



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
COLEGIADO DE ENGENHARIA CIVIL
PROJETO DE GRADUAÇÃO

CATARINA VIEIRA BOTELHO

UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA MCT PARA O ESTUDO DO
MELHORAMENTO DE SOLOS LATERÍTICOS ESTABILIZADOS COM
COPRODUTO SIDERÚRGICO TIPO FGD E CIMENTO PORTLAND
APLICADO EM CAMADAS DO PAVIMENTO

VITÓRIA
2021

CATARINA VIEIRA BOTELHO

**UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA MCT PARA O ESTUDO DO
MELHORAMENTO DE SOLOS LATERÍTICOS ESTABILIZADOS COM
COPRODUTO SIDERÚRGICO TIPO FGD E CIMENTO PORTLAND
APLICADO EM CAMADAS DO PAVIMENTO**

Projeto de Graduação apresentado ao corpo docente do Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires.

VITÓRIA

2021

CATARINA VIEIRA BOTELHO

**UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA MCT PARA O ESTUDO DO MELHORAMENTO
DE SOLOS LATERÍTICOS ESTABILIZADOS COM COPRODUTO SIDERÚRGICO
TIPO FGD E CIMENTO PORTLAND APLICADO EM CAMADAS DO PAVIMENTO**

Projeto de Graduação apresentado ao corpo docente do Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada no dia 15 de outubro de 2021.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires
Orientador - UFES

Prof. Dr^a. Karla Maria Wingler Rebelo
Examinador interno – UFES

Prof. Dr. Guilherme Bravo de Oliveira
Almeida
Examinador externo - UFS

AGRADECIMENTOS

Chegado ao fim dessa etapa, permanece o imenso sentimento de gratidão a todos com quem pude contar ao longo desses dias de luta e de glória. Em especial eu agradeço, primeiramente, a Deus, meu aliado nesse sonho, por acolher minhas lágrimas e dar-me forças diante às dificuldades, e a mãezinha do céu, Maria, pelo seu cuidado e proteção diária.

Aos meus pais, Eder e Marília, pelo amor, apoio, zelo e sacrifícios em prol da minha felicidade, tudo o que sou e conquisto é graças ao cuidado e ensinamentos dos dois. Aos meus avós, particularmente vovinha Edinha, por deixar o fardo mais leve com um abraço, um ditado popular e um arroz da noite, o combo perfeito. A minha irmã, Gabriela, aos meus primos Ana Clara, Alba e Moreno, companheiros diários, e a toda minha família, pelo suporte e momentos de alegria ao longo dessa caminhada.

Agradeço ao meu professor orientador, Patrício Pires, pelo direcionamento e incentivo no desenvolvimento dessa pesquisa e da educação de forma geral, possibilitando o progresso do setor da geotecnia. Aos técnicos do laboratório de Geotecnia e Pavimentação, Sidneidy e Ana Carolina, por toda ajuda na realização dos ensaios.

A minha sincera gratidão ao aluno Leonardo Belmond, minha dupla clandestina do projeto de graduação, por ter doado seu tempo, principalmente suas manhãs de sábado, e conhecimento a execução dos ensaios, impulsionando a conclusão desse estudo.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos meus amigos, minha segunda família, vocês foram meu apoio e suporte nas madrugadas de estudo e de risadas. Obrigada pela companhia, experiências compartilhadas, por acreditarem e confiarem em mim durante esse processo de crescimento pessoal e profissional que foi a graduação.

*“Não podemos fazer grandes coisas na terra. Tudo
o que podemos fazer são pequenas coisas com
muito amor.”*

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

BOTELHO, Catarina Vieira. **Utilização da metodologia MCT para o estudo do melhoramento de solos lateríticos estabilizados com coproduto siderúrgico tipo FGD e cimento Portland aplicado em camadas do pavimento**. 2021. Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021.

O Brasil conta com apenas 12,4% das estradas pavimentadas, cenário motivado principalmente pelo custo por quilometro de pavimento. Isto posto, a ocorrência de solos tropicais infere uma alternativa, os pavimentos de baixo custo, cujo principal insumo são os solos lateríticos. A verificação mais representativa do desempenho desse material é realizada com o auxílio da metodologia MCT (*Tropical Compact Miniature*), em conjunto a outras caracterizações necessárias. Alguns solos em seu estado natural não exibem propriedades adequadas para seu uso, no entanto, é possível empregar procedimentos de estabilização com a incorporação de aditivos como, por exemplo, o cimento e a cal. Alternativamente, alguns coprodutos siderúrgicos como o pó de FGD, estão sendo aplicados no melhoramento químico dos solos. O pó de FGD (*Flue Gas Desulfurization*) é gerado pelo processo de dessulfuração, redução do teor de óxido de enxofre, SO_2 , dos gases produzidos na queima de combustível natural. Este projeto de graduação visa avaliar as propriedades dos solos lateríticos melhorados quimicamente com a adição do coproduto pó de FGD comparado com os efeitos do cimento Portland, para fins de pavimentação. Assim, foram determinados dois teores de massa para o cimento e pó FGD, e realizadas as caracterizações, física, hidráulica e mecânica, referentes ao solo puro e as misturas. Dentre as propriedades analisadas destacam-se alguns resultados como o aumento da umidade ótima, relativos ao Mini-Proctor, com a adição do cimento e pó FGD; o considerável aumento do Mini-CBR, capacidade de suporte, proporcional a fração integrada; a constância do coeficiente de permeabilidade independentemente da amostra ensaiada; o aumento considerável da expansão para a maior porcentagem do pó FGD. Os resultados indicam, preliminarmente, que o pó FGD atende aos critérios necessários para aplicação na camada da sub-base, viabilizando o desenvolvimento mais sustentável da pavimentação.

Palavras-chave: Pavimento. FGD. Cimento Portland. Estabilização de solos. MCT.

ABSTRACT

BOTELHO, Catarina Vieira. Use of the MCT methodology to study the improvement of lateritic soils stabilized with FGD-type steel co-product and Portland cement applied in pavement layers. 2021. Graduation Project (Bachelor of Civil Engineering), Federal University of Espírito Santo, Vitória, 2021.

Brazil has only 12.4% of its roads paved, a scenario mainly driven by the cost per kilometer of pavement. That said, the occurrence of tropical soils infers an alternative, low-cost pavements, whose main input is lateritic soils. The most representative verification of the performance of this material is carried out with the aid of the MCT (Tropical Compact Miniature) methodology, together with other necessary characterizations. Some soils in their natural state do not exhibit adequate properties for their use, however, it is possible to employ stabilization procedures with the incorporation of additives such as cement and lime. Alternatively, some steelmaking co-products, such as FGD powder, are being used to chemically improve soils. The FGD (Flue Gas Desulfurization) powder is generated by the desulfurization process, reducing the content of sulfur oxide, SO_2 , of the gases produced in the burning of natural fuel. This graduation project aims to evaluate the properties of chemically improved lateritic soils with the addition of FGD powder co-product compared to the effects of Portland cement, for paving purposes. Thus, two mass contents were determined for cement and FGD powder, and physical, hydraulic and mechanical characterizations were carried out, referring to pure soil and mixtures. Among the properties analyzed, some results stand out, such as an increase in the optimum humidity, relative to the Mini-Proctor, with the addition of cement and FGD powder; the considerable increase of the Mini-CBR, support capacity, proportional to the integrated fraction; the constancy of the permeability coefficient regardless of the sample tested; the considerable increase in expansion to the highest percentage of FGD powder. The results indicate, preliminarily, that the FGD powder meets the necessary criteria for application in the sub-base layer, enabling a more sustainable development of the pavement.

Keywords: Pavement. FGD. Portland cement. Soil stabilization. MCT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura pavimento flexível.....	21
Figura 2 - Estrutura pavimentos rígidos	21
Figura 3 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semiflexíveis	22
Figura 4 - Estabilização granulométrica com brita graduada simples	23
Figura 5 - Realização do ensaio CBR das 12 amostras.....	25
Figura 6 - Massa específica aparente seca máxima das amostras.....	26
Figura 7 - Umidade ótima das amostras	27
Figura 8 - Índice de Suporte Califórnia (ISC) das amostras	27
Figura 9 - Expansão das amostras.....	28
Figura 10 - Processo de produção do aço	32
Figura 11 - Esquema produção pó FGD semiseco.....	34
Figura 12 - Perfil esquemático de ocorrência de solos em ambiente tropical	38
Figura 13 - Corte rodoviário, com camada laterítica sobrejacente à camada saprofítica de origem sedimentar, com as correspondentes microestruturas	38
Figura 14 - Fotografia de MEV da microestrutura de um solo laterítico	40
Figura 15 - Fotografia de MEV da microestrutura de um solo saprofítico	40
Figura 16 - Gráfico da classificação de solos MCT	43
Figura 17 – MEV cascalho laterítico sem estabilização	45
Figura 18 – MEV cascalho laterítico com 2% de cimento (nota-se a formação de agulhas resultantes da hidratação do cimento)	45
Figura 19 - Resíduo do processo de dessulfuração	47
Figura 20 - Estados característicos de consistência dos solos finos e os Limites de Atterberg.....	50
Figura 21 - Compactador do ensaio Mini-MCV	52
Figura 22 - Perda de massa por imersão	53
Figura 23 - Ensaio de permeabilidade com carga variável.....	55
Figura 24 - Mini-Proctor.....	56
Figura 25 - Ensaio de penetração Mini-CBR	57
Figura 26 - Corpos de prova ensaiados	57
Figura 27 - Ensaio de expansibilidade	59
Figura 28 - Curvas granulométricas das amostras.....	61
Figura 29 - Massa específica real dos grãos.....	63

Figura 30 - Limites de Consistência	65
Figura 31 - Limite de Liquidez com 7 dias	66
Figura 32 - Limite de Plasticidade com 7 dias	67
Figura 33 - Variação do Índice de Plasticidade	67
Figura 34 – Gráfico de classificação MCT	70
Figura 35 - Coeficiente médio de Permeabilidade.....	71
Figura 36 - Variação do coeficiente de permeabilidade em função da umidade de compactação	72
Figura 37 - Variação do coeficiente de permeabilidade em função da umidade de compactação	73
Figura 38 - Curvas de compactação Mini-Proctor	74
Figura 39 - Massa Específica Aparente Seca Máxima e Umidade Ótima das amostras.....	75
Figura 40 - Curvas do Mini-CBR de acordo a umidade das amostras	76
Figura 41 – Mini-CBR em acordo com umidade ótima do solo	77
Figura 42 - Curvas de expansão das amostras.....	78
Figura 43 - Expansão das amostras na umidade ótima do solo	79
Figura 44 - Expansibilidade das amostras	80
Figura 45 - Zona ótima do Solo Puro	83
Figura 46 - Zona ótima da mistura com 1,5% de Cimento	84
Figura 47 - Curvas da amostra com 1,5% de pó FGD	85
Figura 48 - Zona ótima da mistura com 3,0% de Cimento	86
Figura 49 - Zona ótima da mistura com 3,0% de pó FGD	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exigências para o SAFL	29
Tabela 2 - Limites de composição do cimento Portland	30
Tabela 3 - Composição química FGD	35
Tabela 4 - Características do FGD	36
Tabela 5 - Limites de expansão para camadas de base e sub-base	58
Tabela 6 - Granulometria das amostras	62
Tabela 7 - Limites de consistência Picoli (2020)	66
Tabela 8 - Classificação SUCS das amostras.....	68
Tabela 9 - Classificação AASHTO das amostras	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Grupos da Classificação MCT	43
Quadro 2 – Misturas estudadas	47
Quadro 3 - Programa experimental	48

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Cimento Portland
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ES	Espírito Santo
EUA	Estados Unidos da América
FGD	<i>Flue Gas Desulfurization</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
HBR	<i>Highway Research Board</i>
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
IG	Índice de grupo
MCT	<i>Tropical Compact Miniature</i>
MCV	<i>Moisture Condition Value</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFS	Universidade Federal de Sergipe
EGAF	Escória granulada de alto-forno
MP	Material pozolânico
MC	Material carbonático
SC	Sulfato de cálcio
MEAS	Massa específica aparente seca máxima

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	17
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	OBJETIVO GERAL.....	18
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3	ORGANIZAÇÃO DO PROJETO DE GRADUAÇÃO.....	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	PAVIMENTAÇÃO.....	20
2.1.1	ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	23
2.1.2	ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA	24
2.1.2.1	CIMENTO PORTLAND	29
2.1.2.2	<i>FLUE GAS DESULFURIZATION</i> (FGD).....	31
2.2	PAVIMENTO DE BAIXO CUSTO.....	36
2.2.1	SOLO LATERÍTICO.....	37
2.2.1.1	CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS.....	41
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	45
3.1	MATERIAIS.....	45
3.1.1	SOLO.....	45
3.1.2	CIMENTO	46
3.1.3	PÓ FGD	46
3.2	MÉTODOS	47
3.2.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	49
3.2.1.1	GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO E SEDIMENTAÇÃO.....	49
3.2.1.2	MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS	49
3.2.1.3	LIMITES DE CONSISTÊNCIA	50
3.2.1.4	TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA.....	51

3.2.1.5	MINI-MCV	51
3.2.1.6	PERDA DE MASSA POR IMERSÃO	52
3.2.1.7	CLASSIFICAÇÃO	53
3.2.2	CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA	54
3.2.2.1	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE	54
3.2.3	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	55
3.2.3.1	MINI-PROCTOR	55
3.2.3.2	MINI-CBR E EXPANSÃO	56
3.2.3.3	EXPANSIBILIDADE	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	60
4.1.1	GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO E SEDIMENTAÇÃO	60
4.1.2	MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS	63
4.1.3	TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA	64
4.1.4	LIMITES DE CONSISTÊNCIA	64
4.1.5	CLASSIFICAÇÃO	68
4.1.5.1	Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)	68
4.1.5.2	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)</i>	69
4.1.5.3	<i>Tropical Compact Miniature (MCT)</i>	69
4.2	CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA	70
4.2.1	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE	70
4.3	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	74
4.3.1	COMPACTAÇÃO	74
4.3.2	MINI-CBR	76
4.3.3	EXPANSÃO	78
4.3.4	EXPANSIBILIDADE	80

4.4	EFEITO DA COMPACTAÇÃO E UMIDADE	81
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
5.1	CONCLUSÃO	88
5.2	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

1 INTRODUÇÃO

A malha rodoviária brasileira, encarregada pela movimentação de aproximadamente 60% das mercadorias e 90% dos passageiros, enfrenta diversos problemas com as altas taxas de deficiência no pavimento e diminuta densidade de rodovias pavimentadas, apenas 12,4%. Em contrapartida, a quantidade de veículos aumentou 63,6% de 2009 a 2017, chegando a quase 100 milhões de veículos em circulação. (CNT, 2018).

O desenvolvimento das extensões rodoviárias de qualidade é essencial para o crescimento do país. Entre os modais de transportes, o terrestre é o que apresenta maior valor de produção e maior faturamento. Segundo dados da Pesquisa Mensal de Serviços e da Pesquisa Anual de Serviços, esse segmento faturou R\$ 233 bilhões em 2016, o que representou 56% do faturamento do setor. (FIESP, 2017). Em vista disso, é incontestável a necessidade de ampliação da malha rodoviária de qualidade, disposto ao aumento da capacidade produtiva e promoção social do país.

Para mais, o elevado custo da implantação de novas malhas rodoviárias e a redução de investimentos no setor de infraestrutura, apenas 1,55% do produto interno bruto (Globo, 2021), inviabiliza o desenvolvimento acelerado dessa categoria. Nogami e Villibor propuseram em 1995, uma alternativa para esta questão, os pavimentos de baixo custo, cujo insumo principal é solo tropical local.

Os solos lateríticos são característicos de regiões com clima tropical úmido, logo, também são conhecidos como solos tropicais. A associação de elevadas temperatura e umidade ao intenso processo de intemperismo, atribui peculiaridades a esses solos, como a presença do argilomineral caulinita envolto por hidróxidos e óxidos de ferro e alumínio e o caráter concrecionado. Essas particularidades elevam a sua capacidade de suporte e permitem a sua aplicação nas camadas do pavimento.

Por essa razão, a metodologia MCT estabelece alguns ensaios que analisam a possibilidade de aplicação desses solos nas camadas dos pavimentos, viabilizando assim uma alternativa para a construção de pavimentos de baixo custo.

Em alguns casos cujos parâmetros naturais do solo não são suficientes para atender os critérios determinados pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagens, pode-se incorporar material, naturais ou artificiais, com resistência superior, proporcionando a melhora do desempenho do solo.

De acordo Dias (2012), o melhoramento das características do solo consiste no emprego de qualquer processo de natureza física, química, físico-química ou mecânica, disposto a modificar as suas propriedades. A escolha do processo e material deve ser capaz de inferir um comportamento satisfatório ao solo frente às solicitações previstas.

Um dos métodos de melhoramento mais usados é a estabilização química, na qual são incorporadas frações de aditivos, por exemplo, o cimento e a cal ao solo. Sabe-se que ao longo da fabricação do aço são produzidos diversos resíduos como as escórias de aciaria e alto forno, e o pó de FGD. Logo, alguns estudos apontam a possibilidade do uso desses resíduos siderúrgicos como substituição, total ou parcial, do cimento e da cal.

Tendo como exemplo, o pó de FGD, produto do processo de dessulfurização, é rico em óxido de cálcio tal qual a cal, podendo ser uma ótima alternativa para a estabilização dos solos. Além dos benefícios quanto ao desempenho e a eficiência, a aplicação desse coproduto implica ações fundamentais a preservação do meio ambiente com a redução do uso de recursos naturais, associada à reutilização e reciclagem dos resíduos industriais.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA

Em meio a uma crise ambiental sem precedentes, podendo comprometer desde recursos naturais a gerações futuras, o progresso da pavimentação é inevitável e necessário para o desenvolvimento do país. Dessa forma, é

fundamental estudar e implementar o crescimento sustentável, em foco na presente pesquisa, com o uso de adições como o pó de FGD.

A comprovação científica das características como as propriedades física e químicas do pó FGD reduz as discriminações acerca do tema, e incentiva o emprego do mesmo no quesito dos solos melhorados. Além disso, a avaliação do desempenho das misturas auxiliado pela metodologia MCT induz a tomadas de decisão mais assertivas ao trabalhar-se com solos lateríticos.

Em vista disso, o presente de trabalho pretende, como o estudo da estabilização de solos lateríticos com adições de cimento ou pó FGD, apresentar uma alternativa assertiva no tratamento de solos para aplicação nas camadas de base e sub-base do pavimento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem por objeto geral avaliar as propriedades físicas e mecânicas de um solo laterítico melhorados quimicamente com a incorporação de cimento Portland CPIII 40 RS e pó de FGD, para fins de pavimentação.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mensurar os teores ótimos obtido pela compactação dos corpos de prova com solo puro e estabilizados com o cimento Portland ou pó de FGD, no compactador em miniatura, Mini-Proctor.
- Avaliar os efeitos da adição de diferentes percentagens de cimento ou pó FGD, na condutividade hidráulica da mistura.
- Delimitar uma região ótima de trabalho para todas as amostras limitada pelo Mini-CBR e expansão, fundamentado em trabalhos realizados com a adoção da metodologia MCT.

- Analisar as alterações nas propriedades físicas e mecânicas, motivadas pelo aumento no teor de umidade das amostras.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO PROJETO DE GRADUAÇÃO

Para melhor entendimento e compreensão acerca do tema explanado, o trabalho está dividido em 5 capítulos compondo referencias teóricas e ponderações finais.

Capítulo 1: Capítulo inicial expõe uma breve introdução das atividades desenvolvidas ao longo do trabalho, além de esclarecer as motivações e objetivos, geral e específicos, com a realização da pesquisa.

Capítulo 2: Apresenta o embasamento bibliográfico, com referências teóricas e laboratoriais, dos objetos necessários para a compreensão do trabalho, como a pavimentação no Brasil, o melhoramento de solos auxiliado por estabilizações, granulométrica e química, as características produtivas e físicas dos materiais solo laterítico, cimento Portland e do pó FGD.

Capítulo 3: Especifica os insumos e aponta as metodologias e procedimentos usados para qualificar os materiais e misturas propostas.

Capítulo 4: Neste capítulo são demonstrados e analisados os resultados obtidos nos ensaios em relação a parâmetros e comportamento esperados, já citados, em sua maioria, no Capítulo 2.

Capítulo 5: São apresentadas as principais conclusões alcançadas com a pesquisa e sugestões para trabalhos futuros de acordo com o tema.

Por fim, listou-se todas as referências bibliográficas usadas no desenvolvimento da pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente referencial teórico visa direcionar e compor ideias a respeito dos temas discutidos ao longo dessa pesquisa como, a pavimentação de baixo custo e os procedimentos referente a essa técnica rodoviária fundamentada na utilização de solos lateríticos, e a estabilização de solos, focada na estabilização química com a aplicação de cimento Portland ou do coproduto pó de FGD.

2.1 PAVIMENTAÇÃO

Disposto a melhorar a qualidade de transporte da população o pavimento é uma ferramenta indispensável para o desenvolvimento de cidades, e consequentemente do país. Contudo, é a excelência do conjunto, uso de materiais apropriados, mais o dimensionamento correto e manutenção preventiva que ditará o bom desempenho e eficiência da estrutura.

BERNUCCI et al. (2006, p. 9) define pavimento como,

[...] uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

O total de camadas do pavimento varia de acordo o solo do subleito, podendo comportar camada de revestimento e base, obrigatórias, sub-base e reforço do subleito, optativas. Logo, a composição final da estrutura, construída sob superfície regularizada por processos de terraplenagem, e os materiais usados governam o comportamento do pavimento, classificando-o em flexível, rígido ou semiflexível.

Segundo o Manual do DNIT (2006), os pavimentos flexíveis, Figura 1, são compostos por camadas granulares, que por sua vez sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado; a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Nos pavimentos

rígidos, Figura 2, o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Por último, os pavimentos semirrígidos ou semiflexíveis apresentam propriedades intermediárias entre o rígido e flexível, ou seja, caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias.

Figura 1 - Estrutura pavimento flexível

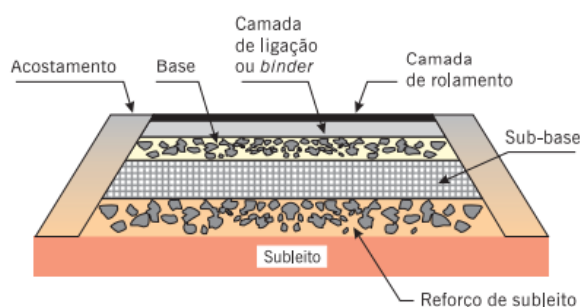
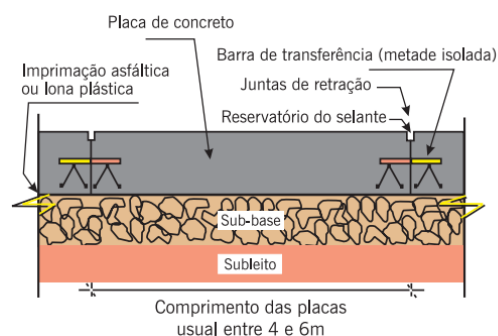


Figura 2 - Estrutura pavimentos rígidos

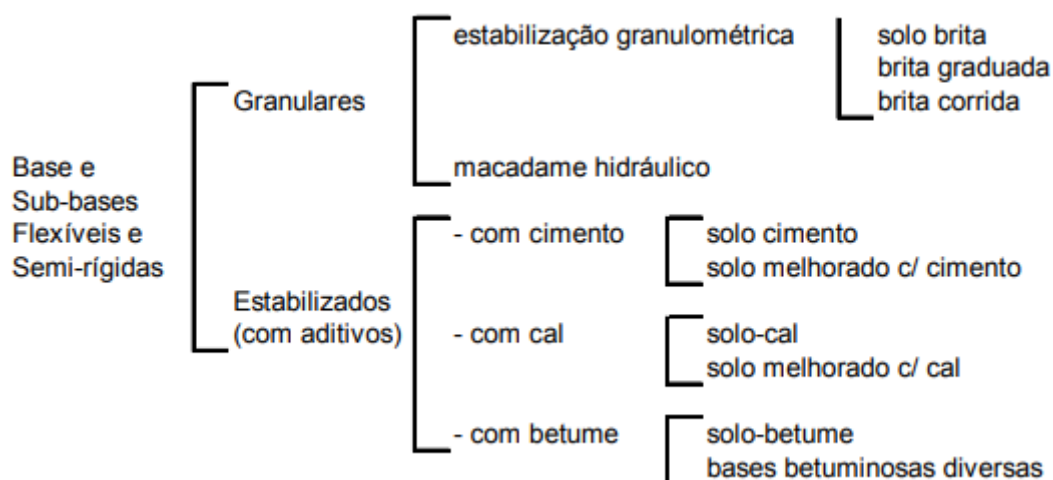


FONTE: Bernucci et al. (2006, p. 10).

Por conseguinte, a principal diferença entre os pavimentos rígidos e flexíveis, como o próprio nome revela, está relacionada à deformação e distribuição de tensões para as camadas subjacentes, os pavimentos flexíveis são mais dúcteis e os pavimentos rígidos são pouco deformáveis. A atribuição dessas características é estabelecida em acordo com o material empregado, comportando materiais granulares e/ou cimentícios.

Os materiais componentes da estrutura do pavimento devem resistir e distribuir ao subleito as tensões produzidas pelo tráfego. Assim, as bases e sub-bases, flexíveis ou semirrígidas, podem ser classificadas tipicamente como granulares ou estabilizadas, como mostra a Figura 3:

Figura 3 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semiflexíveis



FONTE: Manual de Pavimentação (2006, p. 96).

O principal material aplicado na construção das rodovias é o próprio solo, uma vez que tem grande disponibilidade, o custo é relativamente baixo e inofensivo à saúde humana e ao meio ambiente. No entanto, em alguns casos o solo local não dispõe de propriedades, físicas e mecânicas, necessárias para suportar os esforços provenientes do tráfego e das intempéries, logo, é feito a retificação das características desse material para atender as exigências do projeto. (BRITO e PARANHOS, 2017).

De acordo Ingles e Metcalf (1972) as propriedades do solo podem ser melhoradas de diversas formas, como por processos químicos, físicos, mecânicos entre outros. No entanto, devido à grande variabilidade dos solos a aplicabilidade de um método ou adição está associada a particularidades do solo e aos esforços e carga que o material será submetido.

Complementarmente, segundo Batista (1976 apud BRITO e PARANHOS, 2017, p. 2), “a estabilização consiste no tratamento do solo, por um processo mecânico, ou químico, tornando-o estável para os limites de sua utilização, e permanecendo assim, mesmo sob a ação de cargas exteriores e ações climáticas”.

Isto posto, os principais métodos usados para estabilização são o aumento da densidade do solo, a correção granulométrica e incorporação de aditivos

químicos, usados de forma singular ou em conjunto, como por exemplo, a adoção de brita graduada com cimento Portland.

2.1.1 ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

A estabilização granulométrica ou mecânica (Figura 4) é fundamentada na proporção do tamanho dos grãos e manipulação dos solos, inferindo ao material maior estabilidade que o solo original, e condições adequadas para aplicação no do projeto. (VILLIBOR, 1982 apud RODRIGUES, 2018).

Figura 4 - Estabilização granulométrica com brita graduada simples



FONTE: <https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/mineracao/mineracao-santiago-ltda/produtos/cimento-e-mineracao/brita-graduada-simples-bgs>

O Manual do DNIT (2006) também cita que as camadas exclusivamente granulares apresentam caráter flexível e são estabilizadas granulometricamente por ação da compactação, redução do índice de vazios, de um material, puro ou mistura de materiais, com granulometria predeterminada em especificações.

Diversos são os insumos aplicados nessa metodologia, como o próprio material “in natura” (solo, brita graduada ou brita corrida) ou composições com agregados naturais (areia de leito de rios, seixo rolado etc.), artificial (areia de brita, pedra britada etc.) ou reciclado (escória de aciaria, resíduos da

construção e demolição, resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais etc.).

Entre os agregados mencionados, destaca-se o crescimento e possibilidade do uso dos agregados reciclados tanto nas camadas de reforço de subleito, sub-base e base. Alguns estudos, como Picoli (2020), Nepomuceno (2019), Bridi (2020), apontam equivalência dos desempenhos mecânico e hidráulico entre os agregados reciclados e naturais. Dessa forma, o baixo custo e evidente eficiência desses materiais cooperam à alternativa mais econômica e sustentável na construção dos pavimentos.

2.1.2 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA

Segundo Bernucci et al. (2006), inicialmente, a camada de revestimento do pavimento é exposta a esforços de flexo-compressão, ficando as camadas mais profundas submetidas, principalmente, a esforços de compressão. As camadas subjacentes podem ser compostas por materiais estabilizados granulometricamente, como foi observado no item acima, ou quimicamente, de modo a aumentar a coesão e rigidez da camada.

Conforme Manual de Pavimentação do DNIT (Figura 3), a estabilização do solo pode ocorrer por três frentes diferentes, com a adição de cimento, cal ou betume. Todavia, Brito e Paranhos (2017) citam outras alternativas de aditivos para a estabilização de solos como a cinza volante e cinza volante geopolimerizada, CBR Plus (nanopolímero), nanosílica e cimento, e lignosulfonato.

A proporção de aditivo em relação ao total da mistura implicada alterações diferentes as características do solo, dessa forma, a estabilização química é subdivida em duas categorias a dos solos melhorado e dos “solos-aditivo”. Para fins de pavimentação, tendo como exemplo o cimento, têm-se teores usuais entre 2% e 4% para solo melhorado com cimento e superiores a 5% para o solo-cimento.

Ademais, está cada vez mais crescente a utilização de coprodutos siderúrgicos como substituição total ou parcial do cimento e da cal. A inclusão desses materiais na construção civil ocorre, principalmente, em razão do elevado volume de impurezas geradas com a produção de aço nas usinas siderúrgicas. A ArcelorMittal (2004) menciona que são produzidos cerca de 200 a 300 kg de escória para cada tonelada de ferro gusa.

Entretanto, o uso desses coprodutos deve ser bem avaliado, principalmente devido à expansibilidade do material para obras de terraplenagem, dessa forma, é de suma importância a determinação dessa característica dos aglomerantes. Tessari e Cobe (2015) relatam em sua pesquisa que o principal responsável pelo aumento do potencial expansivo dos coprodutos é o elevado teor de óxido de cálcio, CaO.

Picoli (2020), demonstra em seus trabalhos análises referentes ao estudo da estabilização química com a aplicação do cimento Portland e do pó FGD, indicando medidas necessárias para o controle tecnológico do pavimento, como a massa específica aparente seca e umidade ótima, o Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR), expansão, e expansibilidade. No total foram verificadas 12 amostras (Figura 5) compostas por solo puro e arranjos com o cimento e pó FGD.

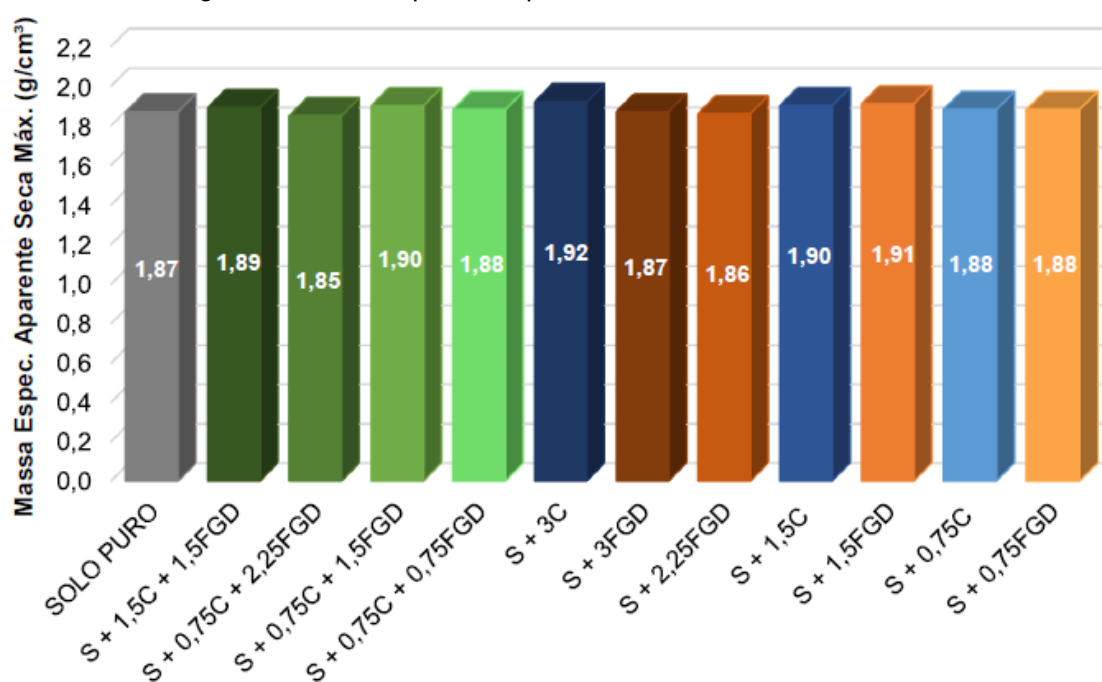
Figura 5 - Realização do ensaio CBR das 12 amostras



FONTE: Picoli (2020).

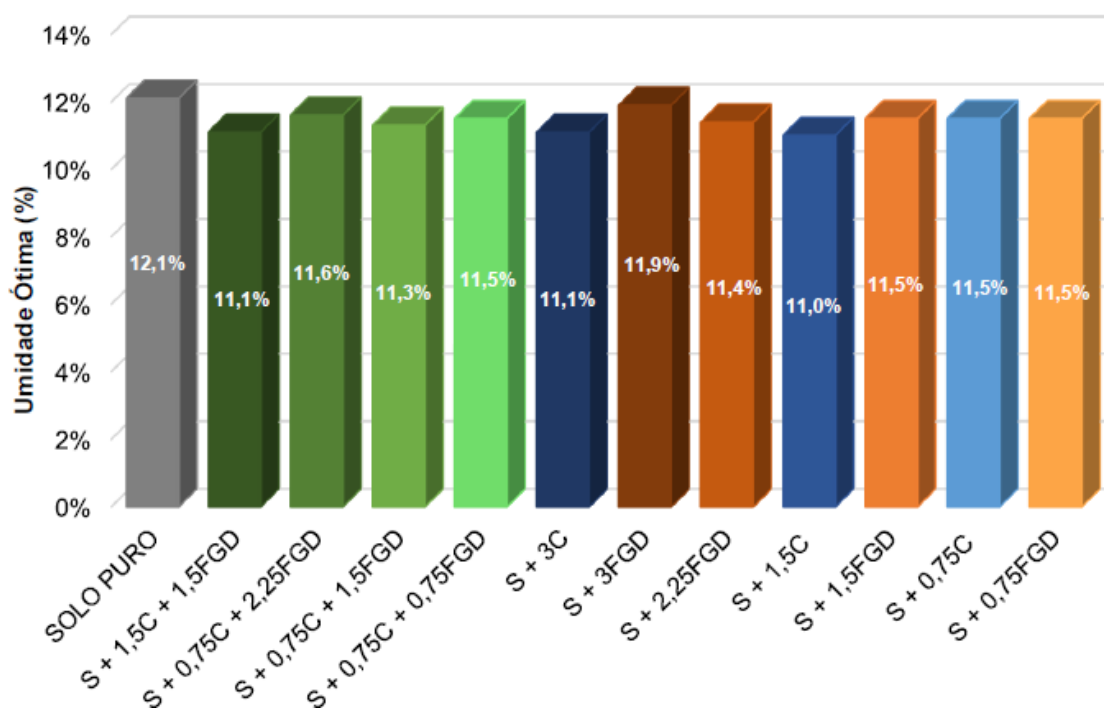
De acordo Picoli (2020), nas Figura 6 e Figura 7, as adições usadas não provocam uma alteração significativa na massa específica seca máxima, mas reduz a umidade ótima com o acréscimo de aditivos; em contrapartida o índice de suporte Califórnia aumenta expressivamente com a incorporação do cimento e/ou pó FGD (Figura 8), qualificando todas as amostras à aplicação na camada de sub-base, com CBR superior a 30%. Ademais, apenas o SOLO PURO, S+0,75C e S+0,75FGD não apresentaram características para uso na camada de base, conforme norma ES 140/10 (DNIT, 2010).

Figura 6 - Massa específica aparente seca máxima das amostras



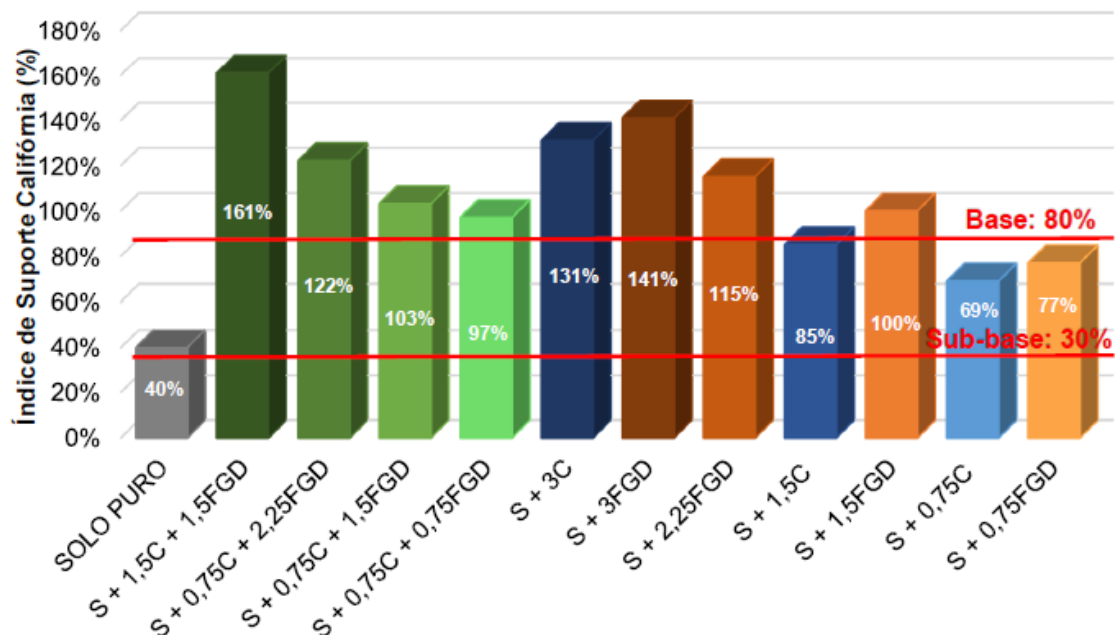
FONTE: Picoli (2020).

Figura 7 - Umidade ótima das amostras



FONTE: Picoli (2020).

Figura 8 - Índice de Suporte Califórnia (ISC) das amostras

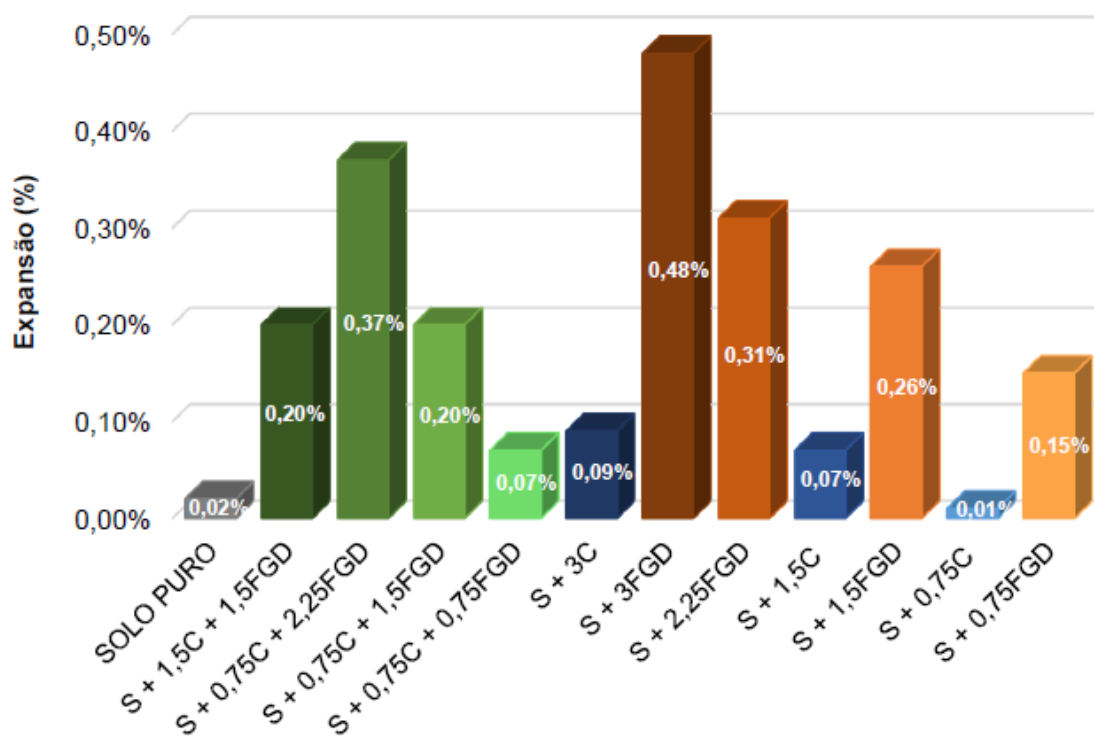


FONTE: Picoli (2020).

Já quanto à variação volumétrica, tendo em vista inicialmente a expansão, Picoli (2020), constata que nas misturas com pó FGD e cimento ou apenas pó FGD, a expansão aumenta com o acréscimo do teor de pó FGD, Figura 9. Por sua vez, a expansibilidade, determinada segundo procedimentos da norma ME

160/12 (DNIT, 2012), mostrou-se estável, para o solo puro e a mistura S+3C, 3,80% e 3,74%, sucessivamente, no entanto confrontando a mistura S+3FGD com o solo puro, essa propriedade mais que dobrou, 7,84%.

Figura 9 - Expansão das amostras



FONTE: Picoli (2020).

Seguidamente, a adoção da metodologia MCT, objetivo dessa pesquisa, implica algumas modificações no diagnóstico dos resultados exibidos por Picoli (2020), dado que, as propriedades de compactação e capacidade de suporte estão relacionadas aos ensaios de Mini-Proctor e Mini-CBR, não de CBR. Ainda assim, independentemente da metodologia empregada, espera-se o melhoramento das características do solo, uma vez que, segundo análise química de complexo sortivo de Picoli (2020) a efetividade da interação solo-FGD ocorre similar à do cimento e da cal.

Logo, para essa característica, Mini-CBR, Reschetti Junior et. al (2008) apontam em seu trabalho valores admissíveis e os resultados obtidos, para os solos arenosos finos lateríticos, expostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Exigências para o SAFL

Exigências mecânicas	Valores admissíveis	Resultados obtidos
Mini-CBR sem imersão	$\geq 40\%$	59%
Perda de suporte no Mini-CBR por imersão em relação ao Mini-CBR sem imersão	$\leq 50\%$	27%
Expansão com sobrecarga padrão	$\leq 0,3\%$	0%
Contração	0,1 a 0,5%	0,2%

FONTE: Adaptado de Reschetti Junior et. al (2008).

2.1.2.1 CIMENTO PORTLAND

A construção civil desenvolveu-se ao longo dos anos auxiliada por um dos materiais mais usados na área, o cimento Portland. A sua grande versatilidade possibilita o emprego do cimento nos mais diversos elementos, desde blocos de concreto com espessura de 3 centímetros a grandes construções como as barragens, pontes e arranha-céus.

O surgimento desse material foi registrado em 1824 quando o construtor inglês Joseph Aspdin queimou, moeu e misturou pedras calcárias e argilas. A mistura apresentou resistência semelhante às pedras aplicadas nas construções da época, logo, no mesmo ano, o rei George IV, patenteou o produto como cimento Portland.

O principal constituinte dos diversos tipos de cimento Portland é o insumo clínquer Portland. Esse material é produzido por meio da calcinação de uma mistura de calcário, argila e corretivos químicos a aproximadamente 1450°C. Os tratamentos químicos que proporcionam a formação de compostos hidráulicos e caráter ligante, mais conhecimento como quimismo, são proporções de compostos de natureza siliciosa, aluminosa ou ferrífera, limitada a especificações vigentes (ISAIA, 2011).

Na primeira etapa dessa cadeia de transformações mineralógicas, fases minerais abundantes na natureza – calcita (CaCO_3), dolomita $\{\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2\}$, quartzo (SiO_2), plagioclásio $\{(\text{NaAlSi}_3\text{O}_8)-(\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8)\}$, biotita $\{\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2\}$, muscovita

$\{KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2\}$, caulinita $\{Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8\}$, hematita (Fe_2O_3), entre outras – são transformadas em minerais metaestáveis, cujos campos de estabilidade envolvem normalmente temperaturas superiores a $1000^\circ C$, representados pelos silicatos cálcicos (alita – Ca_3SiO_5 e belita – Ca_2SiO_4) e pelos aluminatos e ferro-aluminatos cálcicos (C_3A – $Ca_3Al_2O_6$ e C_4AF – $Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$). O processo de hidratação do cimento Portland, última etapa dessa cadeia, compreende a estabilização dos minerais do clínquer, através da hidratação, gerando uma assembleia mineralógica distinta, constituída predominantemente por fases de baixa cristalinidade, como o C-S-H (proporções variáveis de CaO , SiO_2 e H_2O), etringita ($Ca_3Al_2O_6 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) e portlandita $\{Ca(OH)_2\}$ (CENTURIONE, MARINGOLO & PECCHIO, 2003).

Atualmente o mercado brasileiro dispõe de 8 tipos distintos do aglomerante, sem contar o cimento Portland branco, normatizados segundo a ABNT 16697:2018, Tabela 2. A diversidade de cimento e classes está intimamente ligada às possibilidades de aplicação, permitindo o ajuste do componente de acordo suas características físicas e químicas.

Tabela 2 - Limites de composição do cimento Portland

Nome Técnico do Cimento Portland	Sigla	Classe (MPa)	Sufixo	Clínquer + SC	EGAF	MP	MC
Comum	CPI	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 - 100	0 - 5		
Comum com Adição	CPI-S			90 - 94	0	0	6 - 10
Comum com Escória	CPII-E			51 - 94	6 - 34	0	0 - 15
Comum com Pozolana	CPII-Z			71 - 94	0	6 - 14	0 - 15
Comum com Filer	CPII-F			75 - 89	0	0	11 - 25
Alto-forno	CPIII			25 - 65	35 - 75	0	0 - 10
Pozolânico	CPIV			45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
Alta Resistência Inicial	CPV	ARI		90 - 100	0	0	0 - 10
Branco	CPB	25, 32		75 - 100	-	-	0 - 25

Nome Técnico do Cimento Portland	Sigla	Classe (MPa)	Sufixo	Clínquer + SC	EGAF	MP	MC
Estrutural		ou 40					
Branco Não Estrutural	CPB	-	-	50 - 74	-	-	26 - 50

FONTE: Adaptada da ABNT NBR 16697 (2018).

O cimento Portland é um dos aditivos mais usados no processo de estabilização química dos solos. A aplicação desse aglomerante é apropriada, principalmente, para solos granulares, uma vez que as ligações são desenvolvidas no contato entre os grãos, mas também podem ser utilizados em solos com baixo percentual de finos.

O ganho de resistência conferido pelo cimento é iniciado com o desenvolvimento da hidratação do aditivo e sequente formação das etringitas, pode ser imediata, como é o caso do cimento CP V ARI, ou no decorrer do período de cura, 28 dias. “Os efeitos de sua utilização se apresentam como aumento da resistência da mistura, redução da plasticidade do solo, melhora da trabalhabilidade e redução da variação volumétrica (expansibilidade e compressibilidade)” (INGLES & METCALF, 1972; LITTLE & NAIR, 2009; EREN & FILIZ, 2009 apud SILVA, 2016).

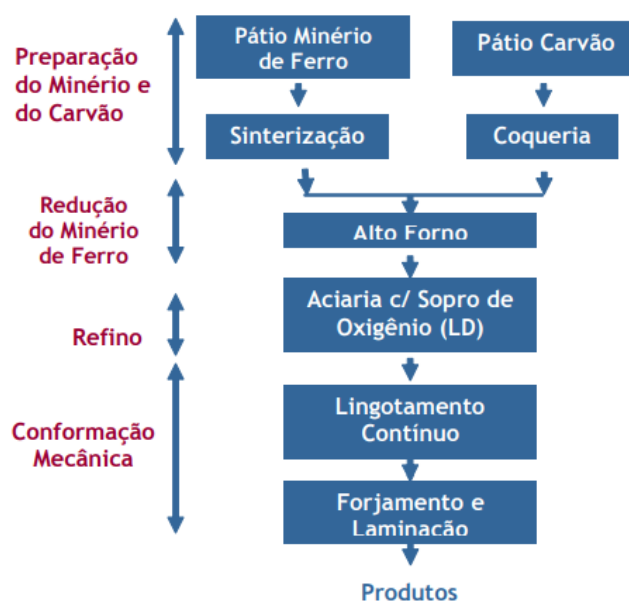
2.1.2.2 FLUE GAS DESULFURIZATION (FGD)

A produção do aço é realizada ao longo de diversos processos de incorporação, aquecimento e resfriamento. Iniciado com a admissão da matéria prima a SINTERIZAÇÃO, onde é manufaturado o sínter, e a COQUERIA, produção do coque. O sínter é uma partícula fina gerada do resfriamento, britagem e peneiramento, a quente, da junção de finos de minério, fundente e adições.

Em seguida, os sínters são enviados para os ALTOS-FORNOS, juntamente com minério de ferro, pelotas e fundente é produzido o ferro gusa. Por fim, o

ferro gusa é transportado para a ACIARIA, nesse ponto o material passa por dois processos distintos a dessulfuração, perda de enxofre, e no convertedor a perda de carbono através do sopro de oxigênio, transformando assim o ferro gusa em AÇO LÍQUIDO, Figura 10.

Figura 10 - Processo de produção do aço



FONTE: Brasil. MCTI. (2010).

No decorrer da produção são gerados diversos reduzidos como as escórias, conformadas por impurezas provindas das matérias-primas (minério de ferro, cal etc.), e o gases poluentes, entre ele o gás carbônico (CO₂), originado pela queima de combustíveis e a incorporação de carbono ao ferro gusa.

A escória é caracterizada por uma massa insolúvel, menos densa, gerada e descartada em algumas etapas do processo. Segundo Arrivabene et al. (2012) a produção de uma tonelada de aço gera em torno de 300 a 350 kg de escória de alto-forno e entre 100 e 120 kg de escória de aciaria. Por sua vez, o carbono excedente do processo é emitido em forma de CO₂, apresentando a maior fração na produção do ferro gusa no alto forno, uma vez que, $2 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{ C} \rightarrow 4 \text{ Fe} + 3 \text{ CO}_2$ (BRASIL.MCTI, 2010).

Ademais,

as principais emissões atmosféricas provenientes das várias unidades operacionais que compõem a indústria siderúrgica são

constituídas de material particulado, óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, monóxido de carbono, metais pesados, compostos orgânicos voláteis, compostos alicíclicos aromáticos, dioxinas e furanos, bifenilas policloradas e compostos ácidos (CAVALCANTI, 2012, p. 14).

Atentando aos altos níveis de poluição atmosféricos atuais, o CONAMA regulamenta por intermédio da resolução nº 382 de 26/12/2006 limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos a fim de atender os padrões nacionais de qualidade do ar.

Um dos compostos produzidos em grande escala por atividades industriais é o dióxido de enxofre, altamente prejudicial à saúde por inalação ou mediante precipitação de chuva ácida. Quando em contato com vias úmidas o dióxido de enxofre (SO_2) transforma-se em trióxido de enxofre (SO_3) e passa rapidamente a ácido sulfúrico (H_2SO_4) (CETESB, 2012).

Consequentemente, dispostas a cumprir às normas ambientais vigentes que limitam os teores de emissões de SO_2 na atmosfera, as usinas siderúrgicas instalam unidades de dessulfurização para aprisionar os gases de efeito estufa por meio do processo *Flue Gas Desulfurization* (FGD). (CASTRO, 2016; MOHAUPT et al., 2018). As unidades de FGD viabilizam a ação de um absorvente alcalino, em geral são usados hidróxidos de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), com os efluentes gasosos composto por dióxido de enxofre (SANTOS, 2007 apud PRADO et al., 2015).

Em outras palavras o processo de dessulfuração tem em vista a neutralização dos SO_2 produzido nas usinas. A inativação desse composto é fundamentada no aumento do pH mais ácido, em torno de 4, para o neutro, com o auxílio de adições alcalinas; geralmente, por efeito de disponibilidade, os materiais mais usados são a cal e o calcário, com o pH perto de 12 e 7,5 sucessivamente.

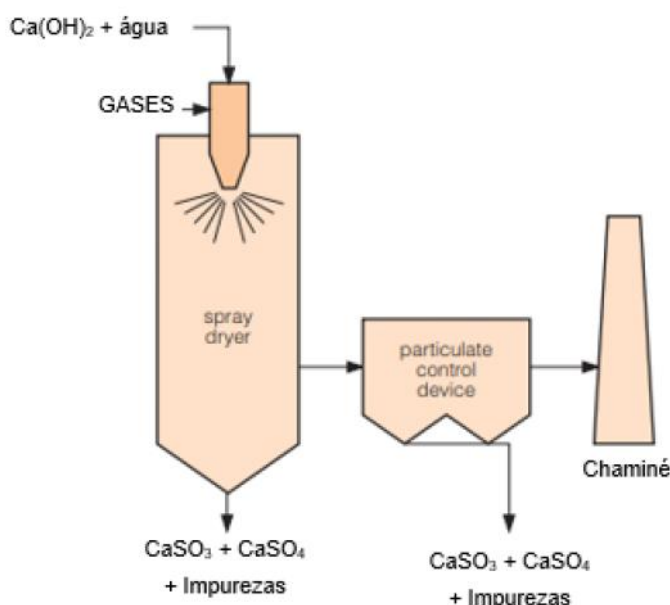
O produto gerado pelo procedimento de dessulfuração está diretamente ligado ao tipo de material usado como absorvente, meio alcalino. As substâncias mais aplicadas são a cal e/ou calcário e/ou hidróxidos de cálcio, consequentemente o material produzido é composto principalmente pela gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (KOHL; NIELSEN, 1997 apud TEIXEIRA, 2019).

Continuamente, esse processo pode ser apresentado por vias seca, semiseca e úmida, esta designação varia em concordância com o consumo de água utilizado no processo, a eficiência, os custos operacionais e a complexidade do tratamento. O processo úmido, *Wet FGD*, é o método mais usado no mundo, com material composto principalmente por sulfito de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Já o processo seco, apesar de ser mais barato é menos eficiente, pulveriza os reagentes secos, usualmente o calcário, a dolomita e a cal hidratada, a temperaturas superiores a 950°C . O intermediário entre os dois processos anteriores é o semiseco ou *SprayDryer*, permitindo a remoção de até 90% do dióxido de enxofre (POULLIKKAS, 2015; TEIXEIRA, 2019).

A SunCoke Energy, localizada na siderúrgica ArcelorMittal Tubarão emprega o processo de FGD semiseco, Figura 11.

As centrais termoeletricas, CTE 5 e 6, localizada na Heat Recovery, recebe o vapor gerado nas 8 caldeiras de recuperação da SUNCOKE pelo aquecimento da água por meio dos gases quentes da coqueria para geração de energia, não gerando emissão pela queima de combustível em caldeira. Após a troca térmica, os gases vão para tratamento na FGD (CETESB e IEMA, 2018, p. 75).

Figura 11 - Esquema produção pó FGD semiseco



FONTE: Teixeira (2019).

Nessa técnica é aplicado o leite de cal, junção de óxido de cálcio (CaO) ou hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) com elevada quantidade de água, na torre

absorvedora (Spray Dryer) por meio do atomizador rotativo. Dentro da torre absorvedora o leite de cal interage com o dióxido de enxofre (SO_2) formando um pó seco composto de sulfito de cálcio (CaSO_3) e sulfato de cálcio (CaSO_4).

“A tecnologia semiseca é interessante em regiões onde o abastecimento de água é limitado (por exemplo, o Nordeste do Brasil [...]), porque consome de 30 a 40% menos água do que o processo FGD tipo úmido [...]” (MOHAUPT et al., 2018). Por outro lado, o processo semiseco apresenta menor eficiência de remoção do SO_2 e maiores custos operacionais (TEIXEIRA, 2019).

A tabela seguinte (Tabela 3) indica a caracterização de um pó FGD produzido pelo processo de dessulfurização por via úmida, destacando-se a alta concentração do óxido sulfúrico e do óxido de cálcio.

Tabela 3 - Composição química FGD

Componentes	(%)	Componentes	(%)
SO_3	45,4	Na_2O	<0,05
CaO	39,48	TiO_2	<0,05
Cl	7,9	BaO	<0,01
MgO	0,30	Co_2O_3	<0,01
SiO_2	0,23	Cr_2O_3	<0,01
P_2O_5	0,12	PbO	<0,01
SrO	0,12	ZnO	<0,01
Fe_2O_3	0,10	$\text{ZnO}_2+\text{HfO}_2$	<0,01
Al_2O_3	0,07	B_2O_3	-
K_2O	0,06	Li_2O	-
MnO	<0,05	Perda Fogo	6,07

FONTE: Mohaupt et al. (2018).

Mohaupt et al. (2018) evidencia as possibilidades de aplicação do pó FGD como matéria-prima secundária de materiais da construção civil, por exemplo, na fabricação de tijolos solo-cimento. Inclusive, a predominância da gipsita e

consequente semelhança com o gesso oportunizam o emprego do pó FGD em diversas áreas da construção civil.

A Federal Highway Administration (2016) também cita que o material FGD tem sido usado com sucesso na construção de bases de estradas, em diversos locais dos Estados Unidos, destaca-se os estados da Flórida, Pensilvânia, Ohio e Texas. O entendimento do comportamento desse material na estabilização de solos é apoiado no estudo das propriedades físicas, químicas e mecânicas, características do material.

Para mais, o processo de produção do pó FGD semiseco expõe algumas características apresentadas pela *Federal Highway Administration Research and Technology* (Tabela 4), necessárias para as análises da pesquisa em questão.

Tabela 4 - Características do FGD

PROPRIEDADES	Granulometria	Silte: 90% Argila: 8,5% Areia: 1,5%
	Peso Específico (kg/m ³)	2,25 a 2,6
	Teor de Sólidos (%)	60 a 80
	Densidade Úmida (kg/m ³)	1,7 a 1,9
	Densidade Seca (kg/m ³)	1,45 a 1,6
	Permeabilidade (cm/s)	1.10 ⁻⁶
	Resistência à compressão de bases e sub-bases estabilizadas (kPa)	2800 a 4500

FONTE: Adaptado de FHWA (2016).

2.2 PAVIMENTO DE BAIXO CUSTO

De acordo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2021) o custo médio para a implantação apenas da pavimentação de uma rodovia pista simples atua em torno de R\$ 1.462.241,81, inviabilizando o desenvolvimento acelerado das malhas rodoviárias brasileiras. Uma alternativa

para países tropicais é a implantação de pavimentos de baixo custo, cujo princípio é a aplicação de solo local nas camadas estipuladas.

De acordo Nogami e Villibor (1995), para ser considerado um pavimento de baixo custo, o pavimento deve:

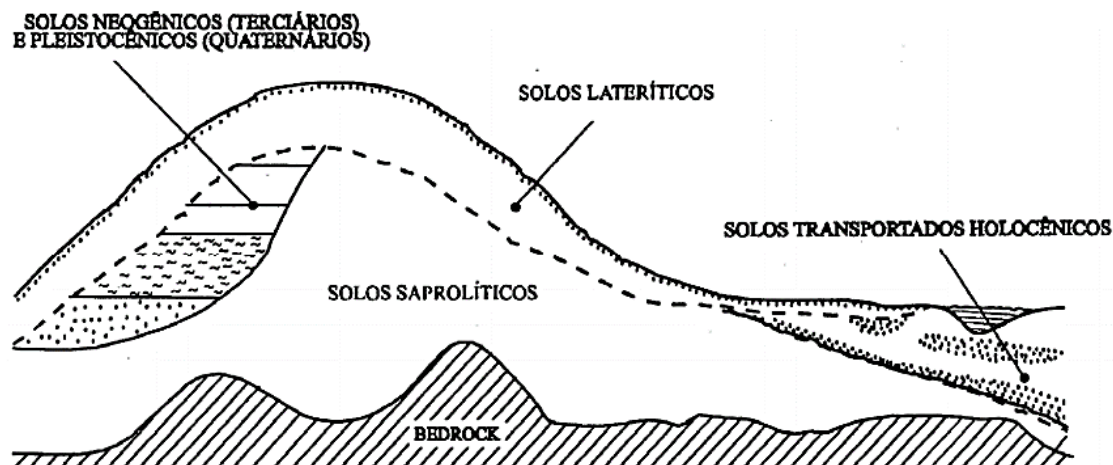
- Utilizar bases constituídas de materiais cujos custos de execução são substancialmente menores por m³ acabado, em relação às bases convencionais, [...], constituídas quase sempre de pedra britada ou de solo-cimento.
- Utilizar revestimento betuminoso de tipo tratamento superficial, com espessura de, no máximo, cerca de 3 cm e, frequentemente, da ordem de cerca de 1 cm;
- Considerar um trânsito de tipo leve a, no máximo, médio, com Volume Diário Médio da ordem de 500 veículos, com acerca de 30% a 40% de caminhões e ônibus”.

Para a pesquisa em questão atenta-se, exclusivamente, a possibilidade de aplicação de solos tropicais nas camadas de base e sub-base, e quando necessário, o melhoramento das características do solo com a incorporação de aditivos.

2.2.1 SOLO LATERÍTICO

O Brasil é um país rico em recursos naturais e matéria-prima. Um espécime que engloba esses dois aspectos são os solos lateríticos, cuja características são mui particulares. Esse material é identificado especificamente nas regiões tropicais, classificando-o por solo tropical. No entanto os solos tropicais, como um todo, compreendem dois grandes conjuntos, os solos lateríticos (também denominado de solo maduro), e os solos saprolíticos (denominados de solo residual jovem), Figura 12.

Figura 12 - Perfil esquemático de ocorrência de solos em ambiente tropical



FONTE: Villigor et al. (2000).

Nas regiões tropicais, o clima úmido associado a elevadas temperaturas, a ação e disponibilidade abundante da água e a existência demasiada de bactérias, fungos e algas, promovem um processo pedogenético (formação do solo) mais acelerado. Logo, os solos tropicais dispõem de muitas peculiaridades resultantes das condições ambientais como o clima, relevo, material de origem e principalmente, pela quantidade e ocorrência de fortes chuvas, que estimulam as reações químicas do intemperismo, Figura 13. (ZARONI e SANTOS, 2013 - EMBRAPA).

Figura 13 - Corte rodoviário, com camada laterítica sobrejacente à camada saprolítica de origem sedimentar, com as correspondentes microestruturas



FONTE: Villibor (2019).

Aditivamente Santos e Parreira (2015) atribuem as peculiaridades dos solos tropicais, quanto ao comportamento hidráulico e mecânico, ao processo de laterização, caracterizado pela lixiviação dos cátions básicos, acarretando concentração de óxidos de ferro e alumínio; “[...] devido a este processo, a fração argila dos solos lateríticos é constituída essencialmente de argilominerais do grupo das caulinitas e de hidróxidos e óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio [...]” (SANTOS E PARREIRA, 2015, p. 3). O recobrimento dos argilominerais pelos hidróxidos e óxidos hidratados resultam combinações estáveis em presença de água que por sua vez atuam como agentes cimentantes naturais entre os grãos do solo.

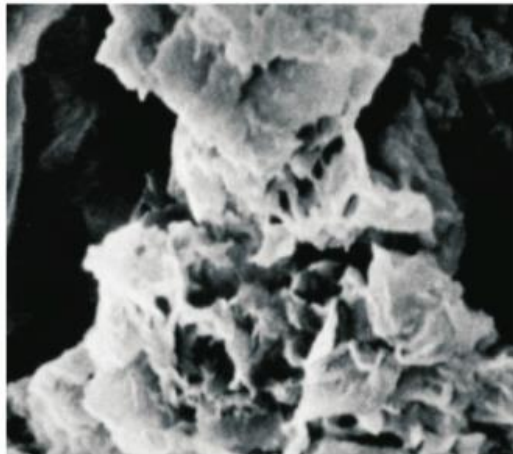
Nogami e Villibor (1995), explicam as particularidades dos solos lateríticos fundamentado no arranjo intenso e resistente entre as partículas componentes, macrofábricas e microfábricas, associado ao envolvimento da caulinita pelos hidróxidos e óxidos de ferro e alumínio hidratados e ao formato dos grãos, distinto da forma tipicamente lamelar dos argilominerais tradicionais.

Vale ressaltar que são óxidos hidratados de ferro e alumínio e a permanência do argilomineral caulinita são o que conferem o comportamento laterítico, e a coloração tipicamente avermelhada, por efeito da hematita, ou amarelado, devido à goethita, específica dos solos lateríticos. As imagens seguintes expõem a diferença entre as microestruturas de um solo laterítico, Figura 14, e um solo não laterítico, Figura 15.

Figura 14 - Fotografia de MEV da microestrutura de um solo laterítico



Figura 15 - Fotografia de MEV da microestrutura de um solo saprófitico



FONTE: Nogami e Villibor (1995) apud Villibor (2019).

Solo laterítico é definido pelo Comitê de Solos Tropicais da Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (ISSMFE) como aquele que pertence aos horizontes A (camada mineral com enriquecimento de matéria orgânica) e B (apresenta máxima expressão de cor, estrutura e/ou que possuem materiais translocados), de perfis bem drenados, desenvolvido sob atuação de clima tropical úmido. Possuem sua fração argila constituída essencialmente de argilominerais do grupo das caulinitas e de óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio o que confere à estrutura poros e agregações altamente estáveis (NOGAMI et al., 1985 apud MARANGON, 2004, p. 25).

Estes solos têm tendência a possuírem uma grande parcela da sua granulometria menor que 2 mm de diâmetro e em alguns locais podem apresentar, inseridos em sua constituição, pedregulhos lateríticos denominados de laterita, que são massas consolidadas, maciças ou porosas, de mesma mineralogia dos solos lateríticos. Estas têm sido muito aproveitadas como materiais de construção rodoviária. (MARANGON, 2004, p. 25).

E como foi mencionado, de acordo Nogami e Villibor (1995), a melhor maneira de aumentar a densidade de malha rodoviária no Brasil é o incentivo a implementação de pavimentos de baixo custo, solos lateríticos. Conforme Bernucci (1995) apud Santos e Parreira (2015), a compactação dos solos lateríticos em condições ideais, de umidade e massa específica seca máxima, acarreta elevada capacidade de suporte e baixa perda dessa capacidade quando imerso. Por conseguinte, a disposição e conhecimento das propriedades desses materiais, reduzem os custos de execução e aumentam o desempenho do pavimento.

Assim, conhecida as particularidades geológicas dos solos tropicais e suas capacidades mecânicas e hidráulicas, fez-se necessário o desenvolvimento de um procedimento de estudo diferente dos tradicionais, os quais, em sua maioria são baseados no comportamento de solos dos Estados Unidos e na análise das propriedades índices do solo.

2.2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS

Os solos tropicais superficiais podem apresentar um comportamento laterítico, devido a processos de alterações ocasionadas pelas temperaturas e umidades elevadas das regiões tropicais. A modificação do solo induz a formação de uma camada ferruginosa, inferindo ações de cimentação adicionado a presença de ferro e alumínio, todo esse processo promove variações às características mecânicas e hidráulicas do solo.

De acordo Bernucci et al, (2006), as singularidades desses solos mostraram-se eficientes na aplicação em obras rodoviárias, mas, as técnicas de classificação tradicionais, embasada em análises granulométricas e limites de consistência, são insuficientes para representarem com precisão as propriedades mecânicas dos solos, necessárias no dimensionamento dos pavimentos.

Analizada a necessidade Nogami e Villibor expuseram em 1981 no Simpósio de Solos Tropicais em Engenharia (COPPE/UFRJ) uma metodologia para classificação dos solos tropicais de granulação fina, denominada Miniatura Compactada Tropical – MCT –. A metodologia MCT foi desenvolvida com o intuito de suprir limitações de classificação dos solos com base nas propriedades índices, possibilitando assim a análise de propriedades como a contração, permeabilidade, expansão, compactação, capacidade de suporte, infiltrabilidade etc.

Esse procedimento consiste na utilização de corpos de provas em MINIATURA, COMPACTADOS e destinados particularmente para a caracterização de solos TROPICAIS, MCT, conseqüentemente, os moldes dos corpos de prova compreendem dimensões reduzidas com diâmetro e altura iguais a 50 mm com

material passante na peneira de 2,0 mm. No Brasil, essa classificação é padronizada com o auxílio da norma rodoviária do Departamento Nacional de Estradas e Rodagens, DNER-CLA 259/96 – Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura.

A classificação é determinada com realização do ensaio classificatório Mini-MCV, do qual são obtidos os coeficientes c' e d' , e o da perda de massa por imersão, P_i . A princípio, a verificação do coeficiente c' esta relacionada a granulometria do solo, assim Villibor (2009) indica que, valores acima de 1,5, são próprios a argilas e solos argilosos, abaixo de 1,0, representa areias e os siltes não plásticos ou pouco coesivos, e o intervalo entre 1,0 e 1,5, configura os solos intermediários como areias siltosas, areias argilosas, argilas siltosas etc.

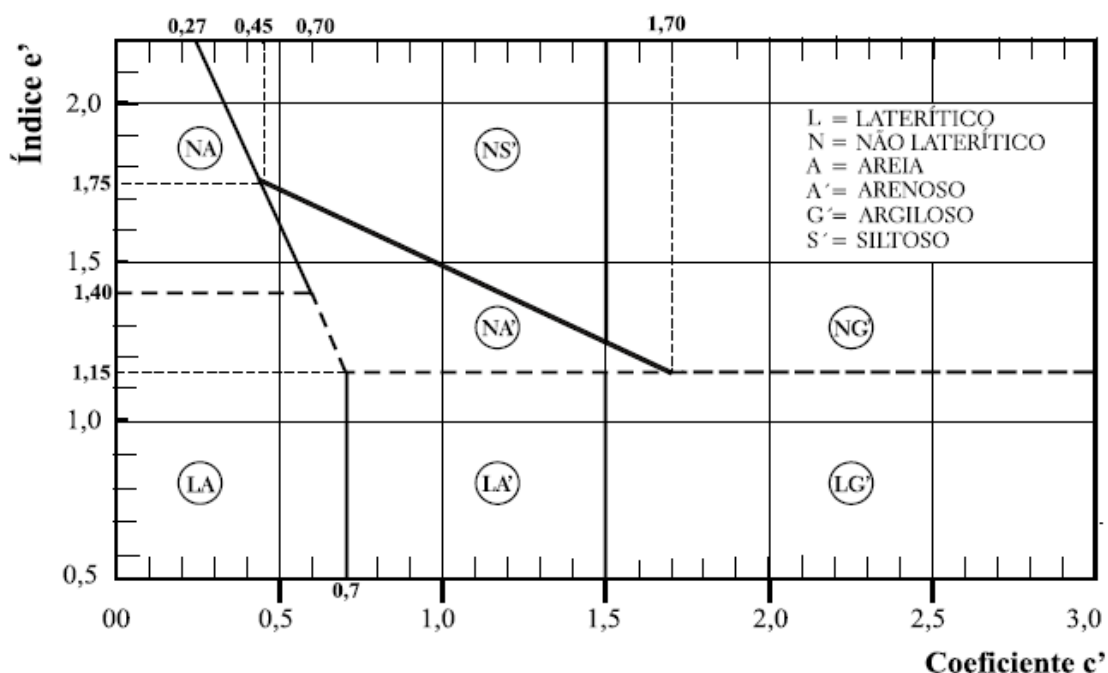
Por sua vez, o índice de laterização – e' –, é mensurado a partir dos parâmetros determinados em ensaio d' e P_i , conforme equação (1):

$$e' = \sqrt[3]{\left(\frac{P_i}{100}\right) + \left(\frac{20}{d'}\right)} \quad (1)$$

O índice e' foi concebido para indicar o comportamento laterítico ou não laterítico. Verificou-se que o comportamento laterítico começa a se manifestar quando $d' > 20$ e $P_i < 100$, o que permitiu o estabelecimento da linha horizontal principal, correspondente a $e' = 1,15$, que separa os solos L dos solos N. Para os solos pobres em finos, a transição ocorre para valores mais altos de P_i , o que levou ao estabelecimento da linha horizontal secundária em posição um pouco acima, correspondente a $e' = 1,40$ (NOGAMI e VILLIBOR, 1995, p. 89).

Isto posto, a Figura 16, expõe as conclusões observadas acima categorizando os solos tropicais em duas macros classes de solos, de comportamento laterítico e de comportamento não-lateríticos, representados pelas letras L e N, sucessivamente. Seguidamente, Nogami e Villibor (1995), subdividiram as classes que indicam o comportamento principal do solo em grupos, Quadro 1.

Figura 16 - Gráfico da classificação de solos MCT



Quadro 1 - Grupos da Classificação MCT

Grupo	Solos
NA	- Solos considerados tradicionais, compostos de areias, siltes e misturas de areias e siltes, nos quais os grãos são constituídos essencialmente de quartzo e/ou mica. - Praticamente não possuem finos argilosos coesivos e siltes caulíníticos.
NA'	- Misturas de areias quartzosas (ou de minerais de propriedades similares) com finos passando na peneira 0,075mm.
NS'	- Solos saprolíticos silte-arenosos peculiares de constituição predominante feldspática-micácea-quartzosa.
NG'	- Solos saprolíticos argilosos pobres em quartzo e ricos em anfibólios, piroxênios e feldspatos cálcicos. - Solos superficiais pedogenéticos.
LA	- Areias com pouco finos de comportamento laterítico, típicas do horizonte B dos solos areias quartzosas e regossolos. - A porcentagem de finos lateríticos dos solos é muito baixa.
LA'	- Solos tipicamente arenosos e constituintes do horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente no Brasil por latossolos

	arenosos e solos podzólicos ou podzolizados arenosos. - Presença de matizes vermelho e amarelo
LG'	- Os integrantes mais frequentes desse grupo têm sido as argilas e as argilas arenosas, que constituem o horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente por latossolos, solos podzólicos e terras roxas estruturadas.

FONTE: Autora.

Resumidamente, em virtude das peculiaridades dos solos lateríticos como a baixa deformabilidade, elevada capacidade de suporte e baixa expansibilidade, a classificação MCT visa separar os solos finos de comportamento laterítico dos solos de comportamento não-lateríticos (BERNUCCI et al., 2006). A identificação dos solos de comportamento laterítico promove a utilização desse material em obras de pavimentação.

Ademais, além da possibilidade do uso de solos tropicais finos lateríticos, Villibor e Alves (2017) certificam em seus estudos a eficácia da aplicação de solos tropicais de granulação grossa, ou seja, a fração retida na peneira 2,0 mm. A classificação desses solos é realizada por meio da classificação G-MCT, fundamentada na classificação MCT da fração parcial passante na peneira 2,0 mm associada à análise granulométrica integral do solo.

Villibor e Alves (2017), também revelam que os solos granulares com finos lateríticos apresentam propriedades adequadas como a elevada capacidade de suporte e módulo de resiliência, a baixa contração e expansão, entre outras, viabilizando o emprego desse material em camada de base com tráfego pesado.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Conforme os objetivos apresentados, a metodologia desta pesquisa consiste na execução de ensaios laboratoriais, a fim de quantificar os parâmetros característicos das misturas, compostas por solo puro com adições variáveis, de pó FGD ou cimento. Logo, os materiais e métodos aplicados nesta análise estão descritas em seguida.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 SOLO

O solo empregado foi coletado na jazida JP6, localizada no município de Iconha/ES, mais precisamente no km 373 da BR-101 Sul. O solo denominado solo JP6, qualifica um solo laterítico predominantemente arenoso, que por sua vez, em acordo com os trabalhos desenvolvidos por Picoli (2020), apresenta boa interação com o cimento Portland, Figura 17 e Figura 18, e pó FGD.

Figura 17 – MEV cascalho laterítico sem estabilização

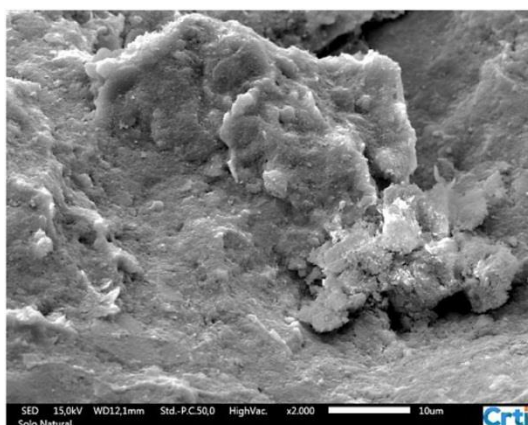
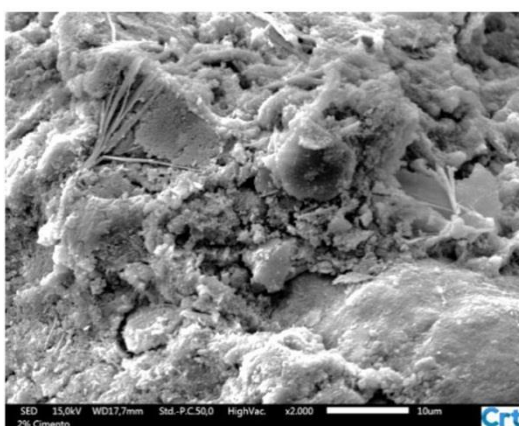


Figura 18 – MEV cascalho laterítico com 2% de cimento (nota-se a formação de agulhas resultantes da hidratação do cimento)



FONTE: Rocha e Rezende (2017).

3.1.2 CIMENTO

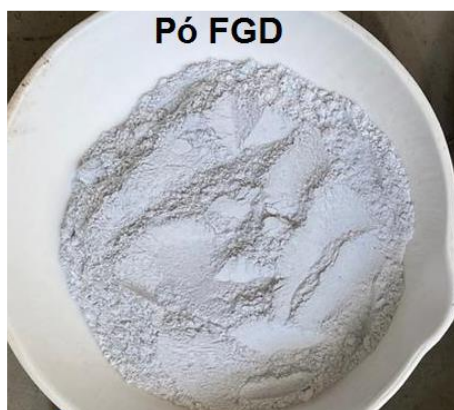
O cimento usado no estudo foi o Cimento Portland CP III 40 RS, disponibilizado pelo laboratório de solos da UFES, exibe algumas particularidades entre elas a resistência as variações de temperaturas e ao ataque de sulfatos. Entre as adições permissíveis o CP III é o aglomerante hidráulico que dispõe maior quantidade da adição escória de alto do forno na sua composição.

Em acordo com a Tabela 2 da NBR 16697/18, a composição final do cimento Portland é limitada por variações de 25% a 65% de clínquer mais sulfatos de cálcio, 35% a 75% de escória granulada de alto-forno, 0 a 10% de material carbonático e 0% de material pozolânico. Entre algumas vantagens impostas pelo uso do cimento com escória estão o aumento da resistência mecânica e a sulfatos, durabilidade e redução da emissão de dióxido de carbono (CO₂) para a produção de cimento com adição de escória.

3.1.3 PÓ FGD

A resultante gerada pelo processo de dessulfuração, *Flue Gas Desulfurization* (FGD), das usinas siderúrgicas, o pó FGD (Figura 19), foi disponibilizado pela empresa ArcelorMittal Tubarão, localizada na cidade de Serra/ES. O pó de FGD foi coletado da caçamba de armazenamento desse resíduo, na SunCoke, e armazenados em sacos inertes e transportados ao laboratório de solos da UFES (TEIXEIRA, 2019).

Figura 19 - Resíduo do processo de dessulfuração



FONTE: Picoli (2020).

3.2 MÉTODOS

Para análise do solo melhorado com aditivos foram definidas percentagens com base na massa do solo seco, variando de 2 a 4%, compreendendo a definição de solo melhorado, uma vez que, o solo-cimento implica percentual superior ou igual a 5%.

A representação dos materiais e as seguintes proporções usadas são expressas com JP6 - solo, C - cimento CP-III 40 RS e FGD – para pó FGD; foram determinadas 5 misturas distintas, o solo puro, 1,5% de cimento CP-III, 1,5% de pó de FGD, 3% de CP-III e 3% de pó de FGD, Quadro 2.

Quadro 2 – Misturas estudadas





FONTE: Autora.

A fim de identificar e mensurar a resistência das misturas praticou-se ensaios definindo a caracterização física, hidráulica e mecânica, auxiliadas pelas normas vigentes do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT – e da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. O programa experimental está definido na Quadro 3, abaixo.

Quadro 3 - Programa experimental

CARACTERIZAÇÃO	ENSAIOS	NORMA	AMOSTRA
FÍSICA	Granulometria por Peneiramento e Sedimentação	NBR 7181/16 (ABNT, 2016)	Solo
	Massa Específica Real dos Grãos	NM 52/09 (ABNT, 2009) NM 53/09 (ABNT, 2009)	Solo
	Limites de Liquidez	NBR 6458/17 (ABNT, 2017)	Solo e Misturas
	Limites de Plasticidade	NBR 7180/16 (ABNT, 2016)	Solo e Misturas
	Teor de Matéria Orgânica	NBR 13600/96 (ABNT, 1996)	Solo
	Mini-MCV	ME 258/94 (DNER, 1994)	Solo
	Perda de Massa por Imersão	ME 256/94 (DNER, 1994)	Solo

CARACTERIZAÇÃO	ENSAIOS	NORMA	AMOSTRA
HIDRÁULICA	Coeficiente de Permeabilidade	NBR 14545/21 (ABNT, 2021)	Solo e Misturas
MECÂNICA	Mini-Proctor	ME 228/94 (DNER, 1994)	Solo e Misturas
	Mini-CBR e Expansão	ME 254/97 (DNER, 1997)	Solo e Misturas
	Expansibilidade	ME 160/12 (DNIT, 2021)	Solo e Misturas

FONTE: Autora.

3.2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

3.2.1.1 GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO E SEDIMENTAÇÃO

Inicialmente foi feita a análise granulométrica do solo puro, de acordo com a NBR 7181/16 (ABNT, 2016). O ensaio tem por objetivo classificar o solo quanto ao tamanho das partículas, medindo a massa passante em peneiras padronizadas relativa ao peso total do solo. Solos com fração grossa e fina, nesse caso trata-se de um solo areno-argiloso, carece a caracterização completa, processo de peneiramento seguido pelo ensaio de sedimentação dos sólidos em solução de hexametáfosfato de sódio.

3.2.1.2 MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS

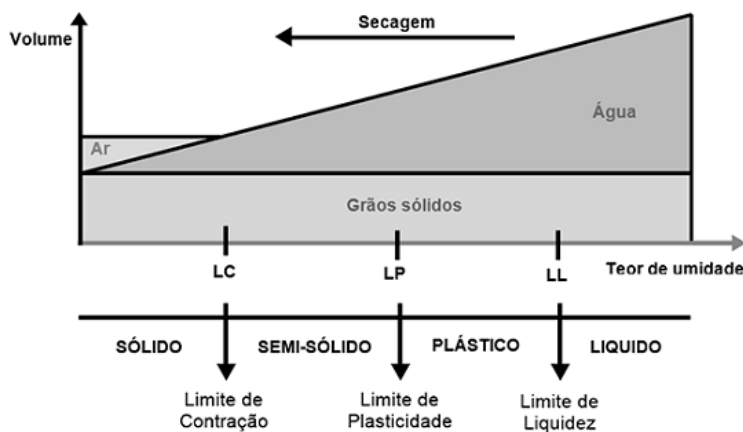
A massa específica real dos grãos do solo, relação entre a massa total e o volume, foi determinada seguindo procedimento da NM 52/09 e NM 53/09 (ABNT, 2009). Ensaiou-se apenas o solo puro retido e passante na peneira nº4, abertura 4,75 mm, isolando os resultados para os agregados graúdos e finos.

3.2.1.3 LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Os ensaios realizados para definição dos limites de consistência, também vistos como limites de Atterberg, foram Limite de Liquidez (LL) NBR 6458/17 (ABNT, 2017) e Limite de Plasticidade (LP) NBR 7180/16 (ABNT, 2016). Todos esses parâmetros indicam o grau de ligação entre as partículas mediante quantidade de água existente no solo e eventual mudança de estado físico.

Com o auxílio do aparelho de Casagrande indica-se o teor e umidade em que o solo passa do estado líquido para plástico, limite de liquidez; já o limite de plasticidade é a medida da umidade no qual o solo decorre do estado plástico para o semissólido quando atritado em placa de vidro de superfície esmerilhada; o limite de contração é a proporção de água no solo no limiar entre o estado semissólido e o sólido, ou seja, quando a perda a umidade não provocara a redução do volume, Figura 20.

Figura 20 - Estados característicos de consistência dos solos finos e os Limites de Atterberg



FONTE: <https://www.suportesolos.com.br/blog/consistencia-do-solo-ensaios-geotecnicos-ensaios-de-limite-de-liquidez-ll-e-de-plasticidade-lp/33/>.

Estabeleceu-se 10 amostras para estudo, 2 para o solo puro, 1,5% de CPIII 40 RS, 3% de CPIII 40 RS, 1,5% de pó de FGD e 3% de pó de FGD, uma vez que, foram executados dois ensaios por misturas, um no momento que se adicionou água destilada a mistura seca, e outro 7 dias após a primeira medição dos limites LL e LP.

O processo de cimentação, formação das etringitas, tanto do cimento quanto do pó FGD é estabelecido ao longo tempo e sequente capacidade de hidratação, dessa forma, o intervalo entre a realização do ensaio tem por objetivo medir a competência de cada aditivo em inferir rigidez ao solo no decorrer de 7 dias.

Segundo Nogami e Villibor (1995), a maioria das normas e estudos apontam limites máximos de 25%, para o limite de liquidez, e 6%, para o índice de plasticidade. Mas a prática, tanto de campo quanto de laboratório, indica inaplicabilidade desses critérios para os solos tropicais lateríticos, dessa forma é necessária a verificação de outros fatores, como a expansibilidade.

3.2.1.4 TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA

Em conjunto a análise da caracterização, também foi realizado o ensaio de teor da matéria orgânica no solo puro, NBR 13600/96 (ABNT, 1996). De acordo Machado e Ruver (2013) o teor de matéria orgânica interfere significativamente na resistência a compressão simples do material solo-cimento. A presença de matéria orgânica prejudica as reações químicas entre o cimento e o solo, restringindo as propriedades mecânicas resultantes, consequentemente, quanto menor a porcentagem desse parâmetro maior a resistência adquirida pela mistura.

Para os solos topicais, Alves (2014) indica em sua pesquisa, que devido às elevadas temperaturas e umidade nos trópicos, a matéria orgânica sofre decomposição muito rápido, dessa forma, os solos apresentam em média de teores entre 1,0 e 2,0% de matéria orgânica.

3.2.1.5 MINI-MCV

O ensaio Mini-MCV permite a determinação de dois parâmetros necessários para a classificação dos solos laterítico, representado pela norma ME 258/94 (DNER, 1994), logo, ensaiou a amostra do solo puro. Para a classificação são determinados dois coeficientes empíricos, o coeficiente c' , analisa as

consequências da distribuição granulométrica no comportamento do solo, e o coeficiente d' , capacidade do solo de se comportar de como laterítico.

Segundo Ferreira (1992) *apud* Malanconi (2013), para o coeficiente c' valores abaixo de 0,5 representam solos muito arenosos e acima de 2,0 caracterizam as argilas, já a variação entre 0,5 e 2,0 correspondem aos siltes arenosos, argilas arenosas e argilas siltosas. Os valores do coeficiente d' para argilas lateríticas são superiores a 20, argilas expansivas inferiores a 15 e solos siltosos, cauliníticos e micáceos, menores que 10.

Figura 21 - Compactador do ensaio Mini-MCV



FONTE: Autora.

3.2.1.6 PERDA DE MASSA POR IMERSÃO

A verificação da perda de massa por imersão foi realizada na amostra de solo puro, seguindo a norma ME 256/94 (DNER, 1994). Assim como o Mini-CBR, o corpo de prova permanece imerso por 20 horas em água, e como resultante avalia a estabilização do solo mediante presença de lâmina d'água, Figura 22.

Segundo Ferreira (1992), conforme citado por Malanconi (2013), a estabilidade do solo sob ação da água é medida de acordo o percentual de massa desprendido do corpo de prova, perda de massa por imersão (P_i). A perda de massa das argilas lateríticas, areias argilosas e argilas arenosas apresentam valores próximos de 0, das argilas expansivas, superior a 100%, e das areias finas ou siltes muito expansivos, aproximadamente 300%.

Figura 22 - Perda de massa por imersão



FONTE: Autora.

3.2.1.7 CLASSIFICAÇÃO

O ensaio de análise granulométrica é essencial para a maioria dos sistemas de classificação dos solos como Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e ABNT NBR 6502:1995 – Rochas e solos – Terminologia.

Ademais, especificamente para solos laterítico tem-se a classificação MCT com base nos ensaios realizados segundo as normas ME 254/97 (DNER, 1997) – Mini-CBR e Expansão –, ME 256/94 (DNER, 1994) – Perda de massa por imersão – e ME 258/94 (DNER, 1994) – Mini-MCV – avalia propriedades como a contração, permeabilidade, expansão, coeficiente de penetração d'água, coesão, capacidade de suporte e curvas de compactação. (Manual de Pavimentação, 2006).

Para essa pesquisa, o solo puro foi classificado granulometricamente, em conformidade com as métodos abordados, e pela metodologia MCT.

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA

3.2.2.1 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

O entendimento de coeficiente de permeabilidade resguarda o pavimento quanto ao acúmulo de água, o qual acarretaria a degradação da estrutura. Assim, foram realizados ensaios para determinar o coeficiente de permeabilidade do solo puro e das misturas, todas em acordo como método “A” da NBR 14545/21 (ABNT, 2021), Figura 23. Garcia e Lollo (2019) em suas pesquisas confirmam que a condutividade hidráulica (k) tende a valores infinitesimais e inversamente proporcional ao aumento da dosagem de solo cimento. Ademais, o coeficiente de condutividade hidráulica, na condição saturada, pode sofrer variação na ordem de 8 a 10, no intervalo compreendido entre um solo granular e solo fino, de acordo Lambe e Whitman (1979).

Figura 23 - Ensaio de permeabilidade com carga variável



FONTE: Autora.

3.2.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

3.2.3.1 MINI-PROCTOR

A massa específica aparente seca do solo referente à umidade ótima de trabalho garante resistência máxima ao solo e é a base para compactação dos corpos de provas de outros ensaios como Índice de Suporte Califórnia e Expansão. Por essa razão, foram executados ensaios de compactação em equipamento miniatura em conformidade com a norma ME 228/94 (DNER, 1994), Figura 24.

Figura 24 - Mini-Proctor



FONTE: Autora.

Para cada mistura e solo puro, foram preparadas 5 amostras, 48 horas antes da compactação, com teores de umidade variando $\pm 2\%$ da umidade ótima da amostra, definida com base na umidade ótima apresentada nos estudos de Picoli (2020). Seguindo o procedimento “B” da norma, energia de compactação intermediária, os corpos de provas foram conformados aplicando 6 golpes com o soquete tipo pesado, massa igual 4540 gramas. O critério de aceitação dos corpos de prova em relação à altura final foi compreendido entre $50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

3.2.3.2 MINI-CBR E EXPANSÃO

Em sequência a compactação, sem processo de cura, para todos os corpos de prova citados no ensaio acima, foram realizados os ensaios de Mini-CBR e Expansão, segundo ME 254/97 (DNER, 1997). Por definição o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR) determina a relação entre a pressão a penetração do solo em comparação a brita padrão,

medida fundamental em construção de pavimentos, por isso é tão importante para a análise.

O ensaio é realizado após 20 horas de imersão em água, logo, os corpos de prova são colocados na prensa elétrica automática, Figura 25, e à medida que as cargas são aplicadas o software mede os deslocamentos, Figura 26, e plota um gráfico carga *versus* deslocamento. As cargas consequentes das penetrações 2,0 mm e 2,5 mm definem o Mini-CBR.

Figura 25 - Ensaio de penetração Mini-CBR



FONTE: Autora.

Figura 26 - Corpos de prova ensaiados



FONTE: Autora.

Associado ao ensaio de Mini-CBR tem-se o ensaio de expansão, onde são feitas leituras iniciais, quando o CP é imerso, e finais, antes de ser retirado do tanque de imersão, ou seja, o solo interage com a água por 20 horas. O aumento da expansão está relacionado ao acréscimo de umidade, uma vez que, a saturação do material reduz a sucção entre grãos (SANTOS e MARTÍNEZ, 2003). Algumas normas regulamentadoras limitam os valores de expansão conforme a camada do pavimento em que o solo será empregado, Tabela 5.

Tabela 5 - Limites de expansão para camadas de base e sub-base

CAMADA DO PAVIMENTO	LIMITE DE EXPANSÃO	NORMA DNIT
Base estabilizada granulometricamente	$\leq 0,5\%$	ES 141/2010
Sub-base estabilizada granulometricamente	$\leq 1,0\%$	ES 139/2010
Base de solo melhorado com cimento	$\leq 0,5\%$	ES 142/2010
Sub-base de solo melhorado com cimento	$\leq 1,0\%$	ES 140/2010

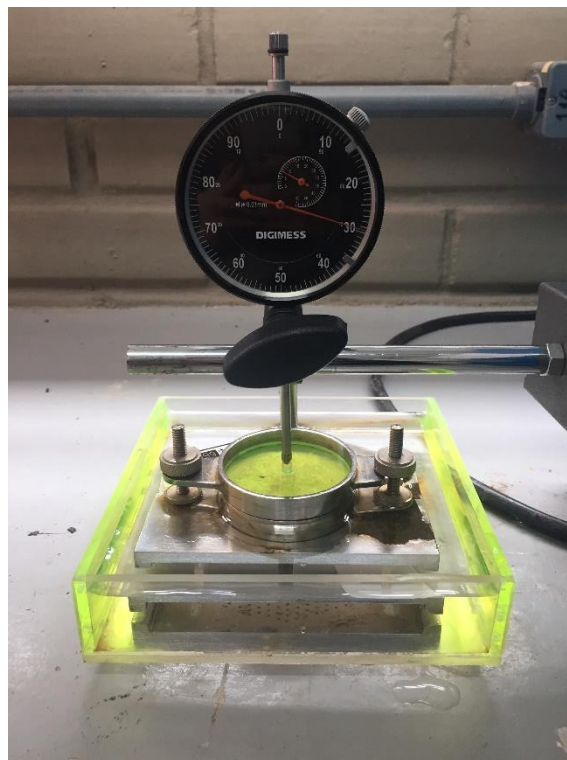
FONTE: Autora.

3.2.3.3 EXPANSIBILIDADE

O ensaio de expansibilidade, Figura 27, elaborado para todas as amostras, solo puro e misturas, em conformidade com ME 160/12 (DNIT, 2012), mensura o potencial de expansão do solo com o aumento da umidade, propriedade correspondente à fração de argila, parte ativa do solo. Vale ressaltar que os resultados obtidos no ensaio contabilizaram os deslocamentos no período de 6 horas de duração.

Para a aplicação de solos laterítico em camadas de base este parâmetro é associado à expansão, permitindo valores de expansão superior a 1,0%, desde que a expansibilidade apresente um valor inferior a 10%, ES 139/2010 (DNIT, 2010).

Figura 27 - Ensaio de expansibilidade



FONTE: Autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

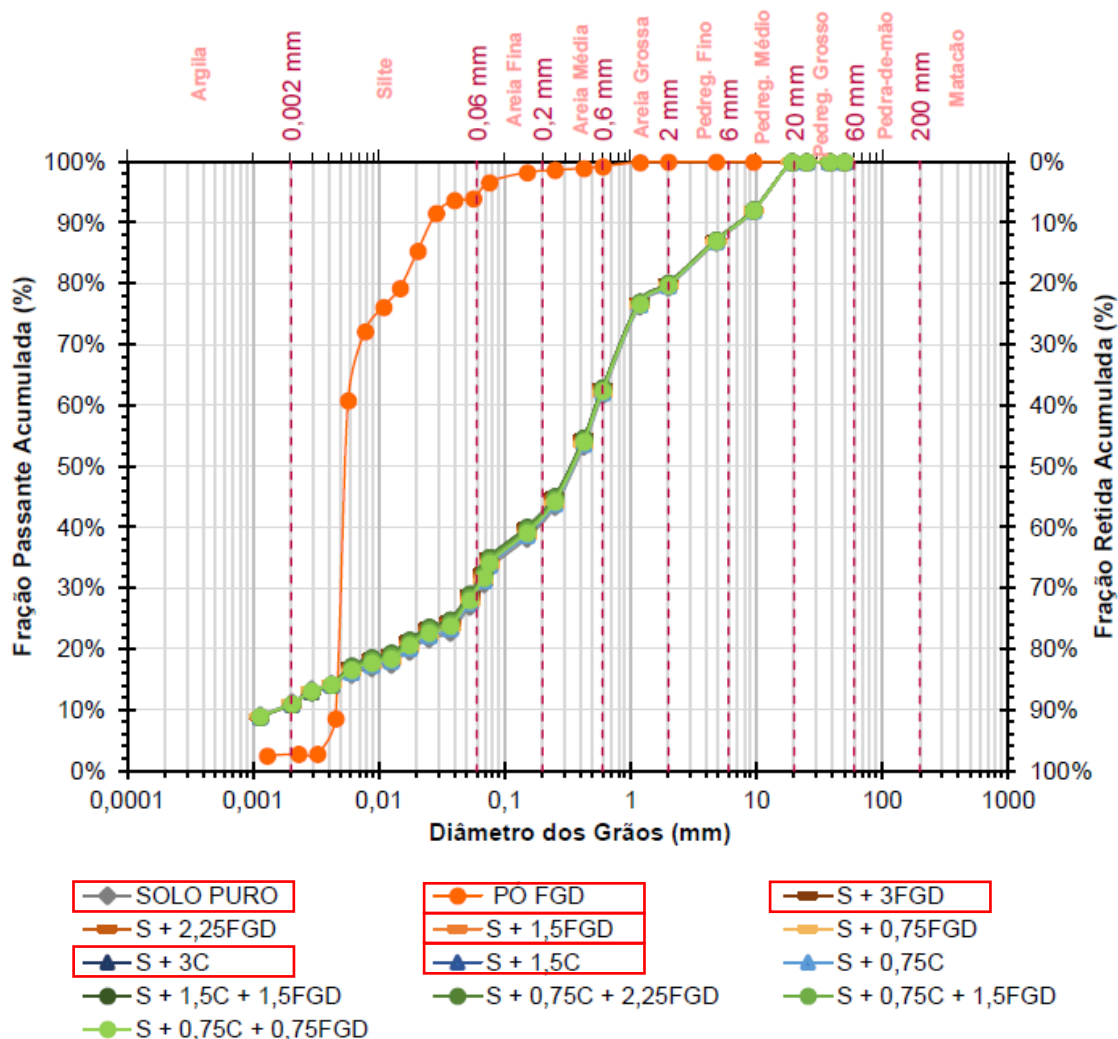
Neste capítulo serão apresentadas as resoluções e análises deliberadas de cada procedimento experimental citado no item anterior e realizados ao longo desse estudo. É de referir que a extração do solo, usado nos ensaios, ocorreu na mesma jazida indicada nos estudos de Picoli (2020); por essa razão, os resultados dos ensaios granulometria por peneiramento e sedimentação, massa específica real dos grãos e teor de matéria orgânica, indicativos da caracterização física dos materiais e misturas, foram auferidos da pesquisa da Mestra em pauta.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.1.1 GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO E SEDIMENTAÇÃO

A Figura 28 exibe as curvas granulométricas particulares ao solo, pó FGD e as misturas apontadas na legenda. Todavia, as análises granulométricas de interesse desse estudo são apenas do solo puro, pó FGD e das misturas de solo adicionados 1,5% e 3% de pó FGD, ou 1,5% e 3% de cimento Portland, destacadas em contorno vermelho.

Figura 28 - Curvas granulométricas das amostras



FONTE: Picoli (2020).

A Tabela 6 exibe relação entre o tamanho dos grãos e a percentagem referente a esta demarcação. As dimensões das partículas enquadram a amostra em argila, silte, areia ou pedregulho, sendo argila inferior a 0,002 mm, silte, entre 0,002 e 0,06 mm, areia fina, 0,06 a 0,2 mm, areia média, 0,2 a 0,6 mm, areia grossa, 0,6 a 2 mm, pedregulho fino, 2 a 6 mm, pedregulho médio, 6 a 20 mm, e pedregulho grosso, 20 a 60 mm.

Tabela 6 - Granulometria das amostras

Granulometria das Amostras								
Tamanho dos Grãos	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedr. Fino	Pedr. Médio	Pedr. Grosso
(mm)	< 0,002	0,002-0,06	0,06-0,2	0,2-0,6	0,6-2,0	2,0-6,0	6,0-20	20-60
JP6	11,10 %	17,70 %	12,00 %	21,00 %	17,70 %	8,70 %	11,90 %	0,00%
Pó FGD	2,70%	91,80 %	4,00%	0,80%	0,80%	0,00 %	0,00%	0,00%
JP6+3C	10,80 %	19,90 %	11,80 %	20,40 %	17,10 %	8,40 %	11,50 %	0,00%
JP6+3FGD	10,80 %	19,90 %	11,80 %	20,40 %	17,10 %	8,40 %	11,50 %	0,00%
JP6+1,5C	11,00 %	18,80 %	11,90 %	20,70 %	17,40 %	8,50 %	11,70 %	0,00%
JP6+1,5FGD	11,00 %	18,80 %	11,90 %	20,70 %	17,40 %	8,50 %	11,70 %	0,00%

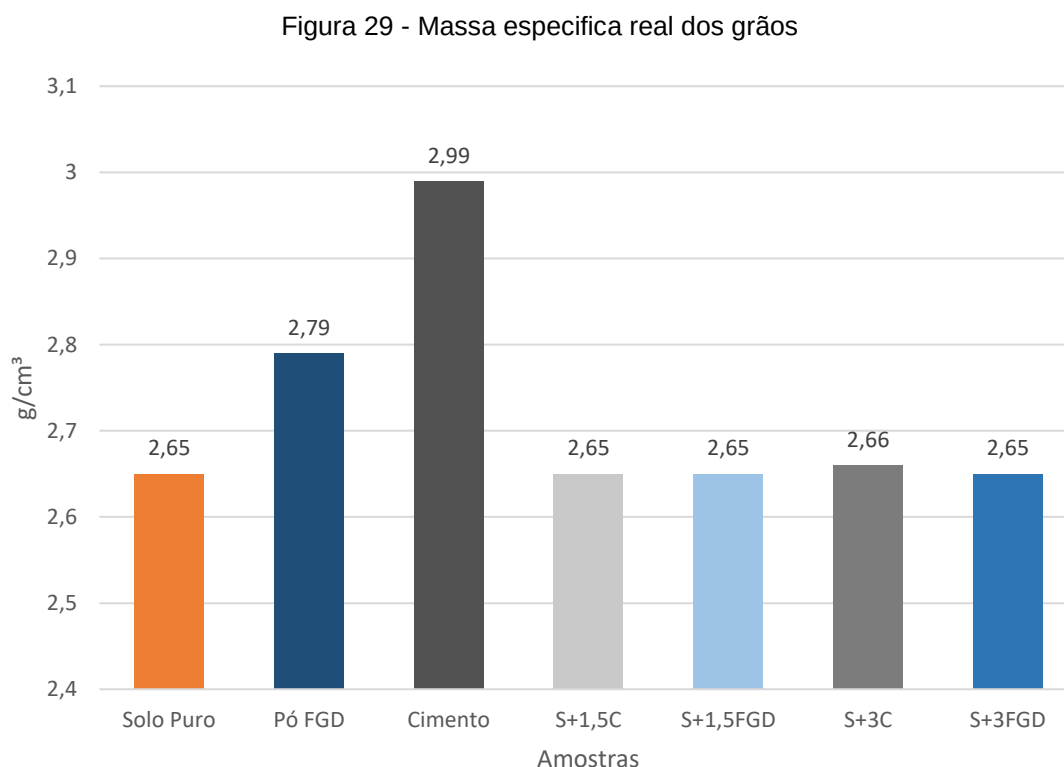
FONTE: Adaptado de Picoli (2020).

A diversidade no tamanho dos grãos nas amostras JP6, JP6+3C, JP6+3FGD, JP6+1,5C e JP6+1,5FGD, permite o preenchimento de vazios com maior eficiência reduzindo assim a compressibilidade e aumentando a resistência do material. Já a composição pó FGD é predominante mais fina, desde a descrição tátil visual a análise da curva granulométrica. A Federal Highway Administration Research and Technology (2016) expõe valores superiores a 90% para as partículas tamanho silte do pó FGD, com total de 91,80% o material está em conformidade com o critério apresentado.

Não obstante, observa-se que todas as curvas associadas ao solo puro ou com adições, especificam a mesma trajetória com variações mínimas. Essas pequenas variações são verificadas nas porcentagens da tabela acima, principalmente nas partículas tamanho silte.

4.1.2 MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS

A relação entre o peso e o volume dos grãos do solo puro, pó FGD, cimento CPIII 40 RS e das misturas, estão apresentadas na Figura 29. Assim como na análise granulométrica os resultados da massa específica real dos grãos apresentados foram obtidos da tese de Picoli (2020).



FONTE: Adaptado de Picoli (2020).

Dentre os resultados expostos, a massa específica dos grãos do solo puro, de 2,65 g/cm³, é consideravelmente inferior ao cimento e pó FGD. Todavia, a medida está adequada a intervalos encontrados na literatura, como a variação apresentada pelo Manual do DNIT (2016) de 2,60 g/cm³ a 2,80 g/cm³, e próxima à ensaios de pesquisadores, tal qual Bridi (2020). Nota-se também, as massas específicas das misturas são similares a do solo puro, dado que, a fração das adições em comparação a massa total é baixa.

O pó FGD, gerado pelo processo semiseco, expõe um dos maiores valores para esse ensaio com 2,79 g/cm³, ligeiramente superior ao intervalo proposto pela FHWA (2016), de 2,25 a 2,6g/cm³ para os processos úmido, seco e

semissecos. Por outro lado, alguns trabalhos como Cunha (2020), aplicaram o mesmo método de ensaio usado na pesquisa de Picoli (2020), dispondo de massa próxima a ensaiada, igual a $2,75 \text{ g/cm}^3$, exclusivamente para o processo semiseco. Seguidamente, o cimento resultou massa específica real de $2,99 \text{ g/cm}^3$, adequado ao intervalo de $2,8$ e $3,2 \text{ g/cm}^3$, e próximo aos valores apresentados nos trabalhos Baldovino e Izzo (2019), $3,11 \text{ g/cm}^3$, e FOPPA (2005), $3,15 \text{ g/cm}^3$.

4.1.3 TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA

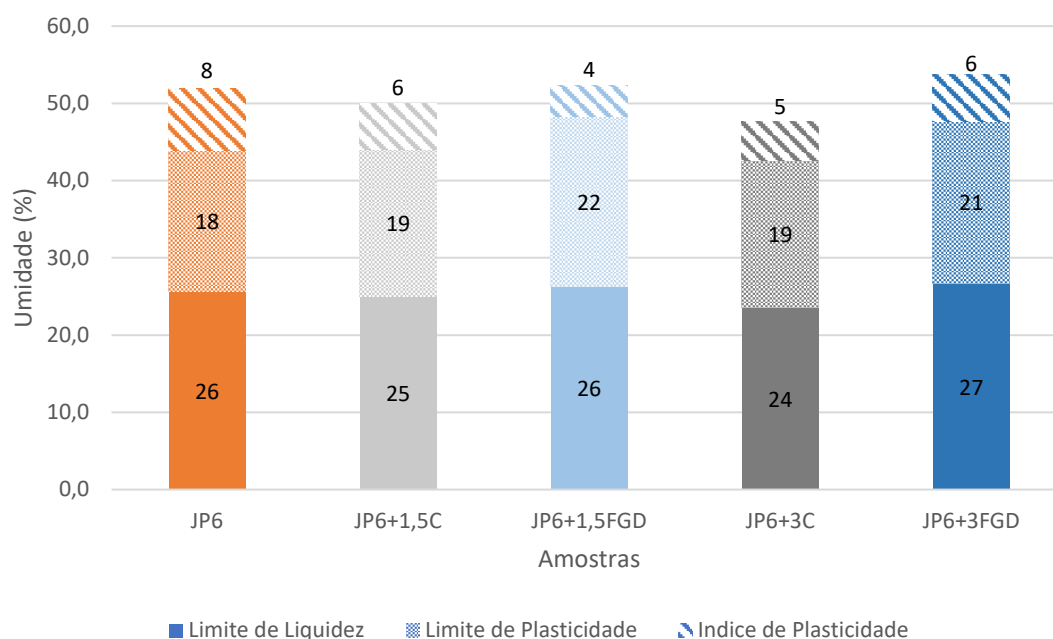
A percentagem de matéria orgânica, resultado obtido de Picoli (2020), no solo e pó FGD, foram de $2,82\%$ e $1,80\%$, sucessivamente. Sabe-se que a presença de matéria orgânica acidifica ainda mais o solo, meio ácido, dificultando as reações químicas com o cimento. De acordo com Dias (2012) solos com teores de matéria orgânica superior a 2% não são indicados para a estabilização com cimento, mas Picoli (2020) cita que a estabilização do solo estudado com cimento e pó FGD foi muito satisfatória.

Uma hipótese que explica essa divergência entre os teores de matéria orgânica e a ação do solo-cimento é o predomínio de partículas grossas no solo, $59,3\%$; os solos granulares interagem melhor com o cimento, assim, a percentagem de matéria orgânica apresentada não foi suficiente para dificultar a interação do particulado grosso com o cimento. Não obstante vale lembrar, conforme Machado e Ruver (2013), a resistência a compressão de misturas solo-cimento é significativamente influenciada pelo teor de matéria orgânica.

4.1.4 LIMITES DE CONSISTÊNCIA

A Figura 30 indica os resultados dos limites de consistência ensaiados, limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP), com secagem prévia do material.

Figura 30 - Limites de Consistência



FONTE: Autora.

Inicialmente, nota-se a alteração do limite de liquidez com a adição do cimento e o pó FGD em conformidade com as frações citadas. O acréscimo de cimento acarreta a redução do limite de liquidez do solo puro, com uma variação de 2%, quando comparado à amostra com 3% de cimento. Em contrapartida, a incorporação do pó FGD estimulou o aumento do limite de liquidez, ou seja, é necessária uma quantidade maior de água para a amostra modificar seu estado de consistência, do plástico para o líquido.

Quanto ao limite de plasticidade, verifica-se um comportamento padronizado para as todas as misturas, o aumento do teor de umidade. O LP do pó FGD é relativamente superior ao do cimento, contrastado com limite do solo puro, diferença máxima de 3%, assim, as misturas com o coproduto precisam de mais água para atingir o estado plástico. Por conseguinte, os valores de IP sofreram contração em todas as misturas, inferiores a 7, indicando misturas fracamente plásticas.

Esses resultados corroboram com o comportamento das amostras encontradas na pesquisa de Picoli (2020) (Tabela 7), Almeida et al. (2015) e Souza et al. (2000) a qual indicam redução da plasticidade com a incorporação do aditivo, devido a alterações na fração argilosa das amostras.

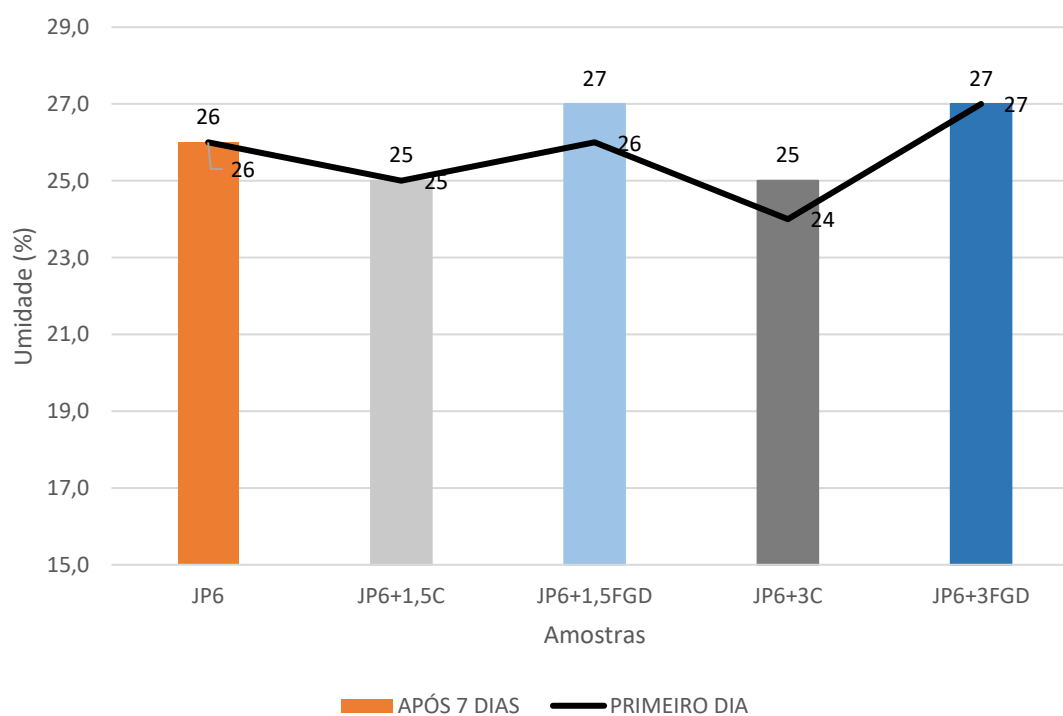
Tabela 7 - Limites de consistência Picoli (2020)

Amostra	LL	LP	IP
JP6	27	17	10
JP6+1,5C	26	19	7
JP6+1,5FGD	28	22	6
JP6+3C	26	19	7
JP6+3FGD	28	23	5

FONTE: Autora.

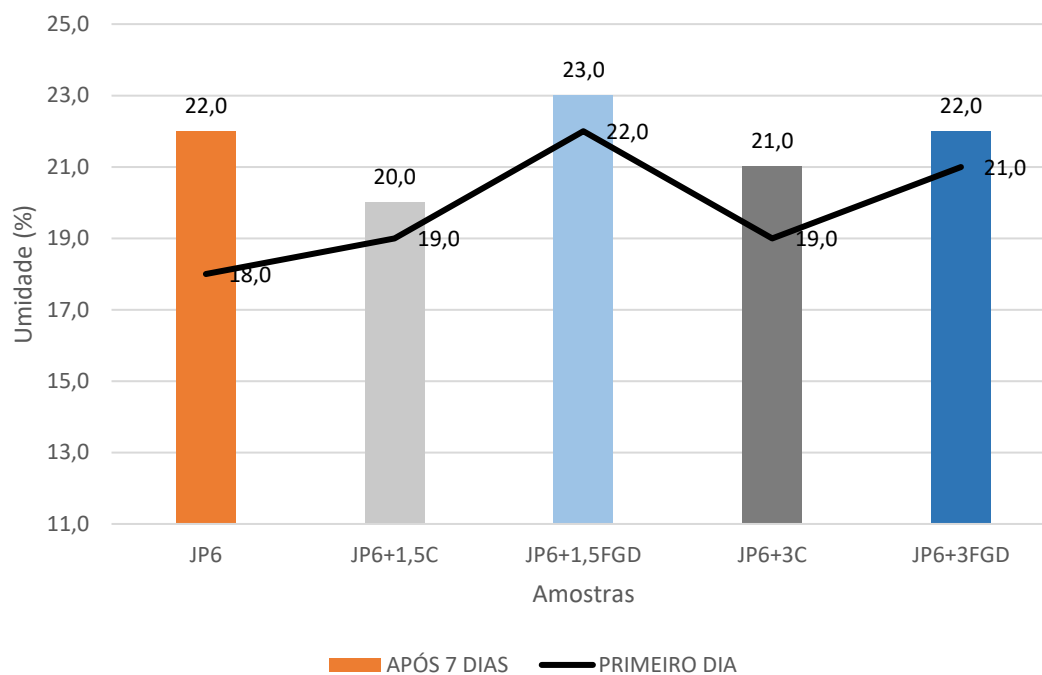
Em seguida, as Figura 31, Figura 32, Figura 33 apresentam as análises dos resultados dos limites de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade 7 dias após a realização do primeiro ensaio, sem secagem prévia do material.

Figura 31 - Limite de Liquidez com 7 dias



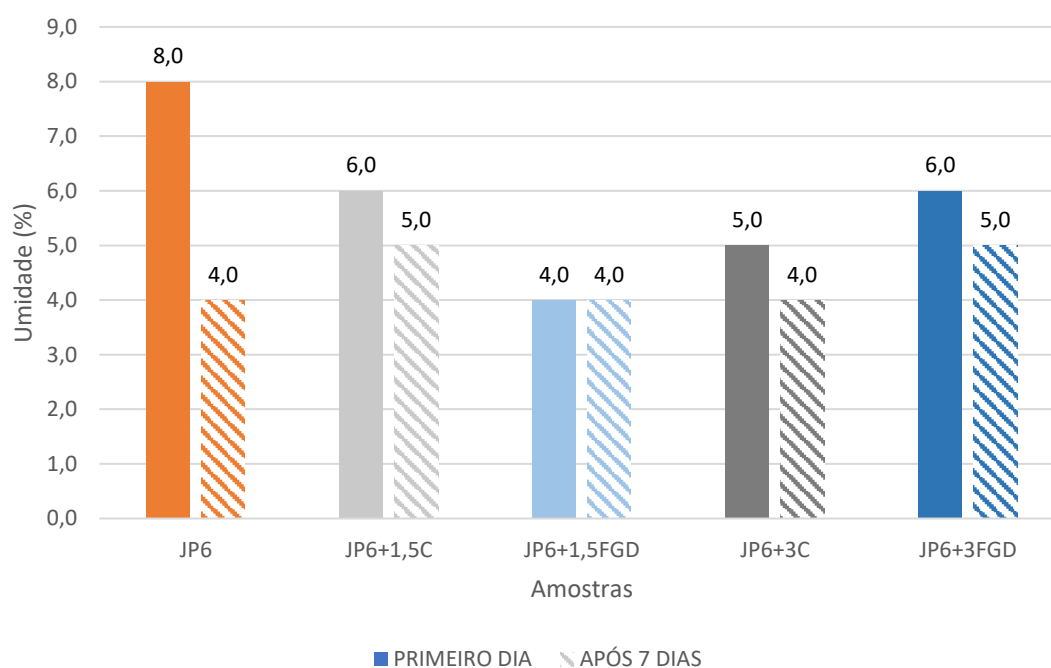
FONTE: Autora.

Figura 32 - Limite de Plasticidade com 7 dias



FONTE: Autora.

Figura 33 - Variação do Índice de Plasticidade



FONTE: Autora.

Confrontando os LL e LP após sete dias, verifica uma redução de ambos os limites em relação ao cimento e um aumento e constância dos limites nas misturas com pó FGD; já o índice de plasticidade indica estabilidade entre todas as amostras, com plasticidade fraca. Ademais, verifica-se notáveis

variações no limite de plasticidade, entre o primeiro e sétimo dia nas amostras de JP6 e JP6+3C, no índice de plasticidade da amostra JP6.

De acordo Picarelli (2003), a principal interação do solo com quaisquer substâncias adicionadas é retratada pelas trocas iônicas, e está ligada a variação de fração argila e silte total da mistura. Dessa forma, a variação entre os parâmetros sugere que as cargas negativas das amostras citadas não estão completamente neutralizadas no primeiro dia de compactação, mas a constância dos índices de plasticidade no sétimo dia confirma a afirmativa de Araújo e Pejon (2018) a respeito da diminuição da capacidade de troca catiônicas em misturas de solo-cimento, indicando a estabilização da mistura.

4.1.5 CLASSIFICAÇÃO

Os materiais foram classificados de acordo a granulometria: Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, e a laterização: *Tropical Compact Miniature (MCT)*. Como foi dito anteriormente, os resultados da análise de granulometria foram retirados da pesquisa de Picoli (2020), logo, a classificação granulométrica dos solos segue determinação da pesquisadora.

4.1.5.1 SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS (SUCS)

Na Tabela 8 abaixo está apresentada a identificação e descrição da classificação de cada amostra.

Tabela 8 - Classificação SUCS das amostras

Amostras	Identificação	Descrição
Solo Puro	SC	Areia Argilosa
JP6+1,5C	SC-SM	Areia Argilo-siltosa
JP6+1,5FGD	SC-SM	Areia Argilo-siltosa
JP6+3C	SC-SM	Areia Argilo-siltosa
JP6+3FGD	SM	Areia Siltosa

FONTE: Adaptado de Picoli (2020).

Classificou-se o solo puro em areia argilosa (SC), mistura bem graduada de areia e argila, entretanto, a adição do cimento e pó FGD provocou uma pequena alteração na classificação devido à redução do índice de plasticidade. Assim, para as misturas JP6+1,5C, JP6+1,5FGD e JP6+3C, tem-se uma areia argilo-siltosa, e JP6+3FGD, uma areia siltosa; nota-se que a maior variação da classificação ocorreu com a máxima fração do pó FGD.

4.1.5.2 *AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO)*

A classificação AASHTO carece do parâmetro índice de grupo (IG), que avalia a qualidade do material empregado no subleito de uma rodovia, para determinação do tipo solo. Assim, os valores encontrados de IG e sequente definição estão apresentados na Tabela 9. Todas as amostras foram enquadradas como material granular A-2-4, constituídos por areia, areia argilosa ou areia siltosa, e IG = 0, indicando solo com ótima capacidade de suporte.

Tabela 9 - Classificação AASHTO das amostras

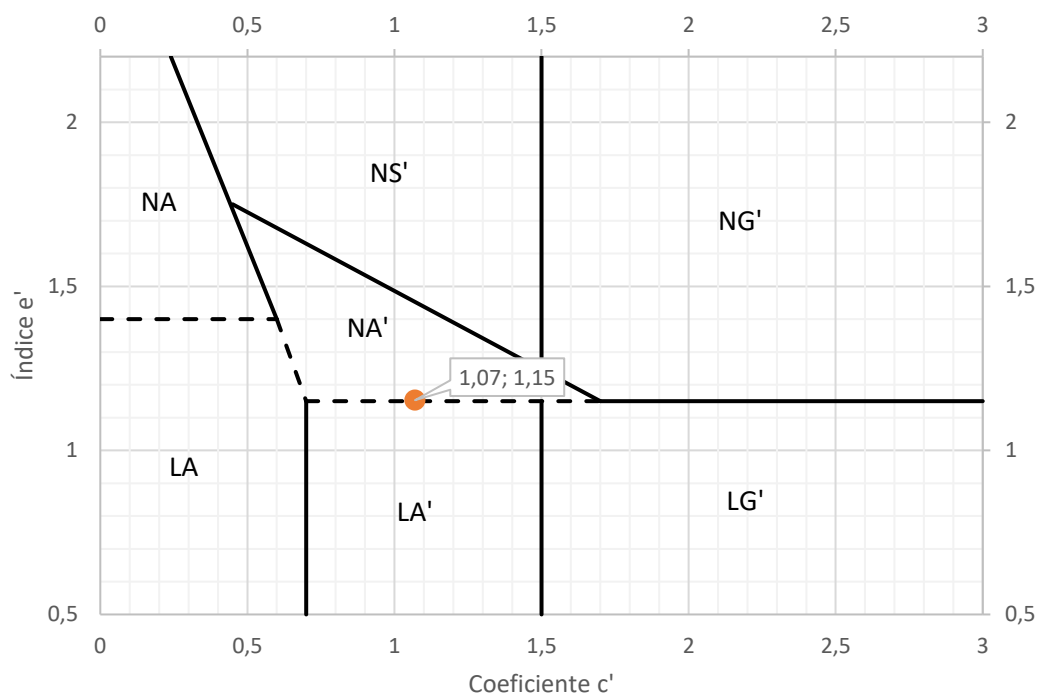
Amostras	IG	Identificação	Descrição
Solo Puro	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa
JP6+1,5C	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa
JP6+1,5FGD	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa
JP6+3C	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa
JP6+3FGD	0	A-2-4	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa

FONTE: Adaptado de Picoli (2020).

4.1.5.3 *TROPICAL COMPACT MINIATURE (MCT)*

Para o solo puro foi realizada a classificação MCT, e as definições foram plotadas na Figura 34. Os parâmetros de entrada usados foram o coeficiente c' , igual a 1,07, e o índice e' , igual a 1,15, que por sua vez, depende do coeficiente d' , igual a 34,9, e da perda por imersão, igual a 96.

Figura 34 – Gráfico de classificação MCT



FONTE: Autora.

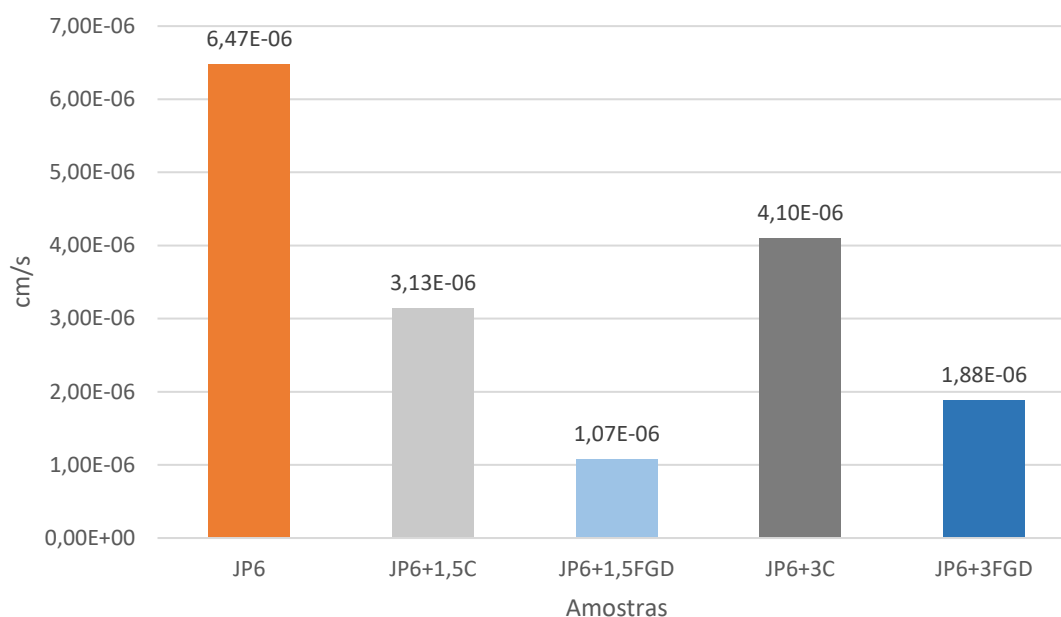
Logo, com os resultados e auxílio da norma CLA 259/96 (DNER, 1996), entende-se que a amostra é um solo LA', areia argilosa laterítica. De acordo Nogami e Villibor (1995) os solos integrantes desse grupo, predominantemente arenosos, conhecidos pôr latossolos arenosos, solos podzólicos ou podzolizados arenosos, quando compactados apresentam elevada capacidade de suporte, baixa permeabilidade, entre outros benefícios. A classificação MCT ratifica as classificações anteriores, o qual os autores da metodologia relacionam o solo LA' ao SC, conforme catalogação SUCS, e A-2 e A-4, AASHTO.

4.2 CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA

4.2.1 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

Na Figura 35 estão apresentados os valores do coeficiente de permeabilidade médio para o solo puro e misturas com 1,5% e 3% das adições.

Figura 35 - Coeficiente médio de Permeabilidade



FONTE: Autora.

A princípio, nota-se que o coeficiente de permeabilidade da amostra JP6 é ligeiramente superior às demais amostras, seguido pelos corpos de prova com adição de cimento, e por fim, as amostras mais impermeáveis são com adição de pó FGD. Contudo, a ordem de grandeza relacionada aos resultados dos coeficientes de permeabilidade, 10^{-6} , é constante, destarte a variação entre os resultados é praticamente desprezível.

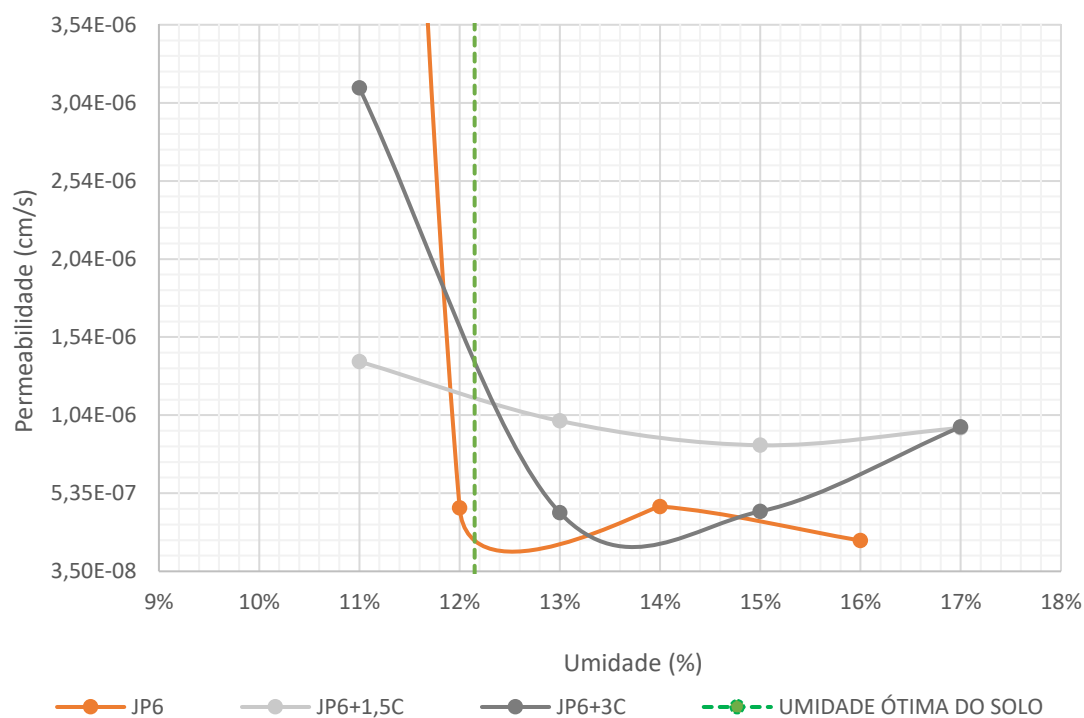
De acordo com literatura, os solos impermeáveis, com permeabilidade muito baixa ou baixíssima, são limitados à condutividade hidráulica inferior a 10^{-7} cm/s; sabe-se que as médias expostas são superiores a $1,07 \times 10^{-6}$, consequentemente, as amostras são classificadas como solos com baixa permeabilidade.

Cruz (2004) menciona que a condutividade hidráulica está associada ao tamanho e distribuição dos grãos, isso porque, se um solo for bem graduado, disposição contínua de diâmetros, os espaços vazios gerados pelas partículas maiores podem ser preenchidos pelas menores, produzindo com arranjo intrincado entre os grãos do solo. A redução dos vazios diminui as possibilidades de passagem da água, ou seja, uma menor permeabilidade.

Logo, a grandeza de 10^{-6} aponta a predominância de partículas tamanho areia fina, silte e argila.

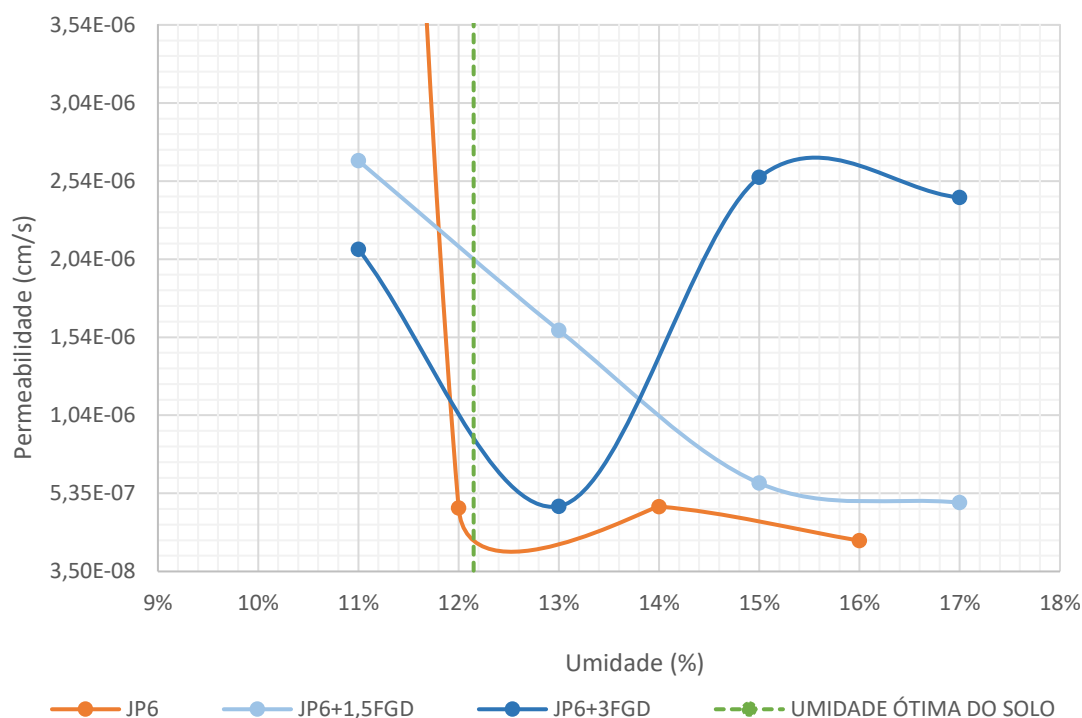
Outra análise necessária é avaliação da condutividade em função do teor de umidade do solo compactado, Figura 36 e Figura 37.

Figura 36 - Variação do coeficiente de permeabilidade em função da umidade de compactação



FONTE: Autora.

Figura 37 - Variação do coeficiente de permeabilidade em função da umidade de compactação



FONTE: Autora.

Lambe (1958) *apud* Rojas (2015) explica o comportamento do solo compactado a partir das partículas de argila individualizadas, subdividindo a curva de compactação em dois ramos de umidade. O ramo seco, lado esquerdo a umidade ótima, o arranjo entre as partículas é floculado, a orientação é aleatória e o índice de vazios é maior. Já o lado direito da curva, ramo úmido, a composição entre os grãos é dispersa, orientação paralela e o índice de vazios é menor. Desse modo, a reduzida quantidade de espaço de vazios no ramo úmido indica menor permeabilidade das amostras com maior teor de umidade.

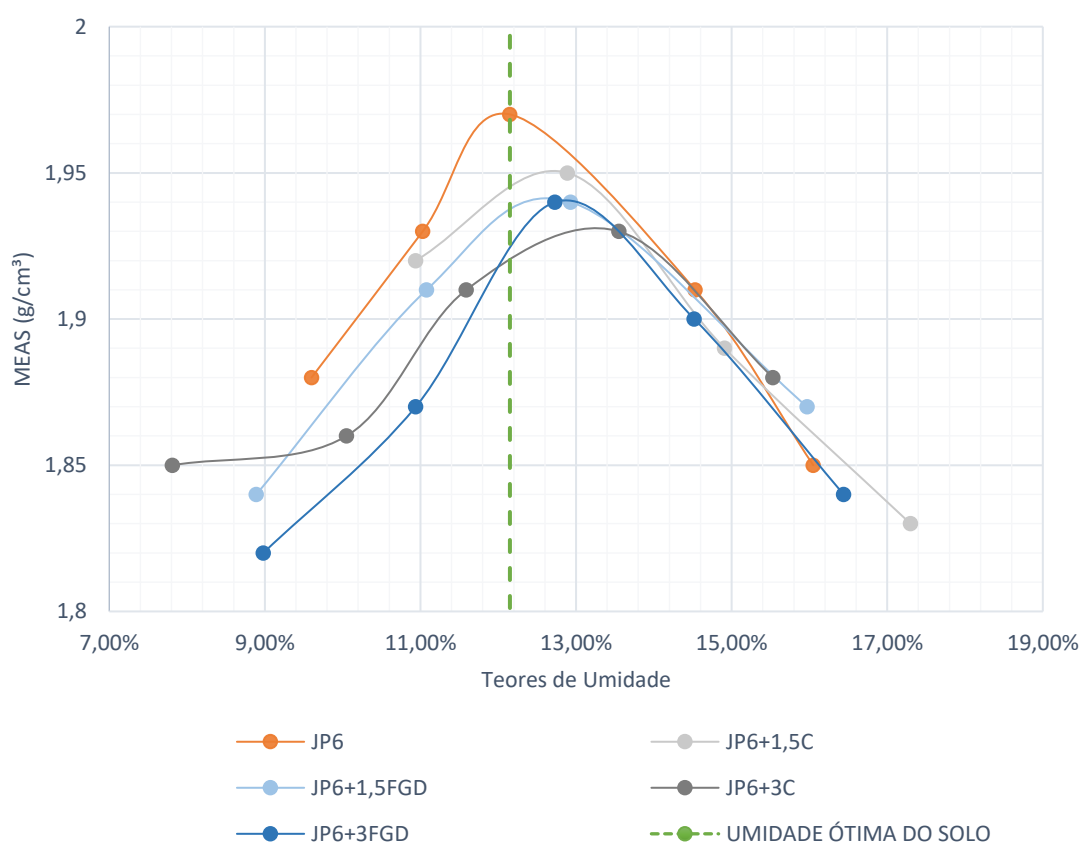
Nota-se que as curvas de permeabilidade das misturas e do solo, com exceção de dois pontos da amostra de 3% pó FGD, inconsistência atribuída ao método de ensaio (paredes rígidas), apresenta uma redução da permeabilidade com o aumento da umidade de compactação.

4.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

4.3.1 COMPACTAÇÃO

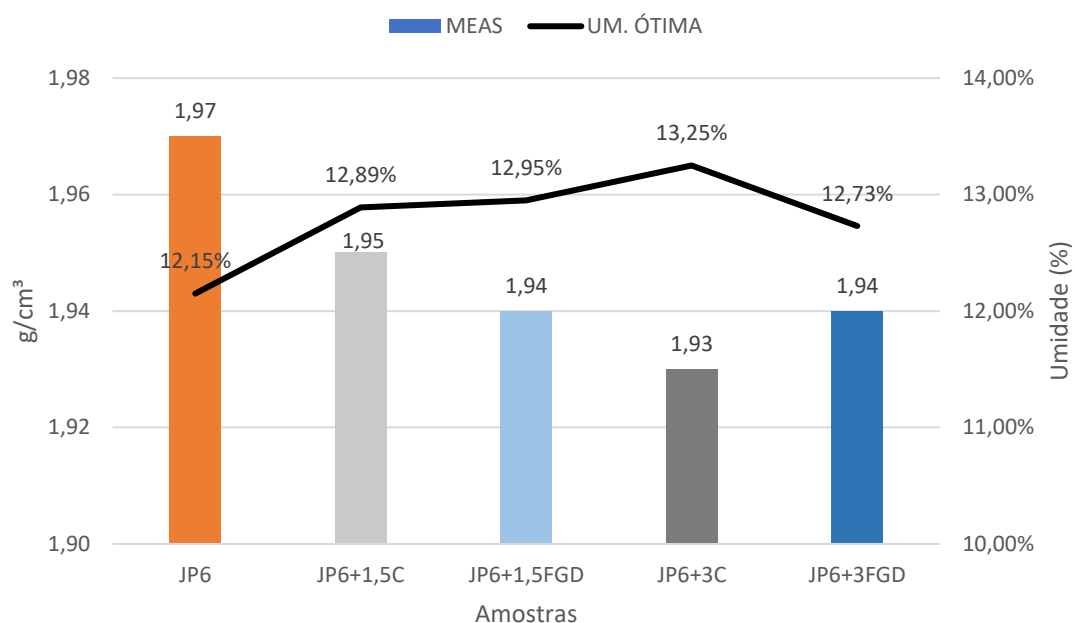
A compactação dos corpos de provas foi efetuada em compactador miniatura, Mini-Proctor, dessa forma as curvas de compactação apresentadas na Figura 38 são particulares a essa metodologia. Complementando o entendimento, a Figura 39 expõe os valores para massa específica aparente seca máxima (MEAS) e umidade ótima de cada amostra.

Figura 38 - Curvas de compactação Mini-Proctor



FONTE: Autora.

Figura 39 - Massa Específica Aparente Seca Máxima e Umidade Ótima das amostras



FONTE: Autora.

Observa-se que a adição do pó FGD e do cimento provoca modificações tanto em relação à umidade ótima quanto a MEAS. Nas amostras com cimento, a umidade ótima aumenta proporcionalmente à percentagem da adição, já nas amostras com pó FGD, a umidade ótima admite aumento inicial e estabiliza, independentemente da quantidade estudada. A Figura 39 também expõe a alteração da massa específica aparente seca máxima nas misturas comparadas com o solo puro, o cimento causa uma redução contínua e o pó FGD diminui e estabiliza.

Os resultados estão em conformidade com o trabalho de Dias (2012) e a descrição apresentada por ACI 230 (2009) em que a adição de cimento ao solo, geralmente, causa um aumento na umidade ótima e diminui o a densidade específica seca máxima. No entanto, em amostras com elevada densidade específica, há o aumento nas densidades secas.

Para mais, os valores de umidade corroboram a facilidade de absorção de água do cimento, comportamento higroscópico, e a inclinação ao equilíbrio higroscópico do pó FGD.

4.3.2 MINI-CBR

Os gráficos seguintes, Figura 40 e Figura 41, apresentam os valores encontrados de Mini-CBR variando com a umidade e conforme a umidade ótima do solo, sucessivamente.

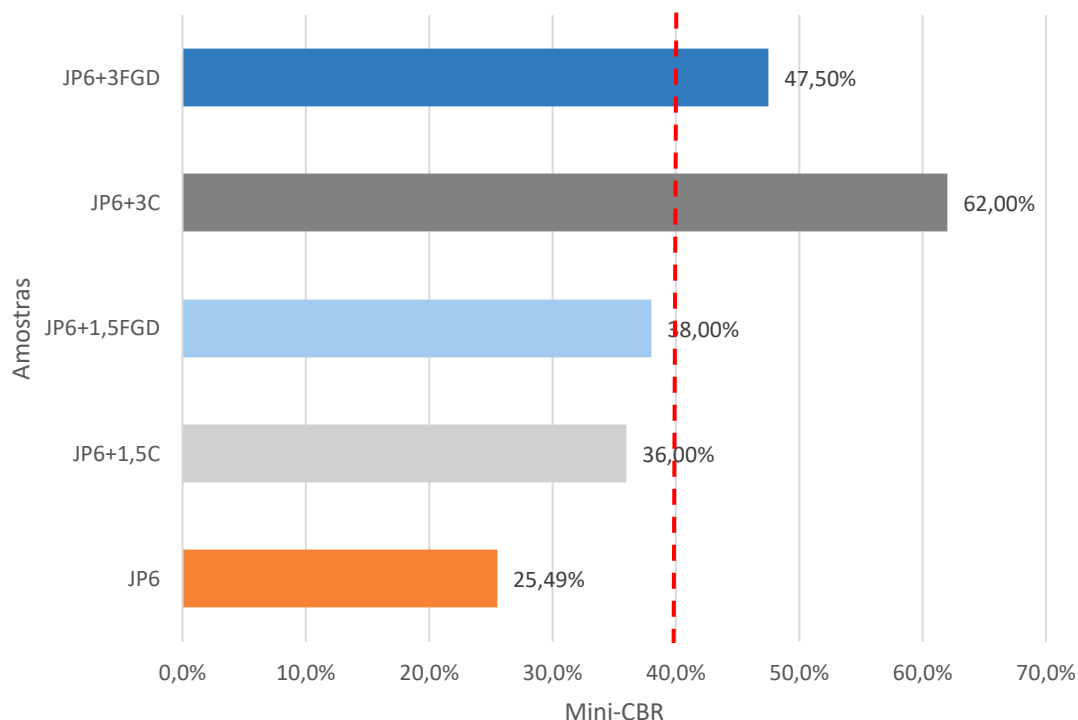
Figura 40 - Curvas do Mini-CBR de acordo a umidade das amostras



FONTE: Autora.

Como sugere a linha de tendência em vermelho, apesar das divergências entre as curvas das amostras, todos os resultados de resistência apresentam um ponto de máxima e posterior redução com o aumento da umidade. Em algumas amostras o ponto de inflexão da curva, máximo valor, não está associado à umidade ótima, desse modo, limitou-se o maior valor de Mini-CBR a umidade ótima do solo, 12,15%, Figura 41.

Figura 41 – Mini-CBR em acordo com umidade ótima do solo



FONTE: Autora.

Analisando, os resultados, é notável o aumento da resistência das amostras equivalente a porcentagem de cimento e pó FGD incorporado. Com base no Mini-CBR do solo, 25,49%, a amostra JP6+1,5C dispõe de um aumento de 41,23%, e a JP6+3C, um aumento de 143,23%; em contrapartida a amostra JP6+1,5FGD, teve aumento de 49,08%, e JP6+3FGD, de 86,35%. Reschetti Junior et. al (2008) apresentam em seus trabalhos critério superior a 40% (linha vermelha traçada) de Mini-CBR sem imersão para aplicação de solos arenosos finos lateríticos em bases de pavimento de baixo custo. Levando em consideração essa ponderação, dado que os resultados de Mini-CBR sem imersão são superiores aos imersos, tanto a amostra JP6+3C quanto a amostra JP6+3FGD exibem resistência para essa aplicação.

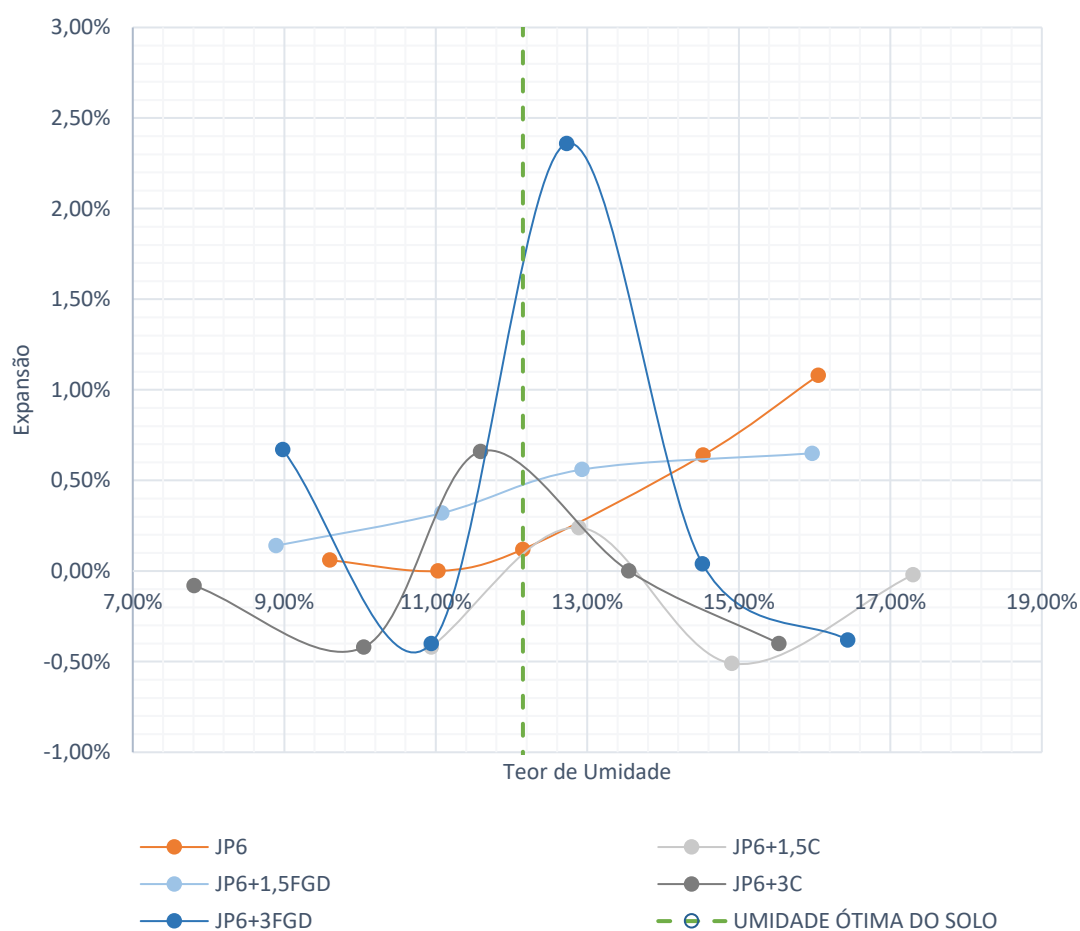
O desempenho das amostras apresentaram comportamento distinto das análises encontradas na tese de Picoli (2020), no qual as amostras com pó FGD obtiveram desempenho superior as amostras com cimento, todavia, o melhoramento da capacidade de suporte corrobora a boa interação do pó FGD com solos arenosos sugerido por Picoli (2020). Por conseguinte, embora as

amostra com 3,0% de adição retratam variação de 14,5%, todos os resultados foram satisfatórios.

4.3.3 EXPANSÃO

Assim como na análise anterior, a Figura 42 expõe a variação da expansão em relação à umidade das amostras de solo puro, com cimento e pó FGD. A Figura 43 apresenta os valores referentes à 12,15%, umidade ótima do solo.

Figura 42 - Curvas de expansão das amostras

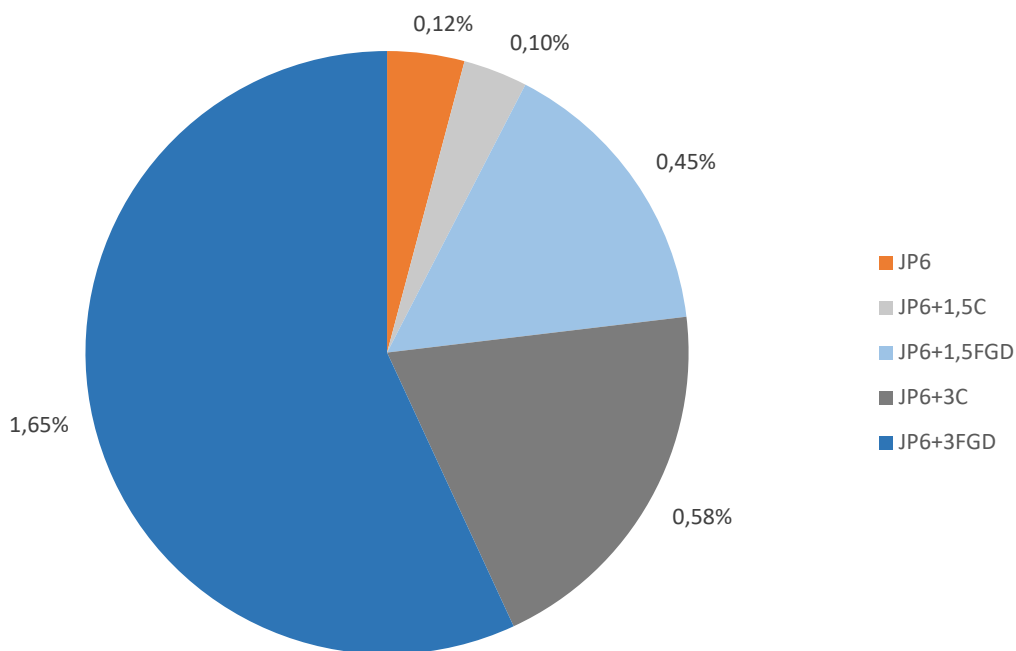


FONTE: Autora.

As curvas das amostras JP6 e JP6+1,5FGD demonstram um comportamento linear, ambas aumentaram o volume com a umidade, já as amostras JP6+1,5C, JP6+3C e JP6+3FGD dispõem de vários pontos de mudança na concavidade, com pequenas variações, no caso do cimento, e grande, pó FGD. Segundo Ferreira e Ferreira (2009), a variação volumétrica promovida pelo aumento ou

redução do teor de água no material, Figura 42, não é previsível e dependente de diversos fatores, como as características do solo, do ambiente e estados de tensão.

Figura 43 - Expansão das amostras na umidade ótima do solo



FONTE: Autora.

Logo, a verificação da expansão foi realizada com base na umidade ótima do solo (Figura 43). Nota-se que o valor da expansão nas misturas é diretamente proporcional à fração adicionada de cimento e pó FGD, todavia, quando comparada à expansão das misturas com o pó FGD, a expansão das misturas com cimento é mínima. De acordo com as diretrizes do DNIT, ES 142/2010 e ES 140/2010, o solo melhorado com cimento aplicado na camada de base devem ter expansão inferior a 0,5% e sub-base 1%.

Assim, as amostras JP6, JP6+1,5C e JP6+1,5FGD detêm de propriedades aplicáveis à camada de base, com expansão de 0,12%, 0,10% e 0,45%, sucessivamente, e as amostras JP6, JP6+1,5C, JP6+1,5FGD e JP6+3C, com expansão de 0,12%, 0,10%, 0,45% e 0,58%, são aptos à utilização em sub-base. Apenas a amostra JP6+3FGD não se enquadra em nenhum dos critérios citados. O estudo de Reschetti e Junior et al. (2008) limita os valores de

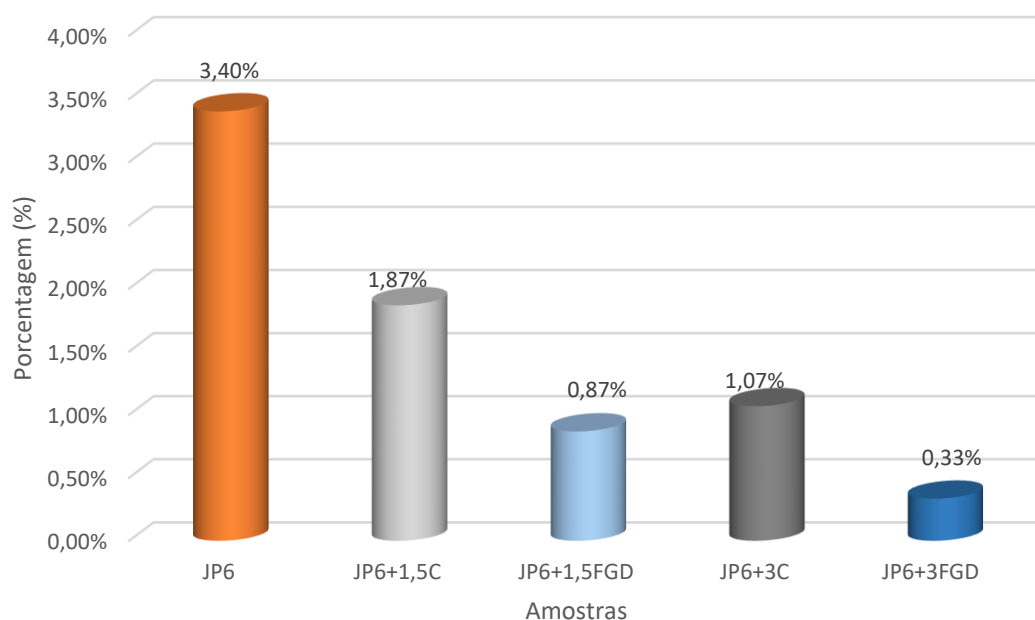
expansão para ensaio Mini-CBR a 0,30%, para essa demarcação somente as amostras JP6 e JP6+1,5C atendem ao critério.

Picoli (2020) menciona duas hipóteses para explicar as grandes porcentagens de expansão das misturas com o pó FGD, a primeira está relacionada à maior área superficial do material, influenciando elevadas troca catiônica com as moléculas de água e cátions hidratados, e a segunda ao excesso do composto Ca(OH)_2 , produzido na hidratação do pó FGD e existente no material.

4.3.4 EXPANSIBILIDADE

A Figura 44 apresenta os resultados de expansibilidade das amostras submetidas a 6 horas de ensaio. Primeiramente, vale mencionar que a remessa de solo usada nos ensaios anteriores é diferente da usada nesse ensaio, mas ambas foram retiradas da mesma jazida. Em razão do tempo de realização da pesquisa não foi possível a caracterização da segunda remessa do material, visivelmente mais avermelhado.

Figura 44 - Expansibilidade das amostras



FONTE: Autora.

O maior valor de expansibilidade exposto é referente ao solo puro, com redução significativa e equivalente a razão de cimento e pó FGD adicionada. As amostras com cimento apresentam uma redução inicial de 45%, com expansibilidade de 1,87% para JP6+1,5C e 1,07% para JP6+3C, as amostras com pó FGD atenuam a expansibilidade a 0,87% para JP6+1,5FGD e 0,33% JP6+3FGD. A norma ES 098/07 do DNIT recomenda expansibilidade inferior a 10% para o uso do material na camada de base, assim, em acordo com esse parâmetro todas as amostras aptas para implantação.

Segundo Dutra e Vale (2016), devido à presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, o pH dos solos lateríticos é predominante mais ácido e o processo de cimentação, entre os grãos, restringe a sua compressibilidade, resultando em materiais de baixa expansibilidade. Outra suposição a reduzida expansibilidade é a predominância das reações de floculação inicial das partículas tamanho argila, que facilita o processo de cimentação e redução o potencial expansivo.

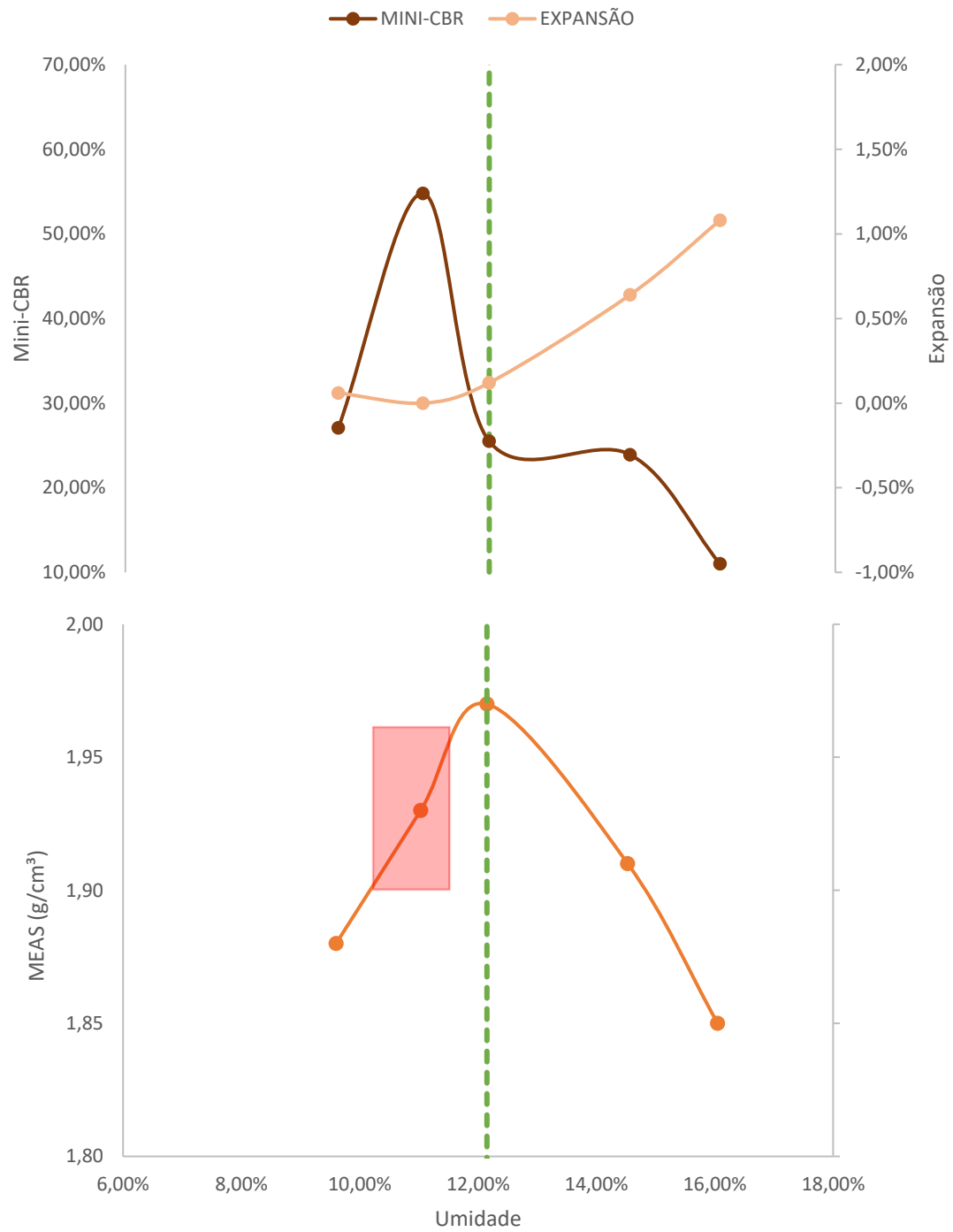
4.4 EFEITO DA COMPACTAÇÃO E UMIDADE

Como foi apresentado nos tópicos anteriores, às propriedades físicas estão constantemente relacionadas com a massa específica aparente seca e a umidade da amostra, por essa razão, estão também associadas à curva de compactação de cada mistura. A curva de compactação expõe um ponto de inflexão indicando a massa específica seca máxima e umidade ótima, dividindo o comportamento do solo em duas regiões, o ramo seco, a esquerda da umidade ótima, e o ramo úmido, à direita. A locação dos pontos no gráfico indica o comportamento do material, caso encontre-se na zona seca, indica uma estrutura de arranjo das partículas floculada, e na zona úmida, estrutura dispersa.

No ramo seco, o baixo teor de umidade e do grau de saturação, induzem tensões capilares no solo que elevam a dureza do mesmo, contundo essa estrutura é facilmente rompida com a percolação da água, ou seja, as características associadas à umidade abaixo da ótima são instáveis.

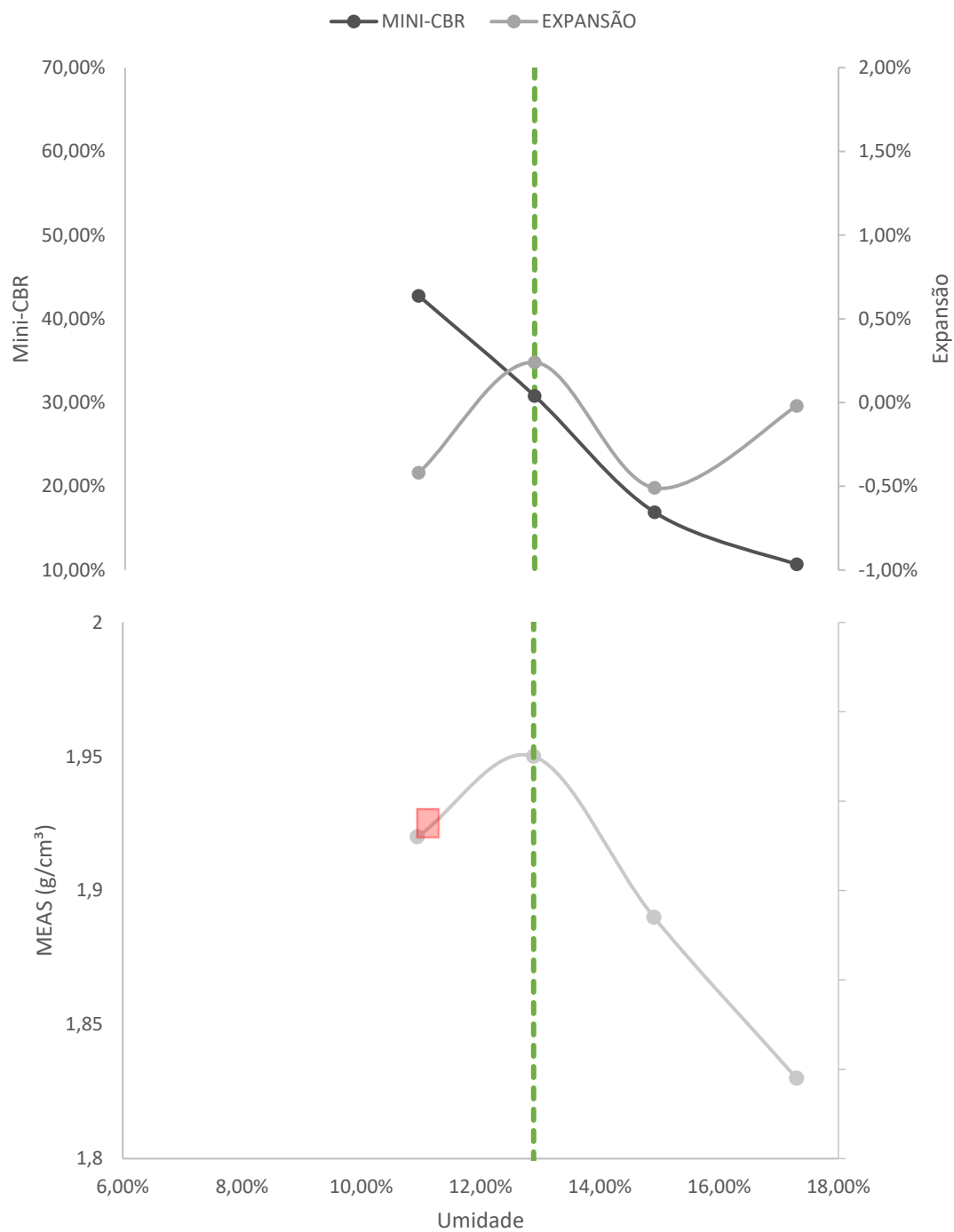
No entanto, levando em consideração apenas os parâmetros de Mini-CBR, superior a 40%, e expansão, inferior a 0,5%, para a camada de base, a região aceitável para cada mistura altera o padrão citado. Para as Figura 45 e Figura 46, a região que integra os critérios citados está no ramo seco da curva de compactação, já para as Figura 48 e Figura 49, a faixa contempla os dois lados da curva, contudo, como explicado, é aconselhável o trabalho com pontos na zona úmida. A mistura com 1,5% de pó FGD não apresentou nenhum ponto com Mini-CBR superior 40%, diante disso, o gráfico referente à mistura não possui uma região delimitada, Figura 47.

Figura 45 - Zona ótica do Solo Puro



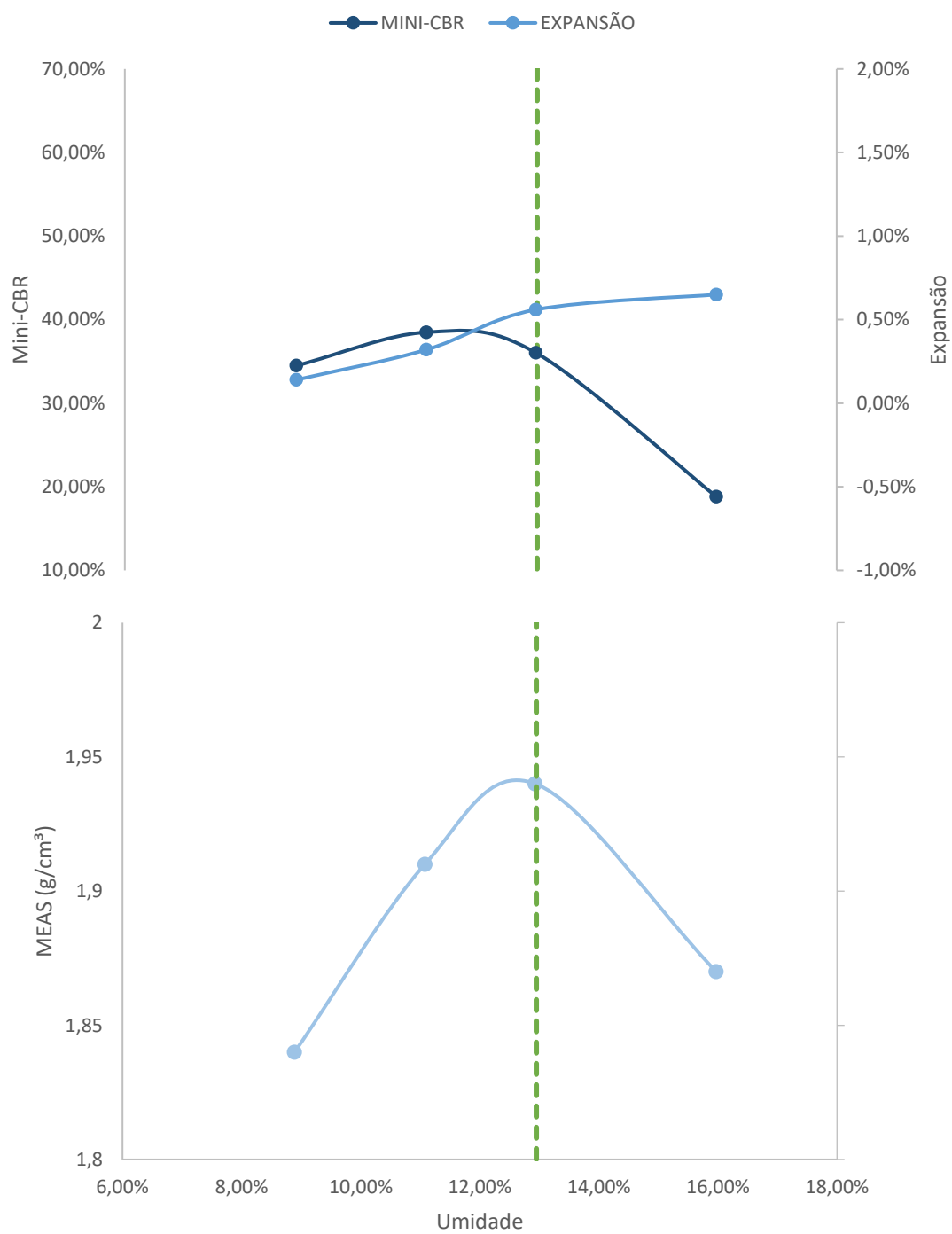
FONTE: Autora.

Figura 46 - Zona ótima da mistura com 1,5% de Cimento



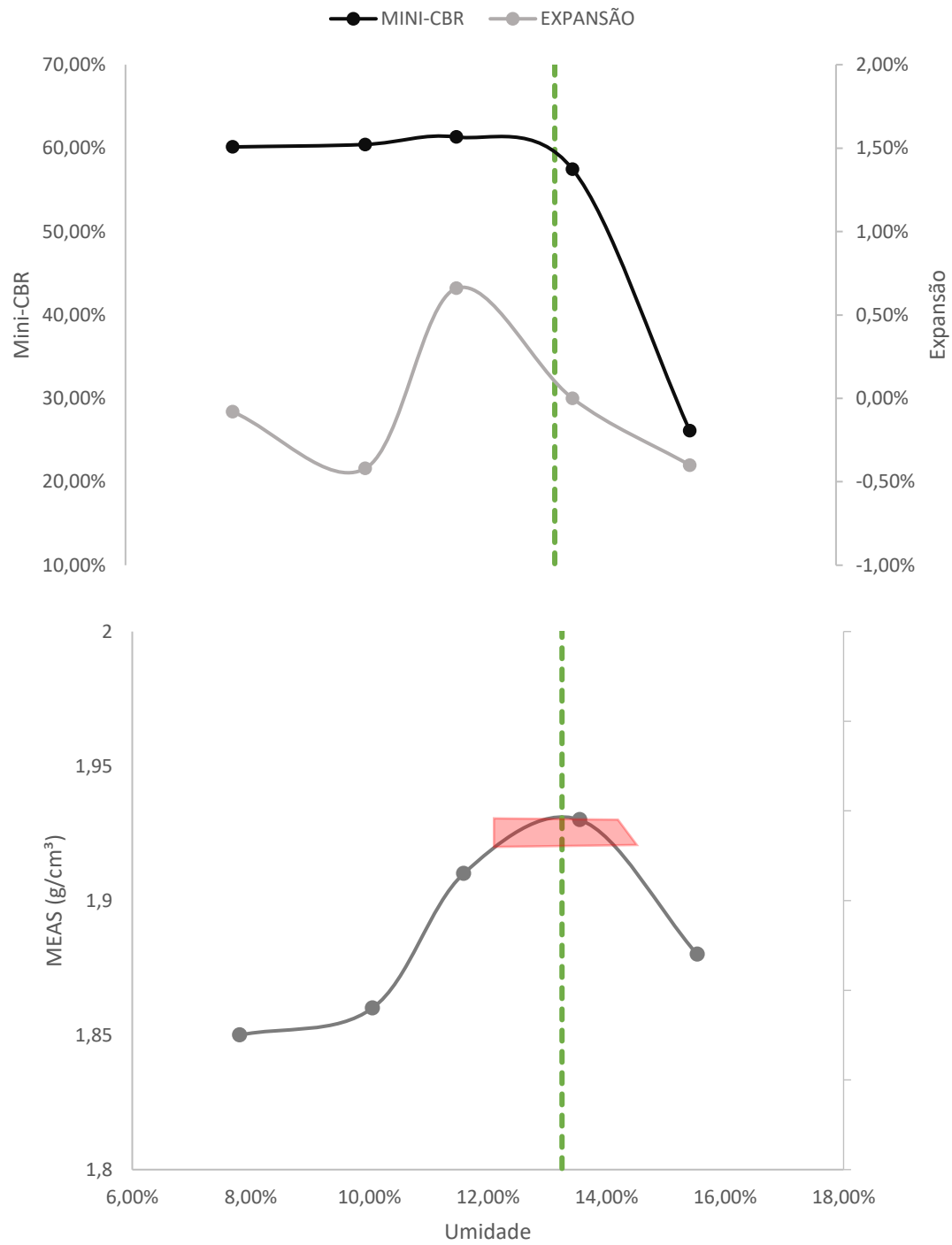
FONTE: Autora.

Figura 47 - Curvas da amostra com 1,5% de pó FGD



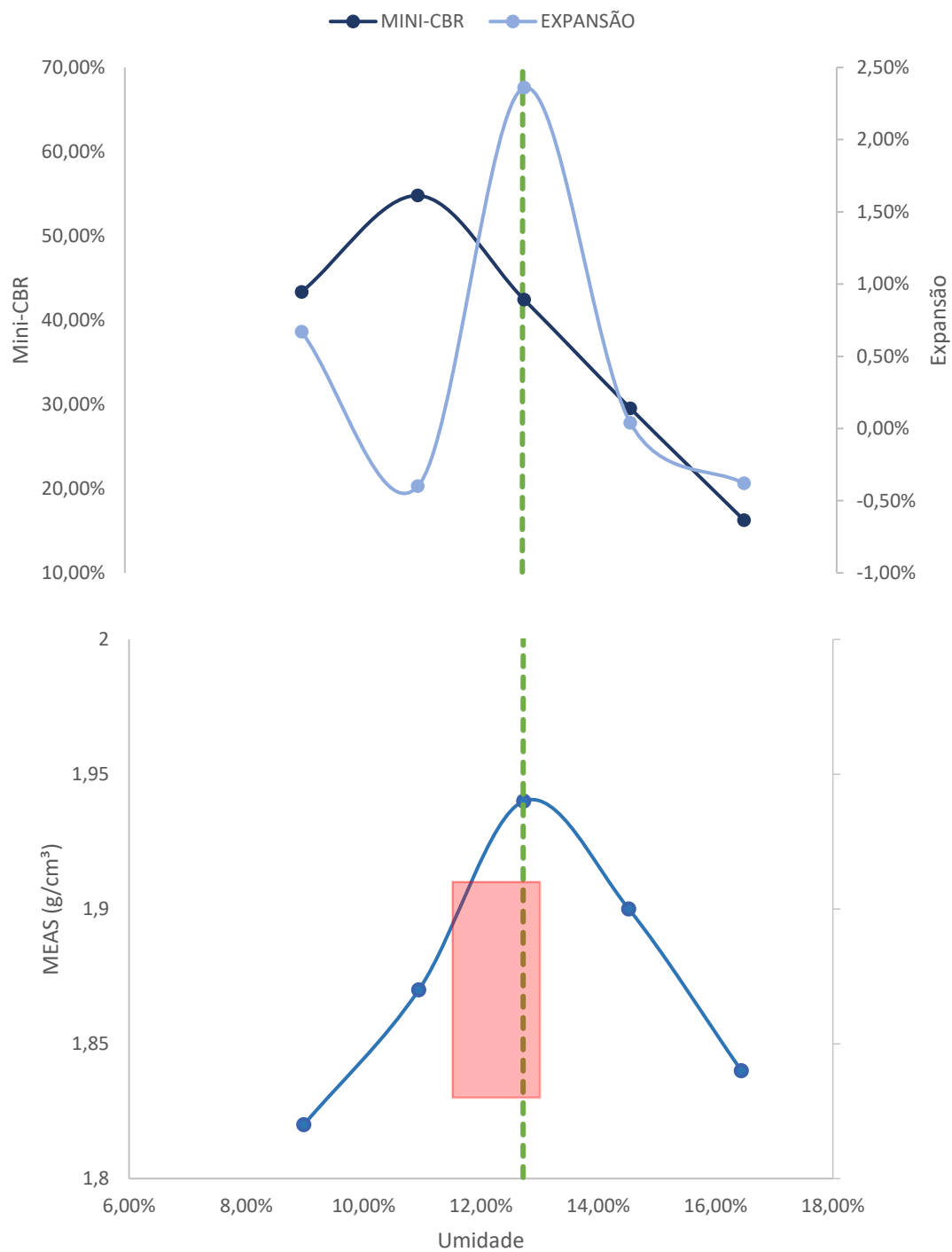
FONTE: Autora.

Figura 48 - Zona ótima da mistura com 3,0% de Cimento



FONTE: Autora.

Figura 49 - Zona ótima da mistura com 3,0% de pó FGD



FONTE: Autora.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

O coproduto pó FGD apresenta densidade de $2,79 \text{ g/cm}^3$, inferior à do cimento Portland, porém, esse padrão não se mostra relevante, uma vez que, todas as amostras apresentaram a mesma massa específica de grãos do solo puro, $2,65 \text{ g/cm}^3$. Quanto à classificação do solo, independentemente dos parâmetros considerados, as três metodologias, convergiram para a mesma especificação, areia argilosa. Ainda assim apenas a metodologia MCT comprova o comportamento laterítico do solo, areia argilosa laterítica (LA'), possibilitando a aplicação do solo em camadas do pavimento.

As curvas de compactação geradas pelo método Mini-Proctor, indicaram uma pequena redução da massa específica aparente seca máxima e um aumento na umidade ótima das amostras com cimento e pó FGD; para JP6+1,5C e JP6+3C, a redução e o aumento foram proporcionais à fração adicionada, já as amostras JP6+1,5FGD e JP6+3FGD apontam um equilíbrio higroscópico.

Quanto aos limites de consistência, o LL e LP do pó FGD foram superiores às misturas com cimento, mas não apresentaram uma variação expressiva entre as amostras JP6+1,5FGD e JP6+3FGD, já o limite de liquidez das amostras com cimento reduziu proporcionalmente. Consequentemente, as misturas com pó FGD demandam maior quantidade de água para integrar os estados líquido e plástico. Seguidamente, as alterações dos limites de liquidez, plasticidade e do índice de plasticidade após 7 dias indicam a continuidade das reações para estabilização do solo.

Discordante da redução esperada, o estudo da condutividade hidráulica apontou padronização na ordem de grandeza, 10^{-6} cm/s , independente do aditivo, da percentagem e da umidade da amostra.

Em relação à expansão, a adição do cimento e do pó FGD promove aumento proporcional, a fração do aditivo, e significativo. As duas amostras com apenas

1,5% de massa, estão aptas, conforme limites do DNER, para aplicação na camada de base, e a JP6+3C para sub-base. A amostra com 3,0% de pó FGD teve a maior expansão, 1,65%, restringindo o seu uso em quaisquer camadas do pavimento.

A capacidade de suporte avaliada em acordo com Mini-CBR, expôs aumento progressivo e correspondente à razão do aditivo, atingido valores máximos de 47,5% para o pó FGD e 62,0% para o cimento. Baseado em autores, citados ao longo do trabalho, ambos foram superiores a medidas de 40% viabilizando o uso na camada de base.

Em resumo, os resultados e análises referentes às propriedades físicas e mecânicas do solo e das misturas estudadas, indicam e confirmam a possibilidade de aplicação do pó FGD como estabilizante de solo, principalmente para a camada de sub-base.

5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar das conclusões positivas, o volume de pesquisas aplicando o pó FGD para fins de pavimentação ou o Mini-CBR como medida de capacidade de suporte são escassas, inferindo negativamente na certificação dessas propostas, dessa forma sugere-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- I. Avaliar o efeito do índice de laterização dos solos em relação a alterações das propriedades volumétricas como expansão e expansibilidade;
- II. Verificação dos ensaios de Mini-Proctor e Mini-CBR para amostras de solo puro e misturas estabilizadas, aplicadas em trechos reais;
- III. Análise da condutividade hidráulica de solos estabilizados com cimento e pó FGD em permeâmetro de paredes flexíveis.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Solo-Cimento**. Publicado em 22 de dezembro de 2009. Disponível em: <<https://abcp.org.br/solo-cimento/>>. Acesso em: julho de 2021.

ALMEIDA, G. B. de O.; CASAGRANDE, M. D. T.; CAVALCANTE, E. H. Estudos experimentais de um solo aditivado com cimento Portland para aplicação em camadas de pavimentos. **Ebook: From Fundamentals to Applications in Geotechnics**. Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, p. 87-94, Buenos Aires - Argentina, 2015. Disponível em: <<https://ebooks.iospress.nl/publication/41502>>. Acesso em: setembro de 2021.

ALVARENGA, Darlan. **Investimento em infraestrutura tem que dobrar para o Brasil dar salto de competitividade, aponta estudo**. Portal G1 – Globo.com. Publicado em 01 de julho de 2021 às 00h05. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/07/01/investimento-em-infraestrutura-tem-que-dobrar-para-brasil-dar-salto-de-competitividade-aponta-estudo.ghtml>>. Acesso em: setembro de 2021.

ALVES, Raimundo Nonato Brabo. **A importância da matéria orgânica nos solos tropicais**. Portal EcoDebate. Publicado em 20 de outubro de 2014. Disponível em: <<https://www.ecodebate.com.br/2014/10/20/a-importancia-da-materia-organica-nos-solos-tropicais-artigo-de-raimundo-nonato-brabo-alves/>>. Acesso em: julho de 2021.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 230.1R-09**: Report on Soil Cement. Farmington Hills, Michigan, p. 32. 2009. Disponível em: <230.1R-09 Report on Soil Cement (mycivil.ir)>. Acesso em: agosto de 2021.

ARAÚJO, Iviny Barros de; PEJON, Osni José. Avaliação da condutividade hidráulica e da capacidade de troca catiônica de misturas de solo arenoso, cimento e argila e seu potencial de uso como barreiras ambientais de fundo em

aterros sanitários. *In*: 16º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. **Anais...** São Paulo, 2018. 10 p. Disponível em: <http://www.schenautomacao.com.br/cbge/envio/files/trabalho_74.pdf>. Acesso em: setembro de 2021.

ARRIVABENE, Lúcio Flávio [et al.]. Viabilidade técnica da fabricação de cimento com mistura de escória de aciaria LD e resíduo de granito. *Metallurgia e Materiais. R. Esc. Minas*, Ouro Preto, 65(2), 241-246, abr. jun., 2012. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rem/a/LXCWCF959ZNdTtWtpzW6FML/?lang=pt&format=pdf>>. Acesso em: junho de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14545/2021**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro, 16 p. 2021.

_____. **ABNT NBR 7181/ 2016**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 12 p. 2016.

_____. **ABNT NBR 7183/1982**: Determinação do limite e relação de contração de solos. Rio de Janeiro, 3 p. 1982.

_____. **ABNT NBR NM 52/2009**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 6 p. 2009.

_____. **ABNT NBR NM 53/2009**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 8 p. 2009.

_____. **ABNT NBR: 16697/2018**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 12 p. 2018.

_____. **ABNT NBR 13600/1996**: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2 p. 1996.

_____. **ABNT NBR 6458/2017:** Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 10 p. 2017.

_____. **ABNT NBR 7180/ 2016:** Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 3 p. 2016.

BALDOVINO, Jair de Jesús Arrieta; IZZO, Ronaldo Luis dos Santos. Relação porosidade/cimento como parâmetro de controle na estabilização de um solo siltoso. **Revista *Colloquium Exactarum***, v. 11, n.1, Jan-Mar. 2019, p. 89–100. Disponível em: <<https://journal.unoeste.br/index.php/ce/article/view/2812/2757>>. Acesso em: março de 2021.

BERNUCCI, Liedi Bariani [et al.]. **Pavimentação asfáltica:** formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006. 504 f. Disponível em: <https://www.academia.edu/21661995/Pavimenta%C3%A7%C3%A3o_Asf%C3%A1ltica_Forma%C3%A7%C3%A3o_B%C3%A1sica_para_Engenheiros>. Acesso em: maio de 2021.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais – produção de metais:** ferro e aço. Elaborado por Instituto Aço Brasil – IABr e suas associadas. Brasília/DF: MCTI, 2010. 42 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/04/brasil_mcti_ferro_aco.pdf>. Acesso em: agosto de 2021.

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, Centro Tecnológico. Vitória, 139 p. 2020. Disponível em: <http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_14446_Disserta%E7%E3o%20-

%20Lucas%20Oliveira%20Bridi%20REV%20005.pdf>. Acesso em: julho de 2021.

BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. Estabilização de Solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, setembro de 2017. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/wp-content/uploads/artigo-cientifico/pdf/estabilizacao-de-solos.pdf>>. Acesso em: agosto de 2021.

CASTRO, Rui de Paula Vieira de. **Caracterização de sólidos e desenvolvimento de metodologia analítica para monitoramento de tratamento oxidativo de resíduos sólidos de dessulfurização de fases exaustos de termelétrica a carvão**. Rio de Janeiro, 2016. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químico e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.h2cin.org.br/download/tratamento-oxidativo-de-residuos-solidos-de-dessulfurizacao-de-gases-exaustos.pdf>>. Acesso em: julho de 2021.

CAVALCANTI, Pedro Porto Silva. **Gestão Ambiental na Indústria Siderúrgica – Aspectos Relacionados às Emissões Atmosféricas**. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10004547.pdf>>. Acesso em: junho de 2021.

CENTURIONE, S. L.; MARINGOLO, V.; PECCHIO, M. Cadeia de transformações cristalóquímicas de minerais naturais em cimento Portland e concreto. *In*: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 47, 2003, João Pessoa, PB. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2003. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbc/2003/artigos/47cbc-15-04.doc>>. Acesso em: abril de 2021.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental. **Dióxido de Enxofre**. Ficha de Informação Toxicológica. Publicado em julho de 2012. Atualizado em julho de

2020. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2020/07/Dio%CC%81xido-de-enxofre.pdf>>. Acesso em: junho de 2021.

CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Somente 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada.** Agência CNT Transporte Atual. Publicado em 14 de agosto de 2018. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/somente-12-da-malha-rodoviaria-brasileira-pavimentada>>. Acesso em: março de 2021.

_____. **Consistência do Solo - Ensaios Geotécnicos - Ensaios de Limite de Liquidez (LL) e de Plasticidade (LP).** Publicado em: 17 de janeiro de 2017. Disponível em: <<https://www.suportesolos.com.br/blog/consistencia-do-solo-ensaios-geotecnicos-ensaios-de-limite-de-liquidez-ll-e-de-plasticidade-lp/33/>>. Acesso em: julho de 2021.

CRUZ, Maria de Lurdes Santos da. **Novas tecnologias de aplicação de solo-cimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil. Portugal, 240 p. 2004. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/1810>>. Acesso em: agosto de 2021.

CUNHA, Yago Guidini. **Avaliação das propriedades ambientais do lixiviado e da massa bruta de solos melhorados com coprodutos siderúrgicos obtidos em laboratório por meio de ensaio de coluna.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória, 116 p. 2020. Disponível em: <http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_14928_Disserta%E7%E3o_Yago_Guidini.pdf>. Acesso em: julho de 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-CLA 259/1996:** Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura – Classificação. Rio de Janeiro, 6 p. 1996.

_____. **DNER-ME 160/2012:** Solos – Determinação da expansibilidade – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 7 p. 2012.

_____. **DNER-ME 228/1994:** Solos – compactação em equipamento miniatura – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 14 p. 1994.

_____. **DNER-ME 254/1997:** Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 14 p. 1997.

_____. **DNER-ME 256/1994:** Solos compactados em equipamento miniatura-determinação da perda de massa por imersão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 6 p. 1994.

_____. **DNER-ME 258/1994:** Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 14 p. 1994.

_____. **Norma DNIT 098/2007 - ES:** Pavimentação – base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 7 p. 2007.

_____. **Norma DNIT 140/2010 - ES:** Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 9 p. 2010.

_____. **Norma DNIT 142/2010 - ES:** Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 9 p. 2010.

_____. **Norma DNIT 160/2012 - ME:** Solo – Determinação da expansibilidade – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 7 p. 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE.
Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação.** 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Pavimenta%E7%E3o_05.12.06.pdf>. Acesso em: abril de 2021.

DIAS, João José da Fonseca Marques Simões. **Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 117 p. 2012. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/7837/1/Dias_2012.pdf>. Acesso em: setembro de 2021.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Custo Médio Gerencial.** Publicado em 26/08/2020 às 18h23. Atualizado em 27/09/2021 às 17h24. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/custo-medio-gerencial>>. Acesso em: outubro de 2021.

DUTRA, Sónia; VALE, Cecília. Utilização de solos lateríticos em pavimentos rodoviários. **Revista Geotecnia**, n. 136, p. 83-93, mar. 2016. Disponível em: <<https://spgeotecnia.pt/uploads/jgeot201613605.pdf>>. Acesso em: junho de 2021.

ESCÓRIA de Alto-Forno. ArcelorMittal, 2004. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/coprodutos/escoria-alto-forno>>. Acesso em: julho de 2021.

FERREIRA, Silvio Romero de Melo; FERREIRA, Maria da Graça de Vasconcelos Xavier. Mudanças de volume devido à variação do teor de água em um vertissolo no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, 33:779-791, 2009. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/BgJRFNJ7YnrsLQm4HCgSz6C/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: julho de 2021.

FHWA – Federal Highway Administration (EUA). **User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction.** FGD scrubber material - Material Description. Report FHWA-IF-03-019. Washington DC: U.S. Department of Transportation. 2016. 6 p. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/fgd1.cfm>>. Acesso em: setembro de 2021.

FIESP, Departamento da Indústria da Construção. **Pavimento de vias no Brasil:** infraestrutura de transportes terrestres rodoviários e cadeias produtivas da pavimentação. São Paulo: FIESP, 2017. 70 p. Disponível em: <<http://www.sinicesp.org.br/materias/2017/Deconcic-Pavimento.pdf>>. Acesso em: agosto de 2021.

FOPPA, Diego. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 143 p. 2005. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7845/000558347.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: setembro de 2021.

GARCIA, Fernando Marques de Sousa Louzada; LOLLO, José Augusto de. Ensaio de Permeabilidade com Solo-Cimento. *In:* XXXI Congresso de Iniciação Científica. **Anais...** UNESP, 2019. Disponível em: <http://prope.unesp.br/cic/admin/ver_resumo.php?area=100096&subarea=30850&congresso=41&CPF=10036469645>. Acesso em: junho de 2021.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization:** Principles and Practice. Butterworths, Sydney, Butterworths, 1972. Disponível em: <<https://trid.trb.org/view/137528>>. Acesso em: outubro de 2021.

ISAIA, Geraldo (org.). **Concreto:** Ciência e Tecnologia. 1ª ed. São Paulo: Ibracon, 2011.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. **Soil mechanics, SI Version.** John Wiley & Sons. 1979.

MACHADO, Cintia Rodales; RUVER, Cesar Alberto. A influência da matéria orgânica na mistura de solo-cimento. *In:* 12ª Mostra de Produção Universitária. **Anais...** Rio Grande/RS, 23 out. 2013. Disponível em: <<https://propesp.furg.br/anaismpu/cd2013/cic/2755.doc>>. Acesso em: julho de 2021.

MALANCONI, Maurício. **Considerações sobre misturas de solos tropicais estabilizados quimicamente para uso como camada de pavimento urbano.**

Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2013. 94 f. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4341/4872.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: abril de 2021.

MARANGON, M. **Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais. Utilizando Solos Lateríticos Locais a partir da Pedologia, 33 Classificação MCT e Resiliência.** Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2004. 442 f. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/148-2004/993-marcio-marangon>>. Acesso em: junho de 2021.

MINERAÇÃO SANTIAGO. **Brita graduada simples BGS.** Soluções Industriais. 2021. Disponível em: <https://www.solucoesindustriais.com.br/images/produtos/imagens_10122/brita-graduadasimplesbgs.jpg>. Acesso em: setembro de 2021.

MOHAUPT, Alexandre Ferreira; SAGRILLO, Viviana Possamai Della; REIS, Alessandra Savazzini dos. Potencialidades do resíduo do sistema FGD utilizado na dessulfuração de gases de uma coqueria. *In: 73º Congresso Anual da ABM – Internacional, parte integrante da ABM Week. Anais...* São Paulo, SP, Brasil, outubro de 2018. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/potencialidades-do-resduo-do-sistema-fgd-utilizado-na-dessulfurao-de-gases-de-uma-coqueria>>. Acesso em: março de 2021.

NEPOMUCENO, Daiana Valt. **Avaliação em campo de estrutura de pavimento incorporando solo estabilizado com coproduto de aciaria KR sujeita a carregamento com simulador HVS em comparação com previsões de desempenho segundo o novo método brasileiro de dimensionamento MeDiNa** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória, 2019. 187 f. Disponível em:

<http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_13411_DISSERTA%C7%C3O%20DAIANA%20VALT%20NEPOMUCENO.pdf>. Acesso em: abril de 2021.

PICARELLI, Simone. **Avaliação da contaminação de solos por hidrocarbonetos e metais pesados em diques de contenção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais. Porto Alegre, 107p. 2003. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3039/000380877.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: agosto de 2021.

PICOLI, Hully Carvalho. **Estabilização de solos com coproduto de coqueria FGD e cimento Portland para uso em camadas de pavimentação**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020. 144 f. Disponível em: <http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_14931_Disserta%E7%E3o_Hully%20Carvalho%20Picoli.pdf>. Acesso em: fevereiro de 2021.

POULLIKKAS, A. Review of Design, Operating, and Financial Considerations in Flue Gas Desulfurization Systems. **Energy Technology & Policy**, v.2, n. 1, 2015, 13 p. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/23317000.2015.1064794?needAccess=true>>. Acesso em: agosto de 2021.

PRADO, J. M.; RODRIGUES, L. M.; SILVA, S. N. Determinação das características o subproduto da FGD (*Flue Gas Desulfurization*) da combustão do carvão. *In: II Encontro de Ciência e Tecnologia do IFSUL Campus Bagé. Anais eletrônicos...* 2015. 5p. Disponível em: <<http://www2.bage.ifsul.edu.br/encif2015/pdf/20150930092321000000.pdf>>. Acesso em: julho de 2021.

RESCHETTI JUNIOR, Paulo Roberto; PARREIRA, Alexandre Benetti; FERNANDES JÚNIOR, José Leomar. Avaliação do efeito da adição de fibras na deformabilidade e no módulo de resiliência de um solo arenoso fino

laterítico. **Anais...** Rio de Janeiro: ANPET, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.usp.br/item/001705132>>. Acesso em: junho de 2021.

ROCHA, Mirella Taslitha; REZENDE, Lilian Ribeiro de. Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. **Revista Matéria**, v.22, n.4, 2017. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rmat/a/d6BkvL6hQgKbVnMV8Zpdbbz/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: maio de 2021.

RODRIGUES, Klaus Henrique de Paula. **Estudo de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Ouro Preto, 2018. 108f. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/9879/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_EstudoEstabiliza%c3%a7%c3%a3oGranulom%c3%a9trica.pdf>. Acesso em: agosto de 2021.

ROJAS, José Waldomiro Jiménez. **Coleção Ciências do Pampa – Estabilização de Solos**. Universidade Federal do Pampa, 2015. Disponível em: <<https://cursos.unipampa.edu.br/cursos/engenhariasanitariaeambiental/files/2015/09/Caderno-1-Estabiliza%c3%a7%c3%a3o-de-Solos.pdf>>. Acesso em: maio de 2021.

SANTOS, Eliana Fernandes dos; PARREIRA, Alexandre Benetti. Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais. *In*: 44^a RAPv – Reunião Anual de Pavimentação e 18^o ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, 2015. Disponível em: <http://sinicesp.org.br/44rapv/trabalhos/TrabalhoFinal_5.pdf>. Acesso em: setembro de 2021.

SANTOS, Gioconda; MARTÍNEZ, Souza. **Estudo do comportamento mecânico de solos lateríticos da formação barreiras**. Dissertação (Doutor

em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003. 291f. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2429/000369608.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: julho de 2021.

SILVA, Matheus Francisco da. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infraestrutura de Transporte, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2016. 142f. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-01092016-102359/publico/DissertacaoSilvaMF.pdf>>. Acesso em: setembro de 2021.

SOUZA, Cristiano Márcio Alves de; RAFULL, Leidy Zulys Leyva; VIEIRA, Luciano Baião. Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.3, p.460-464, 2000. Campina Grande, PB, DEAg/UFPB. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/tQwVyFzzLWjvbxRZGTMdP3f/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: maio de 2021.

TEIXEIRA, Roberta Arlêu. **Concretos produzidos com adição de resíduo proveniente do sistema de dessulfurização de gases (FGD):** avaliação de aspectos mecânicos, ambientais e de durabilidade. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória, 2019. 202 f. Disponível em: <http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_13837_Disserta%E7%E3o%20Roberta%20Arl%EAu%20Teixeira%20UFES%202019.pdf>. Acesso em: agosto de 2021.

TESSARI, C. L.; COBE, R. P. **Melhoramento de solos com incorporação de resíduos de siderurgia**. Projeto de graduação (Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2015. 97 f. Disponível em:

<<https://nuvem.ufes.br/index.php/s/Jo4xiF7rkwgeaKB#pdfviewer>>. Acesso em: setembro de 2021.

Villibor, Douglas Fadul; ALVES, Driely Mariane Lancarovici. Classificação de solos tropicais de granulação fina e grossa. **Revista Pavimentação**, ano XII, nº 43, jan-mar/2017. Disponível em: <https://issuu.com/revistapavimentacao/docs/revista_43>. Acesso em: outubro de 2021.

VILLIBOR, Douglas Fadul; NOGAMI, Job Shuji. **Pavimentos econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

ZARONI, Maria José; SANTOS, Humberto Gonçalves do. **Formação do solo**. Ageitec – Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2013. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000gn362j9v02wx5ok0liq1mqy0jc9b7.html>. Acesso em: setembro de 2021.