

# Estabilização de Solos Argilosos por meio de Cimento Portland, Escória Granulada de Alto-Forno Moída e Pó de FGD

Anna Beatriz Pereira Vervloet

Estudante, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, [anna.vervloet30@gmail.com](mailto:anna.vervloet30@gmail.com)

Enza Raphaela Fachinetti Santos

Estudante, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, [enzafachinetti@gmail.com](mailto:enzafachinetti@gmail.com)

Patrício José Moreira Pires

Professor, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, [patricio.pires@gmail.com](mailto:patricio.pires@gmail.com)

Alana Costa Marin

Engenheira Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, [alanacmarin@gmail.com](mailto:alanacmarin@gmail.com)

Débora Ferrão Antonio

Engenheira Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, [deboraferraoantonio@gmail.com](mailto:deboraferraoantonio@gmail.com)

**RESUMO:** Objetivando a estabilização química de solos de baixa consistência de maneira sustentável, através da utilização de estabilizantes alternativos ao cimento Portland, minimizando sua utilização e simultaneamente reduzindo as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) associadas à indústria cimenteira, foram avaliados dois resíduos da indústria siderúrgica, Flue-Gas Desulfurization (FGD), proveniente de plantas de dessulfuração dos gases de combustão na etapa de coqueria, e Escória Granulada de Alto Forno Moída (GAFm), gerada na etapa de redução do ferro gusa e resfriada com água. O experimento constituiu-se na incorporação de 15% de estabilizantes em massa de solo seco, analisando os parâmetros físicos e mecânicos da utilização individual do FGD e em combinação com a GAFm, em um solo argiloso de baixa consistência. Dos resultados, as amostras contendo FGD e GAFm apresentaram notável aumento na resistência ao longo do tempo, contrastando com as amostras contendo apenas FGD, que exibiram comportamentos discrepantes quando comparadas as idades iniciais (até 90 dias) com idade avançada (495 dias), indicando redução considerável da resistência com o avanço da idade. Portanto, sugere-se que a combinação dos coprodutos representa uma solução eficaz no aprimoramento de solos de baixa consistência, sendo economicamente viável e ambientalmente sustentável.

**PALAVRAS-CHAVE:** Flue-Gas Desulfurization (FGD), Escória Granulada de Alto Forno Moída (GAFm), Estabilização de Solos, Solos de Baixa Consistência.

**ABSTRACT:** Aiming to chemical stabilization of soft soil in a sustainable way, through the use of alternative stabilizers to Portland cement, minimizing their use and simultaneously reducing carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions associated with the cement industry, two residues from steel industry, Flue-Gas Desulfurization (FGD), coming from combustion gas desulfurization plants in the coke oven stage, and Granulated Ground Blast Furnace Slag (GGBS), generated in the pig iron reduction stage and cooled with water. The experiment consists of the incorporation of 15% of stabilizers in dry soil mass, analyzing the physical and mechanical parameters of the individual use of FGD and in combination with GAFm, in a clayey soft soil. From the results, the samples containing FGD and GAFm showed a notable increase in resistance over time, contrasting with the samples containing only FGD, which exhibited discrepant behavior when comparing the initial ages (up to 90 days) with advanced ages (495 days), indicating a considerable reduction in resistance with advancing age. Therefore, it is suggested that the combination of coproducts represents an effective solution for improving soft soil, being economically viable and environmentally sustainable.

**KEYWORDS:** Flue-Gas Desulfurization (FGD), Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBS), Soil Stabilization, Soft Soil.

## 1 INTRODUÇÃO

Solos de baixa consistência, ou seja, que apresentam parâmetros de resistência não adequados para atender às solicitações de carga provenientes de pavimentação e fundações, por exemplo, são um desafio para a engenharia civil. Comumente presentes em regiões costeiras, esses solos carecem de intervenção para viabilizar sua utilização. Para tal problemática, uma solução eficaz é a estabilização química do solo, que consiste em provocar reações físico-químicas no mesmo por meio da adição de agentes estabilizantes, resultando na cimentação da matriz do solo original, alterando sua estrutura e promovendo melhoria nos parâmetros de resistência.

Atualmente, o cimento Portland é o ligante mais utilizado como solução para melhoramento de solos. Porém, segundo Lehne e Preston (2018), sua produção é responsável por cerca de 8% de toda a emissão mundial de CO<sub>2</sub>, o que implica na necessidade de se investigar produtos alternativos que sejam capazes de substituir parcial ou totalmente o cimento de maneira mais sustentável. Neste contexto, os coprodutos siderúrgicos ganham notoriedade pelo potencial de proporcionar um aumento na resistência do solo, ou apenas mantê-la, enquanto ampliam a destinação desses resíduos e garantem a redução da demanda das indústrias cimenteiras e, conseqüentemente, a redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

Assim, esta pesquisa visa analisar o comportamento de um solo de baixa consistência incorporado com resíduo FGD tanto individualmente quanto em combinação com a GAFm, tendo como ponto de partida estudos que indicam que a composição química desses coprodutos possuem propriedades cimentantes que podem contribuir para estabilização química do solo à partir de reações que aumentam a resistência e durabilidade do mesmo. Diante disso, foram desenvolvidos ensaios para compreender o comportamento mecânico e microestrutural das amostras de solo estabilizado.

### 1.1 Objetivo

Avaliar a viabilidade técnica do uso de dois resíduos da indústria siderúrgica, o Flue-Gas Desulfurization (FDG) e Escória Granulada de Alto Forno Moída (GAFm), como substitutos totais ou parciais do Cimento Portland para estabilização de um solo argiloso de baixa consistência.

## 2 METODOLOGIA

Utilizando-se um solo argiloso de baixa plasticidade, oriundo da cidade litorânea de Guarapari/ES, Brasil, foram preparadas 3 amostras distintas possuindo 15% de ligante em relação ao peso do solo puro e seco, sendo elas: Solo Cimento (SC), tendo como ligante o Cimento Portland CP V-ARI, Solo FGD (SF) e Solo FGD e GAFm (SFE), tendo em sua composição 7,5% de cada resíduo. A manipulação das amostras se deu em 5 etapas: preparação do solo, mistura, compactação, cura e extrusão. Foram conduzidos ensaios de Teor de Umidade, Granulometria e Limites de Consistência para caracterização das amostras, e ensaios de Compressão Simples para compreensão do comportamento mecânico das mesmas. Dessa forma, a análise foi conduzida em amostras submetidas a um período de cura submersa de 495 dias, comparando com os resultados obtidos no período de 90 dias.

## 3 RESULTADOS

Os resultados decorrentes da caracterização física e mecânica, bem como suas implicações, são apresentados a seguir. É importante ressaltar que, como componente analítico adicional para uma compreensão mais aprofundada, dados provenientes da pesquisa realizada por Marin (2022) também foram incorporados.

### 3.1 Teor de Umidade

A fim de se investigar o consumo de água nas amostras, que pode estar relacionado com as reações químicas entre solo e estabilizantes, foram realizados ensaios de teor de umidade para cada uma delas. Diante dos resultados apresentados por Marin (2022) para os ensaios realizados até os 90 dias, notou-se uma

redução gradual em todas as composições quando comparado com o solo puro, sendo a amostra contendo cimento Portland a que apresentou maior declínio (Figura 1).

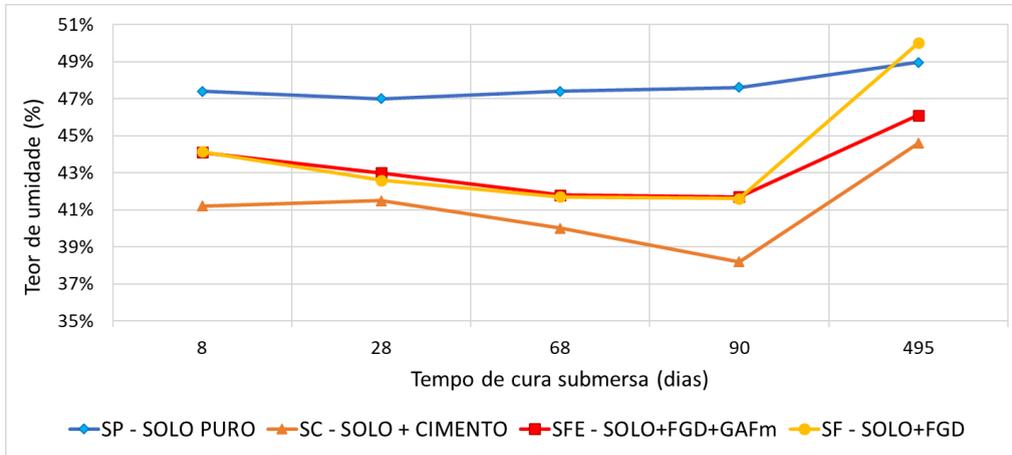
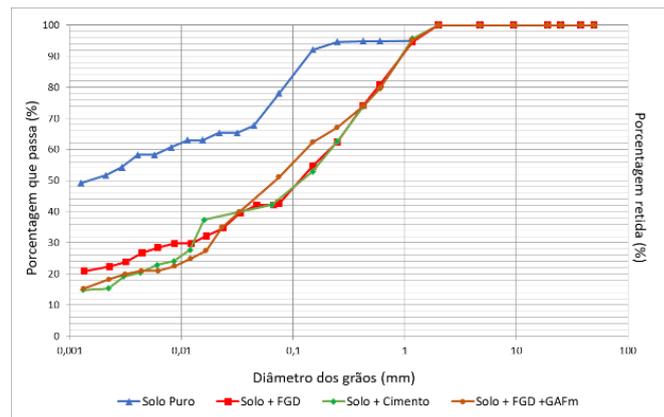
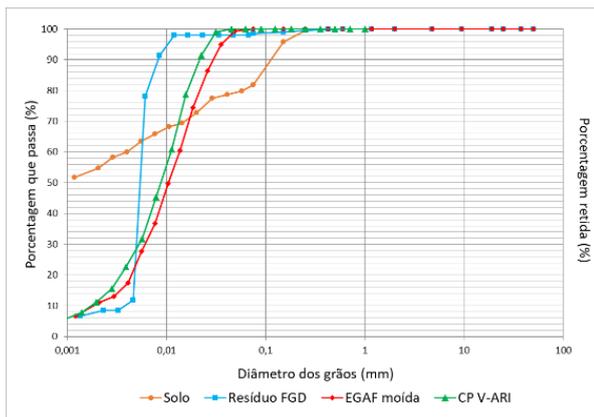


Figura 1. Teor de umidade das amostras versus tempo de cura submersa.

Após um período de 495 dias de imersão das amostras, foi evidenciado um acréscimo nos teores de umidade em todas as amostras em comparação aos valores registrados aos 90 dias. A amostra “SP” apresentou aumento de 2,9%, enquanto as misturas “SFE”, “SC” e “SF” apresentaram 10,4%, 15,8% e 19,3%, respectivamente. Destacando-se, assim, a amostra “SFE”, com menor incorporação de água.

### 3.2 Granulometria

No que tange à granulometria, segundo Marin (2022), os resíduos e o CP V-ARI foram classificados como uniformes, enquanto a amostra “SP” como mal graduada (Figura 2). Após 495 dias, foram ensaiadas as misturas “SC”, “SF” e “SFE”, que apresentaram-se como mal graduadas (Figura 3).



Figuras 2 e 3. Curva granulométrica dos resíduos, CP V-ARI e “SP” e Curva granulométrica das misturas “SC”, “SF” e “SFE”.

### 3.3 Limites de Consistência

Quanto aos Limites de Consistência, a incorporação de ligantes resultou em aumento no Limite de Liquidez (LL) e Plasticidade (LP) quando em comparação com “SP”. É notável que após 495 dias, as amostras “SC” e “SFE” apresentaram resultados relativamente próximos, enquanto “SF” apresentou menores (Figura 4).

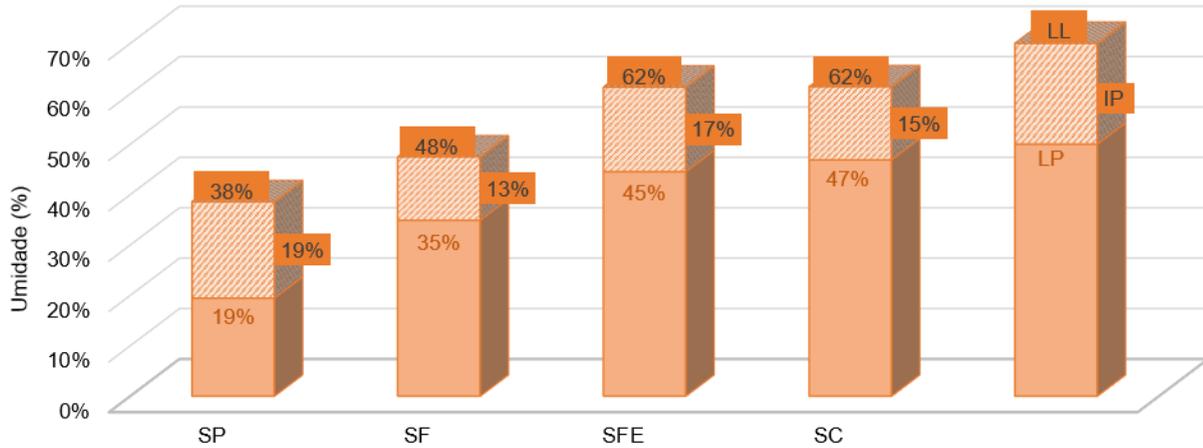


Figura 4. Limites de consistência após 495 dias de cura submersa.

Ao se comparar os resultados de LL obtidos aos 90 e 495 dias de cura, constata-se que apenas a amostra “SFE” apresentou aumento (aproximadamente 7%), enquanto “SC” e “SF” reduziram 4% e 22%, respectivamente. Já na análise de LP, pôde-se observar um aumento em todas as misturas quando comparadas ao solo puro, onde “SC” apresentou o maior valor (47%) e “SF” o menor (35%).

O Índice de Plasticidade (IP), aos 90 dias, segundo Marin (2022), apresentou valores de 27%, 23% e 17% para “SF”, “SFE” e “SC”, respectivamente, e aos 495 dias todas as misturas apresentaram redução. De acordo com Abbey, Ngambi e Coakley (2016), é esperado que o IP diminua à medida que o teor de estabilizante aumenta, indicando um aumento na resistência. Portanto, a redução observada nas amostras em comparação com “SP”, está em concordância com a hipótese de maior resistência.

Por fim, realizando uma análise mais abrangente das misturas segundo a classificação do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), tem-se:

- “SC” e “SFE” são classificadas dentro do grupo CH, que corresponde às argilas inorgânicas de alta plasticidade. Essas amostras são comumente referidas como "argilas gordas" e se caracterizam por apresentar uma elevada plasticidade, alta capacidade de retenção de água e uma notável suscetibilidade a variações de umidade.
- “SP” e “SF” são classificadas no grupo CL, que abrange as argilas inorgânicas de baixa a média plasticidade. Este grupo engloba uma variedade de solos, incluindo argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas e argilas magras. Os solos deste grupo apresentam uma plasticidade moderada, sendo menos suscetíveis a variações extremas de umidade e textura em comparação com o grupo CH.

### 3.4 Compressão Simples

No estudo conduzido por Marin (2022), foi observado um aumento progressivo na resistência ao longo do tempo em relação à amostra "SF", conforme Figura 5. Aos 90 dias, essa composição apresentou uma resistência à compressão de 614,7kPa, representando uma resistência 2049 vezes maior que a resistência apresentada pelo solo puro (3kPa). No entanto, ao atingir o dia 495, um novo ensaio de Compressão Simples na mesma amostra indicou uma resistência de 247,4 kPa, correspondendo a uma redução de 59,7% em relação à registrada aos 90 dias.

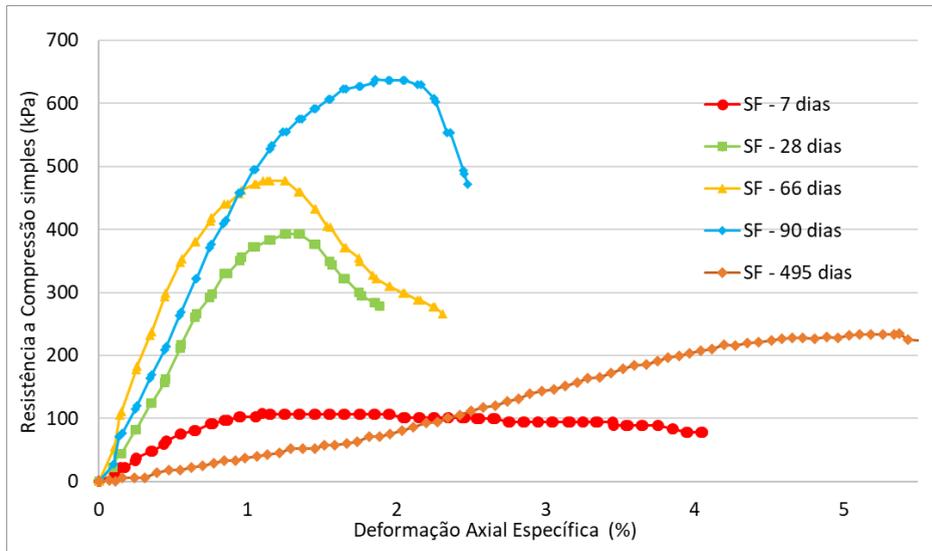


Figura 5. Resistência à compressão não confinada da amostra “SF” em diferentes idades.

Já a amostra “SFE”, aos 90 dias apresentou resistência à compressão de 232,4 kPa e, aos 495 dias, aumentou expressivamente 648%, resultando em uma resistência de 1738,1 kPa, conforme Figura 6.

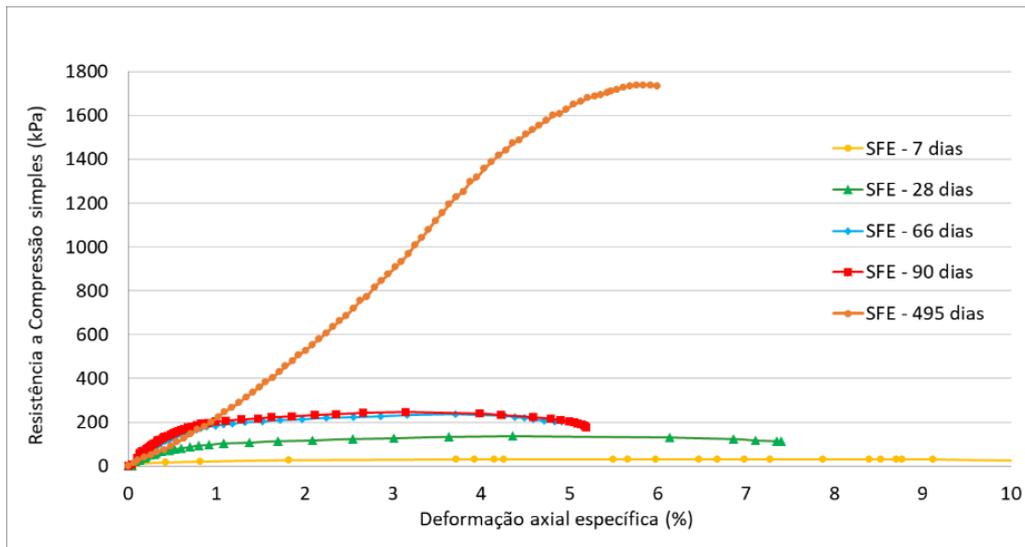


Figura 6. Resistência à compressão não confinada da amostra “SFE” em diferentes idades.

Quanto à amostra “SC”, após um período de cura submersa de 495 dias, foi registrado um aumento de cerca de 14% em sua resistência à compressão em relação aos 90 dias, conforme Figura 7. Contudo, este aumento não se destacou em comparação com as outras amostras do estudo.

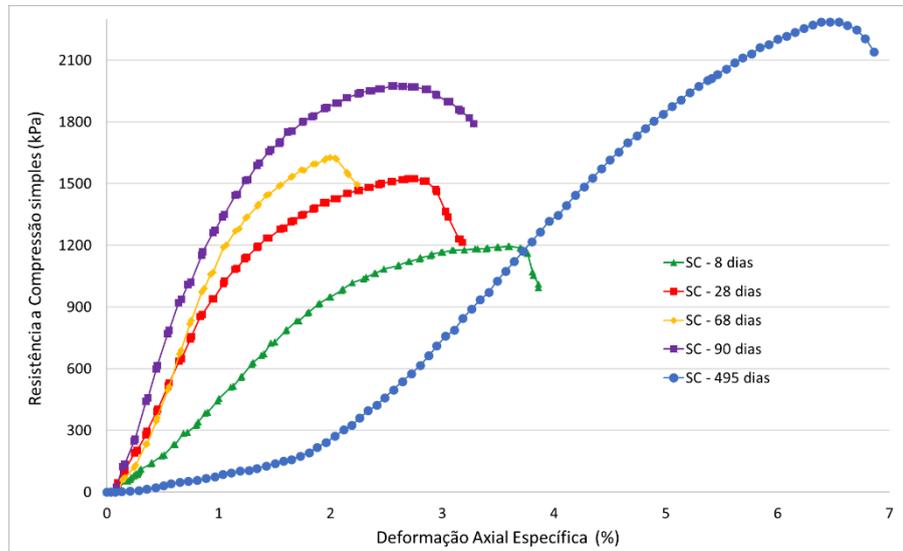


Figura 7. Resistência à compressão não confinada da composição “SC” em diferentes idades.

#### 4 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados, o aumento do teor de umidade nas amostras pode estar associado ao desenvolvimento de etringita em argilas estabilizadas com agentes cimentantes, que é favorecido pela alta porosidade e poros relativamente grandes das argilas. Neste contexto, a formação da etringita não é considerada problemática, como no caso da etringita secundária em matrizes cimentícias tradicionais, uma vez que, segundo Wu et al. (2022), sua formação tem capacidade de preencher os poros existentes, aumentando absorção de água e induzindo efeito cimentante, o que resulta em uma maior densidade após a secagem e, consequentemente, uma resistência mecânica mais elevada. Através da análise de Difratoograma de Raio-X, realizado por Marin (2022), foi constatada presença de etringita aos 8 dias apenas nas amostras “SC” e “SFE”. Entretanto, sua presença não foi observada em fases posteriores, sugerindo a possibilidade de que a mesma possa ter sido consumida ao longo do tempo, possivelmente passando por um processo de desestabilização. Diante disso, o comportamento de elevada resistência nas idades iniciais observado na amostra “SF” pode estar relacionado à presença de etringita nas idades posteriores a 8 dias (28 e 66 dias) e o seu declínio pode estar associado com o consumo da mesma nas fases finais.

Além disso, devido ao período de 495 dias de submersão, faz-se necessário considerar que as amostras absorveram gradualmente água, contribuindo para o notável aumento nos teores de umidade quando comparados com os valores inicialmente registrados. Nesse sentido, a redução na resistência da amostra “SF” pode estar também associada ao aumento do teor de umidade, o qual revelou um acréscimo de aproximadamente 19,3% em relação ao período de 90 dias. Entretanto, ao se analisar os resultados da amostra “SFE”, percebe-se que mesmo com um acréscimo de 10,4% no teor de umidade, a mesma apresentou aumento na resistência. Dessa forma, em termos de resistência, os resultados da combinação de FGD e GAFm apresentam resultados mais otimistas que somente com FGD, provavelmente por essa combinação ativar reações de hidratação que não podem ser observadas quando o solo está apenas adicionado de FGD.

A adição de FGD, GAFm e CP-V no solo pode não ter resultado em reações de hidratação completas, possivelmente afetando a estrutura cristalina do solo e, embora possa ter contribuído para melhorias na resistência do solo devido às trocas catiônicas (CTC), a longo prazo, pode não ter influenciado significativamente os limites de liquidez (LL) e plasticidade (PL). O aumento dos valores dos limites de consistência do solo na presença desses cimentantes também pode ser atribuído à natureza predominantemente fina desses materiais, os quais exibem propriedades de plasticidade.

Por fim, os resultados da amostra “SC” sugerem que após um período de tempo prolongado, o aumento na resistência à compressão da amostra tende a cessar ou reduzir consideravelmente. Assim,

conclui-se que os coprodutos FGD e GAFm possuem potencial para serem empregados como substitutos tanto parcial quanto total do cimento Portland em procedimentos de estabilização de solos de baixa consistência, sendo uma alternativa viável e ambientalmente sustentável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 12025. *Solo – Cimento – Ensaio de compressão simples de corpos cilíndricos – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Marin, A.C. (2022) *Estabilização de solo de baixa consistência com resíduo proveniente de planta de dessulfuração dos gases de combustão*. In: Mestrado em Engenharia Civil - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- Picoli, H.C. (2020) *Estabilização de Solos com Coproduto de Coqueria FGD e Cimento Portland para uso em Camadas de Pavimentação*. In: Mestrado em Engenharia Civil - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- Wu, J.; Liu, L.; Deng, Y.; Zhang, G.; Zhou, A.; Xiao, H. (2022) Use of Recycled Gypsum in the Cement-Based Stabilization of Very Soft Clays and Its Micro-Mechanism. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14 (3), p. 909–921.
- Abbey, S.J., Ngambi, S., Coakley, E. (2016) Effect of Cement and by-Product Material Inclusion on Plasticity of Deep Mixing Improved Soils. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 7 (5), p.265–274.
- Lehne, J., Preston, F. (2018) *Making concrete change: Innovation in low-carbon cement and concrete*. Chatham House, London, UK.