

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

Catarina Vieira Botelho ¹; Leonardo Belmont ²; Patrício José Moreira Pires ³

Resumo – Os transportes no Brasil se dão, majoritariamente, por meio de rodovias. Entretanto, apenas 12,4% das pistas do país são pavimentadas. Tal cenário se justifica pelo elevado custo por quilômetro de obras das rodovias. Como alternativa, tem-se a proposta de execuções de pavimentos de baixos custos que empregam solos lateríticos como principal insumo. Esse tipo de material tropical apresenta propriedades suficientes para empregos em obras viárias. Ainda assim, podem ser necessárias técnicas de estabilização em situações em que parâmetros do solo não são os mais adequados para usos em camadas de pavimentos. Um dos meios para estabilização dos materiais de comportamento laterítico é a incorporação de aditivos como cimento ao solo. Essa técnica de uso amplo em obras de estradas aumenta consideravelmente o custo para sua implantação. Alternativamente, o presente trabalho indica o uso do coproduto siderúrgico FGD, cuja origem é o processo de produção do aço para melhoramento químico do material tropical. Para justificar essa proposta, são empregadas técnicas da metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) para estudo de parâmetros resultantes das misturas do coproduto FGD ao solo de comportamento laterítico. Propriedades de compactação, capacidade de suporte e coeficiente de permeabilidade foram estudadas e comparadas entre misturas de solos ou com coproduto ou com o aglomerante hidráulico e resultados da mistura do FGD ao solo laterítico estudado são suficientes para emprego da mistura em camada de sub-base de obras viárias.

Abstract – Transport in Brazil takes place, mostly, through highways. However, only 12.4% of the country's runways are paved. This scenario is justified by the high cost per kilometer of road works. As an alternative, there is a proposal for low-cost pavement executions that use lateritic soils as the main input. This type of tropical material has sufficient properties for use in road works. Even so, stabilization techniques may be necessary in situations where soil parameters are not the most suitable for use in pavement layers. One of the means for stabilizing materials with lateritic behavior is the incorporation of additives such as cement into the soil. This technique, widely used in road works, considerably increases the cost of its implementation. Alternatively, the present work indicates the use of the steel co-product FGD, whose origin is the steelworks process, for chemical improvement of the tropical material. To justify this proposal, techniques of the MCT methodology (Miniature, Compact, Tropical) are used to study the parameters resulting from the mixtures of the FGD co-product to the soil with lateritic behavior. Compaction properties, bearing capacity and hydraulic conductivity were studied and compared between mixtures of soils or with co-product or with the hydraulic binder, and results of the mixture of FGD to the studied lateritic soil are sufficient to use the mixture in a sub-base layer of road works.

Palavras-Chave – Pavimento; FGD; Cimento Portland; Estabilização de solos; MCT.

¹ Engenheira Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, (27) 99960-1910, catarinavbotelho@gmail.com

² Graduando em Engenheiro Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, (27) 99932-0223, leonardot.belmond@gmail.com

³ Professor Doutor, Universidade Federal do Espírito Santo, patricio.pires@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

O transporte de mercadorias e de passageiros no Brasil se dão, majoritariamente, por meio das rodovias. A Confederação Nacional dos Transportes informa que 60% dos insumos distribuídos pelo país e 90% das movimentações das pessoas são por estradas (CNT, 2018). Com base nisso, investimentos contínuos em construções de novos trechos e manutenção da malha existente são necessários para que tal atividade de logística permaneça relevante para a geração de riquezas.

Ainda que se tenha tamanha relevância para o desenvolvimento do Brasil, há somente 12,4% das estradas pavimentadas (CNT, 2018). Em soma, nem toda malha pavimentada se encontra em plenas condições de funcionamento. Tal cenário implica aumentos significativos de custos aos usuários da malha rodoviária brasileira. Como levantado em matéria do Portal G1 de 2021, os níveis de investimento em obras de infraestrutura são pouco consideráveis no Brasil – cerca de 1,55% do Produto Interno Bruto brasileiro é investido nessa área (Globo, 2021). Obras de manutenção e construção de vias demandam alto custo e uma indústria especializada para esse alto volume de trabalho.

Outro ramo industrial que gera volumes importantes de produtos é a indústria siderúrgica. Conforme dados de 2020 do Instituto Aço Brasil – IAB, houve produção de, aproximadamente, 31,4 mil toneladas de aço bruto ao longo do período mencionado (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021). Inerente às etapas do processo de produção são as gerações de materiais não aproveitados. Relatório de Sustentabilidade de 2018 do IAB registra que para cada tonelada de aço produzida, gera-se 607kg de materiais secundários. Tais coprodutos siderúrgicos são de rica composição química por conta da cadeia e das adições de materiais usadas ao longo do processo. São materiais, portanto, que podem ser aproveitados para outros fins, que não para o descarte, o que se entende por relevante problema ambiental.

Com as problemáticas das obras de infraestrutura e da disposição final de materiais de coprodutos do processo de siderurgia apresentadas, tem-se, no emprego de tais coprodutos em obras de pavimentação, uma solução para ambas as situações. A partir do exposto, este trabalho foi desenvolvido com o intuito de avaliar as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas de misturas de solos tropicais a adições de coproduto siderúrgico FGD e de cimento, que são fundamentais para obras de pavimentação. Em soma, são feitas comparações dos resultados obtidos de ensaios das misturas com cimento Portland e com o coproduto. As avaliações dos parâmetros necessários ao emprego em obras de pavimentação são conduzidas, em maioria, por meio da Metodologia de Ensaios MCT.

Solos de origem tropical laterítica são os materiais que os professores Nogami e Villibor, desenvolvedores da Metodologia MCT, propuseram em seus trabalhos como opção para construção de estradas de baixo custo. Em trabalho de 2009, Pavimentos Econômicos, os autores descrevem particularidades dos materiais tropicais, ensaios empregados para análise por meio da metodologia específica MCT, recomendações de uso e construção e estudos de caso da aplicação de bases com solos arenoso finos lateríticos (SAFL). Os materiais de origem tropical laterítica são aqueles de camadas pedológicas mais superficiais. São solos de pedologia madura originados de ações intempéricas intensas, cujo principal agente é o clima tropical úmido. Por meio do processo de formação, conhecido também por laterização, tem-se a lixiviação de cátions básicos do material natural, ocasionando o acúmulo de óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio. Na fração argila dos solos lateríticos, os óxidos e hidróxidos mencionados combinam-se ao argilomineral predominante, a caulinita, e, na presença de umidade, tem-se as formações de cimentações naturais. Tal combinação resulta nas conhecidas concreções lateríticas presentes tipicamente em materiais tropicais.

Essa cimentação que inicialmente ocorre na fração fina de materiais lateríticos tende a conferir propriedades geotécnicas interessantes a camadas de pavimentação. Ainda assim, podem ser adicionados materiais que promovam os melhoramentos do solo, promovendo processos de estabilização do material natural. Tal estabilização pode se dar por mecanismos químicos ou mecânicos, predominantemente. Este último processo está relacionado à adição de materiais, a princípio inertes, cujos grãos e partículas têm granulometria prescrita. Os grãos são misturados de forma a garantir que o material resultante tenha a faixa granulométrica adequada a requisitos de projeto (VILLIBOR, 1982 apud RODRIGUES, 2018).

O processo de estabilização química, que é fundamentação teórica para este trabalho, tem por princípio a adição de materiais que interajam quimicamente com o solo, de tal modo a conferir propriedades desejadas a aplicações diversas da mistura. Com base no Manual de Pavimentação do DNIT, pode-se estabilizar o material natural por meio de adições de cal, cimento ou betume. Há ainda disponíveis soluções comerciais de aditivos com química preparada para tal fim.

Os estudos recentes do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFES – LGP vêm demonstrando que adições de coprodutos do processo produtivo de aço são eficazes. Como exemplo, 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 máxima e umidade ótima, o Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR), expansão e expansibilidade. A autora constatou que adições do coproduto siderúrgico FGD reduziram as umidades ótimas de compactação das misturas e aumentaram, quase que imperceptivelmente, as massas específicas aparentes secas máximas. Além disso, acrescentar teores do material do processo siderúrgico ao solo elevou os níveis de resistência da mistura, que foi apurado pelos Índice de Suporte Califórnia – ISC ou CBR.

O trabalho citado e usado como referência ainda empregou ensaios da Metodologia MCT para classificação e estudo de propriedades das misturas. Tal metodologia, desenvolvida e amplamente divulgada pelos professores Nogami e Villibor, considera as peculiaridades dos materiais tropicais em seus ensaios. São procedimentos que empregam, usualmente, corpos de prova em Miniatura, em ensaios em que a Compactação é parte integrante dos métodos para caracterização e classificação de solos Tropicais. São reproduzidos ensaios tradicionais de caracterizações mecânica, física e hidráulica em corpos de prova com dimensões reduzidas. Assim, fica possível classificar e mensurar o comportamento geotécnico laterítico dos materiais estudados. Tal comportamento é fundamental para se obter parâmetros e conduzir projetos de obras de pavimentação. Isso porque 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 e aproveitar suas peculiaridades que promovem ganhos a obras viárias (BERNUCCI et al., 2006).

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

O material empregado para estudos deste trabalho é o solo coletado na jazida JP6 (ver Figura 1). A jazida está localizada no município de Iconha, Sul do Espírito Santo, nas proximidades do km 273 da BR-101 Sul. O mesmo material foi usado por Picoli (2020) e por outros trabalhos do LGP da UFES. Como expõe a Figura 2, o solo denominado JP6 apresenta granulometria bem graduada, com predominância de faixas de areias.



Figura 1 - Amostra do Solo da Jazida JP6.

O material de origem tropical tem coloração avermelhada, que é característica de um material de potencial comportamento geotécnico laterítico, além das formações de concreções naturais. Tal potencial foi comprovado nos ensaios da metodologia MCT conduzidos na pesquisa de Picoli (2020).

Neste trabalho foram empregadas duas adições como materiais de estabilização do solo de comportamento laterítico: cimento e coproduto siderúrgico FGD. O material que conhecidamente apresenta bons resultados, cujas misturas foram usadas como resultados para comparações, é o Cimento Portland CPIII 40 RS. O CPIII RS contém maiores percentuais de escória de alto forno em comparação com outras categorias do mesmo material. Por conta dessa composição, a esse aglomerante é conferida a resistência mecânica e a ataques de sulfatos, aumentando a durabilidade deste material quando empregado.

A adição teste deste trabalho é o coproduto siderúrgico denominado FGD. O material antes tratado como resíduo é proveniente da etapa de remoção de enxofre do ferro gusa. Isso ocorre na aciaria e, a depender do processo, tem-se composições químicas para o FGD um pouco diferentes. O coproduto estudado é proveniente do parque industrial da ArcelorMittal Tubarão, localizada na cidade de Serra/ES. O coproduto é pulverulento com textura semelhante à do cimento. Entretanto, o FGD se apresenta com coloração esbranquiçada. Picoli (2020), por meio de ensaios de caracterização química, atestou presença de cátions semelhantes aos encontrados no cimento: Cálcio é o elemento químico predominante na composição do FGD. Há ainda a presença de enxofre, que é razoável pela origem do material no processo siderúrgico. Por essas semelhanças, tem-se justificados os trabalhos do LGP em estudar sua incorporação a materiais naturais.

Para estudo dos efeitos da adição do coproduto siderúrgico, foram compostas misturas com dois percentuais de FGD e de cimento. Foram avaliados os teores de 1,5% e de 3,0% de material adicionado, em relação à massa do solo. A Figura 2 e a Tabela 1 a seguir, tem-se os resumos dos resultados de composição granulométrica, massa específica real dos grãos e classificação referentes a cada material empregado neste trabalho. Esses resultados foram apresentados por Picoli (2020), como parte do programa experimental de seus trabalhos de Mestrado. Os ensaios de massa específica real dos grãos foram conduzidos para frações de materiais passante e retido na peneira de 4,8mm, sendo o resultado apresentado como a média ponderada pelas porcentagens em massa de cada fração presente na amostra original.

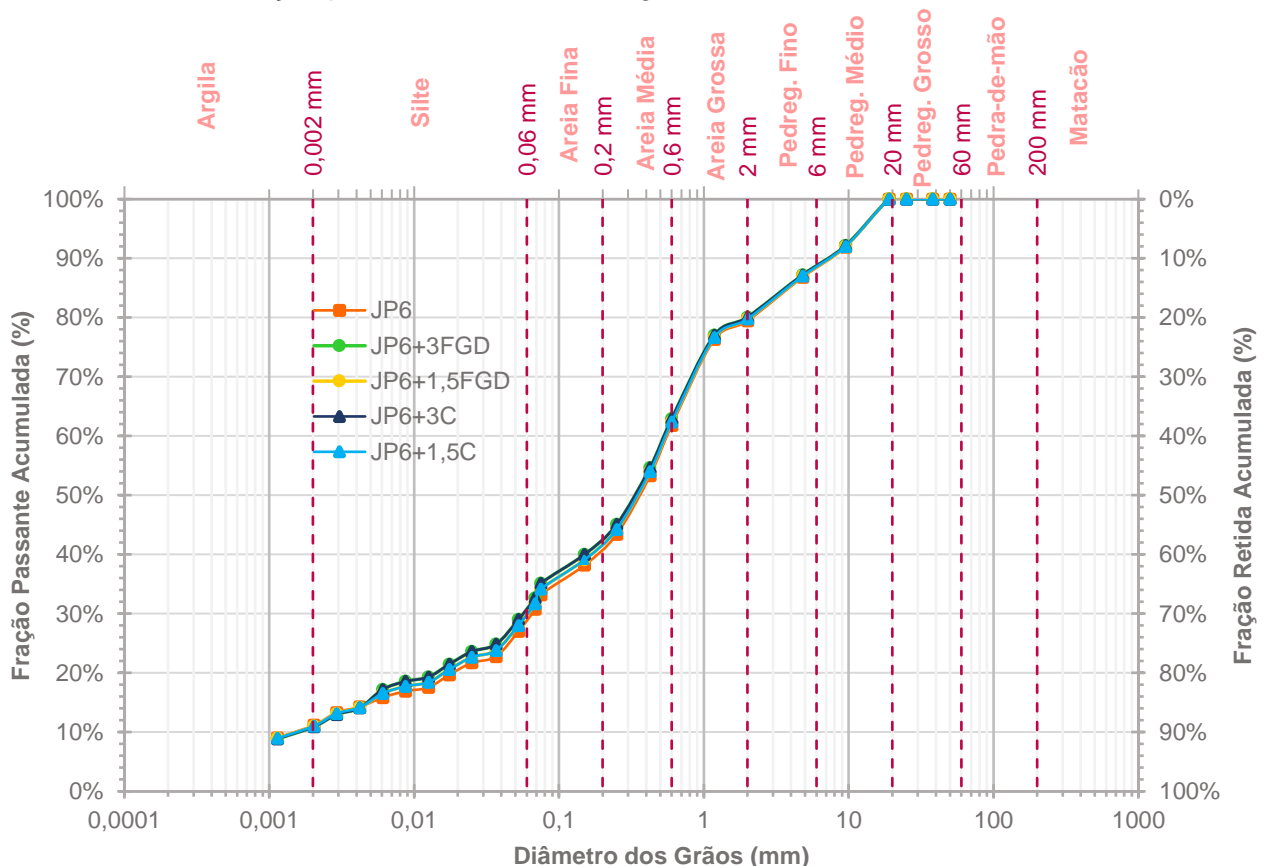


Figura 2 - Curvas granulométricas dos materiais (PICOLI, 2020).

Tabela 1 - Massa Especifica Real dos Grãos e Classificação (PICOLI, 2020).

Amostras	JP6	Cimento	Pó FGD	JP6+ 1,5C	JP6+ 1,5FGD	JP6+ 3C	JP6+ 3FGD
Massa Esp. Real dos Grãos (g/cm ³)	2,65	2,99	2,79	2,65	2,65	2,66	2,65
SUCS ^a	SC ^b	-	-	SC-SM ^c	SC-SM ^c	SC-SM ^c	SM ^d
AASHTO ^e	A-2-4 ^f	-	-	A-2-4 ^f	A-2-4 ^f	A-2-4 ^f	A-2-4 ^f
MCT ^g	LA ^h	-	-	-	-	-	-

Onde: ^a Sistema Unificado de Classificação de Solos; ^b Areia Argilosa; ^c Areia Argilo-siltosa; ^d Areia Siltosa; ^e American Association of State Highway and Transportation Officials; ^f Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa; ^g Tropical Compact Miniature; ^h Areia argilosa laterítica.

2.2 Métodos

Em posse dos resultados e análises físicas apresentadas no estudo de Picoli (2020) foram determinados ensaios complementares a fim de identificar e de mensurar a resistência das misturas definindo as caracterizações física, hidráulica e mecânica. Os ensaios foram realizados em acordo com as normas vigentes do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT – e da Associação Brasileiras de Normas Técnicas – ABNT, como indicado na Tabela 2, abaixo.

Tabela 2 - Programa Experimental

CARACTERIZAÇÃO	ENSAIOS	NORMA	AMOSTRA
FÍSICA	Limites de Liquidez	NBR 6459/16 (ABNT, 2016)	Solo e Misturas
	Limites de Plasticidade	NBR 7180/16 (ABNT, 2016)	Solo e Misturas
HIDRÁULICA	Coefficiente 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

2.2.1 Caracterização Física

A caracterização física ateu-se à definição dos limites de consistência, também vistos como limites de Atterberg, tal qual o Limite de Liquidez (LL) NBR 6459/16 (ABNT, 2016) e Limite de Plasticidade (LP) NBR 7180/16 (ABNT, 2016), uma vez que esses parâmetros indicam o grau de ligação entre as partículas mediante quantidade de água existente no solo e eventual mudança de estado físico. Foram executados dois ensaios por misturas, um com a secagem prévia da amostra e outro sete dias após a primeira medição, sem secagem prévia.

2.2.2 Caracterização Hidráulica

A avaliação do coeficiente de permeabilidade foi processada tanto no solo puro quanto nas misturas, todas em acordo com o método “A” da NBR 14545/21 (ABNT, 2021). Garcia e Lollo (2019) em suas pesquisas afirmam que o coeficiente de permeabilidade (k) tende a valores infinitesimais com o aumento da quantidade de cimento na mistura. Ademais, o coeficiente de permeabilidade, na condição saturada, pode sofrer variação na ordem de 8 a 10 vezes entre solos granulares e solos finos de acordo Lambe e Whitman (1979).

Para avaliação dos coeficientes de permeabilidade, os cinco corpos de prova compactados para fins de caracterização mecânica foram submetidos ao ensaio; ao final, são apresentados como resultados o coeficiente médio para todos os pontos de umidade. Os corpos de prova são compactados em moldes com 50mm de diâmetro interno, até alturas de, aproximadamente, 50mm.

2.2.3 Caracterização Mecânica

A definição dos materiais em relação a suas propriedades mecânicas foi praticada com base nos ensaios de Mini-Proctor, Mini-CBR e expansão e expansibilidade. O ensaio de compactação é a base para conformação dos corpos de provas de outros ensaios como Índice de Suporte Califórnia e Expansão. Isto posto, para cada material foram preparadas 5 amostras, 48 horas antes da compactação com teores de umidade variando $\pm 2\%$ da umidade ótima da amostra, essa definida com base na umidade ótima apresentada nos estudos de Picoli (2020). Seguindo o procedimento "B" da norma, com energia de compactação intermediária, os corpos de provas de diâmetro e altura iguais a 50 mm foram moldados aplicando 6 golpes com o soquete tipo pesado, massa igual 4540 gramas em ambos os lados do corpo de prova.

Em sequência à compactação, executou o ensaio de Mini-CBR associado ao ensaio de expansão, no qual são feitas leituras iniciais quando o CP é imerso, e finais, antes de ser retirado do tanque de imersão; logo, o solo interage com a água por 20 horas. Por fim, o ensaio de expansibilidade, mensura o potencial de expansão do solo com o aumento da umidade, propriedade íntima à fração de argila, parte ativa do solo. Vale ressaltar que os resultados obtidos neste ensaio contabilizaram os deslocamentos no período de 6 horas de duração.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados nesse tópico englobam as deliberações dos ensaios responsáveis pelas caracterizações física, química e hidráulica do solo extraído da jazida JP6, como mencionado anteriormente, e das misturas. Quanto à caracterização física, a Tabela 3 aponta os valores dos limites de liquidez, de plasticidade e do índice de plasticidade com secagem previa (Primeiro dia) e sem secagem previa do material (Após 7 Dias).

Tabela 3 - Limites de Consistência

Material	Primeiro Dia			Após 7 Dias		
	LL (%)	LP (%)	IP (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
JP6	26	18	8	26	22	4
JP6+1,5C	25	19	6	25	20	5
JP6+1,5FGD	26	22	4	27	23	4
JP6+3C	24	19	5	25	21	4
JP6+3FGD	27	21	6	27	22	5

Inicialmente, notam-se pequenas alterações do limite de liquidez com adições de cimento e de pó FGD. Os valores do limite de plasticidade indicam uma padronização de comportamento para as misturas, os aumentos dos teores de umidade são equivalentes às percentagens do aditivo. Por conseguinte, os valores de IP diminuíram em todas as misturas inferiores a 7, indicando misturas fracamente plásticas.

Em sequência, com a confrontação dos limites de consistência das amostras após sete dias, verifica-se 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, há uma variação no limite de plasticidade entre o primeiro e sétimo dia das amostras JP6 e JP6+3C, e 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 às variações das frações argila e silte totais das misturas. 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 trocas catiônicas em misturas de solo-cimento, indicando a estabilização da mistura.

A Figura 3 demonstra as alterações provadas em relação à umidade ótima e à massa específica aparente seca máxima (MEAS) com a adição do pó FGD e do cimento ao solo. 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.

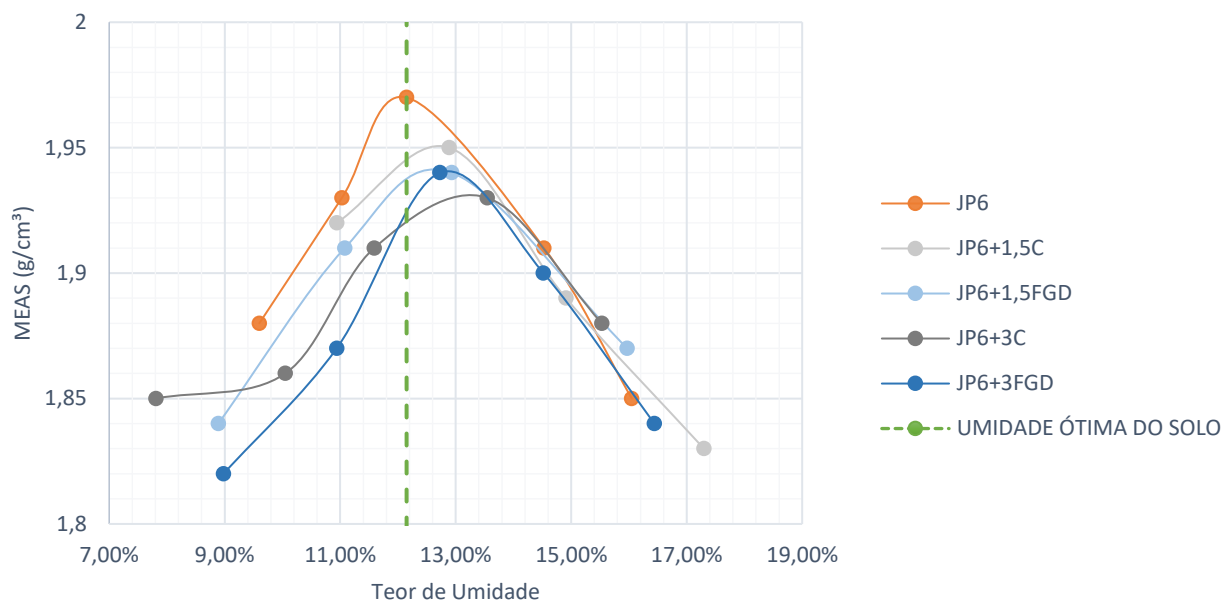


Figura 3 - Curvas de Compactação Mini-Proctor.

Em resumo a Tabela 4 exibe a caracterização mecânica em conjunto à caracterização hidráulica com a apresentação do coeficiente de permeabilidade referente a cada amostra.

Tabela 4 - Caracterização Mecânica e Hidráulica

Material	Caracterização Hidráulica		Caracterização Mecânica			
	Coeficiente médio de Permeabilidade (cm/s)	Massa Específica Aparente Seca Máxima (g/cm³)	Umidade Ótima (%)	Mini-CBR (%)	Expansão (%)	Expansibilidade (%)
JP6	$6,47 \times 10^{-6}$	1,97	12,15	25,49	0,12	3,40
JP6+1,5C	$3,13 \times 10^{-6}$	1,95	12,89	36,00	0,10	1,87
JP6+1,5FGD	$1,07 \times 10^{-6}$	1,94	12,95	38,00	0,45	0,87
JP6+3C	$4,10 \times 10^{-6}$	1,93	13,25	62,00	0,58	1,07
JP6+3FGD	$1,88 \times 10^{-6}$	1,94	12,73	47,50	1,65	0,33

Com o auxílio da tabela acima são notáveis os aumentos de resistência das amostras equivalentes às porcentagens de cimento e de pó FGD incorporado. Com base no Mini-CBR do solo puro (25,49%), a amostra JP6+1,5C dispôs de um aumento de 41,23% e a JP6+3C, de 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% 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.

Constata-se também que os valores de expansão das misturas são diretamente proporcionais às frações adicionadas de cimento e pó FGD. Todavia, quando comparada à expansão das misturas com o pó FGD, tal propriedade 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 deve ter expansão inferior a 0,5% e, para camada de sub-base, inferior a 1%.

Assim, as amostras JP6, JP6+1,5C e JP6+1,5FGD apresentam propriedades satisfatórias à aplicação em camada de base com expansão de 0,12%, 0,10% e 0,45%, respectivamente, e as amostras JP6, JP6+1,5C, JP6+1,5FGD e JP6+3C com expansões de 0,12%, 0,10%, 0,45% e 0,58%, são aptas à utilização em sub-base. Apenas a amostra JP6+3FGD não se enquadra em nenhum dos critérios citados. Contudo, 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 atenderiam ao critério.

No que se refere à expansibilidade, o maior valor exposto é referente ao solo puro, com redução significativa e equivalente às razões de cimento e de pó FGD adicionadas. 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 são 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 possível explicação para a reduzida expansibilidade é a predominância das reações de floculação iniciais das partículas tamanho argila, que facilita o processo de cimentação e reduz o potencial expansivo.

4 CONCLUSÕES

Os trabalhos desenvolvidos pelos autores de campanha de laboratório e de análise e interpretação de resultados indicam que é viável a aplicação do coproduto siderúrgico FGD em obras viárias. A partir de estudos de dosagem, que podem ter por base as sugestões de teores de aplicação da presente publicação, fica possível aplicar o coproduto FGD como estabilizador de materiais de origem tropical.

Essas afirmações são primeiro embasadas nos resultados obtidos de capacidade de suporte: vê-se que há ganhos de resistência mecânica, medida pelo índice Mini-CBR com a incorporação do coproduto FGD. Com os aumentos de teores do aditivo, tem-se progressivo aumento da capacidade de suporte a partir dos ensaios realizados. A resistência máxima obtida da mistura do coproduto ao solo tropical foi de 47,5%; para fins de comparação, o resultado máximo obtido da mesma propriedade em mistura de cimento a solo foi de 62,0%. Com resultados de Mini-CBR superiores a 40%, valor de referência de Mini-CBR apontado no trabalho de Reschetti e Junior et al. (2008), tal resistência possibilita o emprego das misturas em camadas de base de pavimentos.

Parâmetro estudado em concomitância à capacidade é a expansão das misturas. Os dois aditivos, em teores de massa de 1,5%, apresentam propriedades dentro dos limites para aplicação em camadas de base. A mistura JP6 + 3C é aplicável a camadas de sub-base. Por fim, a mistura com teor de 3% em massa de FGD a solo tropical de comportamento laterítico apresentou nível mais elevado de expansão, de 1,65%. Por conta da análise exclusiva dessa propriedade, a mistura JP6 + 3FGD não é adequada a obras viárias.

Os estudos das misturas, por meio de ensaios de compactação Mini-Proctor, indicam reduções das massas específicas aparentes secas máximas de pequenas magnitudes. Em adição, foram constatados aumentos das umidades ótimas nas amostras com aditivos. A adição de cimento ao solo tropical ocasionou alterações das propriedades de compactação proporcionais aos teores do aglomerante. Já as amostras com coproduto siderúrgico FGD apresentaram parâmetros semelhantes.

Ainda sobre ensaios de caracterização das misturas, tem-se os resultados de limites de consistência das amostras. Os limites de liquidez medidos de misturas solo e coproduto FGD foram superiores aos aferidos de amostras de cimento como aditivo. Aumentar o teor de FGD não provocou mudanças significativas nesse limite de consistência. Em comparação, constatou-se redução em proporção com o aumento do teor do aditivo cimento em massa de mistura. A partir desses resultados, é possível afirmar que as misturas com pó FGD demandam maior quantidade de água para variar entre os estados plástico e líquido. Ademais, as análises de limites de consistência com o intervalo de sete dias indicam que as reações entre materiais ainda estavam ocorrendo.

Em se tratando da caracterização hidráulica, houve resultados inesperados: as misturas de aditivos ao material tropical de comportamento geotécnico laterítico e suas conseqüentes reações não provocaram alterações significativas de coeficientes de permeabilidade. Esses parâmetros, medidos pelo coeficiente k , mantiveram-se em ordem de grandeza de 10^{-6} cm/s independente do aditivo, da percentagem e da umidade da amostra.

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.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos funcionários e técnicos do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFES pelo apoio e auxílio ao longo do estudo apresentado. Aos amigos e família pelo suporte e companhia.

REFERÊNCIAS

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 6459/2016: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 5 p. 2016.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. 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.

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.

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.

BERNUCCI, Liedi Bariani [et al.]. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006. 504 f.

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.

- 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.
- DUTRA, Sônia; VALE, Cecília. Utilização de solos lateríticos em pavimentos rodoviários. Revista Geotecnia, n. 136, p. 83-93, mar. 2016.
- 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.
- LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. Soil mechanics, SI Version. John Wiley & Sons. 1979.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- VILLIBOR, Douglas Fadul; NOGAMI, Job Shuji. Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos. 1. ed. São Paulo: Vilibor, 1995.
- VILLIBOR, Douglas Fadul; NOGAMI, Job Shuji. Pavimentos econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.