, possuírem condições anaeróbias (fator importante para dificultar a decomposição), material orgânico parcialmente decomposto (BOURGEAU-CHAVEZ *et al.*, 2018) e solos pouco resistentes.

2.2 MICROESTRUTURA DOS SOLOS

Segundo Hillel (1998), o solo é um sistema heterogêneo, particulado, disperso, poroso e polifásico, devido as três fases que o compõe: sólida, líquida e gasosa. A fase sólida consiste em partículas que variam em composição química, tamanho, forma e orientação formando a matriz do solo. A fase gasosa, geralmente, refere-se ao ar e aos gases orgânicos presentes em zonas de alta atividade biológica e a fase líquida, geralmente, é composta por água e eletrólitos dissolvidos (MITCHELL; SOGA, 2005).

No estado natural, os solos apresentam água em quatro formas: livre, adsorvida, intercamada e água de rede cristalina na forma de íons $(OH)^-$ (MITCHELL; SOGA, 2005). A água adsorvida, àquela presente diretamente na superfície das partículas dos argilominerais, diferentemente da água livre ou capilar, apresenta moléculas organizadas em uma estrutura rígida e orientada (GRIM, 1953). A espessura e a

estabilidade dessas estruturas são dependentes da natureza da estrutura cristalina do argilomineral, dos cátions e dos ânions adsorvidos e, possivelmente, de alguns outros fatores como a matéria orgânica (SANTOS, 1989).

As partículas que compõe a matriz do solo podem ser divididas quanto aos seus tamanhos em areia, silte e argila. Devido à maior área superficial e à atividade físico-química, a fração argilosa é que a mais tem influência no comportamento do solo (HILEL, 1998).

A argila é um material de granulometria fina, em que as partículas apresentam diâmetro menor que 2 μm , constituída por pequenas partículas cristalinas de minerais, conhecidos como “argilominerais”. Além dos argilominerais, as argilas podem conter matéria orgânica, sais solúveis, minerais residuais, como o quartzo e a calcita, e minerais amorfos (SANTOS, 1989). Os argilominerais são compostos por silicatos hidratados de alumínio, conhecidos como aluminossilicatos. Na maioria dos minerais argilosos, há duas principais unidades estruturais (aluminossilicatos) (Figura 1): estruturas tetraédricas — tetraedro de átomos de oxigênio envolvendo um átomo de sílica — ou octaédricas — octaedro de átomos de envolvendo um átomo de alumínio, ferro ou magnésio — que contribuem para o desenvolvimento de reações químicas com a água e os sais nela dissolvidos existentes nos solos (GRIM, 1953; CORREIA, 2011).

Em virtude de substituições isomórficas e de ligações químicas partidas por toda a extensão das arestas das partículas há um desbalanceamento estrutural na argila, em decorrência disso, íons permutáveis são fixados na superfície do argilomineral (SANTOS, 1989). Devido ao desbalanceamento de cargas, estruturas que antes eram eletricamente neutras, passam a apresentar cargas elétricas negativas na face, devido ao desbalanço de oxigênio e cargas positivas nas extremidades da rede (CORREIA, 2011). As partículas negativas presentes nas faces das argilas, para se manterem neutras, atraem íons presentes no meio e moléculas de água, praticamente, em estado sólido devido tensões elevadas que estão sujeitas na superfície das partículas de argila (CORREIA, 2011).

O sistema formado a partir dos cátions rigidamente fixos na superfície dos argilominerais é designado de “Camada de Stern” e adjacente à essa, uma região de

variação da concentração de cátions chamada de “Camada Difusa” (Figura 2). Este sistema entre partícula e a solução circundante é denominado de “Dupla camada” (SANTOS, 1989; MITCHELL; SOGA, 2005).

Figura 1 - Diagrama esquemático mostrando (a) tetraedro de sílica simples, (b) estrutura em folha de tetraedros de sílica dispostos em uma rede hexagonal, (c) unidade octaédrica simples e (d) a estrutura em folha das unidades octaédricas

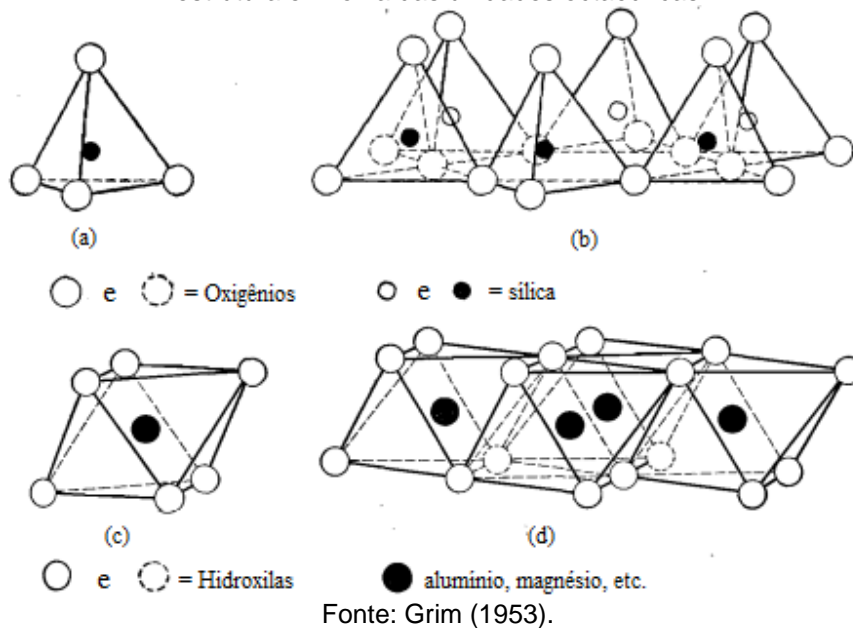
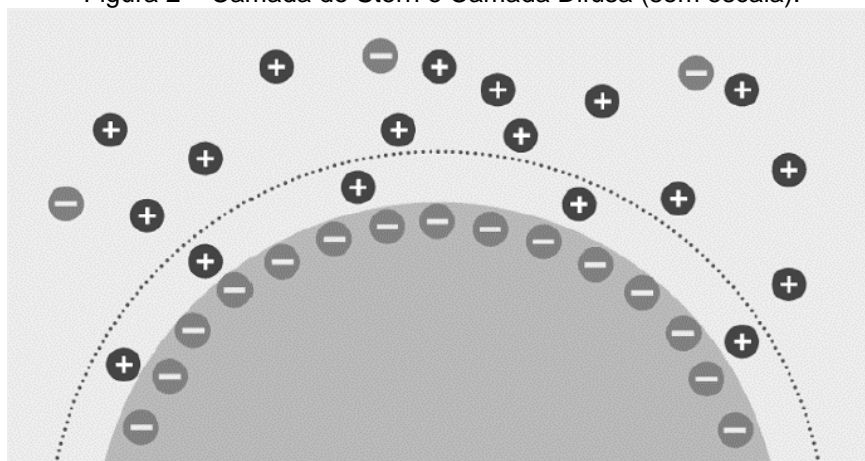


Figura 2 – Camada de Stern e Camada Difusa (sem escala).



Fonte: Bridi (2020).

Para que a estrutura permaneça estável, íons podem permutar na superfície dos argilominerais. Porém, o que determina a troca desses íons é a capacidade de troca catiônica (CTC). Santos (1989) explica que a CTC é uma propriedade fundamental desses solos, visto que os íons permutáveis influenciam nas propriedades físico-químicas das argilas. A troca desses minerais ocasiona uma diminuição nas dimensões da nuvem de água adsorvida, destruindo a estrutura inicial e acarretando

a flocculação da argila. A plasticidade da argila reduz, enquanto a consistência aumenta (CORREIA, 2011). É importante ressaltar que as reações de trocas catiônicas proporcionam uma mudança nas propriedades físicas e físico-químicas, mas não alteram a estrutura das partículas da argila (MITCHELL; SOGA, 2005).

2.3 RESÍDUO FGD

Na produção do aço, durante a etapa de redução, o carvão mineral é aquecido de forma a sofrer pirólise e, conseqüentemente, há desprendimento da matéria volátil, resultando em um material sólido denominado coque. Durante esse processo, uma mistura de gases, como SO_x , NO_x e CH_4 , se formam (TEIXEIRA, 2019).

A resolução Conama 436 (BRASIL, 2011) estabelece os limites máximos de poluentes e define, que na coqueria, por exemplo, esse limite seja de 800 mg/Nm^3 de SO_2 , em condições normais de temperatura e pressão. A emissão desses poluentes é monitorada pelas indústrias. Como alternativa para reduzir as emissões pode-se utilizar de carvão mineral com teor de enxofre menor que 0,5% (BARRENETXEA *et al.*, 2011), em massa. Segundo Fallavena (2011) o carvão brasileiro possui elevados teores de enxofre e dessa forma, se faz necessário o uso de mecanismos para removê-lo.

Um dos processos mais utilizados atualmente para a remoção do SO_2 dos gases de combustão nas usinas que utilizam a queima do carvão como combustível é o *Flue-Gas Desulfurization* (FGD) sendo obrigatório em diversos países. O processo de dessulfuração dos gases funciona com a adsorção do SO_x em um meio alcalino, normalmente cal e/ou calcário e/ou hidróxido de cálcio. Destaca-se que, além do SO_x , HCl , HF , outros compostos podem ser extraídos por esse sistema (CAILLAHUA, 2013). Ao final, os compostos indesejáveis capturados no processo sedimentam e dão origem a um coproduto oriundo do processo denominado de resíduo FGD. Portanto, esse resíduo é um coproduto proveniente da técnica de dessulfuração dos gases de combustão, rico em óxido de cálcio (CaO) e trióxido de enxofre (SO_3) que apresentam características físicas e químicas semelhantes ao gesso (KOKOUZAS; VASILATOS, 2008; JAFER *et al.*, 2018a; TEIXEIRA, 2019; PICOLI, 2020; WU *et al.*, 2022).

Walia e Dick (2018) estimam que a geração do resíduo FGD, a nível mundial, supera 120 milhões de toneladas por ano. Na China, maior produtor de aço no mundo, a geração do resíduo anual é de, aproximadamente, 80 milhões de toneladas (WENYI *et al.*, 2018). Sobre a geração do resíduo no Brasil, não há dados concretos. Contudo, segundo Teixeira (2019), caso considerasse que todas as instalações que promovem a combustão do carvão no Brasil utilizassem a planta FGD, seria previsto a geração anual de 1,2 bilhão de toneladas de resíduo FGD. No Espírito Santo, a geração de resíduo pela *SunCoke Energy*, no ano de 2018, foi de 37,9 mil toneladas. Devido ao grande volume de resíduo gerado e por não possuir uma reutilização amplamente difundida, o gerenciamento deste resíduo nas indústrias ainda compreende na disposição em aterros industriais e sanitários.

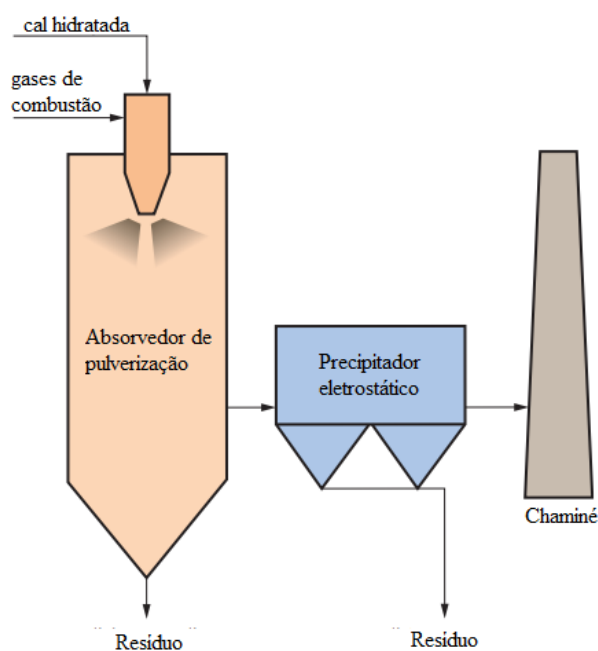
Os tipos de sistemas FGD podem ser classificados, segundo Santos (2007), em duas categorias: regenerativa e não regenerativa. No processo não regenerativo, há a geração de um produto com possível interesse comercial, como gesso ou produto com elevado teor de sulfitos, sulfatos e cinzas volantes. Já no processo regenerativo há a possibilidade de recuperar o agente químico utilizado para capturar o SO₂ e de produzir um produto com valor comercial. Nesse último processo, destaca-se os processos do tipo úmido, que utiliza cal, calcário ou água do mar, o tipo seco, que utiliza injeção de um adsorvente, normalmente, cal e o tipo semisseco ou *spray dryer*, que tem como reagentes a cal, óxido ou hidróxido de cálcio (SANTOS, 2007; POULLIKKAS, 2015).

O processo FGD tipo úmido é o processo de dessulfuração dos gases de combustão mais utilizado ao redor do mundo. Sistemas com esse tipo de processo podem apresentar variações quanto as suas configurações e os tipos de reagentes utilizado. Atualmente, os reagentes CaCO₃ (carbonato de cálcio) e Ca(OH)₂ (cal hidratada) têm sido os reagentes mais utilizados em uma mistura com água (POULLIKKAS, 2015; TEIXEIRA, 2018). No final do processo, há a geração de um resíduo composto, predominantemente, por sulfito de cálcio di-hidratado (CaSO₃.2H₂O). Porém, em algumas configurações, devido ao ar nos gases de combustão, pode haver uma oxidação forçada, obtendo outros produtos como o sulfato de cálcio hemihidratado (CaSO₄.0,5H₂O) e o sulfato de cálcio di-hidratado (CaSO₄.2H₂O) (CARPENTER, 2012).

O processo FGD tipo seco não é amplamente empregado comercialmente devido à baixa eficácia na remoção do enxofre. A purificação dos gases se dá pela calcinação dos reagentes, geralmente cal hidratada, calcário e dolomita, em altas temperaturas (1100 a 1250° C) que reagem com os gases capturando os compostos de SO_x. O subproduto resultante é sulfito de cálcio (CaSO₃) e sulfato de cálcio (CaSO₄) na forma de pó.

O processo FGD tipo semisseco ou *Spray Dryer* (Figura 3) utiliza uma pequena quantidade de água (em torno de 60% inferior ao processo úmido), entretanto gera um produto seco. O resíduo FGD utilizado nesta pesquisa foi originado do processo semisseco que utiliza hidróxido de cálcio, Ca(OH₂), proveniente da empresa *SunCoke Energy*.

Figura 3 - Esquema do processo FGD tipo semisseco ou *Spray Dryer*



Fonte: Adaptado de Carpenter (2013).

O processo de execução da purificação dos gases de combustão inicia-se na injeção de hidróxido de cálcio preparada, previamente, com uma parcela de água. A injeção é feita por bicos aspersores no absorvedor de pulverização formando uma fina névoa de partículas reagindo com os gases exaustos. Devido a quantidade de água limitada e a temperatura de entrada dos gases de combustão, entre 120 e 160°C, os produtos sofrem uma secagem. Normalmente, o tempo de 10 a 50 segundos é suficiente para que os gases reajam com a cal hidratada formando um resíduo rico composto por sulfito e sulfato de cálcio (POULLIKKAS, 2015). Parte deste resíduo é retirada pela

parte inferior do absorvedor, porém, a maior parte segue pelo precipitador eletrostático junto aos gases, onde ocorrerá a precipitação dessas partículas sólidas, para então, o gás dessulfurizado ser lançado na atmosfera por meio de chaminés.

Após o contato entre os gases e a solução são gerados os resíduos, dependentes do teor de oxigênio disponível durante a queima do carvão. Quando disponível em menor quantidade gera sulfito de cálcio (Equação 1), CaSO_3 , enquanto em maior quantidade gera sulfato de cálcio (Equação 2), CaSO_4 . Carbonato de cálcio (Equação 3), CaCO_3 , devido à disponibilidade de CO_2 , também é gerado. Esses produtos seriam, exclusivamente, gerados devido a evaporação de água no processo. Contudo, o CaSO_3 sofre uma oxidação forçada se apresentando como CaSO_4 e, por não sofrer um processo de evaporação por completo pode gerar, assim como no processo úmido, produtos hidratados como o gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anidrita (CaSO_4), hemi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), sulfito de cálcio ($\text{CaSO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e a hannebachita ($\text{Ca}_2(\text{SO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (POULLIKKAS, 2015; WRIGHT; KHATIB, 2016; TEIXEIRA, 2019).



Uma vantagem do processo FGD tipo semisseco é a geração de um resíduo seco, dessa forma, o manuseio e a destinação são facilitados (TEIXEIRA, 2019). Dessa forma, o resíduo se apresenta em um estado favorável para uso e devido a sua composição, pode ser empregado em diversas áreas.

O resíduo FGD tem sido estudado em vários países e os campos de aplicações são diversos. Na construção civil, o resíduo FGD poderia ser utilizado como aditivo no cimento Portland e concreto (POULLIKKAS, 2015; TEIXEIRA, 2019). Porém, devido à composição rica em enxofre do resíduo, sua utilização deve ser investigada quanto à liberação de sulfatos no meio, o que pode impossibilitar o seu uso no concreto. Já na engenharia geotécnica, o resíduo FGD pode ser empregado em aterros, bases e sub-bases rodoviárias, como aditivo em pavimento asfáltico, melhoramento de solos, produção de ligante cimentício de mistura ternária para uso em estabilização de solos, entre outros (PARK *et al.*, 2015; FHWA, 2016; BUTALIA; WOLFE; AMAYA, 2017; BUTALIA *et al.*, 2018; JAFER *et al.*, 2018a; PICOLI, 2020; MAICHIN *et al.*, 2021;

RODVINIJ, RATCHAKROM, 2021; WU *et al.*, 2022). Na agricultura, o resíduo FGD já vem sendo utilizado em solos para atenuar solos ácidos, melhorar as propriedades físicas e química, como fertilizante, para diminuição do escoamento superficial e da erosão, para mitigação do solo sódico e alguns outros (BALIGAR *et al.*, 2011; CHEN; DICK, 2011; BUTALIA; WOLFE; AMAYA, 2017; LI *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2021).

Segundo a FHWA (2016), o coproduto já foi aplicado em campo em bases estabilizadas de estradas em estados norte-americanos, como pode ser visto no Quadro 1. Por mais que esse produto já tenha sido utilizado com sucesso, a associação admite que ainda são necessários mais estudos para compreender o comportamento do material com o solo.

Quadro 1 - Resumo do uso do resíduo FGD em aplicações de bases estabilizadas nos EUA

Estado	Número de Projetos Estimados	Período	Tipos de Projeto	Observações
Flórida	Pelos 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: FHWA (2016).

2.3.1 Características físico-químicas e mineralógicas

Em concordância com o que foi discutido anteriormente, é evidente que os diversos tipos de sistemas de FGD, o carvão utilizado que varia de acordo com a localidade, ocasionariam em resíduos com aspectos distintos. Ao final do processo, o resíduo gerado, na maioria dos casos, é rico em óxidos de cálcio e sulfato de enxofre, independentemente do local onde é produzido e do tipo de sistema utilizado. Devido a isso, os resíduos FGD apresentam características físico-químicas e mineralógicas variáveis.

No que diz respeito às características físicas, a granulometria de resíduo FGD estudado por Liu *et al.* (2009), advindo do processo semisseco, apresentou partículas variando de 1 a 60 μm . Teixeira (2019) e Picoli (2020) utilizaram o resíduo FGD gerado pela mesma empresa que o resíduo utilizado neste trabalho e encontraram partículas variando de, aproximadamente, 0,5 μm a 79 μm e 2 μm a 600 μm , respectivamente. Além disso, pode-se afirmar que os resultados encontrados por Picoli (2020) indicaram que 91,8% do resíduo tem granulometria semelhante ao silte.

Além disso, outra característica relevante é a massa específica que não varia muito entre os diferentes processos, se apresentando entre 2,25 e 2,60 g/cm^3 (FHWA, 2016). O resíduo estudado por Teixeira (2019) apresentou uma massa específica de 2,265 g/cm^3 , enquanto o resíduo estudado por Picoli (2020) apresentou 2,79 g/cm^3 .

Quanto às características químicas, o resíduo foi caracterizado por Picoli (2020) e os resultados encontram-se na Tabela 2 e 3. Pode-se afirmar que o resíduo FGD é rico em CaO e SO_3 , reforçando as informações apresentadas anteriormente.

Tabela 2 - Análise química e de complexo sortivo do resíduo FGD

Elemento	Quantidade
Cálcio (Ca) (cmolc/dm^3)	96,2
Cálcio (Ca) (mg/dm^3)	19278,5
Potássio (K) (mg/dm^3)	170
Sódio (Na) (mg/dm^3)	70
Enxofre (S) (mg/dm^3)	1315
CTC Efetiva (cmolc/dm^3)	97
Saturação de Bases (%)	100

Fonte: Picoli (2020).

Tabela 3 – Análise de Fluorescência de Raios X do resíduo FGD

Elemento / Óxidos	Quantidade
Al_2O_3	<0,1%
CaO	56,40%
Cr_2O_3	<0,01%
Fe_2O_3	0,12%
K_2O	0,04%
MgO	0,55%
MnO	<0,01%
Na_2O	<0,1%

Tabela 3 – Análise de Fluorescência de Raios X do resíduo FGD

Elemento / Óxidos	Quantidade
P ₂ O ₅	0,17%
SiO ₂	0,38%
TiO ₂	<0,01%
SO ₃	25,09%
ZnO	0,02%
V ₂ O ₅	<0,01%
F	<0,1%
Perda por Calcinação (1000°C)	17,08%

Fonte: Picoli (2020).

No que diz respeito à mineralogia, Teixeira (2019), por meio de análises DRX, apontou que o resíduo FGD em questão apresentava minerais de sulfito de cálcio hemidratado ($\text{CaSO}_3 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$), hidroxidocloreto de cálcio (CaClOH) e calcita (CaCO_3). Picoli (2020) indicou que o resíduo apresentava sulfito de cálcio hemidratado ($\text{CaSO}_3 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$), portlandita (Ca(OH)_2), calcita (CaCO_3) e sinjarita ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

2.4 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS

Solos, especialmente solos de baixa consistência, cuja resistência não atende às especificações de projeto podem ser melhorados para que se tornem adequados e satisfaçam os requisitos da engenharia civil. Como técnica de melhoramento, a estabilização é empregada.

Segundo Soliz (2007) e muitos outros, pode-se definir a estabilização dos solos como um processo de modificação das características de um solo por meio de um tratamento artificial visando melhorar seu desempenho. Além disso, o autor complementa que, após o procedimento, o solo deve permanecer estável sob ação de cargas externas e efeito de ações climáticas. Ao final do processo de estabilização, o solo modificado deve apresentar maior resistência ao cisalhamento e menor compressibilidade que o solo original (MAKUSA, 2012).

A estabilização de solos pode ser realizada por meio de processos físicos, mecânicos ou químicos. A estabilização química é empregada em estabilizações superficiais, normalmente, para utilização em base e sub-base rodoviária e em estabilizações profundas. As principais diferenças entre os dois tipos de estabilização é o tipo de solo

a ser melhorado, a quantidade de ligante empregado e o procedimento de mistura a ser adotado. Enquanto as diretrizes normativas limitam as propriedades mínimas que deve ter um solo para ser empregado em obras rodoviárias, na estabilização em profundidade não há limitação para o tipo de solo, podendo ser empregadas em solos de baixa consistência e até mesmo solos com alto teor de matéria orgânica.

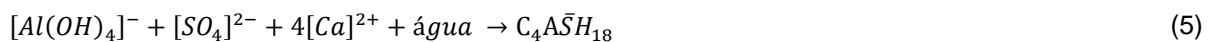
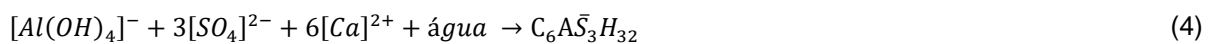
A estabilização em profundidade pode ser realizada mediante técnicas conhecidas como *deep mixing*. A técnica consiste em uma estabilização in situ do solo por meio da mistura do material de baixa consistência com um ligante na forma de pasta ou pó. A aplicação é feita utilizando máquinas acopladas com eixos e lâminas de mistura, bicos aspersores de estabilizante que são utilizados para produzir as colunas de solos melhorados de maiores resistência que o solo original. Segundo Correia (2011), essa técnica pode ser utilizada em vários tipos de solos, desde moles até rochas mais brandas, além de, atualmente, serem utilizadas em outros cenários como estruturas de suporte de escavação, barreira impermeável, entre outros.

Os parâmetros fundamentais para a estabilização química de um solo dependem do solo original e do ligante escolhido. Os ligantes mais utilizados são cal e cimento Portland, porém há vários estudos com a mistura de mais de um ligante ou utilização de resíduos. Normalmente, incorporado ao cimento, encontram-se a escória granulada de alto forno, cinza volante, fíler calcário e areia com alto teor de sílica (AXELSSON; JOHANSSON; ANDERSSON, 2002; KITAZUME; TERASHI, 2013; CORREIA, 2011). Esses aditivos além de conferirem ganhos de resistência mecânica, contribuem para impactos ambientais positivos, devido a reutilização de coprodutos industriais.

Wu *et al.* (2021) apontam que a resistência e a rigidez das argilas estabilizadas à base de cimento, por exemplo, se originam, majoritariamente, da cimentação e da densidade e, secundariamente, de outros fatores como a microestrutura, os constituintes físico-químicos, teor de água etc. Nas composições de agentes estabilizantes à base de resíduos industriais, as reações químicas decorrentes da interação entre solo-ligante podem ser de hidratação, pozolânicas, carbonatação e trocas iônicas.

As reações de hidratação ocorrem na presença do ligante hidráulico, normalmente cimento Portland. Os principais componentes do cimento Portland são silicato tricálcico (C₃S), conhecido como alita, silicato dicálcico (C₂S), conhecido como belita, aluminato tricálcico (C₃A) e ferro aluminato tetracálcico (C₄AF), em que C, S, A e F significam, respectivamente, CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃. Além disso, para retardar a pega do cimento, sulfato de cálcio é adicionado.

O processo de hidratação do cimento, descrito conforme Mehta e Monteiro (2014), se dá pela adição de água, fazendo com que o cimento adquira propriedade adesiva. Imediatamente após a adição de água, o C₃A e a gipsita reagem, ocorrendo a precipitação de trissulfoaluminato de cálcio hidratado ou monossulfoaluminato de cálcio hidratado, os quais são dependentes da concentração de íons de aluminato e sulfato na solução. Nas soluções em que há saturação de Ca²⁺ e OH⁻, o trissulfoaluminato de cálcio hidratado cristaliza como pequenas agulhas prismáticas e é chamada de etringita (C₆A \bar{S} ₃H₃₂), enquanto o monossulfato (C₄A \bar{S} H₁₈) cristaliza-se em forma de placas hexagonais finas. As reações químicas de formação desses minerais podem ser expressas conforme as Equações 4 e 5, em que os caracteres seguem o mesmo padrão já apresentado, com exceção do \bar{S} que designa o trióxido de enxofre, SO₃.



No processo de hidratação, o C₃S e C₂S, por sua vez, reagem produzindo uma família de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que são estruturalmente semelhantes, mas variam na relação cálcio/sílica e no teor de água, além de formarem hidróxido de cálcio, conhecido como portlandita (CH), sendo H a abreviação de H₂O.

A etringita é cristalizada nas primeiras horas da hidratação dos aluminatos devido à relação sulfato/aluminato na fase aquosa e essa precipitação ajuda no enrijecimento e desenvolvimento da resistência inicial. Quando todo o sulfato de cálcio tiver sido consumido e a concentração de íons aluminatos aumentarem devido às contínuas reações do C₃A com o C₄AF, a etringita se desestabiliza e é convertida para a fase mono, AFm (Equação 6). Produtos com composição químicas variáveis, mas com

estruturas semelhantes ao trissulfato e monossulfato hidratado são designados por AFt e AFm, respectivamente (MEHTA; MONTEIRO, 2014).



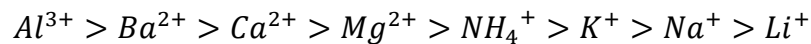
As fases AFm, definidas como “Al₂O₃ - Fe₂O₃ – mono”, segundo Taylor (1997), possuem a fórmula geral apresentada na Equação 7, em que X representa um ânion carregado. Na hidratação do cimento Portland, os ânions mais importantes são OH⁻, SO₄²⁻ e CO₃²⁻.



No decorrer da reação de hidratação primária, parte do hidróxido de cálcio é dissolvido quando combinado com a sílica e/ou alumínio presente no solo podendo gerar um processo de reação pozolânica (CORREIA, 2011). No processo são formados os agentes estabilizantes C-(A)-S-H. Mitchell e Soga (2005) afirmam que as reações pozolânicas acontecerão enquanto o sistema apresentar pH alto suficiente para manter a solubilidade e houver hidróxido de cálcio suficiente para combinar-se à sílica e alumina do solo.

Quanto às reações de carbonatação, entende-se que ocorrem a partir da interação da Portlandita formada a partir da hidratação do cimento ou da composição química de outro agente estabilizante adicionado ou da interação de óxido de cálcio (CaO) com o CO₂, formando carbonato de cálcio (CaCO₃) (PARK et al., 2015; JAFER et al., 2018b; WU et al., 2021; WU et al., 2022).

No que diz respeito à troca iônica, devido ao desbalanceamento de carga das argilas, os íons negativos presentes nas faces das partículas de solo atraem outros íons presentes no meio para se manterem neutros. Esse processo de troca é conhecido como reação de troca catiônica e tem como consequência uma redução da espessura da nuvem de água adsorvida que provoca a destruição da estrutura original da argila, provocando a sua floculação. Como resultado, a troca catiônica pode converter uma argila dispersa de alta plasticidade em uma estrutura floculada com baixa plasticidade (CORREIA, 2011). O processo de troca iônica é estequiométrico e os íons podem ser sequenciados, por exemplo os cátions mais frequentes em processos de estabilização (CORREIA, 2011):



No processo de troca catiônica durante estabilizações de solos, os íons cálcio substituem quase totalmente os íons de potássio e sódio que se encontravam adsorvidos na superfície das partículas de argila (CORREIA, 2011; ÅHNBERG, 2006).

Alguns fatores que podem influenciar na qualidade do produto da estabilização profunda foram apresentados por Terashi (1997) e pode-se destacar o agente estabilizador e as condições do solo de origem.

Os ligantes mais utilizados ao redor do mundo nos processos de estabilização profunda são hidráulicos e aéreos, aplicados isoladamente ou a partir de uma combinação com outros tipos, podendo ser cal, cimento Portland, escórias, em especial a de alto forno, e fílers. Sanches (2012) afirma que o objetivo da incorporação dos aditivos é ocasionar um aumento de resistência ao solo, porém, a escolha não se baseia apenas no que podem proporcionar, mas também na disponibilidade, tanto econômica como temporal, e em impactos ambientais. Além disso, a autora complementa que definir o tipo de ligante a ser utilizado em obras de *Deep Soil Mixing* é o ponto mais importante do projeto. É importante ressaltar que nem todos os estabilizantes são eficientes em quaisquer tipos de solo.

No que diz respeito a cal, o calcário presente nela reage com a água gerando calor e aumentando o pH, isso proporciona a reação entre as partículas de argila e o hidróxido de cálcio, reação pozolânica, aumentando a resistência a longo prazo. Já no cimento Portland, o processo de hidratação forma hidróxido de cálcio, proporcionando uma reação pozolânica de menor magnitude, e silicato de cálcio, sendo o responsável por causar um grande efeito de cimentação, unindo o cimento ao solo para aumentar a resistência. Em relação a velocidade das reações, sabe-se que a reação hidráulica ocorre mais rapidamente que a reação pozolânica, sendo o cimento responsável por ganhos de resistência nos primeiros meses maiores que a cal. Quando os dois materiais são utilizados em conjunto há uma estabilização eficaz, em que o cimento proporciona um aumento mais rápido na resistência, mas o processo de hidratação da cal proporciona um crescimento no calor que acelera a reação do cimento, enquanto a reação pozolânica apresenta um ganho de resistência a longo prazo (AXELSSON; JOHANSSON; ANDERSSON, 2002).

Outros estabilizantes utilizados são as cinzas volantes, responsáveis por proporcionarem reações pozolânicas. Estabilizantes pozolânicos precisam da adição de água e, geralmente, hidróxido de cálcio para acelerar o processo de aumento de resistência, por isso, normalmente são utilizadas em conjunto ao cimento Portland (AXELSSON; JOHANSSON; ANDERSSON, 2002).

Além desses, há estudos em que se exploraram o uso da escória de alto forno. Axelsson, Johansson e Andersson (2002) dizem que a reatividade de uma escória depende da taxa de resfriamento depois da saída do alto forno: quando lento, apresenta uma escória pouco reativa; quando rápido produz uma escória reativa, esse é o caso da escória granulada de alto forno. Esse estabilizante pode formar produtos de alta resistência, quando misturados com o solo, porém a reação é lenta. Para acelerar a reação é necessário que a hidratação ocorra em um meio alcalino.

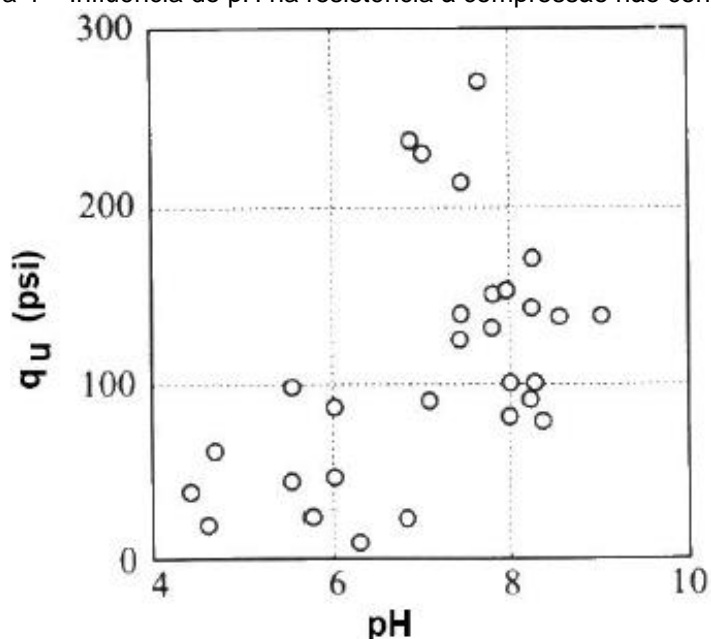
Por fim, os fílers também têm sido utilizados na estabilização de solos, como a areia fina, que não produzem uma reação química, mas atuam como um endurecedor aumentando a resistência final. A vantagem desses estabilizantes é que preenche os vazios formados durante o processo e um fíler barato, utilizado em solos que necessitam grande quantidade de estabilizantes, pode proporcionar uma economia (AXELSSON; JOHANSSON; ANDERSSON, 2002).

No que diz respeito ao teor de ligante, Ånhberg (2006) estudou a estabilização de solos de baixa consistência da Suécia e apresentou quantidade de ligante entre 50 e 200 kg/m³, sendo 100 kg/m³ a mais utilizada, para solos argilosos. Já para as “gyttja”, espécie de lama produzida por meio da deterioração parcial da turfa, variou de 70 a 150 kg/m³, sendo 100 kg/m³ a dosagem mais comum, e para as turfás entre 100 e 300 kg/m³, utilizando geralmente 200 kg/m³. Pode-se perceber que solos ricos em matéria orgânica, como as turfás, necessitam de quantidades de ligantes maiores que solos argilosos, o que foi defendido por Axelsson, Johansson e Andersson (2002). Nascimento (2016) definiu como teor necessário para estabilizar uma turfa na cidade Rio de Janeiro, 150 kg/m³ de CP V - ARI. Correia (2011) utilizou 125 kg/m³ em um estudo de estabilização do solo do Baixo Mondego em Portugal.

Quanto às condições do solo de origem, muitos solos podem apresentar, principalmente na camada superficial, um teor de matéria orgânica. Essa matéria

apresenta húmus e ácido húmico que tendem impossibilitar o processo de hidratação de cimento nesses tipos de solo. Além disso, esses materiais reagem com o produto da hidratação e do hidróxido de cálcio presente no cimento causando uma redução no pH. O resultado disso é um processo de endurecimento mais lento e baixos ganhos de resistência (MAKUSA, 2012; NASCIMENTO, 2016). Isso pode ser explicado pela Figura 4 que apresenta a influência do pH na resistência à compressão não confinada. Quanto mais baixo o pH, mais características ácidas apresentar, menor a resistência atingida.

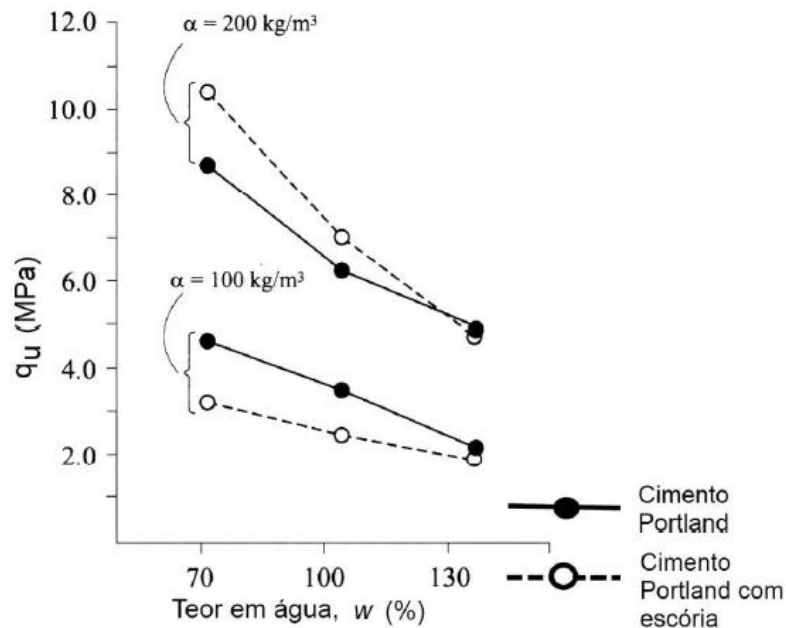
Figura 4 – Influência do pH na resistência à compressão não confinada



Fonte: Thompson (1966, apud CDIT, 2002).

Outro fator importante para que ocorra um processo de hidratação ideal é o teor de umidade. Makusa (2012) expõe que um solo com um teor de umidade insuficiente faz com que o ligante dispute com o solo para obter essa água e que em argilas e turfa, solos com grande afinidade solo-água, a hidratação pode ser retardada afetando a resistência final. Porém, vale ressaltar que solos com alto teor de umidade apresentam menor resistência (Figura 5). No caso de cimentos, uma alta resistência final e densidade obtida pelo processo de estabilização está relacionada a uma maior concentração e menor teor de umidade, mas para que esses resultados sejam favoráveis é necessário garantir o processo de hidratação ideal (MAKUSA, 2012; NASCIMENTO, 2016).

Figura 5 – Influência do teor de água inicial na resistência à compressão não confinada em corpos de prova com idade de 91 dias



Fonte: CDIT (2002).

2.4.1 Estabilização com cimento Portland e resíduo FGD

A seguir são apresentadas experiências sobre estabilizações químicas de solos utilizando o resíduo FGD e o cimento Portland, seja em estabilização em profundidade ou superficial, e alguns outros produtos que associados aos resíduos anteriores favorecem o ganho de resistência quando comparado à adição de cimento. Abaixo será apresentado um panorama dos estudos, as características dos solos, os tipos e teores de ligantes e os parâmetros avaliados que serão abordados neste trabalho. Em seguida serão apresentados os resultados obtidos em termos de aspectos físicos, mecânicos e microestruturais.

Park *et al.* (2015) avaliaram o efeito na resistência à compressão não confinada da incorporação de resíduo FGD e cimento Portland (ASTM Tipo I) em solos argilosos marinhos orgânicos de baixa consistência. O solo com teor de matéria orgânica de 5,87% e pH de 8,3, apresentava limite de liquidez e índice de plasticidade de 51,29% e 16,67%, respectivamente. A moldagem das amostras consistiu na mistura a úmido, numa proporção de 1/1 (relação água/mistura), dos teores de ligantes de 5%, 10% e 15% com o solo. Para obter a combinação de ligantes, o resíduo FGD foi adicionado no Cimento Portland a uma razão de 5% com base na massa seca. Para que refletisse as condições empregadas em locais em que os solos estabilizados são expostos

abaixo do nível do mar, os corpos de prova foram armazenados em um recipiente com água do mar. Além dos ensaios de compressão não confinada (aspecto mecânico), a massa específica aparente seca (aspecto físicos) será abordada e, também, ensaios de DRX que determinaram os produtos das reações químicas ocorridas entre o solo e os estabilizantes (aspecto microestrutural).

Wu *et al.* (2022) estudaram a incorporação de diferentes teores de resíduo FGD junto a clínquer de cimento e metacaulim, um material pozolânico, em uma argila com elevado teor de umidade e alta compressibilidade da China. Os limites de liquidez e plasticidade e índice de plasticidade eram 46,2%, 25,3% e 20,9%, respectivamente. O resíduo utilizado na pesquisa era proveniente de um processo de dessulfuração de calcário-gesso em uma usina de energia na China. Como o objetivo da pesquisa era testar os ligantes em uma argila com dois teores de umidade, foram adicionados, aproximadamente, 1,1 e 1,5 vezes o limite de liquidez, um total de 50% e 70%, de água destilada. O teor de clínquer de cimento e metacaulim adicionado foi 12% e 3%, respectivamente, em relação ao solo seco. Quanto ao resíduo FGD, os teores de adição foram numa relação resíduo/clínquer (G/C) de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. Os parâmetros abordados serão umidade, peso específico aparente seco (aspectos físicos), resistência à compressão simples não confinada (aspecto mecânico) e os produtos das reações por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (aspectos microestruturais).

Um estudo realizado por Butalia *et al.* (2018) avaliou o uso de três tipos de resíduo FGD para melhoramento de um solo colapsível de Indiana (EUA) para estabilização de base e sub-base rodoviária. Os três materiais secos obtidos do processo FGD foram provenientes de usina de carvão (Liaoyang), usina de sinterização de aço (Meishane) e de Caldeira de Leito Fluidizado Circulante (CFB) produzidos na China. Os limites de liquidez de quatro amostras de solos compreenderam entre 24,7% e 36%, enquanto os limites de plasticidade entre 15,6 e 23,4%. Quanto aos teores de adição adicionou-se 6% e 20% de resíduo FGD de material FGD. Por não se tratar de solos de baixa consistência, este trabalho abordará os resultados obtidos, apenas, no ensaio de DRX (aspecto microestrutural).

Maichin *et al.* (2021) desenvolveram um estudo sobre a mistura de cimento e resíduo FGD para estabilização de sub-base de rodovias. Foi utilizado um solo laterítico

oriundo da Tailândia que apresentou limite de liquidez, limite e índice de plasticidade de 41%, 19% e 22%, respectivamente. Os teores de cimento (ASTM C150 - Tipo 1) utilizados foram de 1 a 3%, enquanto os de resíduo FGD, provenientes de uma usina de carvão variou de 1, 3 e 5% da massa de solo seco. Devido ao trabalho abordar a estabilização superficial, valores absolutos de resistência não serão abordados neste trabalho, apenas os produtos gerados com a estabilização observados por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (aspectos microestruturais).

Picoli (2020) estudou a incorporação de resíduo FGD em um solo areno-argiloso por meio de uma campanha experimental desenvolvida no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFES para estabilização de base e sub-base rodoviária. Com dosagens de estabilizantes variando de 0,75 a 3% de CP III-40 RS e resíduo FGD, este trabalho abordará os resultados encontrados de limites de consistência (aspectos físicos) na idade zero.

Os trabalhos apresentados até aqui estudaram, recentemente, a adição do resíduo proveniente de planta FGD, independente de qual foi a indústria geradora, no processo de estabilização de solos. Além disso, alguns trabalhos que serão abordados a seguir, apresentaram considerações relevantes ao comportamento dos solos melhorados quando adicionado somente cimento Portland, tornando-os imprescindíveis para análise dos resultados deste trabalho.

Um estudo focado em entender o efeito na plasticidade da incorporação de cimento Portland, cinza volante e escória granulada de alto forno em diferentes tipos de solos de baixa consistência foi realizado por Abbey, Ngambi e Coakley (2016). Foram utilizados cinco diferentes solos cujas características e classificações se encontram na Tabela 4. Quanto ao teor de ligante, foram incorporados 5%, 10%, 15% e 20% nas amostras, sendo de três diferentes tipos: cimento puro, 50% de cimento e 50% de cinza volante e, por fim, 33,3% de cimento, 33,3% de cinza volante (PFA) e 33,3% de escória granulada de alto forno. As amostras foram submetidas aos testes de limite de Atterberg, três dias após a mistura de acordo com os procedimentos descritos na British Standard (BS 1377-2: 1990). As propriedades avaliadas que serão abordadas são limites de liquidez e plasticidade e índice de plasticidade (aspectos físicos).

Bayat, Asgari e Mousivand (2013) estudaram a incorporação de Cimento Portland e cal em uma composição de solo proveniente de dez diferentes regiões do local

estudado. Os limites de liquidez e plasticidade da argila de baixa plasticidade é 29% e 20%, respectivamente e foram obtidos por meio dos procedimentos da ASTM D 4318. O estudo, em geral, investigou a incorporação dos dois ligantes na plasticidade do solo estabilizado (aspecto físico), cujos resultados serão apresentados neste trabalho. A preparação das amostras consistiu na mistura do solo original aos estabilizantes em teores de 3, 5, 7 e 9% de cimento Portland e cal, ambos adicionados individualmente.

Tabela 4 – Características dos solos estudados por Abbey, Ngambi e Coakley (2016)

Propriedades do solo	Símbolo	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 4	Solo 5
Umidade	w	86	45	36	61	54
Limite de Liquidez	LL	68	42	45	87	63
Limite de Plasticidade	LP	31	37	30	42	53
Índice de Plasticidade	IP	37	5	15	45	10
Peso Específico (kN/m ³)	Y	25	23	22	24	21
Densidade relativa	G	2,55	2,35	2,24	2,45	2,14
Classificação do solo	SUCS	CH	ML	MI	MH	MH

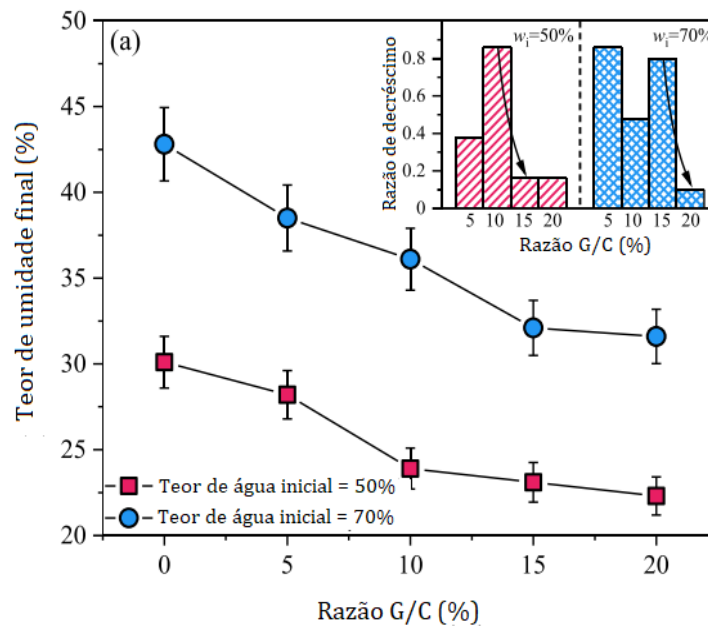
Fonte: Autora (2022).

Ånhberg e Johansson (2005) estudaram a estabilização com cimento, cal, cinza volante e escória de alto forno em três diferentes solos de baixa consistência da Suécia. Dois dos solos apresentavam teor de umidade de 78%, Limite de liquidez entre 66% e 70% resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) de 8 a 15 kPa. O terceiro solo utilizado apresentava teor de matéria orgânica de 10%, w de 220%, LL de 170% e S_u igual a 5 kPa. O teor de incorporação foi de 100 kg/m³ de cimento de calcário (CEM II/A-LL 42.5 R), cal, cinza volante e escória granulada de alto forno. O parâmetros abordados serão resistência à compressão simples não confinada em função do tempo (aspecto mecânico).

2.4.1.1 Aspectos físicos

Os resultados obtidos por Wu *et al.* (2022) quanto às propriedades físicas indicaram que a presença de ligantes, independente do teor de água e G/C, ocasionaram uma diminuição do teor de umidade dos corpos de prova após 60 dias de cura, embora seja evidente que quanto maior o teor de resíduo adicionado, maior é a diminuição do teor de umidade (Figura 6). A diminuição no teor de água pode ser atribuída, segundo os autores, ao aumento das frações da fase sólida da mistura e, também, ao consumo de água pelas reações químicas que ocorrem pela adição dos ligantes.

Figura 6 – Teor de umidade das composições obtidas por Wu *et al.* (2022)

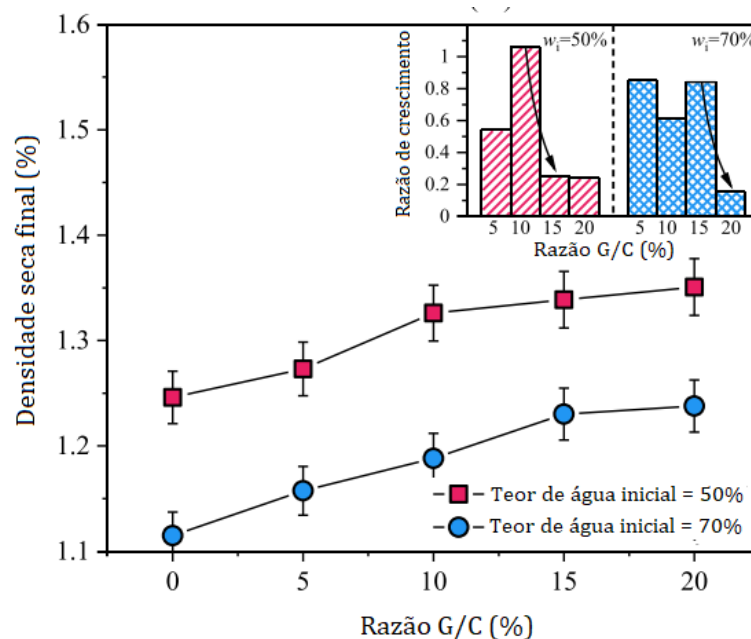


Fonte: Wu *et al.* (2022).

Além disso, é possível observar na Figura 7 que a taxa de decréscimo dos valores da densidade seca diminui à medida em que o teor de ligante cresce. O motivo para tal, possivelmente, é que o crescimento repentino da etringita, segundo os autores, passa a ser dificultado devido à densificação dos poros da matriz do solo, visto que, a formação desses cristais resulta em uma expansão volumétrica. Com isso, conclui-se que deve existir um limiar do teor de gesso que pode ser adicionado no sistema dependente do teor de umidade inicial. Para solos com teor de umidade de 50%, o estudo conclui que a razão resíduo/clínquer é de 10%, já para solos com teor de umidade de 70%, essa razão é de 15% (WU *et al.*, 2022).

Outros pesquisadores que avaliaram o efeito do cimento Portland (Tabela 5) e resíduo FGD (Tabela 6) na massa específica aparente seca foram Park *et al.* (2015). Foi possível observar que quando adicionado 5% e 10% de cimento, os valores de massa específica diminuíram com o passar do tempo, comportamento esse que não foi observado na mistura de 15% que apresentou um aumento na massa específica. Quando se trata da incorporação do resíduo FGD juntamente ao cimento, a adição de 5% e 10% sofreram um aumento na massa específica nos 7 dias iniciais, seguido de uma diminuição aos 14 dias e um novo aumento aos 28 dias. Já a adição de 15% apresentou um aumento aos 14 dias, seguido de uma estabilização no valor.

Figura 7 – Densidade seca final das composições obtidas por Wu *et al.* (2022)



Fonte: Wu *et al.* (2022).

Tabela 5 – Massa específica aparente seca de solo modificado com Cimento Portland obtidas por Park *et al.* (2015)

Teor de Adição	Massa específica aparente seca (g/cm ²)		
	7 dias	14 dias	28 dias
5%	1,06	1,04	1,02
10%	1,06	1,05	1,02
15%	1,01	1,03	1,04

Fonte: Adaptado de Park *et al.* (2015)

Tabela 6 – Massa específica aparente seca de solo modificado com Cimento Portland e resíduo FGD obtidas por Park *et al.* (2015)

Teor de Adição	Massa específica aparente seca (g/cm ²)		
	7 dias	14 dias	28 dias
5%	1,04	1,03	1,05
10%	1,04	1,02	1,03
15%	1,04	1,05	1,05

Fonte: Adaptado de Park *et al.* (2015)

Quanto aos limites de liquidez e plasticidade, Picoli (2020) obteve os resultados apresentados na Tabela 7. Nota-se que a incorporação de agentes estabilizantes não surtiu grandes efeitos nos limites de consistência, tal fato deve-se ao teor de estabilizante utilizado.

Tabela 7 – Limite de Liquidez e Plasticidade obtidos por Picoli (2020)

Amostra	Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
Solo puro	27	17	10
Solo + 1,5 CP + 1,5FGD	26	21	5
Solo + 0,75 CP + 0,75 FGD	27	20	7
Solo + 3,0 CP	26	19	7
Solo + 3,0 FGD	28	23	5

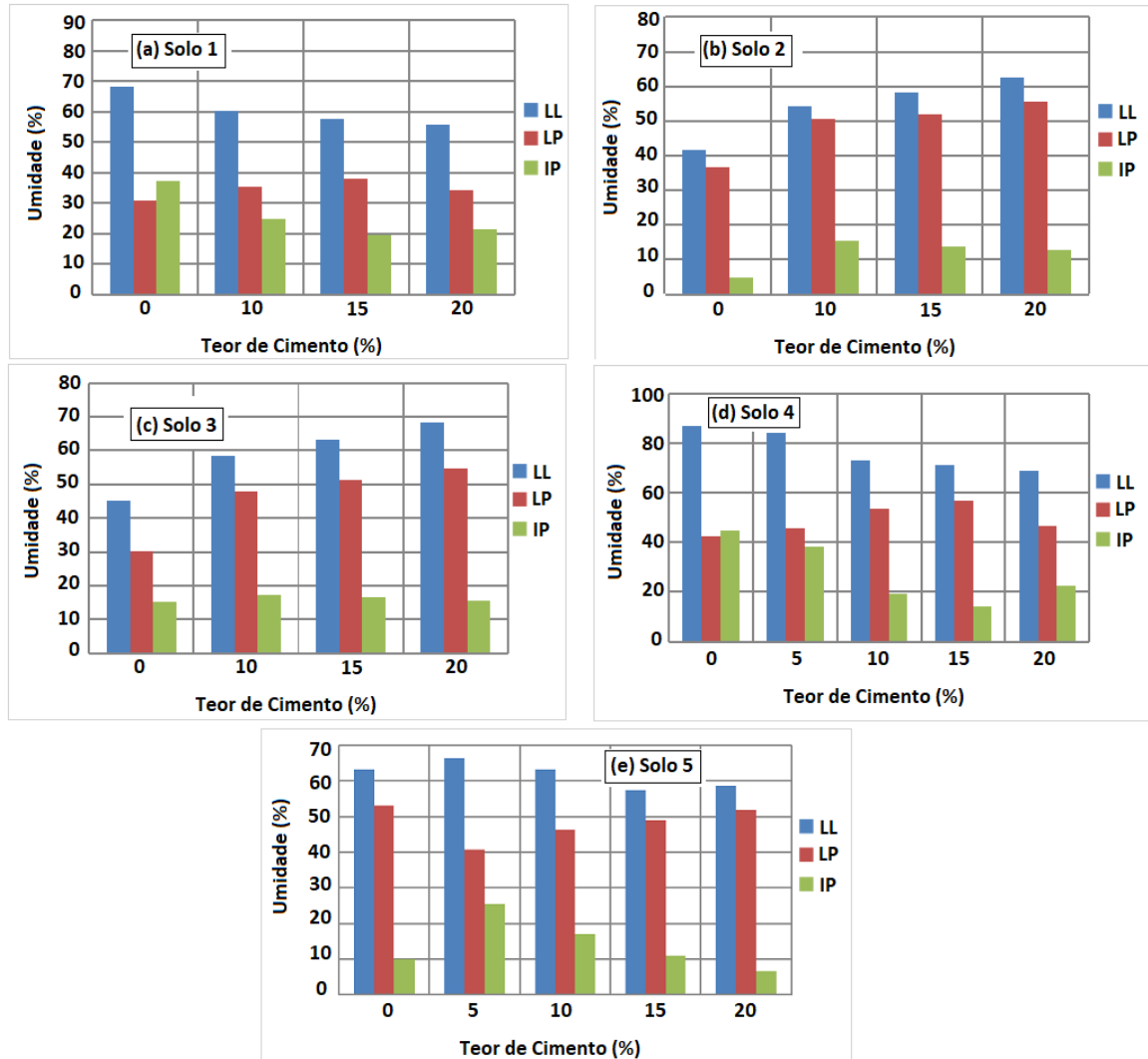
Fonte: Autora (2022).

A partir dos resultados obtidos por Abbey, Ngambi e Coakley (2016) (Figura 8), pôde-se perceber que, os solos não apresentaram uma tendência quanto ao limite de liquidez. O solo 1 e 4, com LL inicial de 68% e 87%, respectivamente, apresentaram uma diminuição no limite de liquidez em relação ao solo sem adição à medida em que se aumentou o teor de cimento adicionado. Já os solos 2 e 3, com LL inicial de 41,7% e 45,2%, respectivamente, apresentaram um aumento no limite de liquidez em relação ao solo não modificado quando aumentou o teor de cimento. Por fim, o solo 5 apresentou um aumento nesse limite quando adicionado 5% de cimento em relação ao valor referência, porém a medida em que se aumentou o teor desse ligante, especificamente em 10% e 15%, o limite de liquidez apresentou uma redução em relação à adição de 5%. Em relação ao solo 3, que apresenta LL parecido ao solo estudado nesse trabalho, a adição de 15% de cimento Portland, ocasionou na mudança de 45,2% para um valor superior a 60%.

Quando foi adicionado cimento e cinza volante ou até mesmo quando se adicionou a escória de alto forno a eles, o solo 1 apresentou um aumento no limite de liquidez na adição de 5% seguido por uma diminuição nos valores à medida em que se aumentou os teores de ligante, em relação ao valor de referência (Figuras 9 e 10). Além disso, pôde-se perceber que as simples adições de cinza volante e escória de alto forno causaram um aumento nesse limite quando comparado à adição de cimento. No solo 4, foi observado o mesmo comportamento de redução do limite de liquidez à medida que se aumentou o teor de cimento e de cimento e cinza volante. Enquanto o teor de 5% de cimento fez com que o LL fosse maior que 80%, a diminuição da quantidade de cimento para que fosse incorporado a cinza volante, fez com que o mesmo limite fosse próximo a 75%. Porém, quando adicionado a escória de alto forno, conseqüentemente havendo uma diminuição no teor dos outros dois ligantes, houve uma redução maior. Quando adicionado 5%, o solo apresentou um limite de liquidez

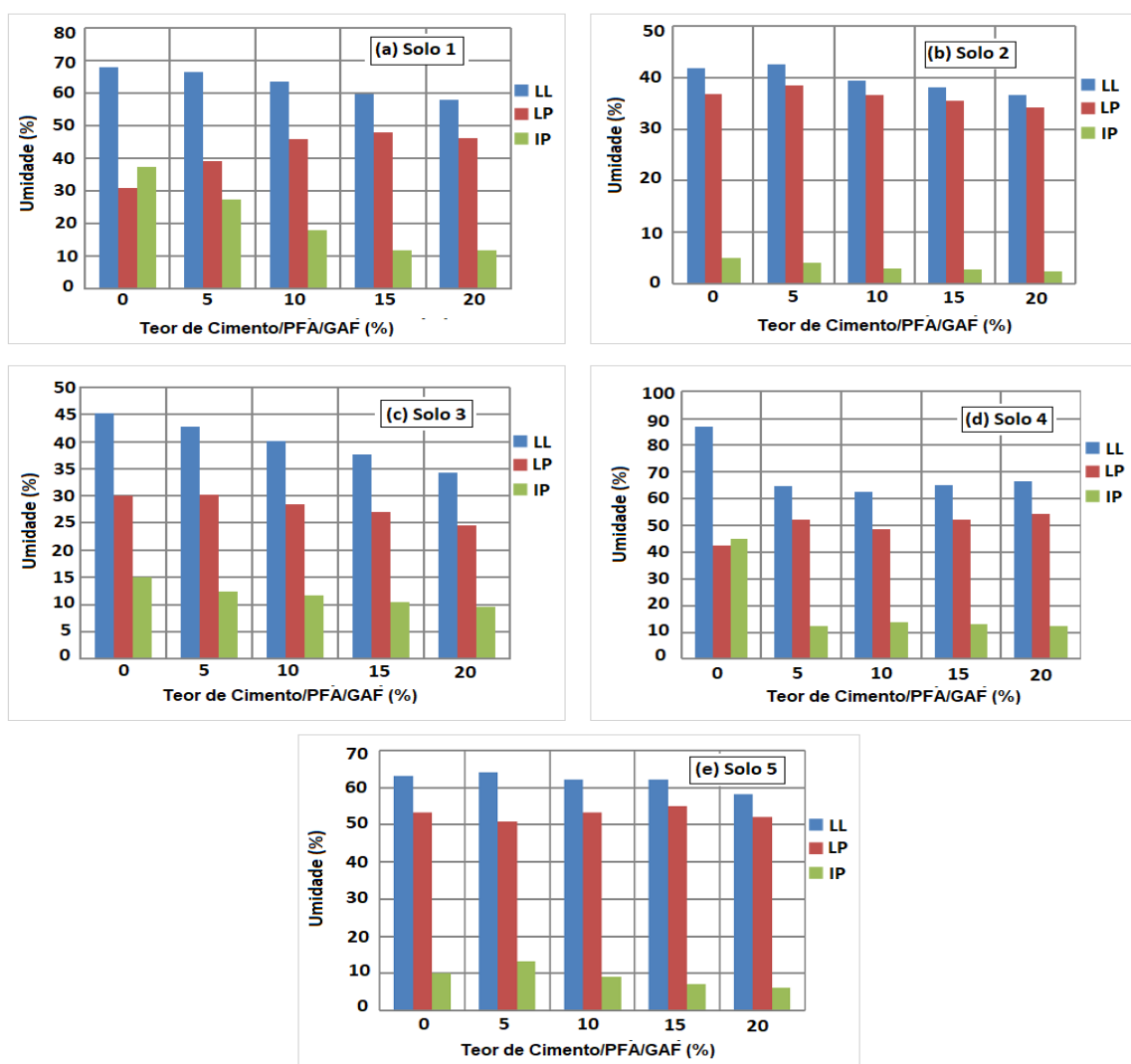
próximo a 65%. Porém, a partir do momento em que se adicionou 15% ou mais de ligante, o LL começou a aumentar, em relação ao menor valor obtido (10% de adição).

Figura 8 – Limite de Liquidez e Plasticidade e Índice de plasticidade dos solos 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e) com a incorporação de Cimento Portland obtidos por Abbey, Ngambi e Coakley (2016)



Fonte: Adaptado de Abbey, Ngambi e Coakley (2016).

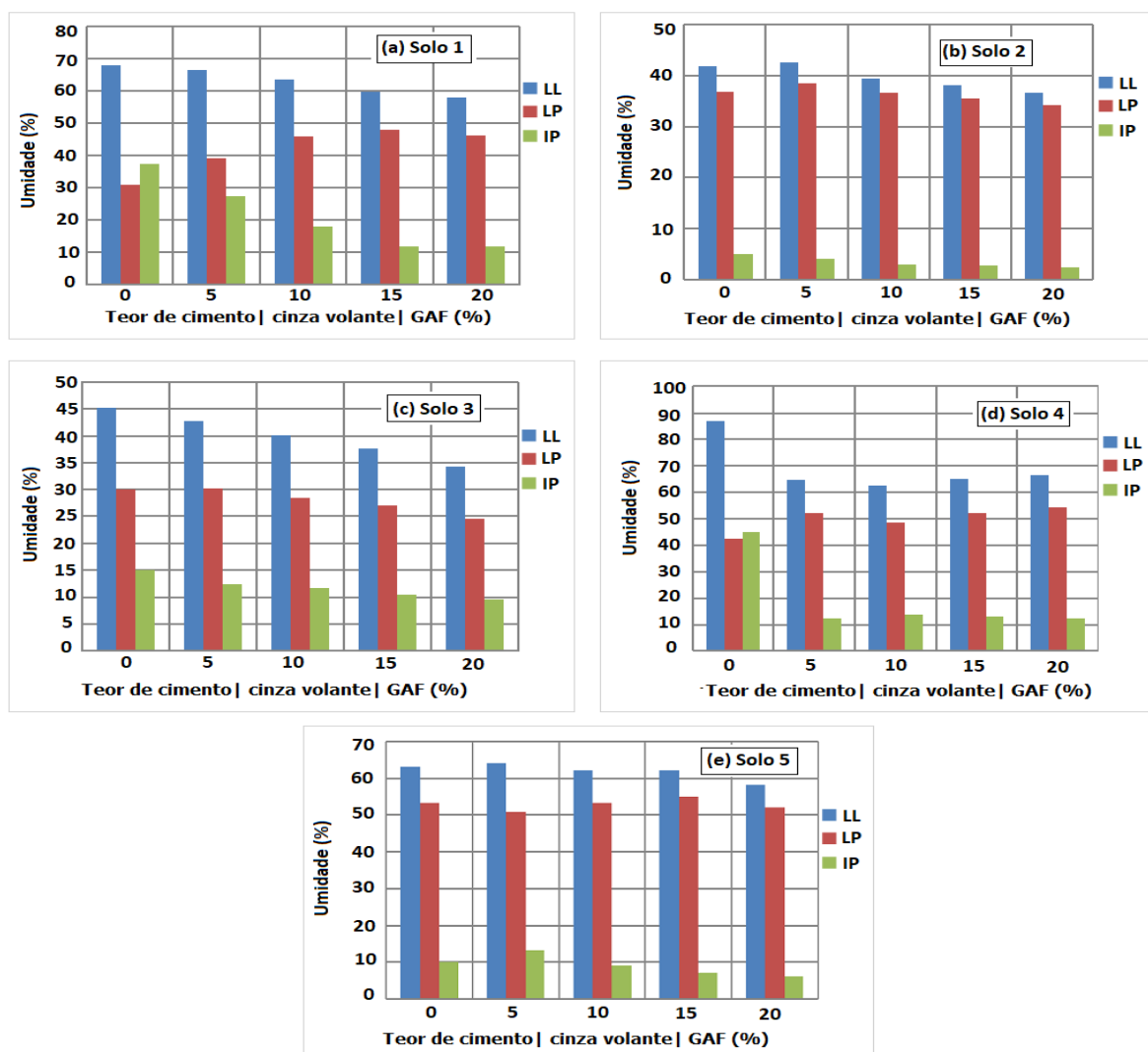
Figura 9 – Limite de Liquidez e Plasticidade e Índice de plasticidade dos solos 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e) com incorporação de cimento Portland e cinzas volantes obtidos por Abbey, Ngambi e Coakley (2016)



Fonte: Adaptado de Abbey, Ngambi e Coakley (2016).

Já o solo 2, quando adicionado 5% de cimento e cinza volante ou quando adicionado a eles a escória de alto forno, apresentou um aumento no LL em relação ao solo não modificado, mas os valores foram menores quando comparado a adição de cimento, somente. O solo que antes apresentava LL de 41,7% em seu estado natural, quando adicionado 5% de cimento, cinza volante e escória de alto forno sofreu um leve aumento nesse limite, contudo a adição de 10% ocasionou um valor menor que 40%. O solo 3 apresentou comportamento semelhante ao solo 2 e o solo 5 não exibiu diferenças significativas entre as diferentes adições.

Figura 10 – Limite de Liquidez e Plasticidade e Índice de plasticidade dos solos 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e) com incorporação de cimento Portland, cinzas volantes e escória granulada de alto forno obtidos por Abbey, Ngambi e Coakley (2016)

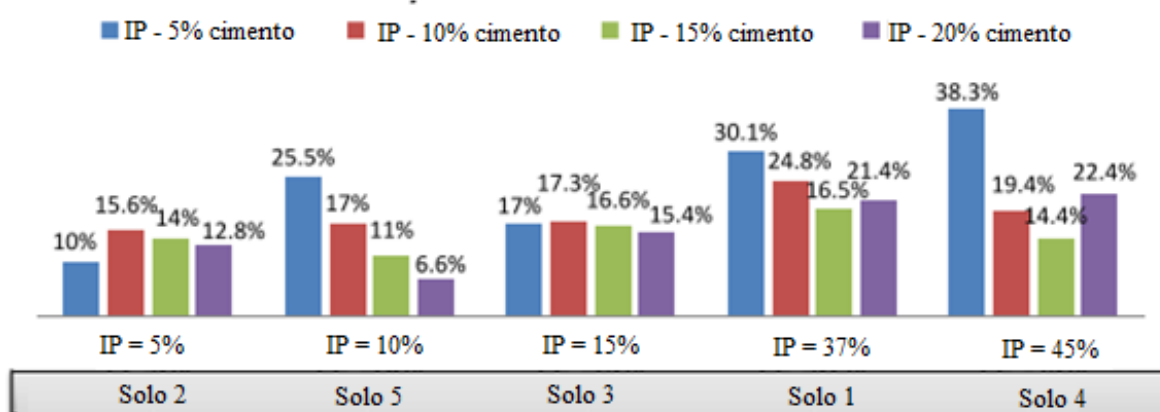


Fonte: Adaptado de Abbey, Ngambi e Coakley (2016).

No que diz respeito ao limite de plasticidade, quando adicionado apenas cimento, os solos 1, 2, 3 e 4 apresentaram um aumento no valor, enquanto o solo 5 apresentou uma redução, quando comparado ao solo sem tratamento. Vale destacar que a adição de 15% de cimento ao solo 3, ocasionou a mudança do LP de 30% para mais de 50%. Quando incorporado a cinza volante e escória juntamente ao cimento, os solos não apresentaram a mesma tendência que a adição pura de cimento. O solo 3, quando adicionado 5% de cimento, cinza volante e escória de alto forno, não apresentou mudança significativa no LP, porém com adições maiores houve uma diminuição nesse limite.

Todos os solos estabilizados com 15% de cimento apresentaram uma diminuição no índice de plasticidade, assim como os estabilizados com cimento, cinza volante e escória de alto forno. Quando analisado os teores de cimento adicionado, solos com IP natural entre 5% e 15% apresentaram um decréscimo, praticamente linear, do IP à medida que o teor de cimento aumentou, com exceção do Solo 2 que apresentou um aumento 5 a 10% de cimento, podendo ser explicado pela baixa plasticidade do solo natural e quantidade insuficiente de ligante (Figura 11). Solos com índice de plasticidade natural de 37% e 45%, quando incorporado o ligante apresentam um decréscimo no valor de índice de plasticidade que o solo natural. Além disso, vale ressaltar que para esses solos o aumento no teor de cimento, além de 15%, ocasiona um ponto de inflexão, sendo um indicativo de teor para um ótimo desempenho e valores acima desse, tornam-se impróprios para estabilização profunda de solos com índice de plasticidade natural $\geq 37\%$ (ABBEY; NGAMBI; COAKLEY, 2016).

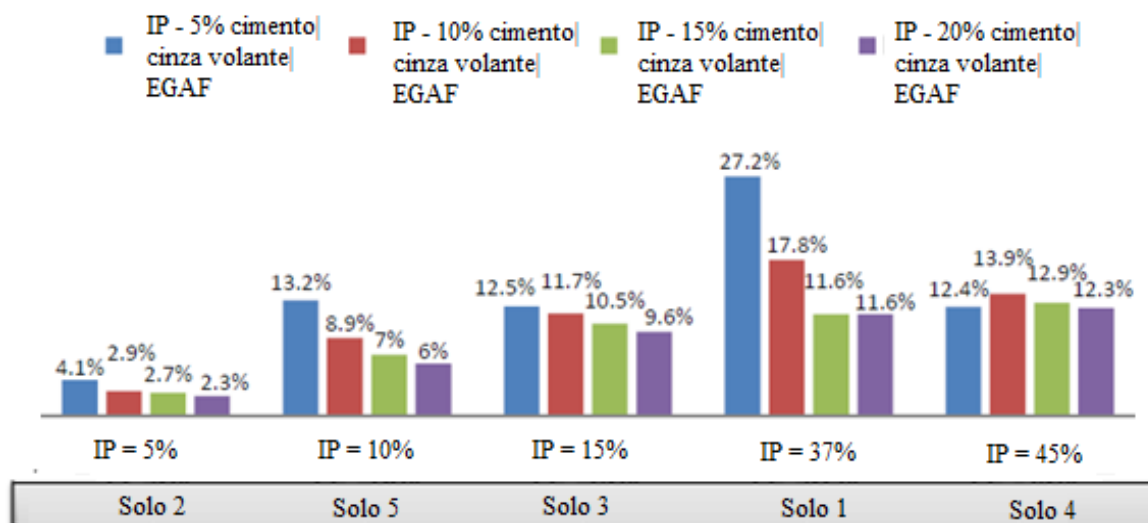
Figura 11 – Índice de Plasticidade para solos estabilizados com cimento Portland obtidos por Abbey, Ngambi e Coakley (2016)



Fonte: Abbey, Ngambi e Coakley (2016).

A inclusão de escória de alto forno e/ou cinzas volantes no solo estabilizado diminui a quantidade de cimento necessária para obter o teor ótimo de ligante e apresentou 20% como o teor ideal dessa combinação (Figura 12). Abbey, Ngambi e Coakley (2016) concluíram que o índice de plasticidade, relacionado ao desempenho final das misturas, varia com o IP natural do solo.

Figura 12 – Índice de Plasticidade para solos estabilizados com cimento Portland, cinza volante e escória granulada de alto forno obtidos por Abbey, Ngambi e Coakley (2016)



Fonte: Abbey, Ngambi e Coakley (2016).

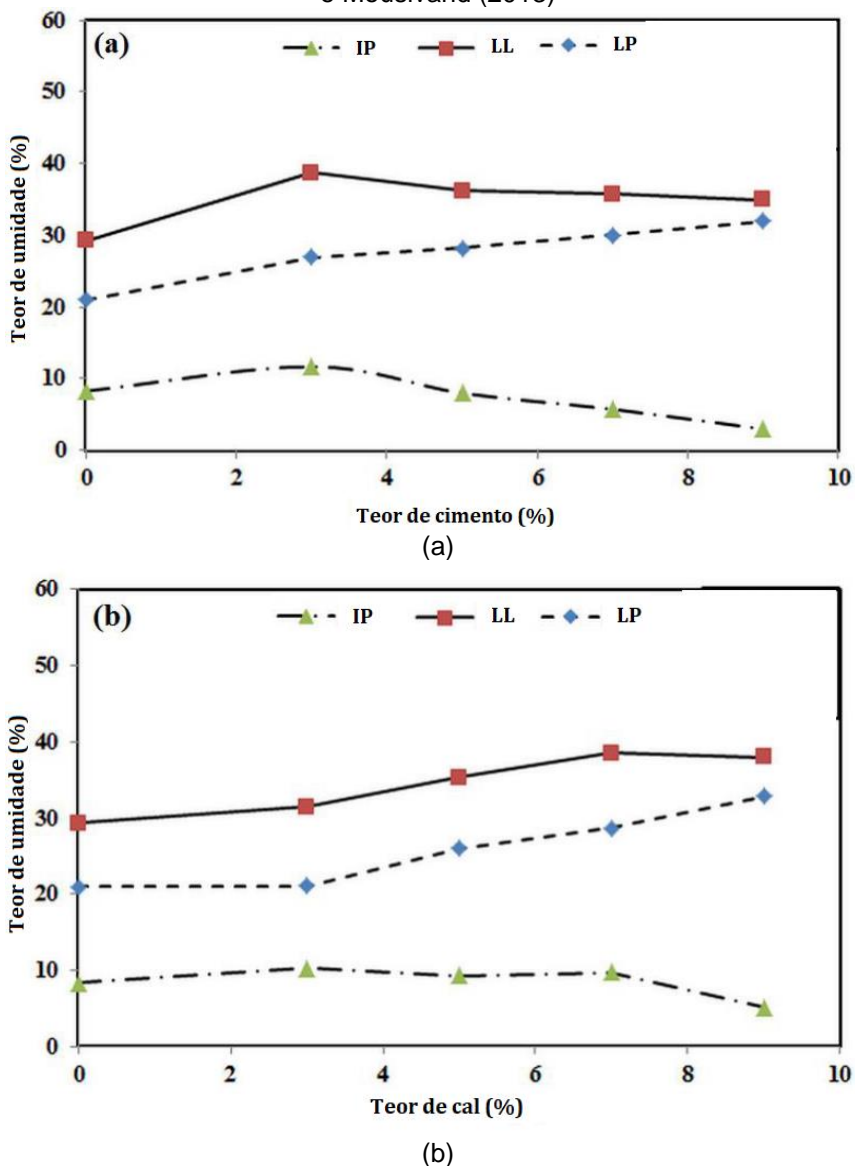
Abbey, Ngambi e Coakley (2016) afirmam que um aumento na pasta de cimento tende a diminuir a fluidez das amostras e aumentar o limite de plasticidade que parecem estar dependentes das propriedades iniciais do solo. Devido a isso, afirmam que é mais adequado descrever os solos estabilizados de acordo com o índice de plasticidade e, a nível de resistência, espera-se que o IP diminua com o aumento do teor de estabilizante.

Vale ressaltar que as mudanças nos limites de consistência na pesquisa de Abbey, Ngambi e Coakley (2016) deve-se a adição dos ligantes. Contudo, a mudança dos valores no solo modificado com a cinza volante e a escória de forno em relação a adição de cimento, somente, pode não ser efeito da adição dos ligantes em si, mas talvez da diminuição dos teores de cimento adicionado. Grytan *et al.* (2012) confere a mudança nos limites de consistência dos solos tratados com cimento Portland à troca catiônica das argilas e o processo de floculação-agregação das partículas com o aumento da quantidade de cimento.

Ainda sobre os limites de consistência do solo modificado, Bayat, Asgari e Mousivand (2013) estudaram o efeito de diferentes teores de cimento e da cal em uma argila de baixa plasticidade que apresentava limite de liquidez e plasticidade de 29% e 20%, respectivamente. Os autores ensaiaram os solos estabilizados 30 minutos após a mistura dos ligantes. Os resultados apresentados na Figura 13 indicaram que tanto o limite de liquidez quanto o de plasticidade aumentaram com a adição de cimento e de

cal em relação ao solo sem adição. Além disso, o índice de plasticidade quando adicionado teores inferiores a 3% de cimento sofreu um aumento, proporcionando uma maior trabalhabilidade ao solo.

Figura 13 – Limites de consistência de mistura: (a) solo cimento; (b) solo-cal obtidos por Bayat, Asgari e Mousivand (2013)



Fonte: Bayat, Asgari e Mousivand (2013).

2.4.1.2 Aspectos Mecânicos

No que diz respeito as propriedades mecânicas, Park *et al.* (2015) encontraram um desempenho mecânico da mistura cimento Portland e FGD inferior aos valores apresentados pela adição pura de cimento Portland em todas as idades de cura (Tabela 8). A adição de 15% do resíduo FGD e Cimento Portland proporcionou uma resistência à compressão não confinada de 198,4 kPa aos 28 dias de cura, enquanto

o mesmo teor de adição de cimento Portland proporcionou uma resistência à compressão não confinada de 256,7 kPa. Os autores pressupuseram que houve alguma inferência que possa ter impossibilitado que as reações entre o resíduo e o cimento ou com as partículas de solo ocorressem. Além disso, os autores atentaram que a incorporação do resíduo pode diminuir a taxa de hidratação dos produtos cimentícios e prolongar o tempo de pega, demandando maiores idades de cura para alcançar uma resistência à compressão não confinada alta.

Tabela 8 – Resultados de UCS com período de cura por amostra obtidos por Park *et al.* (2015)

Idade (dias)	Aditivo	Teor de Adição	pH	UCS (kPa)
7	CP	5%	9,05	42,6
		10%	9,35	131,2
		15%	9,38	198,8
	CP + FGD	5%	9,1	20
		10%	9,48	98,5
		15%	9,58	158,1
14	CP	5%	9,77	51
		10%	9,98	140,9
		15%	10,05	245,9
	CP + FGD	5%	9,76	24,6
		10%	9,9	109,2
		15%	10,41	179
28	CP	5%	9,12	57,8
		10%	9,49	191,9
		15%	10,03	256,7
	CP + FGD	5%	8,73	29
		10%	8,78	133,3
		15%	9,07	198,4

Fonte: Adaptado de Park *et al.* (2015).

Os resultados obtidos por Wu *et al.* (2022) quanto às curvas tensão-deformação do ensaio de compressão simples não confinada apontaram que as deformações no momento de ruptura são menores quando o resíduo FGD é adicionado e que os maiores valores de resistência à compressão não confinada são obtidos quando a razão G/C é de 10% e 15%, para solos com teor de umidade inicial de 50% e 70%, respectivamente. A adição de 1,2% de resíduo no melhoramento de solo com teor de umidade de 50%, juntamente com 12% de clínquer de cimento e 3% de metacaulim fez com que a resistência à compressão não confinada saltasse de 1,25 MPa para

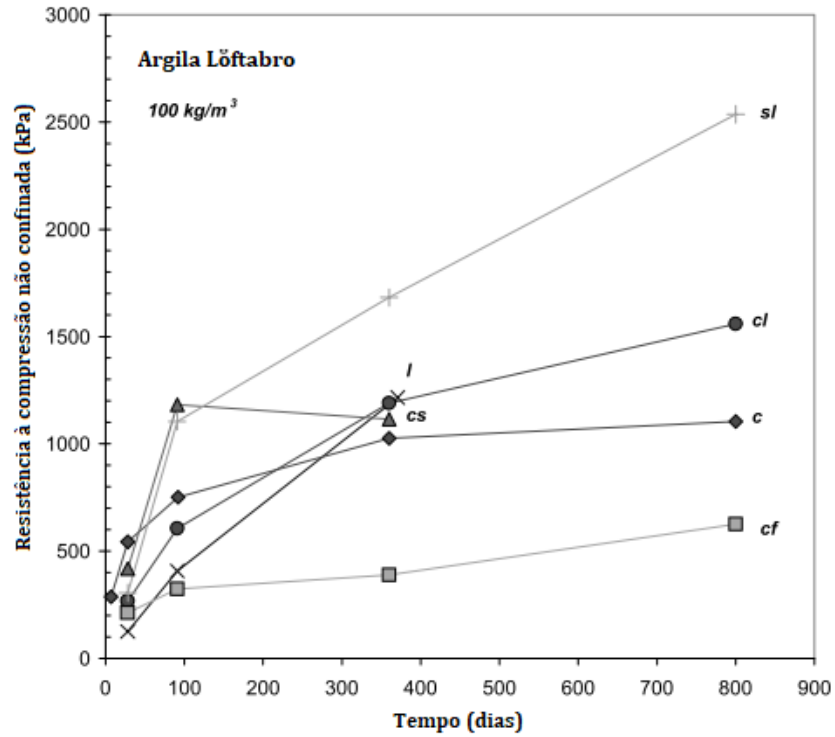
1,74 MPa, aumento de 0,49 MPa, quando comparado ao solo melhorado somente com os mesmos teores de clínquer e metacaulim. Porém quando adicionado teores de resíduo de 1,8% e 2,4% do total da mistura essas resistências de pico apresentaram um decréscimo de 1,73 MPa e 1,64 MPa.

Para teores de umidade mais elevados, como o teor de 70% do solo estudado, a adição do resíduo foi mais eficaz para o aumento da resistência à compressão não confinada das argilas. Quando o teor de 1,8% em relação a mistura total de resíduo foi adicionado, houve um aumento de 0,61 MPa em relação aos solos melhorados com clínquer e metacaulim, somente. Tal fato se deve a maior porosidade nas argilas com maiores teores de umidade, o que pode permitir o crescimento e a expansão volumétrica da etringita (WU *et al.*, 2022).

Para investigar o efeito da incorporação de diferentes ligantes nos solos, Åhnberg e Johansson (2005) realizaram testes de compressão não confinada em amostras com idade de cura de 7, 28, 91 e 364 dias após a mistura (Figuras 14, 15, 16). Os resultados indicaram que nos primeiros meses iniciais, o aumento de resistência se deu mais rapidamente nas amostras estabilizadas com cimento. Após esse período, em geral, essas amostras apresentaram uma taxa de crescimento constante ou reduzida a longo prazo, em contraponto, as amostras contendo cal apresentaram um aumento acentuado a longo prazo. Pode-se perceber uma irregularidade na curva tensão-deformação da argila Löftabro estabilizada com cimento e escória que após um ano apresentou resultados menores que três meses, isso indica o aparecimento de trincas ou amostras não homogêneas.

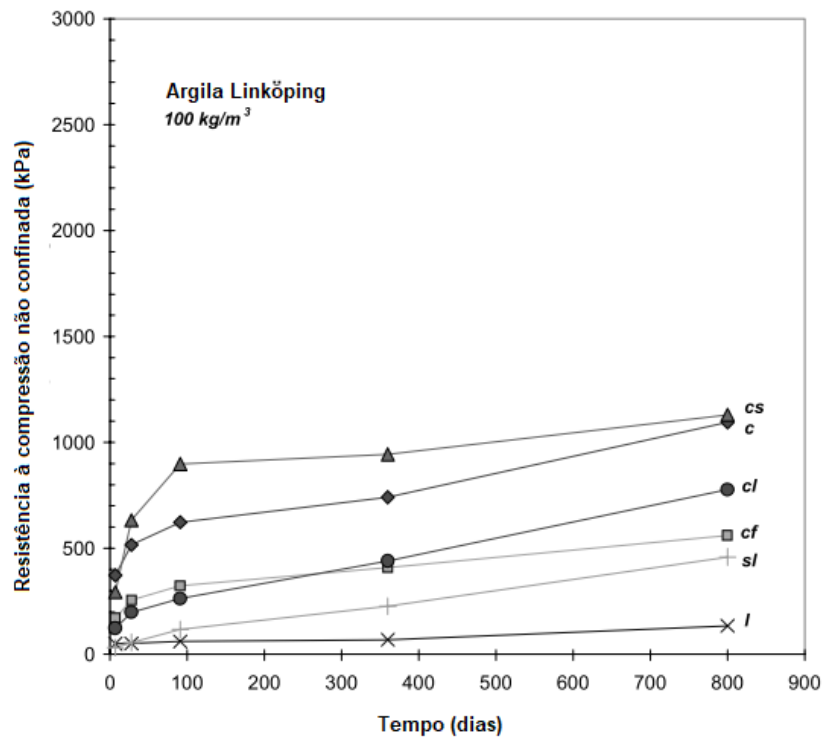
Portanto, pôde-se observar que os ligantes apresentaram resultados satisfatórios na estabilização, sendo a combinação cal-escória a que exibiu maior valor na argila de Löftabro, a cimento-escória na argila de Linköping e cimento-cal na gyttja de Holma. Evidencia-se também que os ligantes atuam de maneira diferentes e que as ligações criadas entre os solos e eles são de tipos, resistências e tempos diferentes para que aconteçam, atribui-se essas diferenças as reações de hidratação e pozolânica. Åhnberg e Johansson (2005) ressaltam que o estudo destaca a importância de se considerar um fator tempo na estimativa de resistência de solos estabilizados.

Figura 14 – Resistência à compressão em função do tempo da Argila de Löftabro estabilizada com diferentes ligantes e composições obtida por Åhnberg e Johansson (2005)



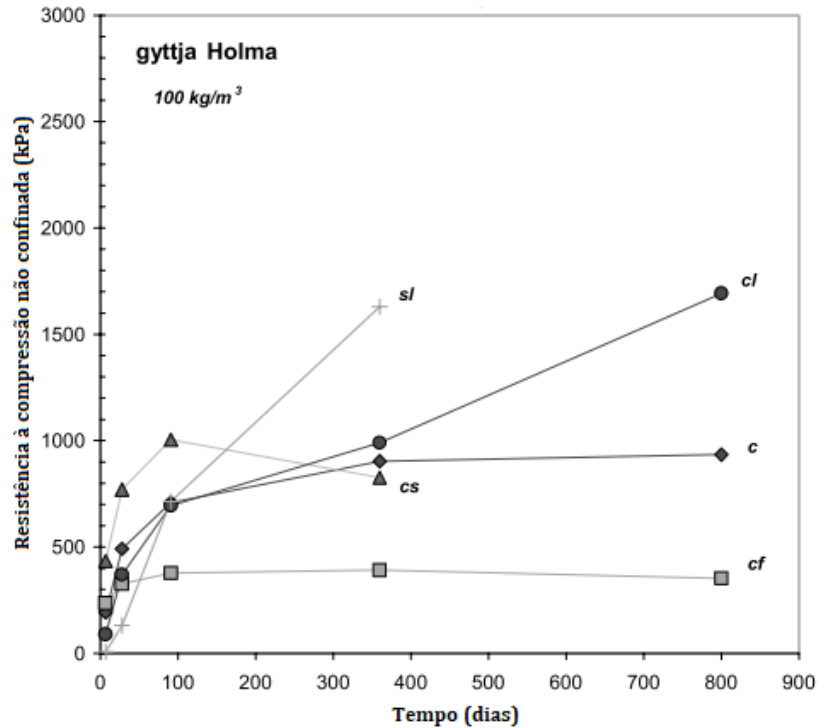
Fonte: Åhnberg e Johansson (2005).

Figura 15 – Resistência à compressão em função do tempo da Argila de Linköping estabilizada com diferentes ligantes e composições obtida por Åhnberg e Johansson (2005)



Fonte: Åhnberg e Johansson (2005).

Figura 16 – Resistência à compressão em função do tempo da Gyttja de Holma estabilizada com diferentes ligantes e composições obtida por Åhnberg e Johansson (2005)

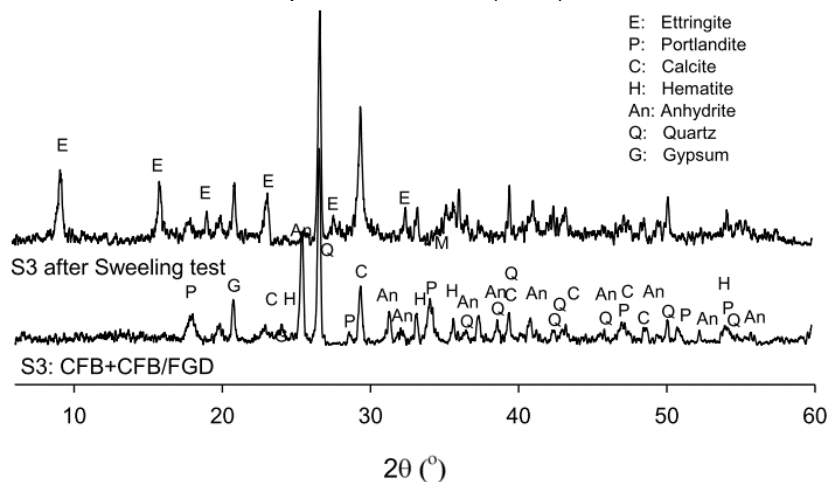


Fonte: Åhnberg e Johansson (2005).

2.4.1.3 Aspectos Microestruturais

Butalia *et al.* (2018) analisaram a microestrutura de solo estabilizado com resíduo FGD proveniente de CFB após ensaio de expansão e observou que aos após 250 dias, o solo apresentava etringita (Figura 17).

Figura 17 - Composição mineralógica da composição solo e resíduo FGD de CFB aos 250 dias obtido por Butalia *et al.* (2018)

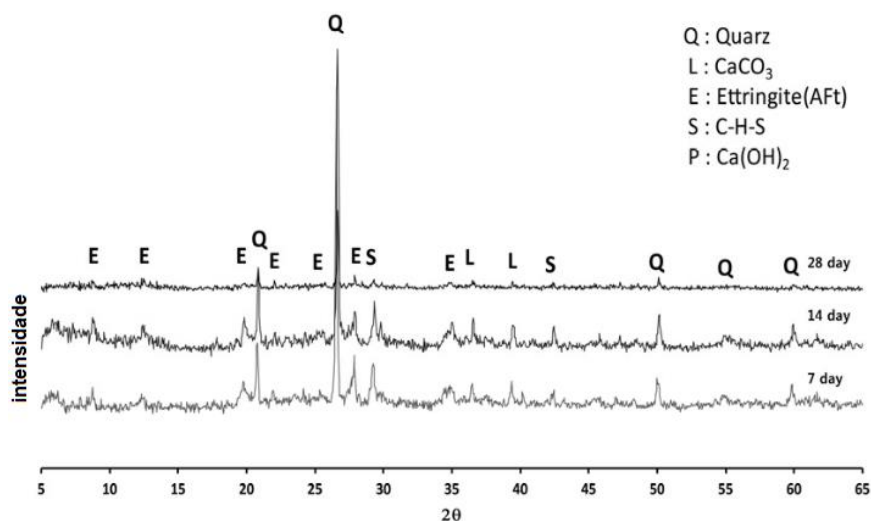


Fonte: Butalia *et al.* (2018).

Por meio dos difratogramas de DRX, Park *et al.* (2015) analisaram a microestrutura dos solos modificados com 15% de adição. Foi observado a formação de C–S–H,

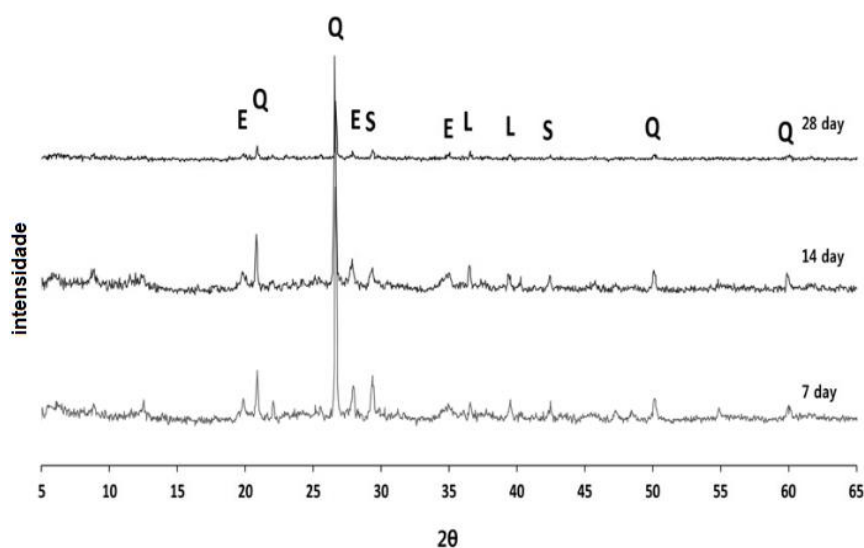
calcita e etringita nos solos modificados com resíduo FGD e cimento Portland (Figura 18 e 19).

Figura 18 – Comparação dos difratogramas de DRX das misturas com teor de 15% de adição de Cimento Portland obtido por Park *et al.* (2015)



Fonte: Adaptado de Park *et al.* (2015).

Figura 19 – Comparação dos difratogramas de DRX das misturas com teor de 15% de adição de Cimento Portland + FGD obtido por Park *et al.* (2015)



Fonte: Adaptado de Park *et al.* (2015).

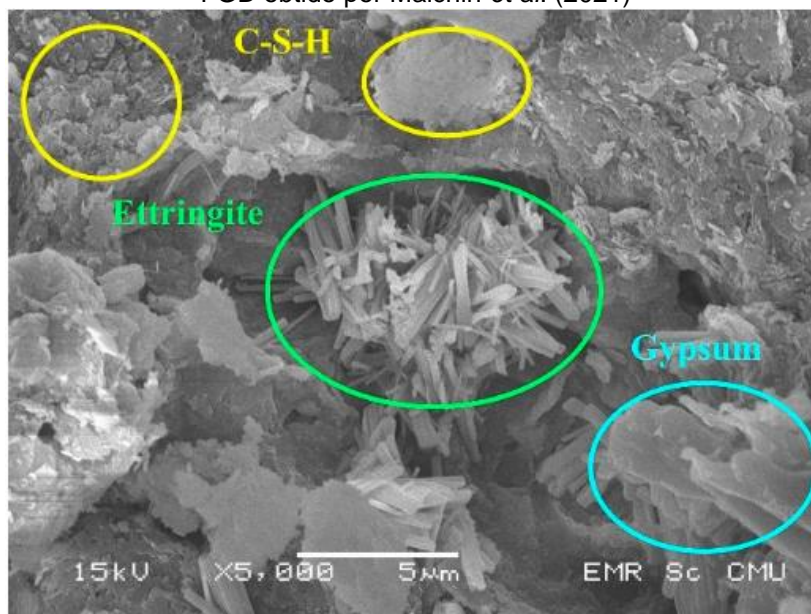
Por meio da análise da porosimetria por incorporação de mercúrio, Wu *et al.* (2022) apresentaram que com a incorporação do resíduo FGD diminuiu o valor acumulado de intrusão quando comparado ao solo melhorado apenas com clínquer de cimento e metacaulim. Além disso, quando plotadas as curvas de distribuição dos diâmetros dos poros foi possível observar que houve uma tendência de movimento do pico da direita para a esquerda, isso é, quanto maior a adição de resíduo mais as curvas tendem a se mover para a esquerda, indicando um menor diâmetro dos poros. Tal fato, pode

ser explicado pelo efeito dominante do resíduo na produção da etringita, ocasionando um preenchimento dos poros de maior dimensão.

Ainda sobre o estudo desenvolvido por Wu *et al.* (2022), foi possível, por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura, encontrar os produtos das reações físico-químicas, que são C-S-H, C-A-H, Ca(OH)₂, Etringita e o CaCO₃, os agentes responsáveis pelas ligações de cimentação. Mas vale ressaltar que o resíduo, por vezes, pode não desempenhar um papel favorável no desempenho mecânico do solo melhorado. Isso se deve à abundância de resíduo no sistema ocasionar, possivelmente, um crescimento excessivo de etringita, gerando uma expansão volumétrica maior que a suportada pelo solo melhorado. Isso porque a expansão volumétrica gera tensões de expansões internas, que corresponde às tensões de tração e caso atinja ou ultrapasse as tensões de tração do solo melhorado podem degradar consideravelmente as amostras.

Assim como o exposto anteriormente, no trabalho de Maichin *et al.* (2021) também se observou os produtos da hidratação do cimento, o C-S-H e a etringita, que confirmaram o ganho de resistência encontrados nas misturas. Além disso, foi possível observar a presença de monossulfoaluminatos em um teor específico de adição. Para determinar os produtos gerados no processo, os autores utilizaram Microscopia Eletrônica de Varredura nos corpos de prova que apresentaram maior resistência à compressão não confinada nos teores de cimento estudado. Quando adicionado 1% de cimento e 1% de resíduo FGD, os produtos encontrados no solo melhorados foram o C-S-H e a Etringita. Já quando utilizado 2% de cimento e 5% de resíduo FGD, combinação que resultou na maior resistência à compressão não confinada dessa pesquisa, encontrou-se o C-S-H, a Etringita e os monossulfoaluminatos. Em contrapartida, quando alterou o teor de cimento e de resíduo FGD para 3%, ambos, não foi observada a formação dos monossulfoaluminatos e resíduo não reagido no sistema (Figura 20).

Figura 20 – Microscopia eletrônica por varredura da composição solo + 3% cimento + 3% resíduo FGD obtido por Maichin *et al.* (2021)



Fonte: Maichin *et al.* (2021).

Segundo os autores, pode ocorrer um excesso de resíduo no sistema e que por se tratar de uma estrutura mais fraca, pode comprometer a resistência. No caso da adição de 3% de cimento e 5% de resíduo FGD, que apresentou uma resistência inferior a adição de 3% de cimento e 3% de resíduo FGD, houve uma quantidade limitada de água ativa para que pudesse garantir a reação de hidratação de cimento por completa junto à dissolução dos íons de sulfato. Os autores concluíram que o teor de água ativa, quando houver um excesso de resíduo no sistema, é um aspecto importante para controlar o ganho de resistência no processo de hidratação do cimento.

No Quadro 2, apresenta-se o resumo dos trabalhos utilizados no referencial teórico deste trabalho e os parâmetros avaliados por eles.

Por fim, vale ressaltar que embora haja diversos estudos utilizando os resíduos industriais para a estabilização de solos, haverá uma divergência óbvia entre os resultados mesmo que tenham sido tratados com o mesmo agente estabilizante e teor, devido às diferentes reatividades destes agentes, às variações decorrentes de aspectos geológicos e geográficos destes e do solo, às técnicas de fabricação e aos produtos obtidos da interação solo-ligante (Wu *et al.*, 2021).

Quadro 2 – Resumo dos trabalhos utilizados no referencial teórico

Trabalho	Solo		Estabilizantes		Parâmetros avaliados					
	Solo de Baixa Consistência?	Consistência	Resíduo FGD	Cimento	Umidade	Peso específico aparente seco	Limites de consistência	Cone/ Palheta	UCS	Análise microestrutural
Park et al. (2015)	Sim	Mole*	X	X	-	X	-	-	X	X
Wu et al. (2022)	Sim	Mole	X	X	X	X	-	-	X	X
Butalia et al. (2018)	Não	Não se aplica	X	X	-	-	-	-	-	X
Maichin et al. (2021)	Não	Não se aplica	X	X	-	-	-	-	-	X
Picoli (2020)	Não	Não se aplica	X	X	-	-	X	-	-	-
Abbey, Ngambi e Coakley (2016)	Sim	Mole a muito mole*	-	X	-	-	X	-	-	-
Bayat, Asgari e Mousivand (2014)	Não	Não se aplica	-	X	-	-	X	-	-	-
Ånhberg e Johansson (2005)	Sim	Muito mole a mole	-	X	-	-	-	-	X	-

*classificados através da relação consistência por meio do índice de consistência.

Fonte: Autora (2022).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Em conformidade com o objetivo, foi avaliada a substituição parcial ou total do cimento Portland pelo resíduo de dessulfuração dos gases de combustão. Os materiais e métodos aplicados para esta avaliação são abordados a seguir:

O solo utilizado nesta pesquisa, classificado como uma argila de baixa plasticidade (SUCS), foi oriundo da cidade litorânea de Guarapari/ES, Brasil (Figura 21).

Figura 21 – Materiais utilizados na pesquisa



Fonte: Autora (2022).

Os estabilizantes utilizados para o melhoramento do solo mole foram Cimento Portland e coprodutos gerados no processo de fabricação do aço, o resíduo FGD e a Escória Granulada de Alto Forno moída (Figura 20). O resíduo FGD foi proveniente da planta de dessulfuração dos gases de combustão da empresa *SunCoke Energy*, localizada no Complexo Tubarão, cidade da Serra/ES, Brasil. O cimento Portland utilizado foi do tipo CP - V de Alta Resistência Inicial, de marca Mizu, devido a esse tipo ser composto de 95 a 100% de clínquer de cimento e gesso e não possuir GAF em sua composição, como o CP III 40 RS, tipo mais utilizado no estado do Espírito

Santo. E por fim, também foi utilizada Escória Granulada de Alto Forno Moída (GAFm) cedida pela Empresa ArcelorMittal Tubarão, localizada na cidade da Serra, Brasil.

A escória granulada de alto forno, ligante hidráulico latente, pode atuar como cimento hidráulico à medida em que sua rede vítrea se dissocia quando atacada por íons de hidroxila. A dissolução da escória é dependente do pH, quando menor que 11,5, a solubilidade da sílica é baixa e a escória não se dissolve. Como resultado desse processo, mais cálcio e magnésio entram na solução formando um revestimento impermeável de aluminossilicato nos grãos da escória dificultando a hidratação adicional da escória. Para contornar essa inibição, ativadores químicos, como hidróxidos e sais alcalinos são necessários para proporcionar a hidratação adicional da escória. Os sais por serem soluções neutras proporcionam um efeito ativador fraco, porém, quando combinados com cal, sofrem uma reação de troca com os íons de Ca^{2+} e OH^- formando soluções que atacam o revestimento de aluminossilicato. A presença de íons de sulfato pode acelerar o processo de dissolução da escória, que aumentará a concentração de Ca^{2+} e Al^{3+} no meio, possibilitando a formação da etringita junto aos íons de sulfato (KONSTA-GDOUTOS; SHAH, 2002). Por sua vez, a GAFm, que já é comercializada e amplamente utilizada na indústria cimentícia, foi utilizada neste trabalho como uma alternativa de compor junto ao resíduo FGD, uma nova composição de agente estabilizador.

Na Tabela 9, as composições de solos modificados estão apresentadas, incluindo a denominação utilizada neste trabalho e os teores de materiais.

Tabela 9 – Composições de solos estabilizados

Composição	Denominação	Materiais			
		Solo	CP V - ARI	Resíduo FGD	GAFm
Solo Puro (solo controle)	SP	100%	-	-	-
Solo Cimento	SC	85%	15%	-	-
Solo cimento FGD	SCF	85%	7,5%	7,5%	-
Solo FGD	SF	85%	15%	-	-
Solo FGD escória	SFE	85%	-	7,5%	7,5%

Fonte: Autora (2022).

Quanto aos métodos, o programa experimental é subdividido em três partes: a caracterização dos materiais, a preparação das composições e moldagem dos corpos

de prova e a caracterização das composições, sendo detalhado nos tópicos 3.1, 3.2 e 3.3.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Quanto as propriedades avaliadas para caracterizar os materiais e as referências normativas utilizadas para tal estão apresentados na Tabela 10. Quanto à análise química e de complexo sortivo, vale ressaltar que esta apresenta as concentrações de macronutrientes como o cálcio (Ca^{2+}), o magnésio (Mg^{2+}), o potássio (K^+), o sódio (Na^+), enxofre e fósforo e os micronutrientes como o alumínio (Al^{3+}), o ferro (Fe^{2+}), o manganês (Mn^{2+}), Zinco (Zn^{2+}) e o cobre (Cu^{2+}). A análise do complexo sortivo compreende na determinação do conjunto de partículas capazes de trocar íons no solo, sendo possível determinar a Capacidade de Troca Catiônica, Soma de Bases e Saturação de Bases, importantes para entender o mecanismo de troca catiônica.

Tabela 10 – Propriedades e referências normativas utilizadas na caracterização dos materiais

Propriedade	Referência Normativa	Observações
Análise Granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 2016)	A análise granulométrica do CP V-ARI foi realizada por meio de difração à laser pelo equipamento Mastersizer 2000 da Malvern Panalytical.
Massa Específica real dos Grãos	NBR 6458 (ABNT, 2016)	-
Limite de Liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016)	-
Limite de Plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016)	-
Teor de Matéria Orgânica		-
pH	Manual de métodos de análise de solo da Embrapa (TEIXEIRA <i>et al.</i> , 2017)	-
Análise Química e de Complexo Sortivo		-
Difração de Raios X		O ensaio de DRX foi realizado em equipamento de marca Rigaku e modelo Última IV, com alvo de molibdênio (Mo).

Fonte: Autora (2022).

3.2 PREPARAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Os procedimentos utilizados nesta dissertação para preparação dos corpos de prova foram baseados nos procedimentos apresentados por EuroSoilStab (2001), Axelsson, Johansson e Andersson (2002), Lorenzo e Bergado (2004), Correia, Venda Oliveira e Lemos (2008), Lorenzo e Bergado (2006), Correia (2011), Marzano *et al.* (2012), Kitazume *et al.* (2015), Al-Jabban *et al.* (2020) e Wu *et al.* (2022).

A preparação das amostras e corpos de prova ocorreram em cinco etapas: preparação do solo, mistura, compactação, cura e extrusão, que serão pormenorizadas a seguir e estão ilustradas no Quadro 2.

Para a produção de um solo de baixa consistência, os torrões de argila foram submetidos à secagem em estufa à temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$ e, posteriormente, à moagem em moinho de bolas com uma massa de esferas de 50 kg durante 12000 rotações. Após o processo descrito, o solo foi submetido à peneiramento em peneira com abertura de 2,0 mm.

Para que se produzisse um solo de consistência muito mole, foi adicionado um teor de água de 47,3% em relação a massa de solo seca, correspondente a 1,1 vez o limite de liquidez. A correspondência de 1,1 vez o LL também foi utilizada por Wu *et al.* (2022). A partir da mistura solo e água, a resistência ao cisalhamento não drenada medida foi de 3 kPa, por meio de ensaio de cone de queda livre.

No que diz respeito às composições de solos melhorados, devido à dificuldade no processo de homogeneização dos agentes estabilizantes, além do teor de água utilizado para produzir o solo, um teor de 47,3% de água foi adicionado em relação a massa de estabilizante. Para a realização dos ensaios de caracterização foi utilizada água destilada, conforme procedimentos descritos em normas, enquanto para a moldagem dos corpos de prova foi utilizada água da torneira.

O teor de ligante adicionado foi de 15% total de adição sobre a massa de solo, aproximadamente 180 kg/m^3 , conforme valores apresentados por Axelsson, Johansson e Andersson (2002), Horpibulsuk, Lorenzo e Bergado (2004), Lorenzo e Bergado (2006) e Correia (2011). As composições estão indicadas na Tabela 9.

No preparo da amostra controle, os materiais secos foram homogeneizados (Quadro 2b) e água foi adicionada (Quadro 2c). Inicialmente, a mistura ocorreu manualmente durante 5 minutos para que a água fosse incorporada (Quadro 2d), prosseguindo com homogeneização mecânica (Quadro 2e), com auxílio de um misturador elétrico, marca *Cortag* e modelo HM-180 Duo, durante 3 minutos, conforme realizado por Correia (2011), e de tal forma que a mistura estivesse, visivelmente, homogênea. Diferenciando-se do procedimento descrito, nas amostras de solo estabilizados, a homogeneização mecânica ocorreu por 3 minutos, com parada após decorrido 1,5 minutos para que se desprendesse o material fixado às paredes dos aparatos.

Os moldes dos corpos de prova eram circulares e feitos de PVC com ϕ 47 mm de diâmetro e 100 mm de altura (Quadro 2g). Na borda inferior, um geotêxtil de espessura média limitava o fundo, fixado com elásticos, juntamente a um papel filtro. Nas paredes internas dos corpos de prova foi aplicado vaselina para facilitar o desmolde.

O procedimento de compactação consistiu em transferir a mistura ao corpo de prova (Quadro 2h) em 4 camadas iguais e submetê-lo a 50 golpes contra a bancadas (Quadro 2i), técnica denominada “*tapping*”, utilizada por Kitazume *et al.* (2015) e Marzano *et al.* (2012). Al-Jabban *et al.* (2020) explicam que a técnica “*tapping*” é mais aplicável em caso em que o solo apresenta resistência ao cisalhamento menor que 10 kPa. EuroSoilStab (2001) e Correia, Venda Oliveira e Lemos (2008) indicam que a duração da moldagem dos corpos de prova não pode exceder 30 minutos. Porém, com a quantidade de amostras moldadas, o período entre o término da mistura e o término da preparação dos corpos de prova durou, aproximadamente, 1 hora.

Após a compactação do material, os corpos de prova foram rasados e na face superior, papel filtro e geotêxtil foram adicionados no diâmetro interno sem que ficassem apoiados na borda. Por fim, foi adicionado uma luva, confeccionada por PVC, para que pudesse estabilizar a carga vertical a ser aplicada (Quadro 2j).

No que diz respeito à cura, os corpos de prova foram armazenados em um tanque com água (Quadro 2k), onde ficaram submerso até as idades de cura, conforme apresentado por Correia (2011) e Nascimento (2016). Além disso, os corpos de prova foram submetidos à uma sobrecarga vertical de 2 kPa, para que fosse exercida uma pressão de adensamento e para que não houvesse nenhum tipo de suspensão do

material em água. A sobrecarga foi constituída por corpos de prova de argamassa, dimensionadas em tamanho específico para que apresentasse a tensão de $2 \pm 0,5$ kPa. Alguns autores esclarecem que essa sobrecarga pode resultar numa melhor resistência, mas tanto em laboratório quanto em obra, aplicada por meio de camada de aterro, uma sobrecarga deve ser adotada (CORREIA, 2011; CORREIA, VENDA OLIVEIRA, LEMOS, 2008).

Por fim, após sujeitos as idades pré-estabelecidas, os corpos de prova foram submetidos ao desmolde. As amostras foram extraídas com auxílio de ar comprimido (Quadro 2I). Para isso, na base inferior dos corpos de prova, foi soldado CAP de PVC de diâmetro de 50 mm, com um furo no meio onde o ar seria aplicado.

Quadro 3 – Procedimentos de moldagem dos corpos de prova ilustrados

(continua)



e) homogeneização mecânica



f) solo após processo de homogeneização



g) corpo de prova de PVC



h) preenchimento do corpo de prova



i) compactação por meio de *tapping*



j) corpo de prova com aplicação da sobrecarga





Fonte: Autora (2022).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES

3.3.1 Análise microestrutural

Assim como abordado no tópico 3.1.7, o ensaio de DRX foi realizado conforme as especificações do equipamento de marca Rigaku e modelo Última IV, com tubo/ânodo de molibdênio (Mo), em um intervalo angular de 4° a 40°, largura de passo 0.02°, sobre as amostras de SC, SCF, SF e SFE com idades de 8 e 90 dias. A preparação das amostras consistiu, após cessado o tempo de cura, na retirada do tanque para que fossem submetidas a secagem em estufa a $60 \pm 5^\circ\text{C}$ e moagem em um almofariz até que obtivesse dimensões de 0,053 mm.

O objetivo da realização desse ensaio era identificar, qualitativamente, os cristais presentes que pudessem elucidar as discussões sobre o comportamento mecânico dos solos modificados.

É importante ressaltar que para a determinação dos picos de alita e belita no cimento Portland foram utilizadas as informações da estrutura cristalina presente na *Crystallography Open Database*, ao código de identificação 1538413 e 2310675, respectivamente.

3.3.2 Análise dos aspectos físicos

Os aspectos físicos avaliados foram umidade, massa específica aparente seca, limite de liquidez e plasticidade nas composições em diferentes idades até aos 90 dias.

O objetivo de se medir o teor de umidade das composições era entender o consumo de água pelas reações ocorridas entre o solo e os estabilizantes adicionados, enquanto o objetivo de se determinar a massa específica aparente seca era a verificação do comportamento do solo modificado, isso porque solos estabilizados quimicamente apresentam uma densificação da matriz e redução do teor de umidade, apresentando maior peso específico.

Já o objetivo de determinar os limites de liquidez e plasticidade era compreender a influência das adições à mistura e no decorrer do tempo. Abbey, Ngambi e Coakley (2016) argumentam que é mais apropriado descrever solos estabilizados de acordo com o índice de plasticidade dos solos e, a níveis de resistência, espera-se que o IP diminua com o aumento do teor de estabilizante. Além disso, sabe-se que alguns aditivos, como os ricos em cálcio, tendem a aumentar o limite de plasticidade do solo, tornando-o mais trabalhável (Bell, 1988). Deve-se evidenciar que a determinação dos limites de liquidez e plasticidade nas composições foram realizados sem secagem prévia.

3.3.3 Análise dos aspectos mecânicos

A resistência ao cisalhamento não drenada foi determinada por meio do ensaio de palheta realizado em laboratório, conhecido como *Miniature Vane Shear Test*, normatizado pela D4648 (ASTM, 2016) e por meio do ensaio de cone de queda livre de laboratório, conhecido como *fall cone test*, normatizado pela ISO TS 17892-6 (ISO, 2017). O objetivo dos ensaios era entender a influência das adições no melhoramento da resistência do solo estabilizado.

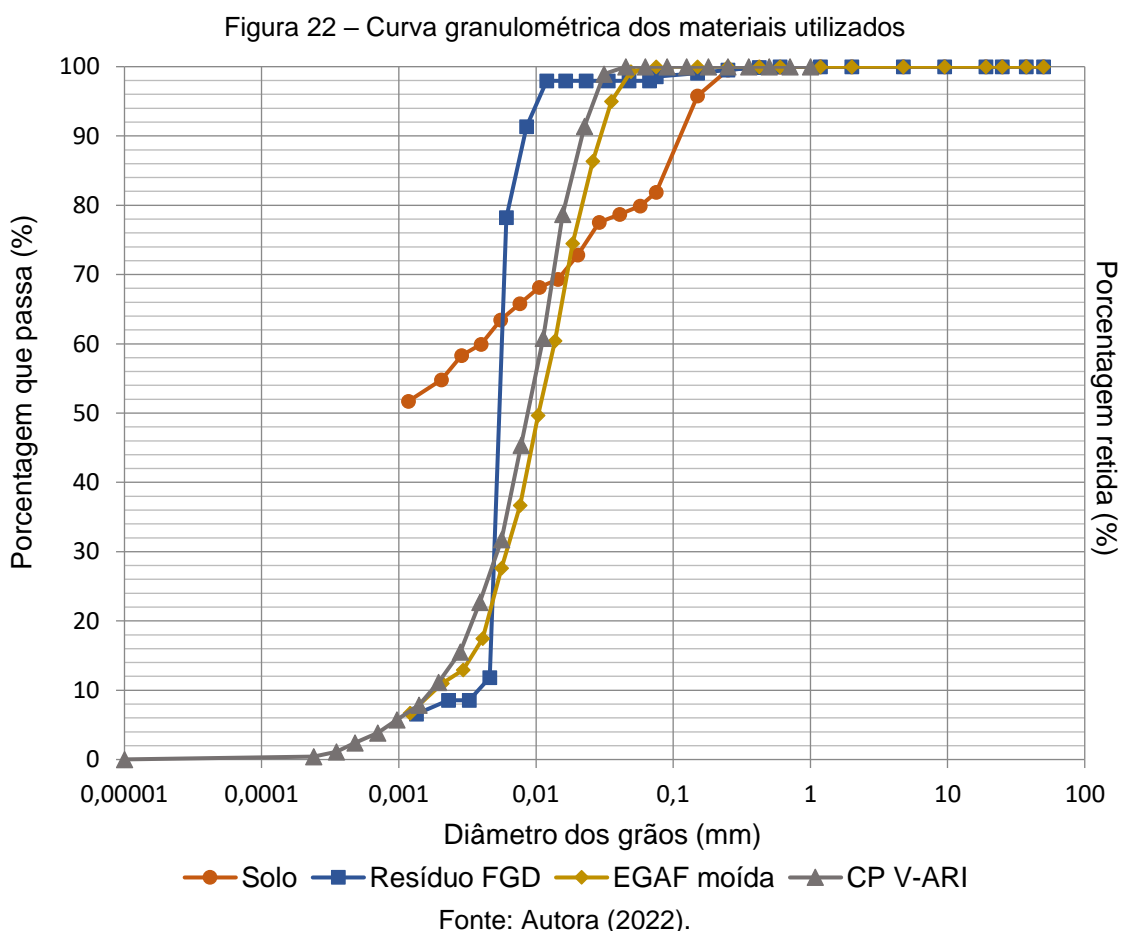
O ensaio de compressão simples (UCS) foi realizado conforme os procedimentos descritos na NBR 12770 (ABNT, 1992). A velocidade de carregamento estabelecida foi de 1 mm/minuto, conforme sugerido em norma e, também, apresentado por Correia (2011). Vale ressaltar que, embora haja limitações da replicação em campo da

resistência à compressão não confinada obtida em laboratório, esse ensaio é amplamente utilizado para descrever solos estabilizados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

As curvas granulométricas do solo, do resíduo FGD, da escória granulada de alto forno e do cimento CP V - ARI estão apresentadas na Figura 22. Na Tabela 11, é apresentada a análise granulométrica em função dos diâmetros correspondentes aos diâmetros de areia, silte e argila.



Quanto ao resíduo FGD, constituído majoritariamente por grãos com dimensão variando de 0,002 mm e 0,075 mm, pode-se afirmar que a composição granulométrica está de acordo com os valores encontrados na literatura e corrobora com os valores encontrados por Teixeira (2019) e Picoli (2020) que estudaram o resíduo gerado na mesma planta FGD.

Na Figura 23 estão apresentados os resultados de massa específica dos materiais e das composições. O solo apresentou massa específica real dos grãos igual a 2,56

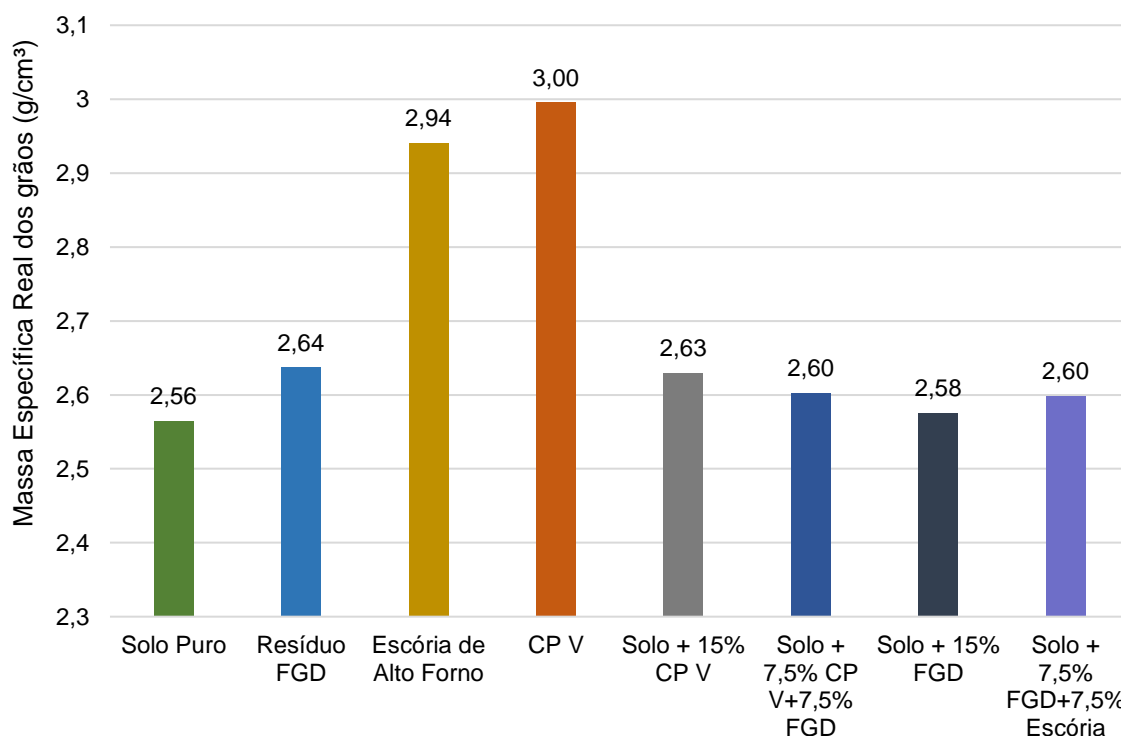
g/cm³, que se mostrou de acordo com os valores característicos dos solos. Quanto ao resíduo FGD, o valor apresentado de massa específica foi de 2,64 g/cm³, estando entre os valores reportados por Teixeira (2018) e Picoli (2022), de 2,26 g/cm³ e 2,79 g/cm³, que estudaram o resíduo advindo da mesma geradora. A escória de alto forno moída apresentou valor igual a 2,94 g/cm³, condizente com valor encontrado por Konsta-Gdoutos e Shah (2003). No que diz respeito ao cimento, a massa específica foi igual a 3,00 g/cm³.

Tabela 11 – Análise granulométrica em função das frações de solo

Material	% de partículas retidas		
	Areia > 0,06 mm	Silte 0,002 – 0,06 mm	Argila < 0,002 mm
Solo	18,1	27,1	54,8
Resíduo FGD	1,45	90,01	8,55
GAFm	-	89	11
CP V - ARI	-	88,9	11,1

Fonte: Autora.

Figura 23 – Massa específica real dos grãos dos materiais utilizados



Fonte: Autora (2022).

Quanto aos limites de consistência, o solo apresentou 43% e 21% de limite de liquidez e plasticidade, respectivamente, e 22% de índice de plasticidade. O solo de acordo

com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) é classificado como uma argila de baixa plasticidade, CL.

A análise química e a análise do Complexo Sortivo dos materiais estão descritas na Tabela 12 e são discutidas conforme Ronquim (2010). Na amostra de solo, é possível perceber que se trata de uma argila rica em sódio (Na^+) e apresenta um valor de CTC efetiva superior ao valor da soma de bases e inferior ao valor da CTC total, o que indica presença de Al^{3+} e H^+ retidos na superfície dos coloides na composição da acidez potencial. O teor alto de H^+ indica um solo com comportamento ácido, corroborando com o resultado encontrado na avaliação do potencial hidrogeniônico que será apresentado posteriormente.

Nas amostras de estabilizantes, é possível perceber que a saturação de cálcio na CTC constitui 99% da saturação de bases do resíduo FGD e em torno de 89% na saturação de bases do CP V - ARI e GAFm. A soma de bases nesses produtos apresenta valores iguais a CTC efetiva e CTC total, indicando a ausência da contribuição de Al^{3+} e H^+ na acidez potencial e devido a isso, apresentam um pH básico.

Tabela 12 – Análise química e de complexo sortivo dos materiais

Parâmetro Analisado	Unidade	(continua)			
		Solo	Resíduo FGD	CP V – ARI	GAFm
Fósforo Mehlich	mg/dm ³	12	2	1	1
Potássio (K)	mg/dm ³	160	150	2.280	130
Enxofre (S)	mg/dm ³	326	522	747	39
Cálcio (Ca)	cmol _d /dm ³	5,6	71,9	44,3	4,4
Magnésio (Mg)	cmol _d /dm ³	4,9	0,1	0,1	0,2
Alumínio (Al)	cmol _d /dm ³	0,7	0	0	0
H+Al	cmol _d /dm ³	5,5	0	0	0
Ferro (Fe)	mg/dm ³	470	5	5	5
Zinco (Zn)	mg/dm ³	10	0,1	0,1	0,1
Cobre (Cu)	mg/dm ³	0,5	0,1	0,1	0,1
Manganês (Mn)	mg/dm ³	50	1	1	11
Boro (B)	mg/dm ³	1,28	0,04	0,04	0,16
Sódio (Na)	mg/dm ³	3.430,00	120	870	91
Relação Ca/Mg	-	1,1	719	443	22
Relação Ca/K	-	13,7	186,9	7,6	13,2
Relação Mg/K	-	11,9	0,3	0	0,6
Sat. Ca na CTC (T)	%	34,1	99,3	88,2	89,2

Tabela 12 – Análise química e de complexo sortivo dos materiais

(conclusão)

Parâmetro Analisado	Unidade	Solo	Resíduo FGD	CP V – ARI	GAFm
Sat. Mg na CTC (T)	%	29,9	0,1	0,2	4,1
Sat. K na CTC (T)	%	2,5	0,5	11,6	6,8
Índice saturação Na	%	87,2	0,7	7,5	8
Soma de Bases (SB)	cmol/dm ³	25,8	72,9	54	5,3
CTC efetiva (t)	cmol/dm ³	26,5	72,9	54	5,3
CTC a pH 7,0 (T)	cmol/dm ³	31,3	72,9	54	5,3
Sat. Alumínio (m)	%	6	0	0	0
Saturação de bases	%	82,4	100	100	100

Fonte: Autora (2022).

O pH apresentado pelo solo foi 4,8, indicando um solo ácido, característica de argilas a serem estabilizadas. Segundo Sobral *et al.* (2015), pH entre 4 e 5, indica a presença de alumínio trocável no solo. Os estabilizantes, resíduo FGD, CP V - ARI e GAFm apresentaram 12,2, 12,6 e 10,7 de pH, respectivamente, indicando materiais básicos que podem elevar o pH do meio favorecendo o ganho de resistência no processo de estabilização.

Por meio do ensaio prescrito no Manual de métodos de análise de solo da Embrapa, o teor de matéria orgânica do solo foi de 11,5% (Figura 24).

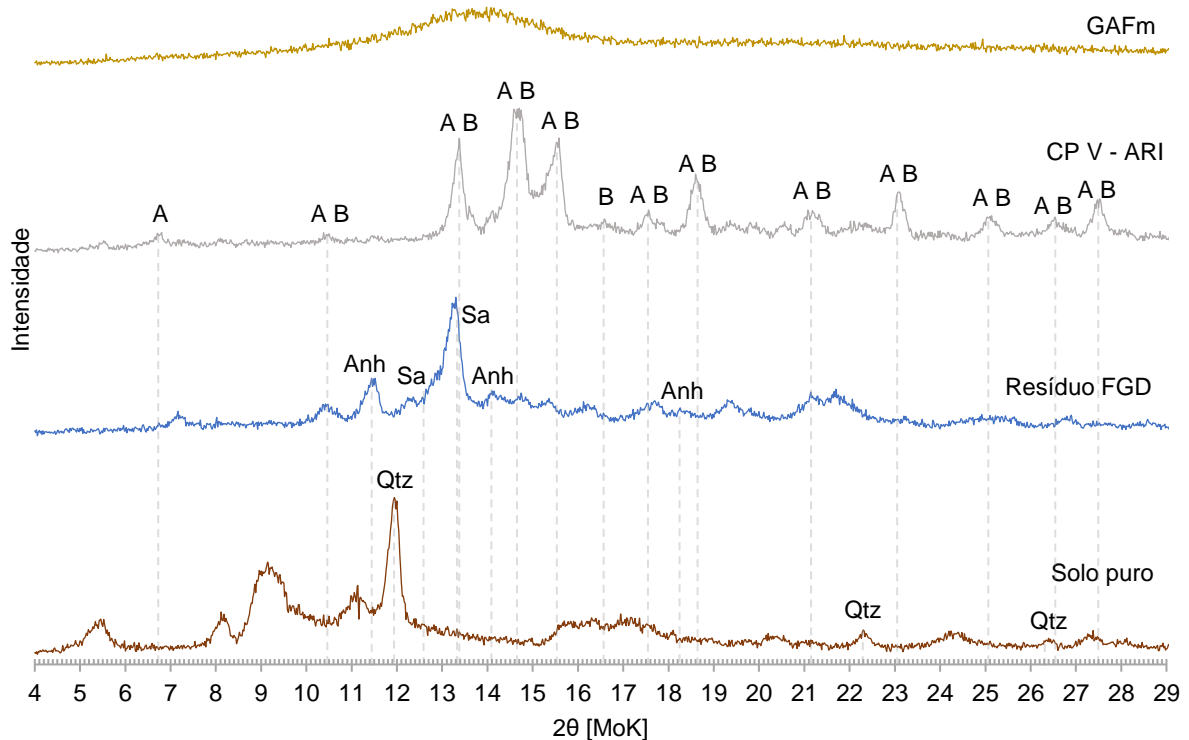
Figura 24– Amostra de solo após calcinação em mufla



Fonte: Autora (2022).

Quanto à mineralogia, os difratogramas dos materiais utilizados estão apresentados na Figura 25. Kaduk *et al.* (2021) afirma que o motivo mais comuns de erros em análises por difração em pó é a orientação preferencial, porque pode conduzir a orientação de cristais não aleatórias que por sua vez levam a intensidade de pico imprecisas. Essas imprecisões podem ocasionar em desafios na identificação de fase e dificuldades na extração de informações para análise estrutural. Dessa forma, devido às dificuldades encontradas na análise dos argilominerais, esta dissertação limita-se a descrever a composição mineralógica da argila estudada como um conjunto de argilominerais, composta, sobretudo, por minerais de quartzo. O resíduo FGD apresenta anidrita – Anh – (CaSO_4) e sulfatos alcalinos – Sa – como *Goergeyite* [$\text{K}_2\text{Ca}_5(\text{SO}_4)_6(\text{H}_2\text{O})$], *Syngenite* [$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})$] e *Langbeinite* [$\text{Ca}_2\text{K}_2(\text{SO}_4)_3$]. Já no cimento Portland foram observados silicato tricálcico (alita) – A – ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) e silicato dicálcico (belita) – B – ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$). Por fim, o difratograma da GAFm confirma a natureza amorfa decorrente do rápido resfriamento do material.

Figura 25 – Difratograma dos materiais utilizados



Fonte: Autora (2022).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS

4.2.1 Análise microestrutural das composições de solo

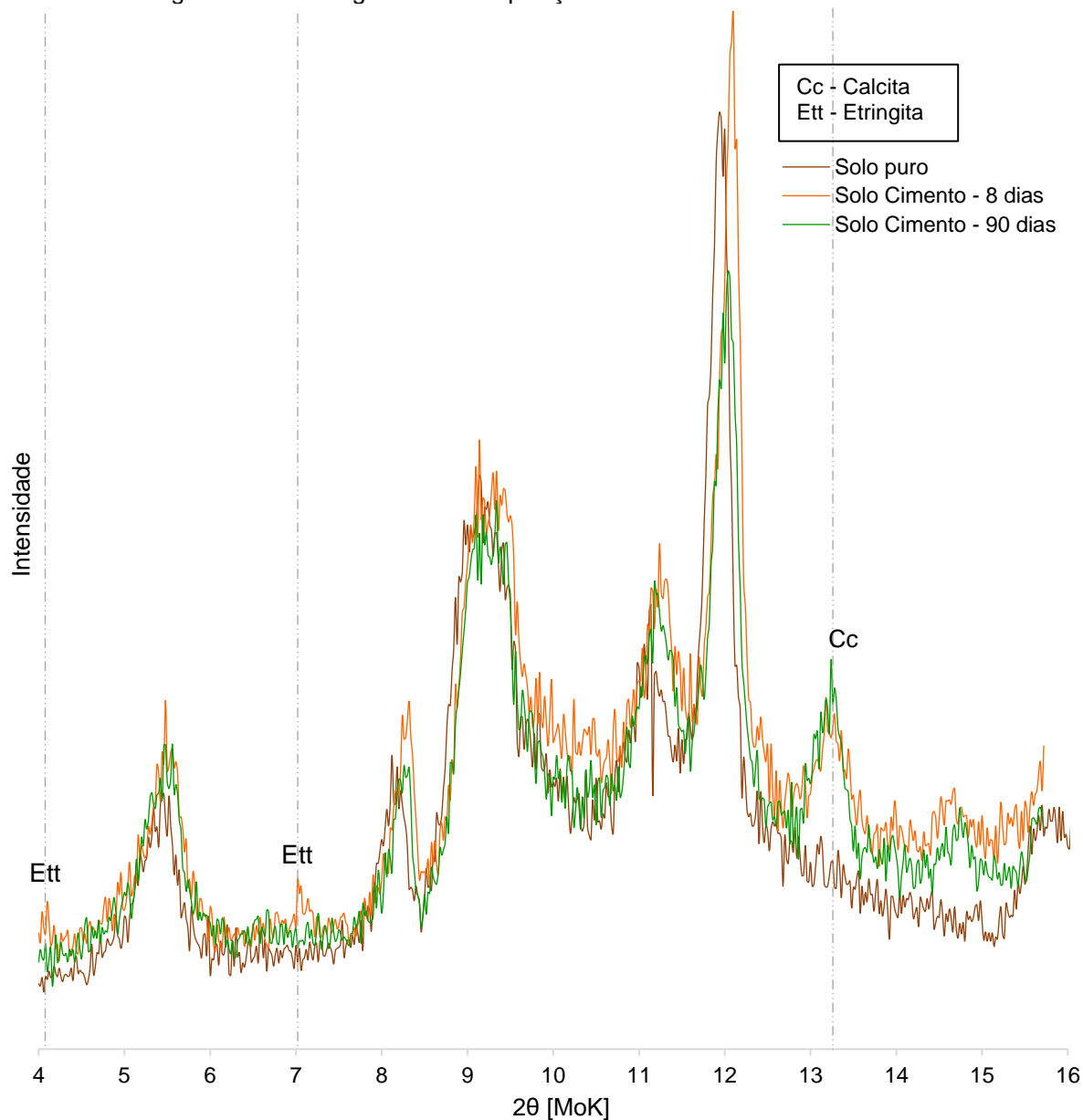
Os difratogramas das composições são apresentados e os principais produtos foram indicados nas Figuras 26 a 29. Os difratogramas completos das misturas de solo contendo Cimento Portland, resíduo FGD e Escória Granulada de Alto Forno Moída, aos 8 e 90 dias, são apresentados juntamente aos difratogramas dos materiais que as compõe no Anexo 1.

Com relação às misturas de solo contendo cimento Portland, pôde-se observar, conforme Figura 26, a produção de etringita aos 8 dias de idade, como produto da hidratação do solo-cimento. Entretanto, não foi observada a presença de etringita aos 90 dias, indicando uma possível desestabilização ao longo do tempo para formar fases AFm, conforme acontece em matrizes cimentícias (WRIGHT; KHATIB, 2016). Nota-se também que não foi possível observar a presença de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) nas composições, independentemente da idade, podendo ser devido a sua natureza pouco cristalina, segundo Mehta & Monteiro (2014). Outro produto observado no difratograma foi calcita, proveniente de reações de carbonatação entre a Portlandita, precipitada na hidratação do cimento Portland, e o CO₂.

Conforme reportado por Park *et al.* (2015) já se esperava observar etringita e calcita, mesmo para o caso de empregar-se baixo teor de cimento, apenas 15%. Embora os autores tenham observado a presença de C-S-H, não se esperava observá-lo devido à característica pouco cristalina do produto. Além disso, os autores observaram que a intensidade dos picos de etringita das composições estudadas foram diminuindo ao longo do tempo, quando analisado aos 7, 14 e 28 dias, da mesma forma como pôde-se constatar neste trabalho pelos difratogramas apresentados.

Nas composições de solo contendo cimento e resíduo FGD, nas proporções de 85%, 7,5% e 7,5% em relação a massa seca (Figura 27), foi possível observar a formação de etringita, aos 8 dias, e calcita aos 8 e 90 dias. Todavia, assim como nas misturas contendo apenas solo e cimento, na composição em questão não foi observada a presença de etringita aos 90 dias, apontando, também, uma possível desestabilização do mineral ao longo do tempo.

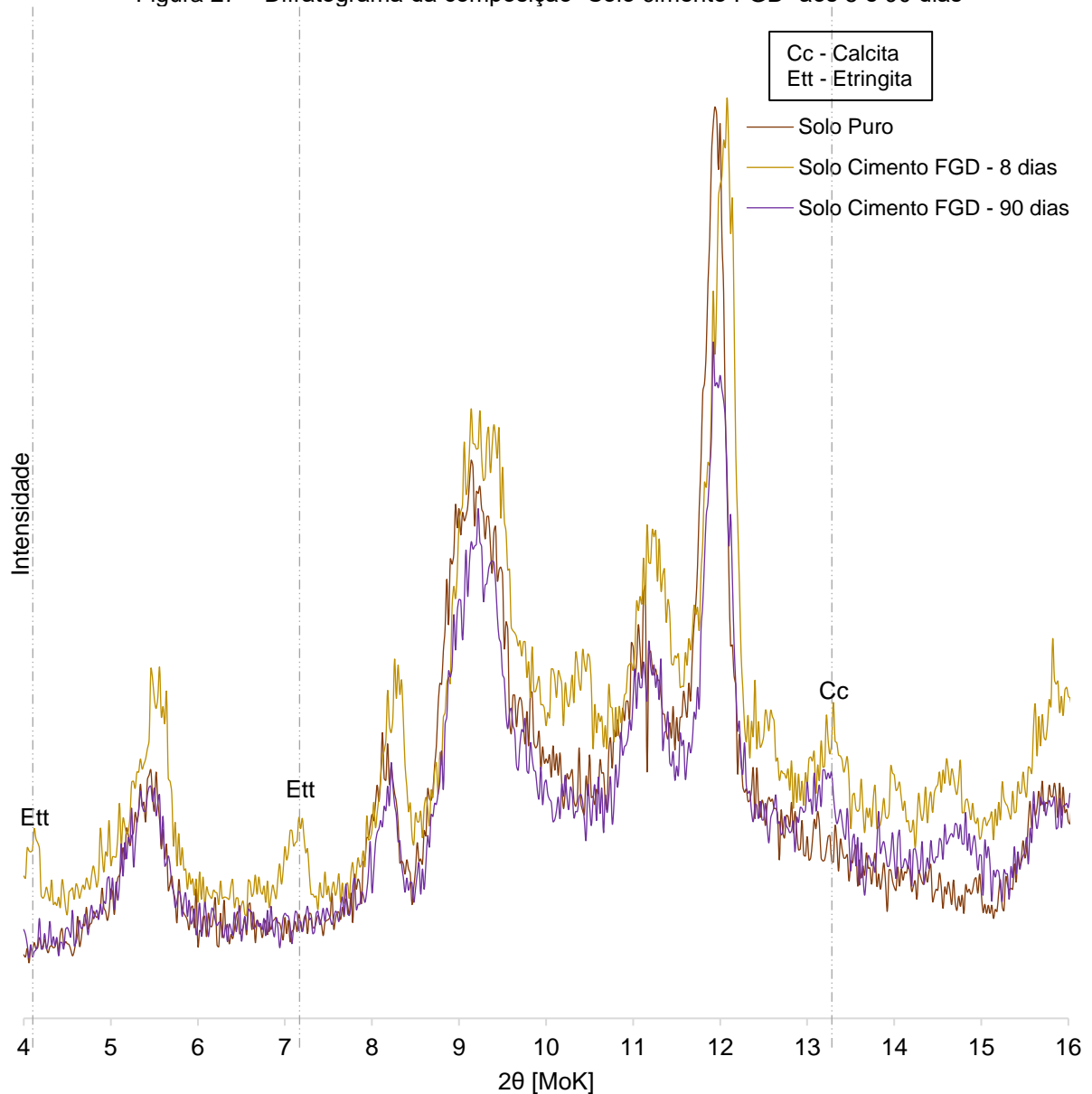
Figura 26 – Difratoograma da composição “Solo Cimento” aos 8 e 90 dias



Fonte: Autora (2022).

A presença de etringita nos difratogramas das composições de solo contendo cimento Portland e resíduo FGD, aos 8 dias, está de acordo com os resultados encontrado por Park *et al.* (2015), Maichin *et al.* (2021) e Wu *et al.* (2022). Para as idades avançadas (90 dias), a não observância da etringita está de acordo com os resultados encontrados por Park *et al.* (2015), em que os autores reportaram uma diminuição na intensidade dos picos do mineral. Quanto à calcita, o mineral, também observado por Park *et al.* (2015), apresentou pico no difratograma menos intenso que na composição SC, indicando que essas reações podem ocorrer em diferentes magnitudes, porém, é necessária análise quantitativa para afirmar a hipótese.

Figura 27 – Difratoograma da composição “Solo cimento FGD” aos 8 e 90 dias

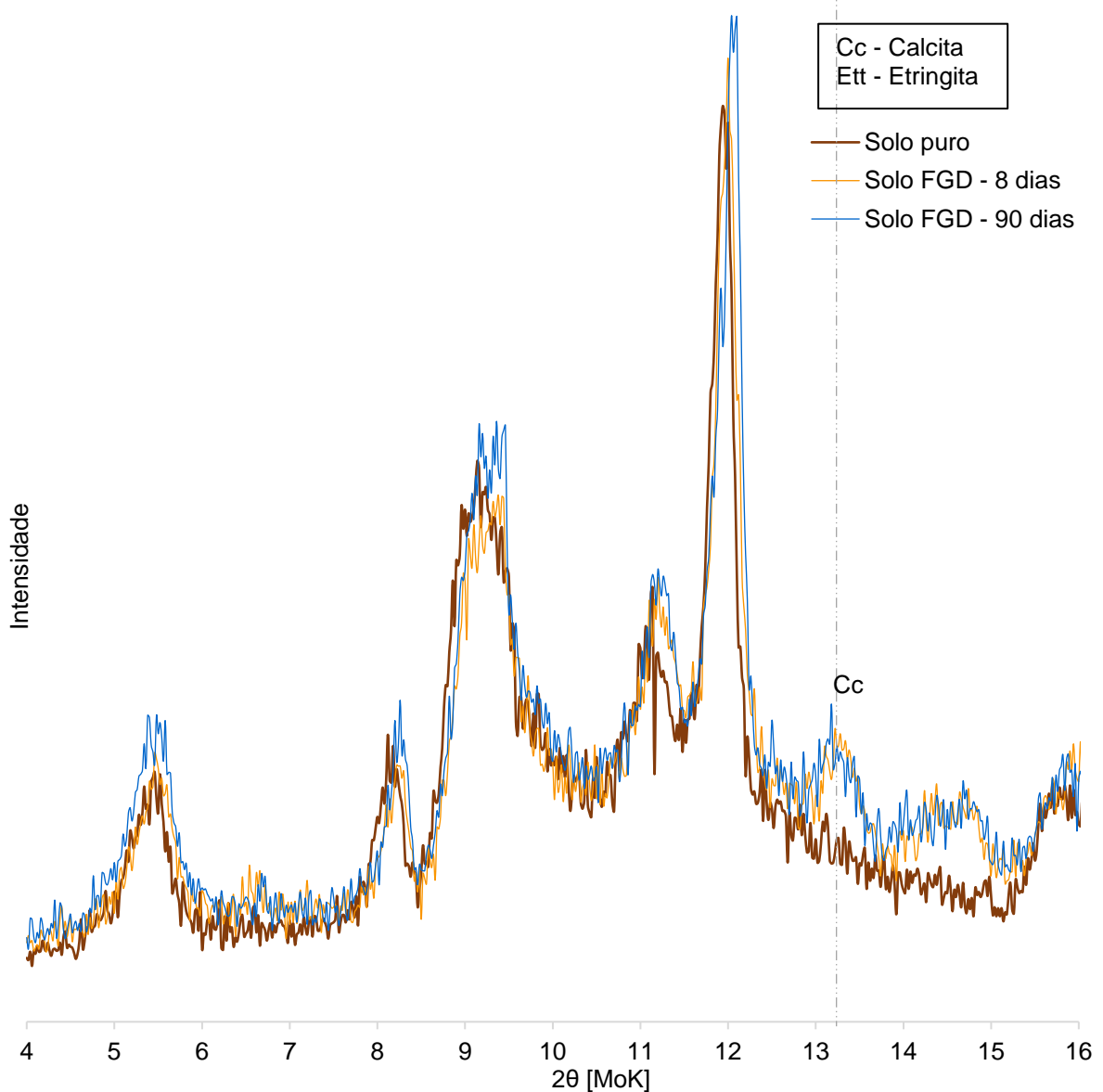


Fonte: Autora (2022).

Por mais que o C-S-H seja o principal produto da hidratação do cimento Portland e que, inicialmente, fosse esperado encontrar esse produto nas composições de cimento com solo, é importante ressaltar que é de grande complexidade encontrar com precisão o C-S-H nos solos modificados com o aditivo. Além disso, tal fato deve-se a complexidade da composição mineralógica da argila, a característica pouco cristalina do C-S-H e ao baixo teor de cimento da mistura, quando comparado aos teores utilizado em matrizes cimentícias, o que torna complexo o processo de identificação desta fase. A não observação do C-S-H está em conformidade com trabalhos apresentados por Sadique *et al.* (2012), Vakili *et al.* (2016), Jafer *et al.* (2018b), visto que a natureza amorfa desse mineral o torna não identificável por DRX.

Nas composições de solo contendo resíduo FGD, na proporção de 85% e 15%, percentuais em massa seca (Figura 28), foi possível identificar a presença de calcita. Embora não houvesse cimento na composição de solo estabilizado que pudesse fornecer hidróxido de cálcio e não ter sido identificada portlandita no resíduo FGD, supôs-se que houvesse hidróxido de cálcio não cristalino ou até mesmo óxido de cálcio que veio a ser hidratado no resíduo e, a partir disso, foram capazes de promover reações de carbonatação. É importante ressaltar que a observação da calcita nessa composição se dá em menor intensidade que nas composições SC e SCF.

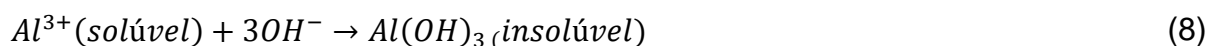
Figura 28 – Difratograma da composição “Solo FGD” aos 8 e 90 dias



Fonte: Autora (2022).

A partir da adição de resíduo FGD no solo, devido à composição do mineral, era esperada a observação de etringita, porém, o mineral não foi observado. Tal fato, apresenta discordância com os resultados obtidos por Butalia *et al.* (2018). Os autores identificaram a presença de etringita após a incorporação do resíduo proveniente de uma planta FGD de uma Caldeira de Leito Fluidizado Circulante (CFB) produzido na China.

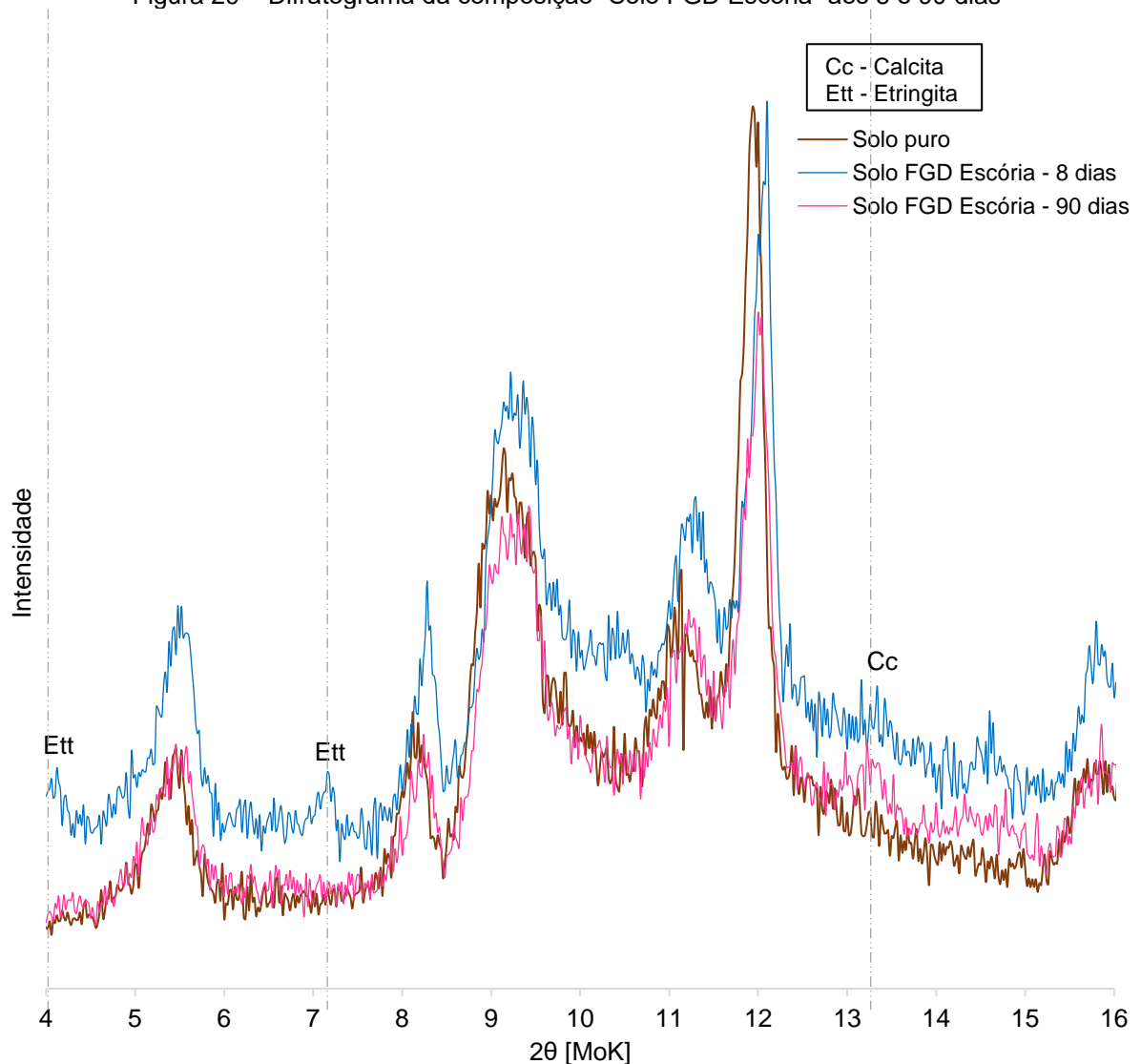
Pode-se afirmar que a não observação da etringita pode ser devido a sua desestabilização, sendo a temperatura em que as amostras foram submetidas a secagem um dos fatores de influência, ou a não formação do mineral. Isso porque, nessa composição, parte do coproduto foi dissolvido fornecendo íons de OH^- , que neutralizaram os cátions de Al^{3+} e H^+ do solo, em decorrência disso, houve um aumento no pH. Porém, a interação do Al^{3+} , que se apresentava como solúvel, com o OH^- , pode se apresentar como um hidróxido insolúvel, vide Equação 8, e assim dificultar a formação da etringita (RONQUIM, 2010).



Nas misturas contendo 7,5% de GAFm, 7,5% de resíduo FGD e 85% de solo, percentuais em massa seca (Figura 29), foi observada a presença de etringita, somente, aos 8 dias. Além disso, foi observada a presença pouco expressiva de calcita aos 90 dias. Com a presença do Ca^{2+} e do SO_4^{2-} provenientes do resíduo FGD e a disponibilidade dos íons Ca^{2+} e Al^{3+} , quando da solubilização da escória ou da presença no solo, foi possível formar a etringita.

Tal fato corrobora a hipótese de que o resíduo FGD estivesse agindo para ativar a escória granulada de alto forno moída, e assim, o conjunto FGD-GAFm pudesse se comportar similarmente a um cimento hidráulico. Kolhe *et al.* (2022) encontraram etringita, portlandita, C-S-H e aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) como produtos hidratados de um compósito produzido com GAF, resíduo FGD e carbetto de cálcio, constituído majoritariamente por CaO (81,29%). Além disso, os autores afirmaram que quanto maior o teor de resíduo FGD nas composições estudadas, mais expressiva era a presença da etringita.

Figura 29 – Difratograma da composição “Solo FGD Escória” aos 8 e 90 dias

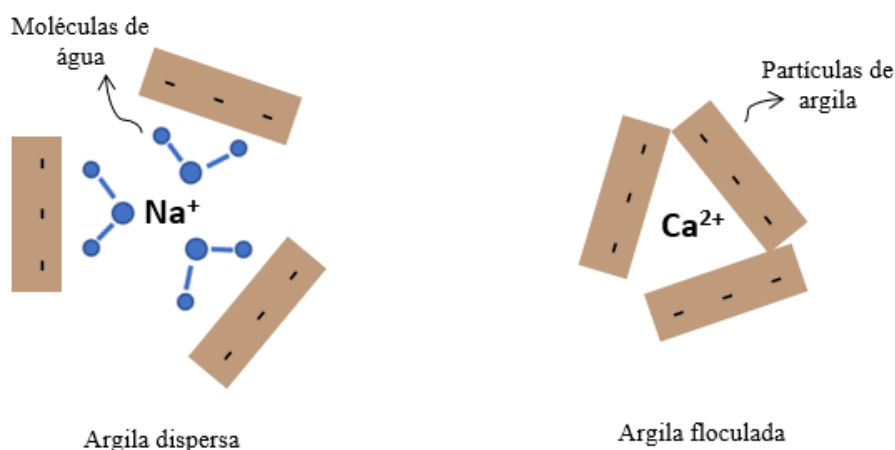


Fonte: Autora (2022).

A formação de etringita em argilas estabilizadas com produtos cimentícios não é vista como problemática, em contraponto à presença da etringita secundária em matrizes cimentícias, devido à estas argilas, normalmente, possuírem alta porosidade com poros relativamente grandes. Dessa forma, a formação de etringita pode gerar um preenchimento dos poros, aumentar o consumo de água e provocar um efeito cimentante nas argilas de baixa consistência, resultando em uma maior densidade seca e, conseqüentemente, maior resistência (WU *et al.*, 2021). Nas amostras em que foi possível observar a presença de etringita aos 8 dias de idade, não foi possível observar a presença do mineral em idade avançada. Acredita-se que a etringita tenha sido consumida, sofrendo um processo de desestabilização.

Além disso, a dissolução do resíduo FGD disponibilizou no sistema uma concentração de Ca^{2+} que foram adsorvidos na face dos argilominerais por meio das reações de trocas catiônicas. Dessa forma, no processo de estabilização, o resíduo ofereceu o Ca^{2+} para a substituição dos íons de Na^+ , visto que era observado um teor elevado desse elemento no solo estudado, resultando em uma redução da nuvem de água adsorvida provocando a floculação da argila (Figura 30).

Figura 30 - Adição de cal para promover a floculação de uma argila dispersa



Fonte: Adaptado de Chen e Dick (2011).

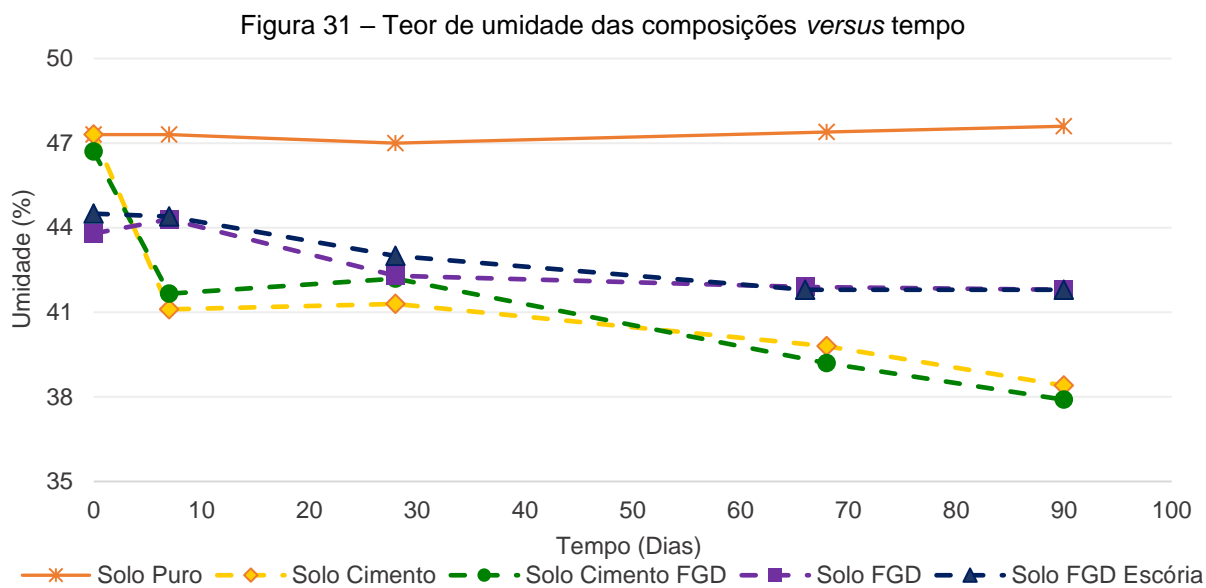
Em síntese, sugere-se que o ganho de resistência em todas as composições deveu-se, inicialmente e imediatamente após a mistura, as reações de troca catiônica. Posteriormente, nas composições SC e SCF deveu-se às reações de hidratação e carbonatação, pois apresentaram etringita, calcita e, possivelmente, C-S-H e C-A-H, podendo ser oriundo até mesmo de reações pozolânicas, porém não detectáveis por ensaio DRX. Na composição SF, o ganho de resistência deveu-se às reações de carbonatação, pois apresentou calcita no difratograma. E por fim, na composição SFE, o ganho se deu por reações de hidratação e carbonatação, devido à presença de etringita e calcita.

4.2.2 Análise dos aspectos físicos das composições de solo

4.2.2.1 Teor de Umidade

No que diz respeito aos teores de umidade, foi possível observar, pela Figura 31, que em todas as composições houve uma redução no teor de umidade no decorrer do tempo quando comparado ao solo sem adições. Além disso, constatou-se que as

amostras que continham cimento Portland, apresentaram uma maior redução no teor de umidade.



Fonte: Autora (2022).

Avaliando a taxa de decréscimo do teor de umidade, nas amostras contendo cimento Portland, a maior redução do teor de umidade ocorreu nos primeiros oito dias de cura. Tal fato pode ser explicado pelas reações de hidratação do CP V - ARI que acontece, predominantemente, aos 7 dias de idade. Já nas amostras “Solo FGD” e “Solo FGD escória” observou-se que a incorporação dos materiais resultou em uma diminuição de água de 8,5% e 6,6%, respectivamente. Durante a cura submersa, o consumo se deu, majoritariamente, dos 8 até 60 dias, indicando o tempo que levam esses materiais proporcionarem reações químicas à composição.

É possível notar que há um crescimento inesperado na umidade da amostra Solo FGD aos 8 dias e nas amostras “Solo cimento” e “Solo cimento FGD”, aos 28 dias. Devido aos aumentos serem discretos, menores que 1,3% em relação ao valor inicial, pôde-se inferir que houve divergência nos procedimentos de ensaio ou uma incorporação de água nas composições devido à cura submersa.

A redução do teor de umidade era esperada e estão de acordo com o comportamento observado por Wu *et al.* (2022). Porém, a redução auferida neste trabalho foi menor do que a auferida pelos autores, que obtiveram, na argila com umidade inicial de 50%, uma redução de 40% do teor quando adicionado 15% de clínquer de cimento e

metacaulim e uma redução maior, mais de 50%, quando adicionou junto a esses, resíduo FGD.

A alteração do teor de umidade em amostras submetidas à cura submersa em água é um indicativo de que reações químicas estão ocorrendo nas composições. Segundo WU *et al.* (2022), a diminuição no teor de umidade é conferida ao consumo e incorporação da água pelas reações químicas entre os aditivos e o solo e, também, ao aumento da fração sólida dos grãos de solo. Dessa forma, a produção da etringita indicada pela análise de DRX nas amostras SC, SCF e SFE induziu na diminuição do teor de umidade do 0 aos 8 dias, visto que a água é consumida na formação do cristal.

Além disso, pôde-se inferir que as reações de trocas iônicas favorecem a diminuição do teor de umidade, uma vez que a adição de um material rico em cálcio diminui a nuvem de água adsorvida da argila.

4.2.2.2 Peso específico aparente seco

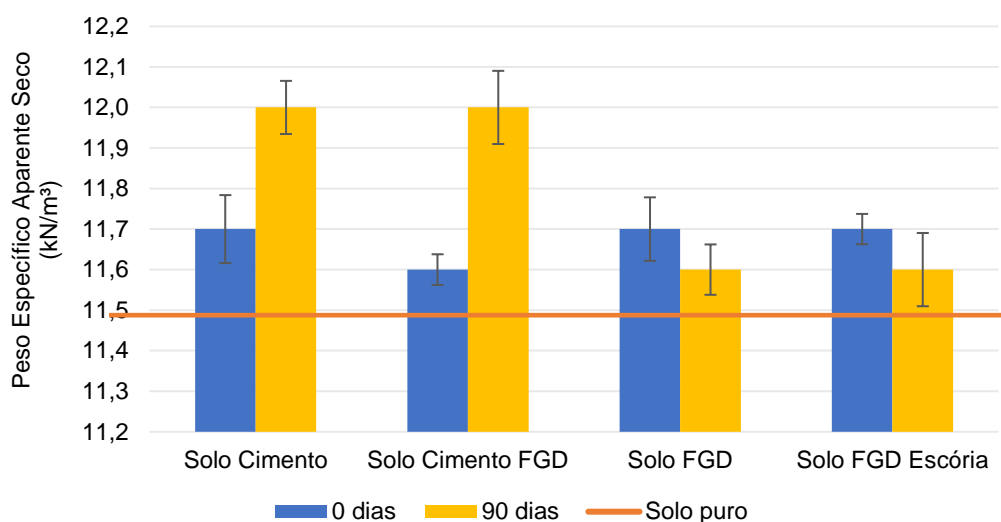
Nas composições de solos modificados, foi possível observar o aumento do peso específico aparente seco, em relação ao solo puro, aos 8 e 90 dias (Figura 32). Nas composições contendo cimento Portland, o peso específico aparente seco aumentou no decorrer do tempo, apresentando maiores valores aos 90 dias. No entanto, as composições SF e SFE apresentaram valores de peso específico aparente seco maiores do que o solo puro em todas as idades, porém sofreram uma diminuição no decorrer do tempo, apresentando os maiores valores no dia zero.

Um aumento no peso específico aparente seco se deve, basicamente, à cimentação interpartículas e ao preenchimento de poros pelos produtos provenientes das reações que ocorreram entre os aditivos e as partículas de argila. Tais fatos resultam em uma diminuição no teor de água e, conseqüentemente, um aumento no peso específico aparente seco (WU *et al.*, 2022). Pode-se afirmar que a adição dos aditivos proporcionou a densificação da matriz que influenciou diretamente na avaliação da resistência mecânica.

Park *et al.* (2015) também haviam observado o aumento da massa específica aparente seca em solos com 15% de adição de cimento Portland e 15% de cimento Portland e resíduo FGD. Da mesma forma, Wu *et al.* (2022) observaram que a adição

de resíduo FGD junto ao clínquer e o metacaulim proporcionava um maior aumento na massa específica seca do que quando o resíduo não era utilizado.

Figura 32 – Peso específico aparente seco das composições e solo puro aos 0 e 90 dias



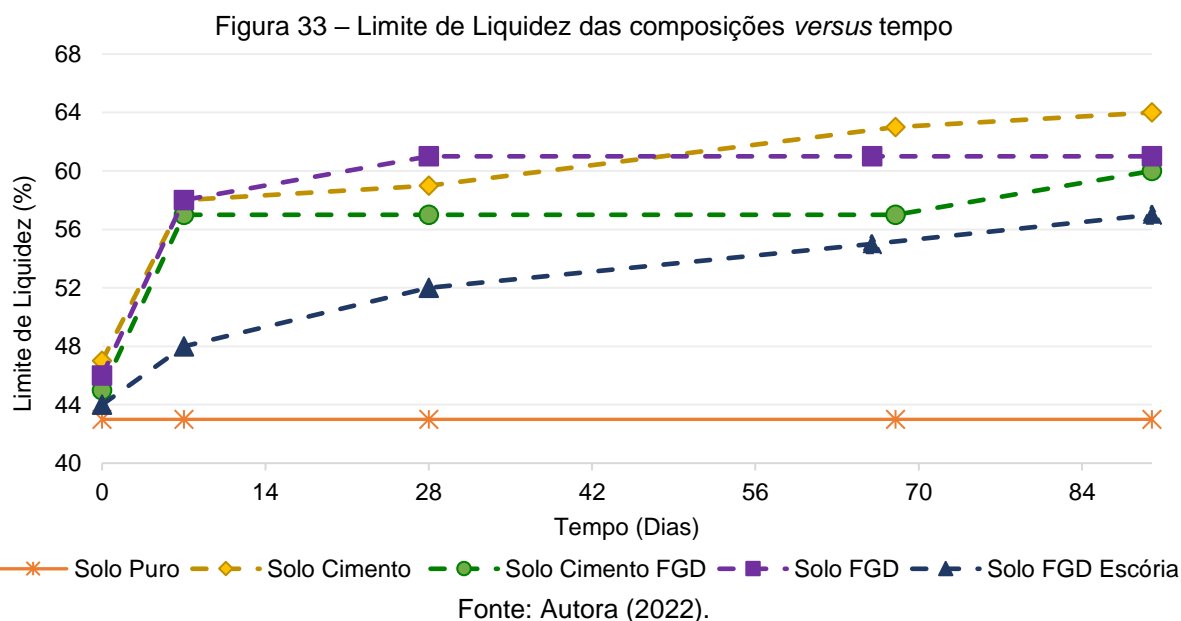
Fonte: Autora (2022).

4.2.2.3 Limite de Liquidez e Plasticidade

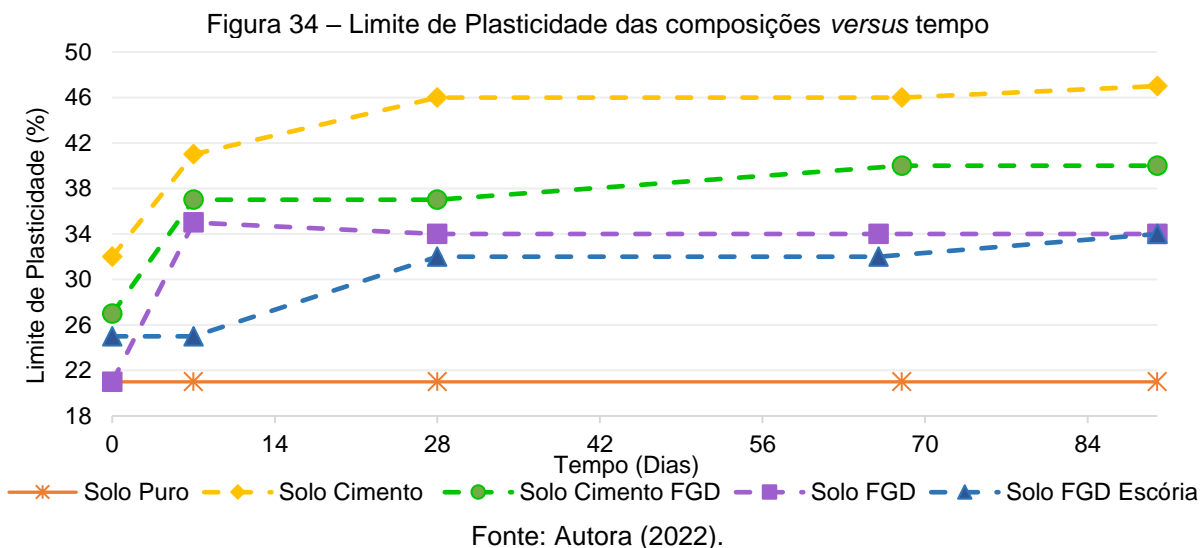
No que diz respeito aos ensaios de limites de consistência, foi percebido que a incorporação de qualquer combinação de estabilizantes proporcionou um aumento no limite de liquidez das composições em relação ao solo puro (Figura 33). A amostra SC, na idade zero, apresentou o maior LL dentre todas as amostras estudadas, 47%, enquanto a amostra SFE apresentou o menor valor, 44%. Além disso, foi observado que o limite de liquidez aumentou no decorrer do tempo, apresentando o maior teor aos 90 dias de cura, em relação ao solo puro, em todas as amostras estudadas. Um aumento entre 22,8% e 26,6% foi observado nas amostras aos 90 dias em relação as amostras aos 8 dias.

Não há uma convergência na literatura sobre qual seria o padrão adequado para o limite de liquidez quando adicionado ligantes. Picoli (2020) observou que a incorporação do resíduo FGD e cimento Portland pouco alterava o limite de liquidez, uma adição de 3% de resíduo FGD aumentava o LL em, apenas, 3,7% em relação ao solo puro. Estudos que realizaram estabilização de solos com fosfogesso, subproduto da indústria de ácido sulfúrico cujos principais constituintes são CaO e SO₃, apresentaram uma diminuição no LL (MUDLIAR; RAJESH, 2022; JAMES, LAKSHMI; PANDIAN, 2014), assim como solos modificados com cimento Portland (BAYAT;

ASGARI; MOUSIVAND, 2013). No entanto, Abbey, Ngambi e Coakley (2016) após estudarem diferentes tipos de adições, inclusive de cimento Portland somente, e encontrarem um aumento e diminuição do LL, dependentes do tipo de solo, constataram que as mudanças nos limites de consistência são inerentes às características iniciais do solo, podendo variar o comportamento.



No que diz respeito aos limites de plasticidade, foi comum à todas as composições um aumento no teor em relação ao solo puro (Figura 34). Assim como no limite de liquidez, na idade zero, a amostra SC apresentou o maior LP entre as amostras, 32%, enquanto SF apresentou o menor valor, 21%. Aos 90 dias, os resultados foram mais expressivos, a amostra SC apresentou o maior LP entre as amostras, 47%, enquanto SFE e SF apresentaram o menor valor, 34%.



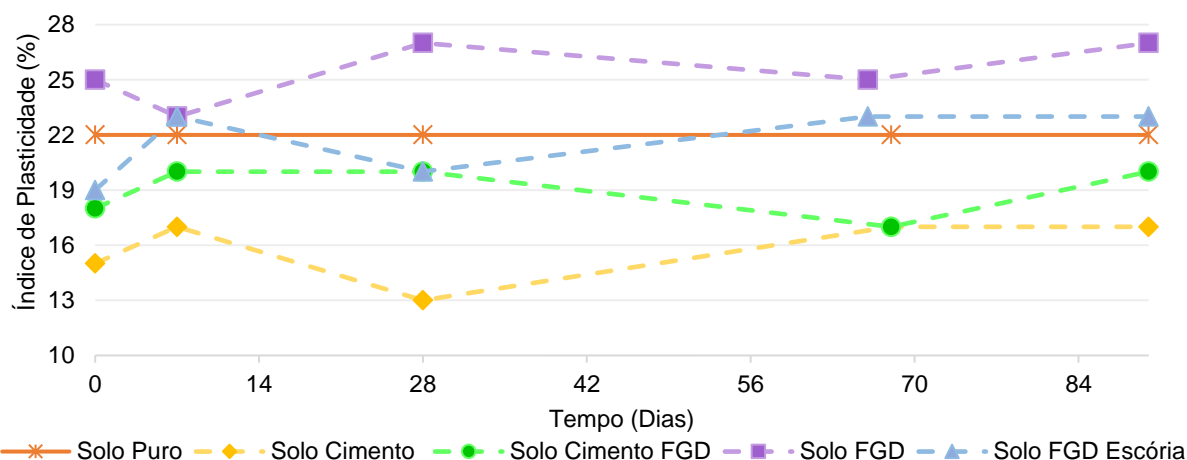
O aumento no LP era esperado para todas as amostras, conforme resultados obtidos por Picoli (2020), James, Lakshmi e Pandian (2014) e Mudliar e Rajesh (2022) quando utilizaram fosfogesso e Bayat, Asgari e Mousivand (2013) incorporando cimento ou cal. Abbey, Ngambi e Coakley (2016) afirmam que um aumento na pasta de cimento tende diminuir a fluidez das amostras e aumentar o limite de plasticidade que parecem estar dependentes das propriedades iniciais do solo.

Bell (1988), utilizando cal para estabilização de solos argilosos, afirmou que os íons de cálcio são combinados ou adsorvidos por minerais argilosos. O resultado disso é um aumento do limite de plasticidade levando a uma melhora na trabalhabilidade do solo. Além disso, o autor reforça que, geralmente, o efeito da cal na plasticidade é quase que imediato. Em concordância com o apresentado por Bell (1988), a adição de produtos ricos em cálcio, proporcionou uma mudança imediata no limite de plasticidade das composições, com exceção da amostra Solo FGD, que só experimentou uma mudança a partir dos 8 dias.

Quanto ao índice de plasticidade (Figura 35), ao zero dia, foi percebido que as composições, com exceção da composição “Solo FGD”, apresentaram uma diminuição no índice de plasticidade. As amostras SC, SCF, SF e SFE apresentaram IP de 15%, 18%, 25% e 19%, respectivamente. Já aos 90 dias, as amostras SC e SCF exibiram valores menores que os de solo puro, 17% e 20%, respectivamente. Por outro lado, SF e SFE apresentaram valores maiores que o solo puro, 27 e 23%, respectivamente.

No dia zero, o índice de plasticidade das amostras de SC, SCF e SFE apresentaram resultados de acordo com os observados por Picoli (2020) em que houve uma diminuição no IP em relação ao solo puro. Porém, divergente do observado pela autora, a amostra SF apresentou resultados maiores que o solo puro. Tal fato, pode ser relacionado ao tipo de solo utilizado e o teor de ligante utilizado. Possivelmente, o teor de ligante utilizado neste trabalho não tenha sido o suficiente para que a amostra SF apresentasse uma redução no IP.

Figura 35 – Índice de Plasticidade das composições *versus* tempo



Fonte: Autora (2022).

Grytan *et al.* (2012) conferem a mudança nos limites de consistência dos solos tratados com cimento Portland à troca catiônica das argilas e a agregação das partículas com o aumento da quantidade de cimento. Com os resultados apresentados, pode-se afirmar que tal fato não é exclusivo da adição do cimento, visto que os outros aditivos utilizados também proporcionaram essas mudanças. Conclui-se que a alteração nesses valores sugere que os aditivos estavam reagindo e proporcionando reações de trocas iônicas com o solo já aludidas anteriormente neste trabalho.

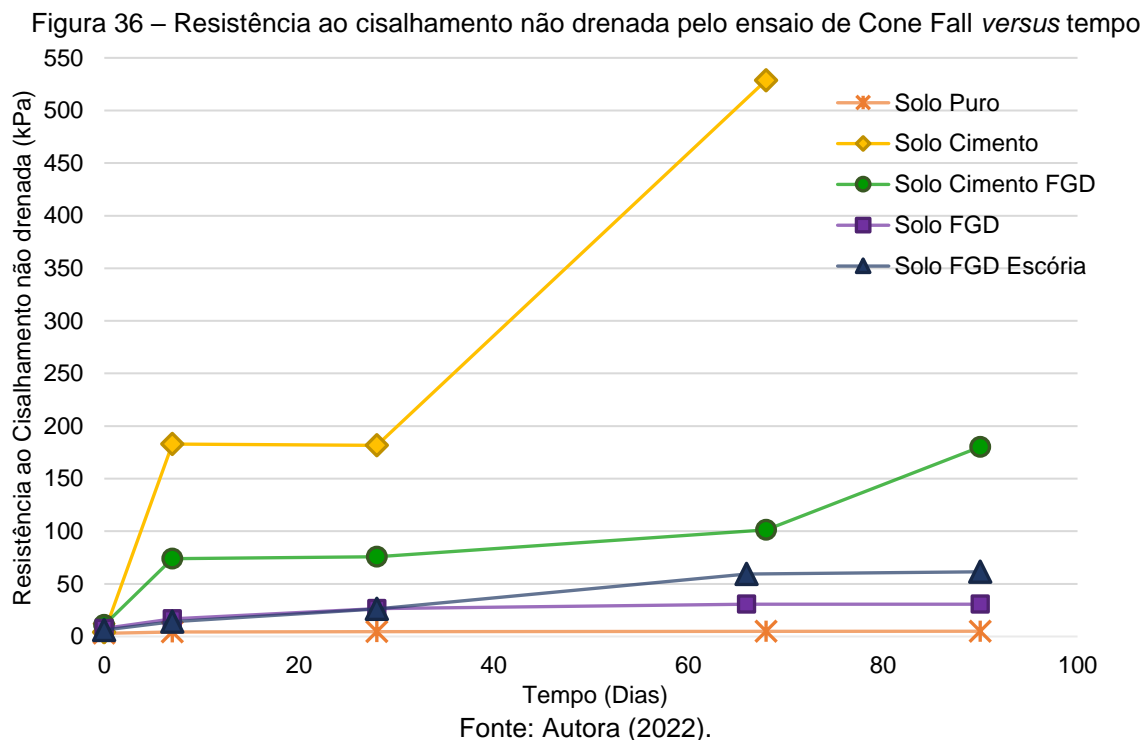
Abbey, Ngambi e Coakley (2016) afirmam que, a níveis de resistência, espera-se que o IP diminua com o aumento do teor de estabilizante. Assim sendo, da ótica do ganho de resistência, a diminuição do índice de plasticidade indica uma maior resistência. Porém, tal fato diverge dos resultados encontrados neste trabalho, visto que as amostras SF e SFE, embora tenham apresentados IP maiores, apresentaram resistência à compressão não confinada e ao cisalhamento não drenada maiores que o solo puro.

4.2.3 Análise dos aspectos mecânicos das composições de solo

4.2.3.1 Resistência ao cisalhamento não drenada

A partir da resistência ao cisalhamento não drenada pelo ensaio de *Cone Fall*, observou-se um aumento na resistência das composições em relação ao solo puro (Figura 36). No dia 0, o solo puro apresentou 3 kPa de resistência ao cisalhamento

não drenada. Aos 90 dias, essa resistência era de 5 kPa, tal fato, deve-se ao processamento da carga vertical utilizada na cura.



Os maiores valores de resistência foram observados nas amostras contendo 85% solo e 15% cimento Portland, apresentando um aumento maior que 105,7 vezes, aos 68 dias. As amostras contendo 85% de solo, 7,5% de CP V - ARI e 7,5% de resíduo FGD, apresentou resistência 36 vezes maior que o solo puro, aos 90 dias. Por fim, as amostras contendo 85% solo e 15% resíduo FGD ou 7,5% resíduo FGD e 7,5% GAFm apresentaram resistência 6,1 e 12,3 vezes maior que o solo sem adições, aos 90 dias.

Eurosoilstab (2001) afirma que as amostras de solo estabilizados atingem resistência ao cisalhamento não drenada de 10 a 50 vezes maior que a resistência inicial do solo. Dessa forma, é possível observar que as amostras apresentaram um aumento esperado de resistência.

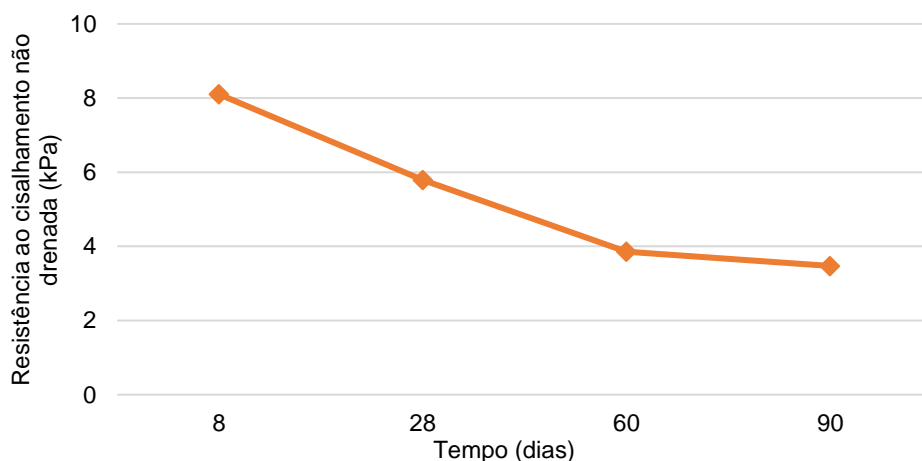
As amostras apresentaram concordância com os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física das composições, em relação ao solo puro. Quando comparado as composições com diferentes ligantes, é possível perceber que SC e SCF não apresentaram valores de resistência ao cisalhamento não drenada semelhantes ou lineares, embora apresentasse massa específica aparente seca iguais a 1,22 g/cm³. Porém, quando comparado SF e SFE, os resultados de resistência ao cisalhamento

não drenado estão de acordo com a massa específica aparente seca, em que SF apresentou menores valores que SFE, embora a resistência à compressão não confinada não tenha apresentado a mesma tendência.

Devido aos resultados apresentados, principalmente em relação a SC e SCF, evidenciou-se o fato de os resultados do ensaio de cone de queda livre de laboratório não serem representativos em solos muito resistentes. Mas é evidente que houve uma resistência maior à penetração nas composições de solo melhorado no decorrer do tempo, quando comparadas as composições no dia zero ou ao solo puro. Vale ressaltar que não necessariamente o valor encontrado pelo ensaio de cone seja representativo da resistência em campo.

Quanto aos resultados obtidos pelo ensaio de palheta no solo puro, pôde-se observar que, aos 8 dias, a resistência ao cisalhamento não drenada foi de 8,1 kPa e aos 90 dias foi de 3,9 kPa, classificando o solo como muito mole (Figura 37). Embora a umidade retirada após o ensaio de palheta tenha permanecido constante, variando de 47,1 a 47,6%, esperava-se que a resistência aumentasse com o tempo devido ao processamento da sobrecarga, porém, não foi isso que ocorreu. Tal fato deve-se, possivelmente, à inconsistência na realização do ensaio como a mudança de operador.

Figura 37 – Resistência ao cisalhamento não drenada pelo ensaio de palheta *versus* tempo na amostra de solo puro



Fonte: Autora (2022).

A partir dos resultados de UCS e por meio da relação da metade da resistência à compressão não confinada, é possível obter os resultados de resistência ao cisalhamento não drenada, como pode ser observado na Tabela 13. A partir disso, o solo antes da estabilização, classificado como muito mole, pode ser reclassificado

após cura de 90 dias, como um solo de consistência dura nas composições SC, SCF e SF ou consistência muito rija na composição SFE.

Tabela 13 – Resistência ao cisalhamento não drenada pelo ensaio de compressão não confinada

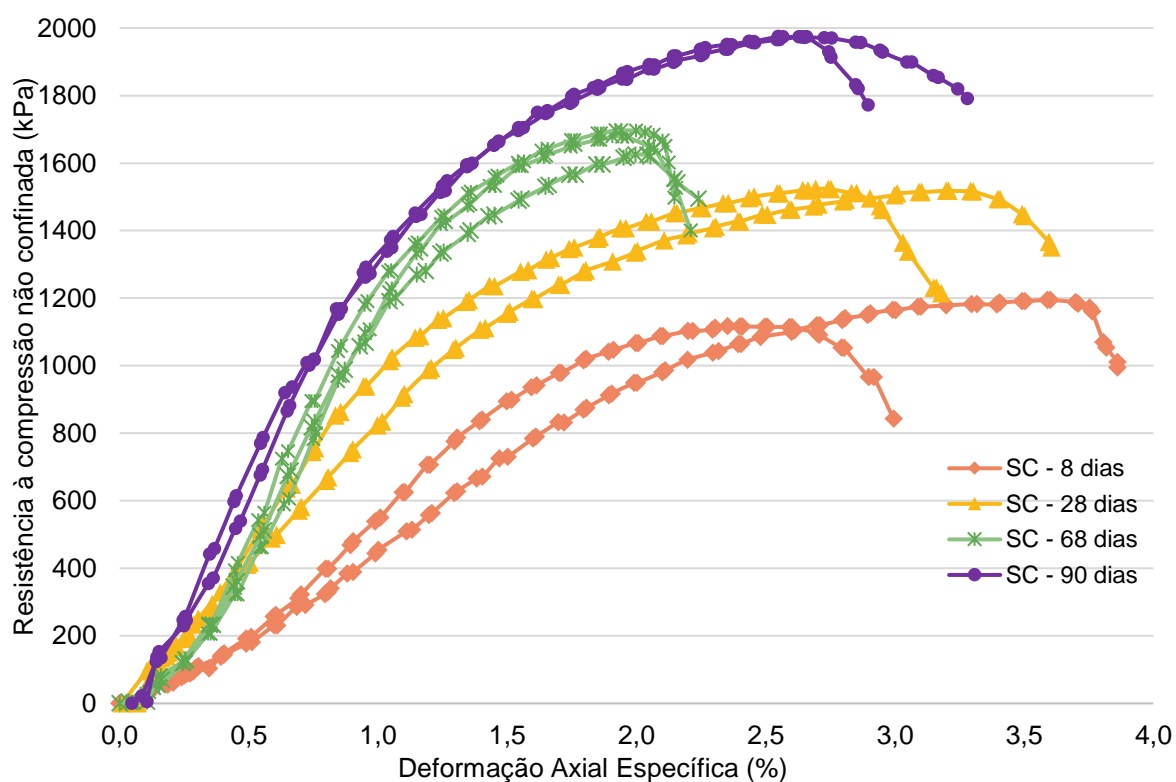
Dias	Resistência ao cisalhamento não drenada (kPa)			
	Solo cimento	Solo cimento FGD	Solo FGD	Solo FGD escória
8	578	223	57	17
28	761	264	198	64
68	834	456	219	113
90	987	533	307	116

Fonte: Autora (2022).

4.2.3.2 Resistência à compressão não confinada

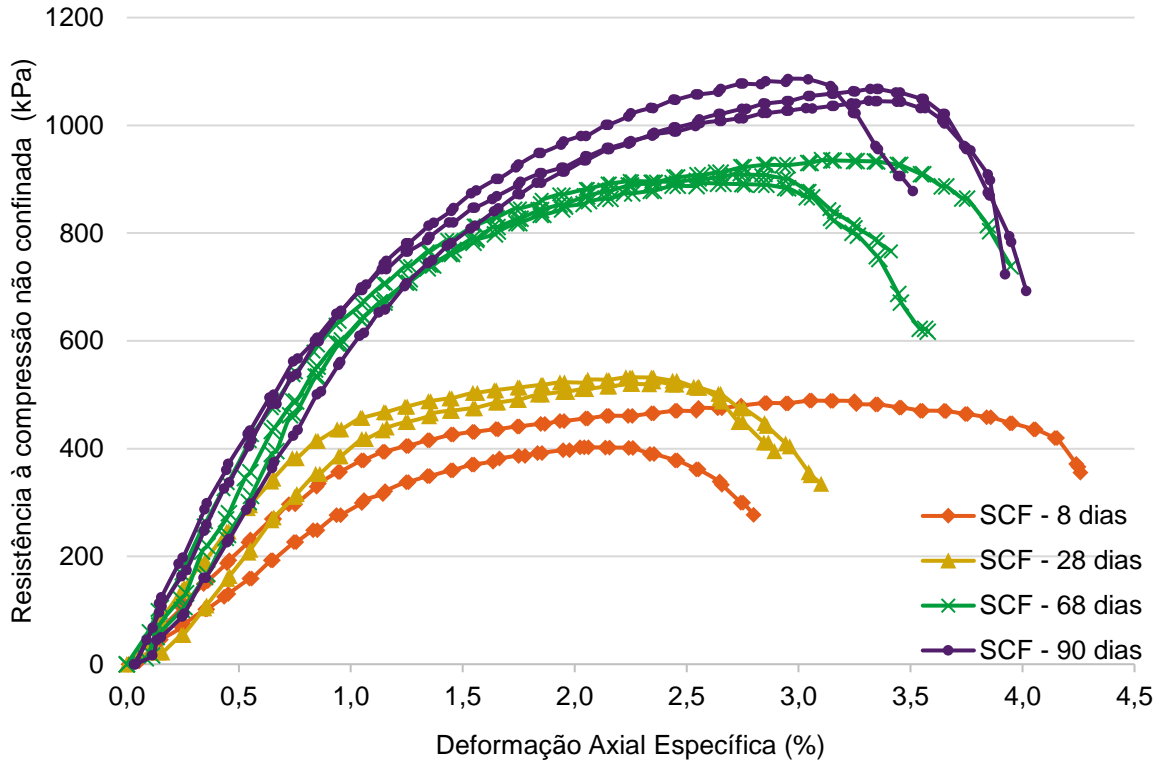
Os gráficos de resistência à compressão não confinada versus a deformação axial específica das misturas são apresentados nas Figuras 38 a 41.

Figura 38 – Resistência à compressão não confinada versus deformação axial específica das composições “Solo Cimento”



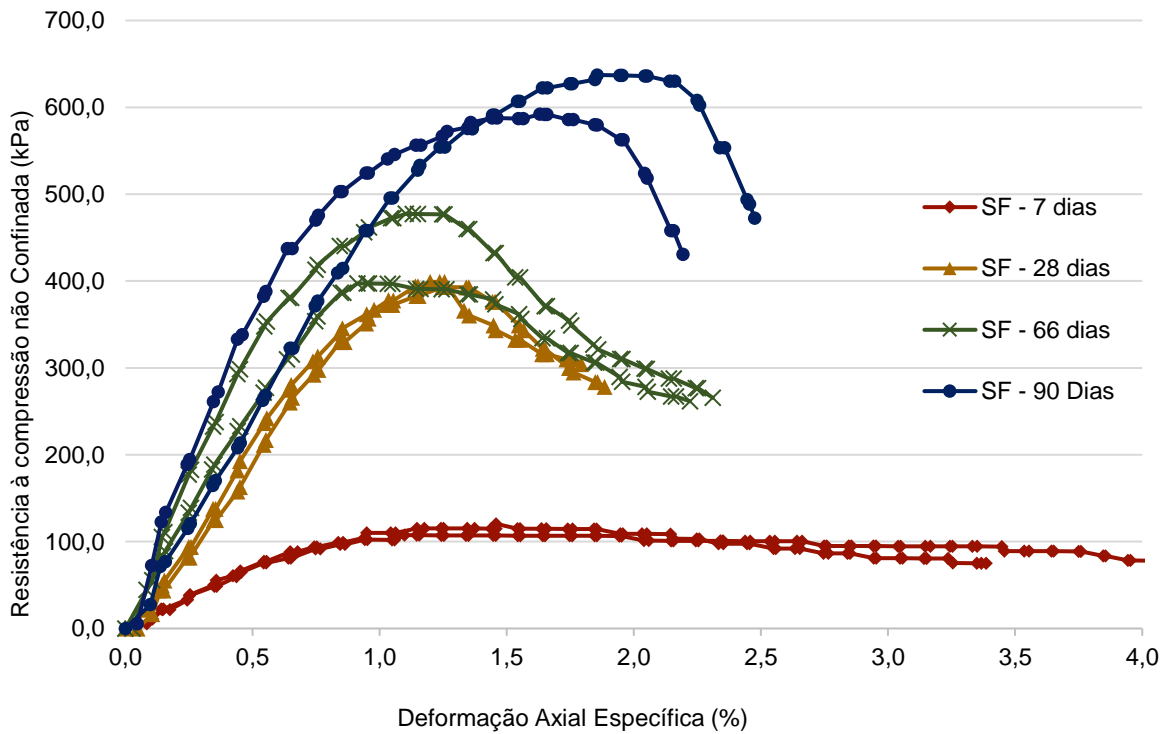
Fonte: Autora (2022).

Figura 39 – Resistência à compressão não confinada *versus* deformação axial específica das composições “Solo cimento FGD”



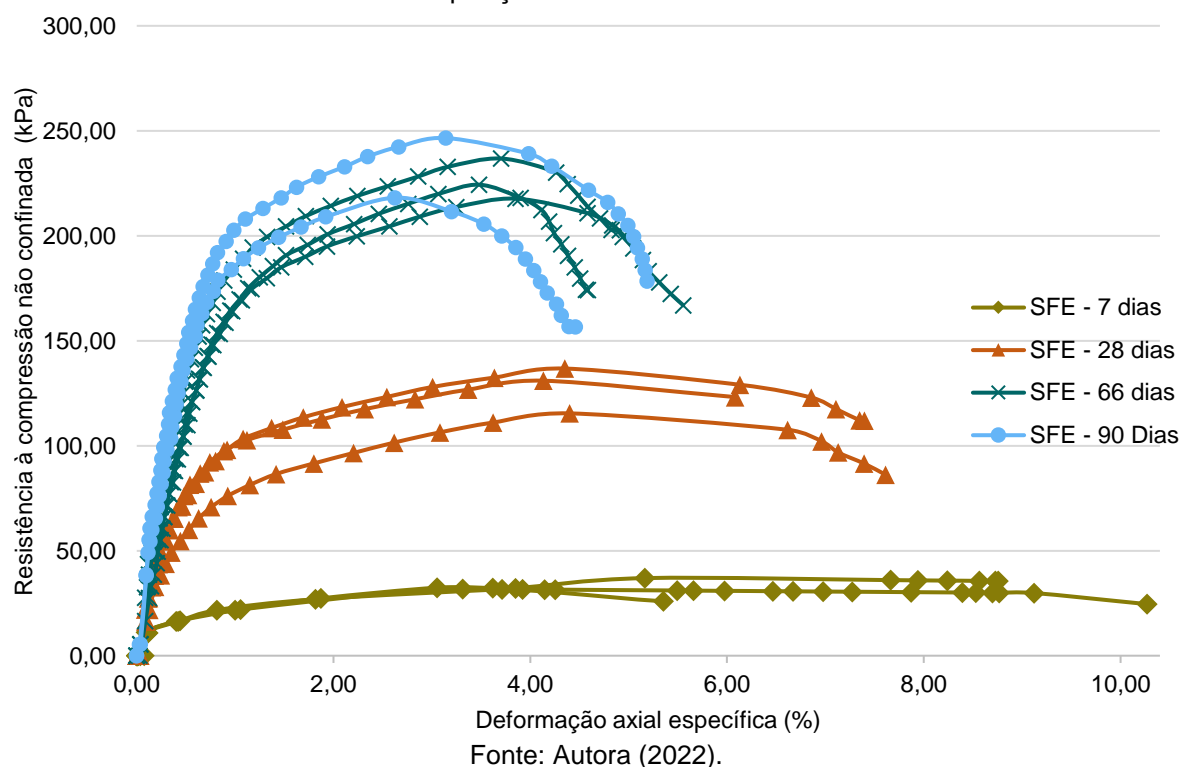
Fonte: Autora (2022).

Figura 40 – Resistência à compressão não confinada *versus* Deformação axial específica das composições “Solo FGD”



Fonte: Autora (2022).

Figura 41 – Resistência à compressão não confinada *versus* deformação axial específica das composições “Solo FGD Escória”



A composição “Solo cimento” apresentou as maiores resistências em todas as idades avaliadas em relação às outras adições. É possível observar que aos 8 dias, a resistência média máxima do solo estabilizado com o CP V - ARI correspondia à 58,5% da resistência apresentada aos 90 dias. Tal fato está de acordo com as características do cimento de alta resistência inicial que proporciona alto ganho de resistência aos primeiros dias de hidratação e a velocidade das reações de hidratação que proporcionam ao solo melhorado uma evolução na resistência nos primeiros dias de estabilização. Sobre as deformações, é possível observar que aos 90 dias as deformações específicas de ruptura foram superiores às apresentadas aos 68 dias, porém inferiores às deformações específicas de ruptura médias das amostras aos 8 dias.

É possível perceber, na composição “Solo cimento FGD”, que a substituição parcial do cimento por resíduo FGD ocasiona uma degradação no comportamento mecânico do solo estabilizado, obtendo uma resistência 45,9% menor, aos 90 dias. Porém, os resultados apresentaram maiores resistências à compressão não confinada que as composições utilizando apenas resíduo FGD ou resíduo FGD e escória. O maior ganho de resistência dessa composição se deu dos 28 aos 60 dias, em que a

resistência passou de 528,9 kPa a 912,4 MPa. Aos 68 dias, 85% da resistência observada aos 90 dias já havia sido alcançada. Quanto à deformação axial específica, foi observado que aos 90 dias valores maiores de deformações foram apresentados em relação as outras idades.

Park *et al.* (2015) também observaram que há um aumento na resistência à compressão não confinada no decorrer do tempo e que a substituição de cimento Portland por resíduo FGD ocasionou um decréscimo de 22,7% na resistência aos 28 dias. Vale ressaltar que a composição utilizada pelos autores (85% de solo, 14,25% de cimento Portland e 0,75% de resíduo FGD) apresentou um menor teor de resíduo em relação ao teor utilizado nesta pesquisa (85% de solo, 7,5% cimento Portland e 7,5% resíduo FGD) e é possível que devido a esses teores, o decréscimo apresentado nesta pesquisa seja maior.

Para potencializar o efeito da estabilização do solo estudado, Wu *et al.* (2022) incorporaram clínquer de cimento Portland, metacaulim e resíduo FGD. Dessa forma, garantiram que além de reações de hidratação e pozolânicas ocasionadas pela adição do clínquer, ocorressem reações pozolânicas em maior grau. Numa composição de 83,8% de solo, 12% clínquer de cimento, 3% de metacaulim e 1,2% de resíduo FGD, garantiram um aumento de 40% na resistência mecânica. Com a adição de 2,4% de resíduo FGD, houve uma redução de 5,7% na resistência. Dessa forma, concluíram que razões de resíduo FGD/cimento maior que 10% pudessem causar uma redução na resistência. Embora esteja-se referindo a diferentes composições de solos estabilizados, neste trabalho utilizou-se uma razão resíduo FGD/cimento igual a 50% que ocasionou numa redução da resistência mecânica.

Na composição “Solo FGD” foi possível observar que houve ganho de resistência no decorrer do tempo. Aos 90 dias, essa composição apresentou resistência de 614,7 kPa, 3,2 e 1,7 vezes menor que o máximo valor alcançado pelo SC e SCF aos 90 dias, respectivamente, porém 2049 vezes maior que o solo puro. Além disso, é necessário destacar que as deformações específicas de ruptura aos 90 dias foram as menores processadas em comparação à todas as composições estudadas.

Na composição “Solo FGD escória”, é possível observar o aumento da resistência com o avanço do tempo de cura. Aos 90 dias, essa composição apresentou resistência

de 232,4 kPa. Esse valor corresponde a um resultado 8,5, 4,6 e 2,6 vezes menor que as resistências apresentadas pelas amostras SC, SCF e SF aos 90 dias, respectivamente. Quanto às deformações, até os 60 dias, a amostra SFE apresentou os maiores valores de deformação de ruptura médio. Aos 90 dias, porém, apresentou valores de deformação específica de ruptura média menores que a amostra SCF.

Åhnberg e Johansson (2005) ao utilizar escória granulada de alto forno, junto à cal, apresentou para um solo com teor de matéria orgânica de 1% valores de resistência à compressão não confinada maiores que 2500 kPa, enquanto, a incorporação de cimento processou, apenas 40% desse valor. Em outro solo com teor de matéria orgânica de 10%, os mesmos agentes estabilizantes proporcionaram um ganho de resistência superior a 1500 kPa. A cal foi adicionada pelos autores para que o ganho de resistência pudesse se dar por meio de reações pozolânicas. Dessa forma, é possível observar que o maior ganho de resistência do solo estudado se deu após os 100 dias. Por mais que o resíduo FGD apresente uma semelhança com a cal por conter cálcio, a não observação de propriedades pozolânicas no resíduo faz com que não haja o mesmo processamento de resistências como os observados por Åhnberg e Johansson (2005). A partir disso, embora a composição apresente valores muito maiores de resistência que o solo puro, sugere-se que a incorporação seja feita junto a um material com propriedades pozolânicas para que o ganho de resistência seja, possivelmente, próximo ao encontrado com a incorporação de cimento Portland.

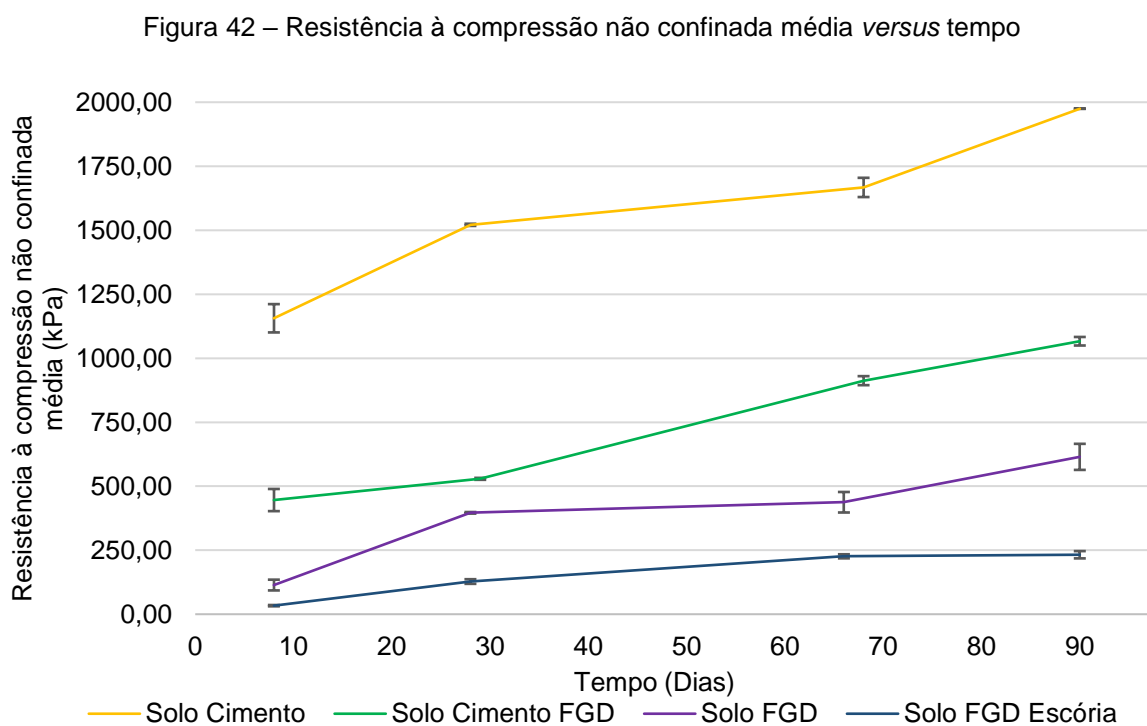
A partir dos resultados apresentados pelos ensaios de compressão não confinada, é possível constatar que a substituição parcial do cimento Portland pelo resíduo FGD ou total pelo resíduo FGD com ou sem GAFm ocasiona um decréscimo na resistência mecânica dessas composições, comportamento este já esperado devido à natureza química do CP V - ARI. Além disso, por mais que haja diferença na resistência à compressão não confinada das quatro composições, todas apresentaram uma melhora quando comparado ao solo puro, que apresentou uma máxima resistência à compressão não confinada de 0,3 kPa. No geral, aos 90 dias, as composições SC, SCF, SF e SFE apresentaram resistências 6581,4, 3554,6, 2049 e 774,6 vezes maior que o solo puro, respectivamente.

Nos gráficos que apresentam os comportamentos mecânicos dos materiais, é possível que perceber que algumas idades das composições apresentam, apenas, dois corpos

de prova, como SC 8, 28 e 90 dias, SCF 8, 28 dias, SF 8, 28, 68 e 90 dias e SFE 90 dias. Isso deveu-se a dificuldade de extrair as amostras moldadas, ocasionando na danificação ou perda dos corpos de prova, em alguns casos, ou a grande dispersão dos resultados apresentados por outras amostras.

Por fim, as maiores resistências à compressão não confinada foram apresentadas, em ordem decrescente, pelas amostras SC, SCF, SF e SF. Esse mesmo ordenamento foi observado numa avaliação da intensidade dos picos encontrados nos difratogramas que indicou a presença de calcita mais expressivas nessas amostras, de maneira decrescente, o que pode indicar a influência da calcita na resistência à compressão não confinada.

Na Figura 42 observa-se a evolução resistências à compressão não confinada média no tempo.



Fonte: Autora (2022).

5 CONCLUSÕES

A partir da análise dos aspectos físicos, foi possível observar que a incorporação do resíduo FGD ao solo proporcionou mudança nos parâmetros avaliados: umidade, peso específico aparente seco e limites de liquidez e plasticidade. As mudanças que, normalmente são observadas em solos estabilizados com cimento Portland, foram observadas em todas as composições contendo o resíduo FGD. O teor de umidade diminuiu (redução variando em 11,6% a 19,9%), enquanto o peso específico aparente seco aumentou (aumento variando em 1,0% a 4,5%), em relação ao solo sem adição, o que ocasionou o aumento da fração sólida do solo e na densificação da matriz. Além disso, houve uma mudança nos limites de liquidez e plasticidade e no índice de plasticidade, sugerindo que os aditivos reagiram e proporcionaram reações de trocas iônicas com o solo.

No que diz respeito ao comportamento mecânico, todas as composições apresentaram uma melhora na resistência à compressão não confinada da argila estudada. Dentre as composições, o maior desempenho foi apresentado pelo solo estabilizado com o CP V – ARI, com resultados 6580 vezes maior que o solo puro, seguido da combinação entre o cimento e o FGD que resultou em um aumento de mais de 3550 vezes na resistência à compressão, aos 90 dias. Já o resíduo FGD ou a combinação desse com a GAFm resultaram em um aumento de 2049 vezes e 774 vezes a resistência da argila aos 90 dias.

No que diz respeito aos aspectos microestruturais, as composições SC, SCF, SFE apresentaram a formação de etringita, aos 8 dias, que garantiu uma melhora no desempenho mecânico. Aos 90 dias, nessas composições não foi observada a presença de etringita, o que sugeriu que o mineral sofreu uma desestabilização se convertendo a uma fase AFm. Na composição SF por mais que tivesse elementos suficientes para formar a etringita, não foram observados picos expressivos nos difratogramas. Além disso, foi possível observar a presença de calcita em todas as composições de solo melhorado, porém com picos mais pronunciáveis de maneira decrescente nas amostras SC, SCF, SF e SFE, conforme também observado nos resultados de resistência à compressão não confinada.

É possível concluir que diferentes mecanismos foram necessários para garantir o ganho de resistência na argila rica em sódio: reações de trocas catiônicas que acontecem imediatamente à incorporação do ligante provocando a floculação da argila, as reações de hidratação que promoveu a formação de etringita que teve como objetivo densificar a matriz de solo e as reações de carbonatação que promoveu a formação de calcita, que mostrou grande influência nos resultados de resistência à compressão não confinada.

Por fim, pode-se concluir que o resíduo FGD tem potencial para ser um substituto total e parcial do cimento Portland nos processos de estabilização de solos de baixa consistência, desde que atenda as características do projeto de engenharia. Além disso, a combinação entre resíduo FGD e GAFm também favoreceram no aumento da resistência à compressão não confinada e no aumento do peso específico aparente da argila. Com isso, o resíduo se apresenta como uma alternativa econômica e sustentável quando comparada com os ligantes utilizados normalmente em processos de estabilização.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em consideração os resultados obtidos neste trabalho, para que o resíduo FGD possa a ser viabilizado, futuramente, como um estabilizante de solos de baixa consistência, sugere-se em pesquisas futuras:

- A determinação de um teor de adição ótimo de resíduo FGD com a incorporação de diferentes teores de resíduo FGD aos utilizados neste trabalho em solos de baixa consistência.
- Avaliar o comportamento de estabilização utilizando o resíduo FGD, cimento Portland e Escória Granulada de Alto Forno moída e algum material pozolânico capaz de impulsionar o ganho de resistência a longo prazo.
- A análise microestrutural por meio de uma combinação de técnicas, como DRX, Microscopia Eletrônica por Varredura e análise termogravimétrica juntamente à análise química e de complexo sortivo, para melhor compreender os argilominerais componentes do solo a ser estudado e os produtos hidratados formados no processo de estabilização.
- A determinação da resistência ao cisalhamento não drenada de um solo estabilizado in situ, por meio das técnicas de *Deep Soil Mixing*, com o resíduo FGD.

REFERÊNCIAS

ABBEY, S. J., NGAMBI, S. COAKLEY, E. Effect of Cement and by-Product Material Inclusion on Plasticity of Deep Mixing Improved Soils. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, 7(5), pp.265–274, 2016

AHNBERG, H.; JOHANSSON, S.E. Increase in strength with time in soils stabilised with different types of binder in relation to the type and amount of reaction products. **Swedish Deep Stabilization Research Centre**, 2005.

AHNBERG, H. Strength of Stabilised soils - A laboratory study on clays and organic soils stabilised with different types of binder, **Swedish Deep Stabilization Research Centre**, 2006.

AL-JABBAN, W.; LAUE, J.; KNUTSSON, S.; AL-ANSARI, N. Briefing: Common laboratory procedures to prepare and cure stabilised soil specimens: A short review. **Geotechnical Research**, v. 7, n. 1, p. 3–10, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. ABNT, Rio de Janeiro: 2016a.

_____. ABNT. **NBR 6459**. Solo - Determinação do limite de liquidez. ABNT, Rio de Janeiro: 2016b.

_____. **NBR 7180**. Solo — Determinação do limite de plasticidade. ABNT, Rio de Janeiro: 2016c.

_____. **NBR 7181**. Solo - Análise granulométrica. ABNT, Rio de Janeiro: 2016d.

_____. **NBR 12770**. Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio. ABNT, Rio de Janeiro: 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4648/D4648M-16**: Standard Test Methods for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil. ASTM International, West Conshohocken, PA: 2016.

AXELSSON, K.; JOHANSSON, S.; ANDERSSON, R. Stabilization of Organic Soils by Cement and Pozzolanic Reactions - Feasibility Study. **Swedish Deep Stabilization Research Centre** - Report 3, 2002.

BALIGAR, V. C.; CLARK, R. B.; KORCAK, R.F.; WRIGHT, R. J. Flue Gas Desulfurization Product Use on Agricultural Land. 1. *In*: Sparks, Donald L. **Advances in Agronomy**. Vol.111. 1st ed, Academic Press, 2011. ed. [S.l.]: Elsevier Inc., [s.d.]. v. 111.

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: Paraninfo, 2011. 682p.

BAYAT, M.; ASGARI, M.R.; MOUSIVAND, M. Effects of cement and lime treatment on geotechnical properties of a low plasticity clay. In: **International Conference on Civil Engineering Architecture & Urban Sustainable Development**, 2013, Tabriz, Iran.

BELL, F.G. Stabilisation and treatment of clay soils with lime. Part 1 - Basic principles. **Ground Engineering**. p.10-15,1988.

BOURGEAU-CHAVEZ, L.L.; ENDRES, S.L.; GRAHAM, J.A.; HRIBLJAN, J.A.; CHIMNER, R.A.; LILLIESKOV, E.A.; BATTAGLIA, M.J. Mapping Peatlands in Boreal and Tropical Ecoregions. In: Liang, S., ed. **Comprehensive Remote Sensing**, vol. 6. Oxford, Reino Unido: Elsevier, p. 24–44. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução n. 436 do CONAMA, de 26 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, n. 247, 26. dez. 2011, Seção 1.

BRIDI, Lucas Oliveira. **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 (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020.

BUTALIA, T. S.; AMAYA, M.T; AMIN, M.; CHENG, C.; LU, M.; CHEN, Y.; WU, M.M; WOLFE, W. Beneficial Utilization of Chinese Dry FGD Materials for Stabilization of Weak Soils. **The Journal of Solid Waste Technology and Management**, vol. 44, no 3, p. 288–98, 2018.

BUTALIA, T.; WOLFE, W.; AMAYA, P. **The utilization of flue-gas desulfurization materials**. [S.l.]: Elsevier Ltd., 2017.

CAILLAHUA, M. C. **Avaliação Técnica para Uso do Gesso FGD como Aditivo Retardador do Tempo de Pega em Cimento Portland**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos). Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2013.

CAMPOS, A.C. **Características de Compressibilidade de uma Argila Mole da Zona Industrial de Santa Cruz**. 2006. 175p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2006.

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

CARPENTER, A.M. **Advances in multi-pollutant control**. London: IEA Clean Coal Centre. 2013. 82p.

CDIT - Coastal Development Institute of Technology. **The Deep Mixing Method - Principle, Design and Construction**. Tokyo: A.A. Balkema Publishers, 2002.

CHANDRASEKARAN, C. Rubber lining for a sulfur dioxide scrubbing system. In: Chandrasekaran, C. **Anticorrosive Rubber Lining: A Practical Guide for Plastics**. William Andrew Publishing, p. 73-76, 2017.

CHEN, L.; DICK, W.A. **Gypsum as an Agricultural Amendment: General Use Guidelines (Bulletin 945)**. The Ohio State University, p. 35, 2011.

CORREIA, António Alberto Santos. 2011. **Aplicabilidade da técnica de deep mixing aos solos moles do Baixo Mondego**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.

CORREIA, A.; VENDA OLIVEIRA, P. J.; LEMOS, L. J. L. **Solo Estabilizado Pela Técnica De Deep Mixing – Preparação Laboratorial De Amostras**. 2005, Coimbra: [s.n.], 2005. p. 8.

COUTINHO, J. de S. **Materiais de Construção 2: 1ª Parte – Ligantes e Caldas**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2006. Acesso em 01 de agosto de 2022. Disponível em: <<https://paginas.fe.up.pt/~jcouti/ligantes2006.pdf>>.

EUROSOILSTAB. **Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils**. Design guide soft soil stabilization. CT97-0351, EC Project No. BE 96- 3177, p. 94. Industrial & Materials Technologies Programme (BriteEuRam III), European Commission, 2001.

FALLAVENA, Vera Lucia Vargas. **Determinação da Matéria Mineral por Tratamento Térmico e dos Teores de Formas de Enxofre por Peroxidação do Carvão Brasileiro**. Porto Alegre. 2011. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

FHWA – Federal Highway Administration (EUA). **User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction**. Report FHWA-RD-97-148. Washington DC: U.S. Department of Transportation. 2016. Disponível em:<<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/toc.cfm>>. Acesso em 10 jul 2022.

FRENKEL, H., GERSTL, Z., ALPEROVITEH, N. Exchange- induced dissolution of gypsum and the reclamation of sodic soils. **Journal of Soil Science**, v. 40, p. 599–611.

FRÖHLICH, Jéssica. **Uso de resíduo cerâmico em cimentos ternários tipo LC³: estudo dos produtos da hidratação**. São Leopoldo. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

GRIM, E.R. **Clay Mineralogy**. Nova York: McGraw-Hill, 1953.

GRYTAN, S.; RAFIQU, I.; MUHAMMED, A.; ROKONUZZAMAN, M. Study on the Geotechnical Properties of Cement based Composite Fine-grained Soil. **International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering**, vol. 01, n. 02, p. 42-49, 2012.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. Califórnia: Academic Press, 1998.

HORPIBULSUK, S., BERGADO, D. T., LORENZO, G. A. Compressibility of cement-admixed clays at high water content. **Geotechnique**, vol. 54, n. 2, p.151–154, 2004.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2020**. Disponível em: <<https://www.acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/>>. Acesso em: 01 de novembro de 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **EN ISO 17892-6: Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 6: Fall cone test**. European Committee for Standardization, Brussels: 2017.

JAFER, H.M.; ATHERTON, W.; SADIQUE, M.M.; RUDDOCK, F.M.; LOFFILL, E. Development of a new ternary blended cementitious binder produced from waste materials for use in soft soil stabilisation. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 516–528, 2018a.

JAFER, H.M.; ATHERTON, W.; SADIQUE, M.; RUDDOCK, F.; LOFFILL, E. “Stabilisation of Soft Soil Using Binary Blending of High Calcium Fly Ash and Palm Oil Fuel Ash”. **Applied Clay Science**, v.152, p. 323–32, 2018b.

JAMES, J., LAKSHMI, S.V.; PANDIAN, P.K. Strength and Index Properties of Phosphogypsum Stabilized Expansive Soil. **International Journal of Applied Environmental Sciences**, v.09, n. 5, p. 2721-2731, 2014.

KAZEMIAN, S. Organic Soils and Peats. In: Bobrowsky, P.T; Marker, B. **Encyclopedia of engineering geology**. Cham: Springer, 2018.

KEMPFERT, H-G.; GEBRESELASSIE, B. **Excavations and foundations in soft soils**. p. 576. Springer, Heidelberg, 2006.

KITAZUME, M.; GRISOLIA, M.; LEDER, E.; MARZANO, I.P.; CORREIA, A.A.S.; OLIVEIRA, P.J.V.; ÅHNBERG, H.; ANDERSSON, M. Applicability of Molding Procedures in Laboratory Mix Tests for Quality Control and Assurance of the Deep Mixing Method. **Soils and Foundations**, vol. 55, no 4, p. 761–77, 2015.

KITAZUME, M.; TERASHI, M. **The deep mixing method**. London: Taylor & Francis Group, 2013.

KOLHE, S. S.; CHANG, T.; CHEN, C.; SHIH, J. Potential Application of Thermally Treated Calcium Carbide Residue as Solid CaO Activator for No-Cement Slag-FGDG Composite. **Construction and Building Materials**, vol. 359, Elsevier, 2022.

KOHL, A.L.; NIELSEN, R. Chapter 7: Sulfur Dioxide Removal. In: **Gas Purification**. 5.ed, Houston/Texas: Gulf Publishing Company, 1997.

KONSTA-GDOUTOS, M.S., SHAH, S.P. Hydration and properties of novel blended cements based on cement kiln dust and blast furnace slag. **Cement Concr. Res.**, vol. 33 p.1269–1276, 2003.

KOUKOUZAS, N.; VASILATOS, C. Mineralogical and chemical properties of FGD gypsum from Florina, Greece. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 83, p. 20-26, 2008.

LEHNE, Johanna; PRESTON, Felix. Making concrete change: Innovation in low-carbon cement and concrete. **Chatham House**: London, UK, 2018.

LI, J.; ZHUANG, X.; QUEROL, X.; FONT, O.; MORENO, N. A review on the applications of coal combustion products in China. **International Geology Review**, v. 60, n. 5–6, p. 671–716, 2018.

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

LORENZO, G.A., BERGADO, D.T. Fundamental Parameters of Cement-Admixed Clay—New Approach. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, vol. 130, n.10, p. 1042–50. 2004.

LORENZO, G.A., BERGADO, D.T. Fundamental characteristics of cement-admixed clay in deep mixing. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol. 18, N. 2, abril de 2006.

MAICHIN, P.; JITSANGIAM, P.; NONGNUANG, T.; BOONSERM, K.; NUSIT, K., PRAAI, S.; BINAREE, T.; ARYUPONG, C. Stabilized High Clay Content Lateritic Soil Using Cement-FGD Gypsum Mixtures for Road Subbase Applications. **Materials**, vol. 14, n. 8, p. 1858, abril de 2021.

MAKUSA, G. P. **Soil Stabilization Methods and Materials in Engineering Practice**. Department of Civil, Environmental and Natural resources engineering, Division of Mining and Geotechnical Engineering, University of Technology, Lulea, Sweden, 2012.

MARZANO, I.P.; LEDER, E.; GRISOLIA, M.; DANISI, C. Laboratory study on the molding techniques for QC/QA process of a Deep Mixing work. In: **Proceedings of the 3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**. Nicosia, 2012.

MEHTA, P. Kumar.; MONTEIRO, Paulo. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MITCHELL, J.K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2005.

MUDLIAR, R., RAJESH, S. Effect of Addition of Phosphogypsum on Strength and Deformation Behavior of Expansive Soils. In: **Proceedings of Geo-Congress 2022**, American Society of Civil Engineers, v.335, p. 189–98, março de 2022.

NASCIMENTO, T.Z. **Comportamento em laboratório e em campo de uma argila muito mole estabilizada com cimento**. 2016. 189p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

PARK, C. G.; YUN, S.; BAVEYE, P.C.; YU, C. Effect of industrial by-products on unconfined compressive strength of solidified organic marine clayey soils. **Materials**, v. 8, n. 8, p. 5098–5111, 2015.

PICOLI, Hully Carvalho. 2020. **Estabilização de Solos com Coproduto de Coqueria FGD e Cimento Portland para uso em Camadas de Pavimentação**. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020.

POULLIKKAS, A. Review of Design, Operating, and Financial Considerations in Flue Gas Desulfurization Systems. **Energy Technology & Policy**, v.2, n. 1, 2015,13 p.

RODVINIJ, P.; RATCHAKROM, C. Effect of Cement Replacement By Fly Ash and FGD Gypsum on Strength of Subbase. **International Journal of GEOMATE**, v. 20, n. 80, p. 9–16, 2021.

RONQUIM, C.C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Embrapa Monitoramento por Satélite: Campinas, 2010.

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. 846–55, 2012.

SANCHES, S.I.D.P. (2012). **Reforço de solos moles de fundação de aterro em Deep Soil Mixing - Modelação de caso de estudo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012.

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, P. S. **Tecnologia de Argilas**. v. 1, ed.2. Editora Edgar Blücher: São Paulo, 1989.

SHUBBAR, A. A.; JAFER, H.; DULAIMI, A.; HASHIM, K.; ATHERTON, W.; SADIQUE, M. The development of a low carbon binder produced from the ternary blending of cement, ground granulated blast furnace slag and high calcium fly ash: An experimental and statistical approach. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 1051–1060, 2018.

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.

SCRIVENER, K. **Lecture 4: Aluminates and Microstructure**. 41p. 2021. Notas de aula.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Relatório Anual 2020**. 2020. Acesso em 01 de setembro de 2022. Disponível em <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2020.pdf>

SOBRAL, L.F.; BARRETO, M.C.V.; SILVA, A.J.; ANJOS, J.L. **Guia Prático para Interpretação de Resultados de Análises de Solo**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2nd ed, T. Telford, 1997.

TEIXEIRA, P.C., *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. Ed.3. Brasília: Embrapa, 2017.

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.

TERASHI, M. Theme lecture: deep mixing method – Brief state of the art. In: **14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Vol. 4, p. 2475–2478. Germany, Hamburg, 1997.

TERZAGHI, K., PECK, R.B., MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 3rd Edition, New York: John Wiley and Sons, Inc., 1996.

VAKILI, M.V.; CHEGENIZADEH, A.; NIKRAZ, H.; KERAMATIKERMAN, M. Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag. **Appl. Clay Sci.** v.124, p.243–251, 2016.

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.

WENYI, T.; SUPING, G.; WEI, X.; YOUXU, L.; ZIXIN, Z. Feature changes of mercury during the carbonation of FGD gypsum from different sources. **Fuel**, v. 212, p. 19-26, 2018

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.

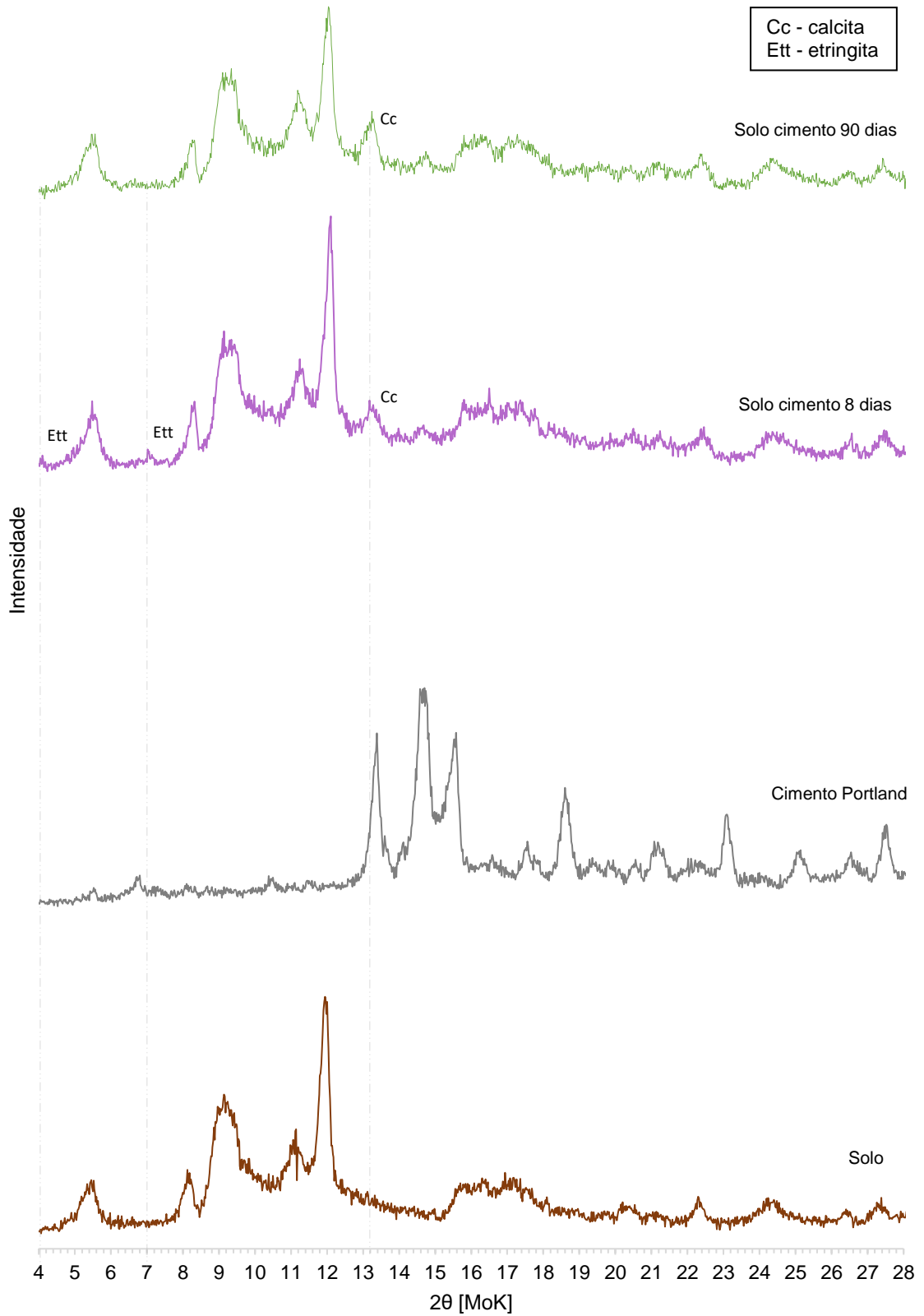
WU, J.; LIU, L.; DENG, Y.; ZHANG, G.; ZHOU, A.; XIAO, H. Use of Recycled Gypsum in the Cement-Based Stabilization of Very Soft Clays and Its Micro-Mechanism. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, vol. 14, n. 3, p. 909–21, 2022.

WU, J.; DENG, Y.; ZHANG, G.; ZHOU, A.; TAN, Y.; XIAO, H.; ZHENG, Q. A Generic Framework of Unifying Industrial By-products for Soil Stabilization. **Journal of Cleaner Production journal**, v. 321, September, 2021.

ZHANG, Y.; ZHANG, H.; ZHANG, X. Influence of calcined flue gas desulfurization gypsum and calcium aluminate on the strength and aft evolution of fly ash blended concrete under steam curing. **Materials**, v. 14, n. 23, 2021.

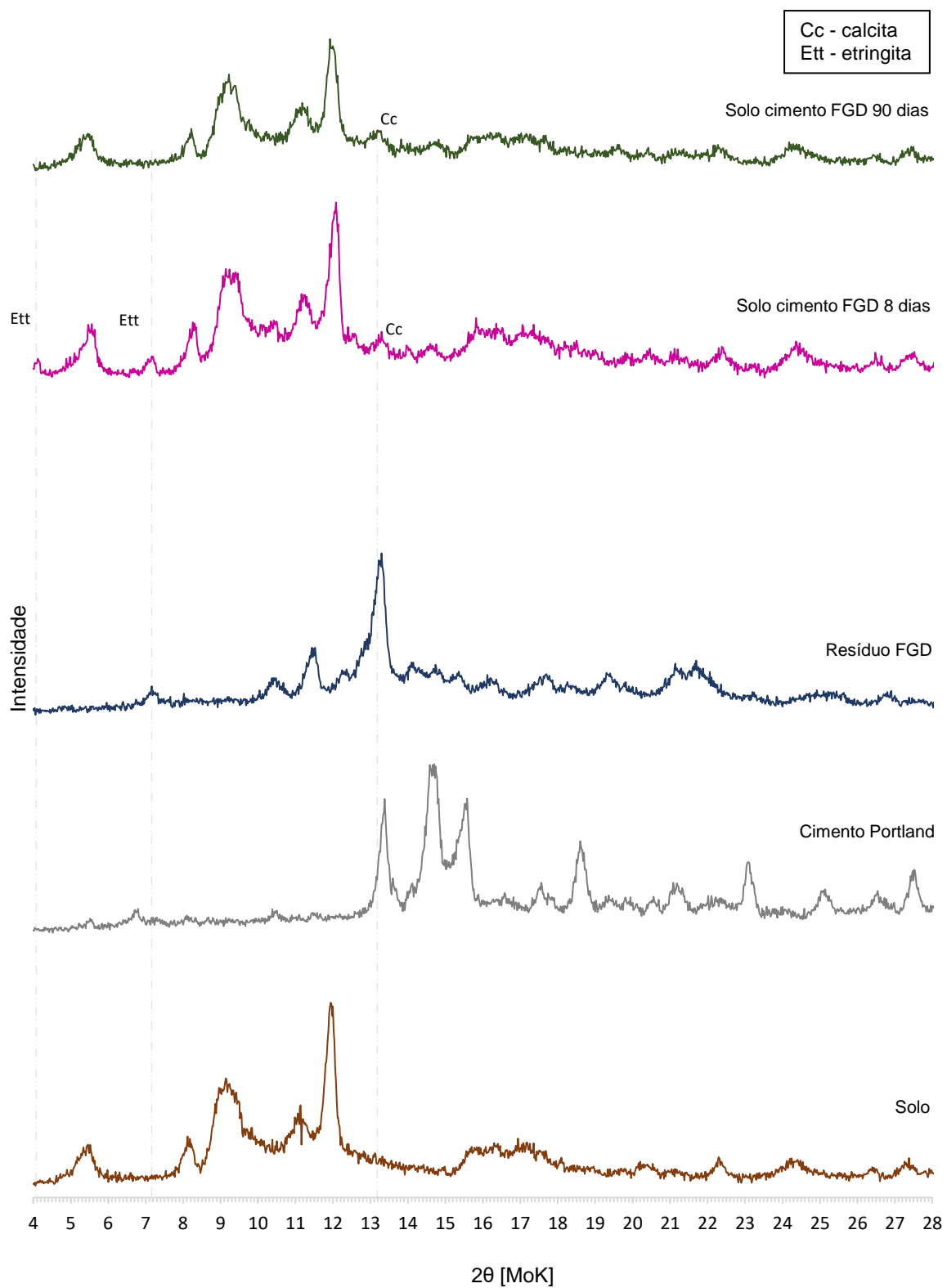
ANEXO I

Figura 43 - Difratoograma do solo puro, cimento Portland e composições “Solo cimento 8 dias” e “Solo cimento 90 dias”



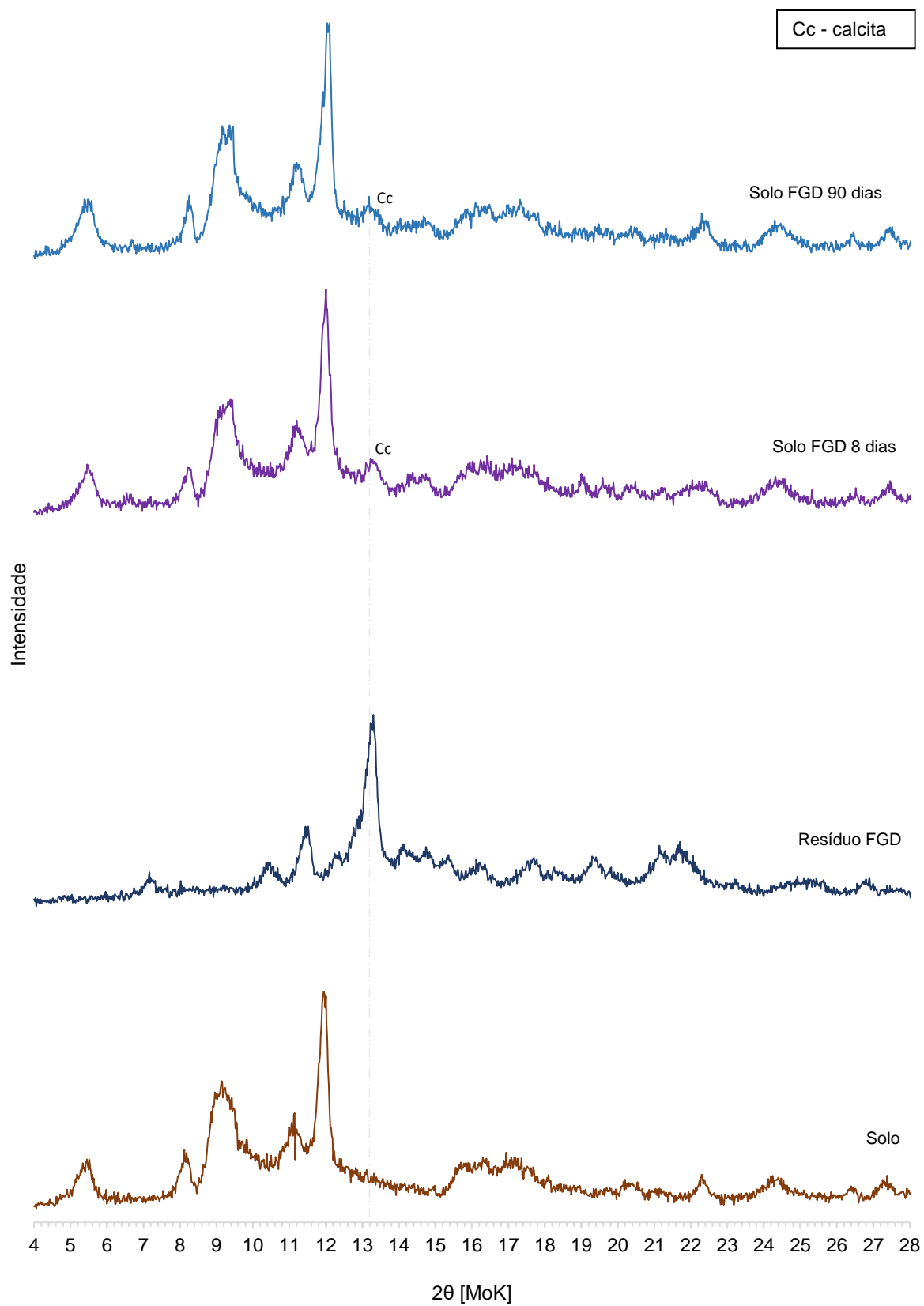
Fonte: Autora (2022).

Figura 44 – Difratoograma do solo, cimento Portland, resíduo FGD e composições “Solo cimento FGD 8 dias” e “Solo cimento FGD 90 dias”



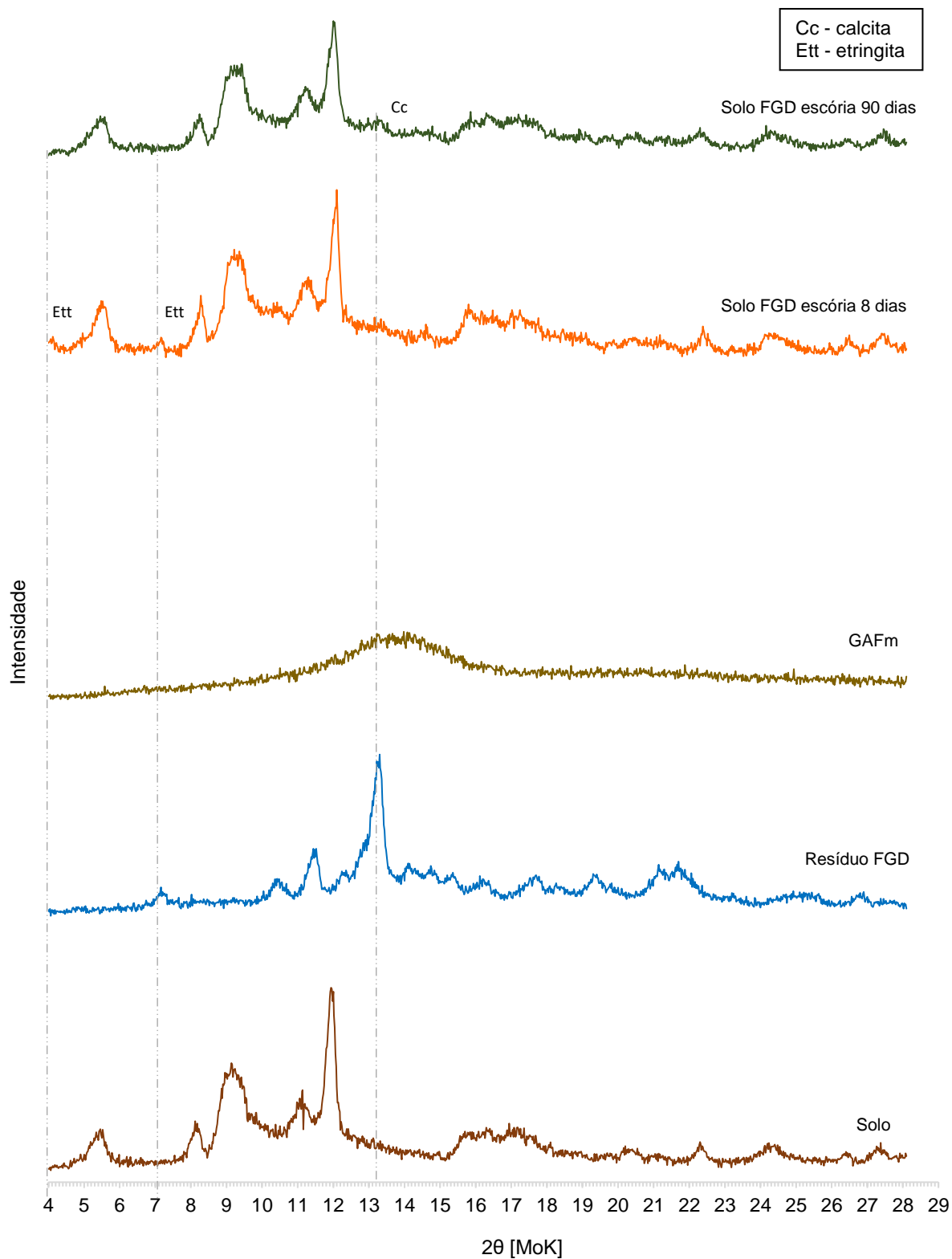
Fonte: Autora (2022).

Figura 45 – Difratoograma do solo, resíduo FGD e composições “Solo FGD 8 dias” e “Solo FGD Escória 90 dias”



Fonte: Autora (2022).

Figura 46 – Difratoograma do solo, resíduo FGD, escória granulada de alto forno moída e composições “Solo FGD escória 8 dias” e “Solo FGD escória 90 dias”



Fonte: Autora (2022).