

Considerações Sobre a Caracterização de Solos Tropicais para Emprego em Sublastro

Juliana Tanabe Assad dos Santos

Engenheira Civil, IME, Rio de Janeiro, Brasil, juliana.tanabe@ime.eb.br

Maelckson Bruno Barros Gomes

Engenheiro Civil, IME, Rio de Janeiro, Brasil, bruno.gomes@ime.eb.br

Antonio Carlos Rodrigues Guimarães

Professor, IME, Rio de Janeiro, Brasil, guimarães@ime.eb.br

Filipe Almeida Corrêa do Nascimento

Professor, IME, Rio de Janeiro, Brasil, guimarães@ime.eb.br

Gleyciane Almeida Serra

Engenheiro Civil, Vale, São Luís, Brasil, gleyciakira@gmail.com

RESUMO: Os solos tropicais são amplamente encontrados em regiões de clima tropicais, mas a aplicação em camadas do pavimento ferroviário tem sido limitada em função da frequente divergência dos padrões definidos pelas normas brasileiras. Neste contexto, os solos tropicais podem ser vistos como uma possibilidade baseada em novos métodos que indicam a necessidade de reavaliação dos padrões atuais. Assim, propõe-se analisar mecanicamente a perspectiva de aplicação de três solos tropicais localizados próximos ao traçado da ferrovia em sublastro através de um estudo de caso da Ferrovia de Integração Oeste-Leste, que liga os estados da Bahia e do Tocantins, Brasil. Foram realizados os ensaios indicados pela norma – Limites de consistência, granulometria, expansão e California Bearing Ratio (CBR) – e também os ensaios triaxiais com análise do Módulo de Resiliência (MR) e de da Deformação Permanente (DP). O solo mostrou-se incompatível com as normas brasileiras em relação ao Índice de plasticidade e à composição granulométrica. Entretanto, foram observados MRs dentro da média esperada para solos tropicais e baixas deformações plásticas. Portanto, pode-se concluir que é possível utilizar solos tropicais estudados em camada de sublastro no que diz respeito a critérios mecânicos.

PALAVRAS-CHAVE: Sublastro, Solos tropicais, Módulo Resiliente, Ferrovia, Deformação Permanente.

ABSTRACT: Tropical soils are widely found in tropical regions, but the use in pavement design has been limited due to the frequent divergence of Brazilian standards. Considering the need for a large volume of materials for railway pavements, it is interesting to search for alternative materials that allow the reduction of materials transport to the field, reducing cost. In this context, tropical soils can be seen as a possibility based on new methods that indicate the need to reevaluate current standards. Thus, it is proposed to mechanically analyze the perspective of applying three tropical soils located near the railway route in subballast through a case study of the West-East Integration Railway, which connects the states of Bahia and Tocantins, Brazil. The tests indicated by the standard were carried out – Limits of consistency, granulometry, expansion and California Bearing Ratio (CBR) – and also the triaxial tests with analysis of the Resilience Modulus (RM) and Permanent Deformation (PD). The soil proved to be incompatible with Brazilian standards in relation to the plasticity index and granulometric composition. However, RMs were observed within the expected average for tropical soils and low plastic deformations. Therefore, it can be concluded that it is possible to use tropical

soils studied in a subballast layer with regard to mechanical criteria. However, to ensure compliance with all functions of the layer, it is suggested to investigate the hydraulic viability of the material.

KEYWORDS: Deposits, Tropical soils, Resilient Modulus, Railway, Permanent Deformation.

1 INTRODUÇÃO

No contexto de expansão ferroviária, entende-se a necessidade de otimização do dimensionamento da via e a escolha adequada dos materiais que constituem as camadas do pavimento. Nesse sentido, ressalta-se a importância da escolha adequada dos materiais utilizados para a garantia de desempenho do pavimento e para o custo adequado de implantação.

No Brasil, onde o clima predominante é o clima tropical úmido, existe grande ocorrência de solos tropicais. O emprego de critérios baseados em estudos e normas de países de clima temperado não é adequado para a seleção de materiais para aplicação em pavimentos ferroviários no território brasileiro.

Nesse sentido, estudos realizados nos últimos dez anos, nos quais se destacam Silva Filho (2018), Sousa (2016), Delgado (2012) e Osten (2012), comprovam a eficiência dos solos tropicais no pavimento ferroviário e evidenciam a importância do desenvolvimento de pavimentos regionalizados e com utilização de tecnologias nacionais (Nogami; Villibor, 2007).

Dessa forma, partindo da premissa que os solos tropicais devem ser analisados de forma diferente das normas ferroviárias utilizadas no Brasil, define-se a hipótese de que é possível a aplicação de solos tropicais provenientes de locais próximos ou do próprio traçado da ferrovia como camada de sublastro.

Portanto, o objetivo do presente artigo é avaliar a viabilidade da utilização de solos tropicais no contexto de obras ferroviárias contempladas por esse tipo de solo em seus traçados de projeto. Para tanto, são definidas as seguintes etapas:

- Caracterizar os materiais segundo os critérios definidos por norma para materiais de sublastro e verificar o enquadramento segundo as normas vigentes;
- Classificar os solos estudados segundo as metodologias tradicionais e MCT;
- Obter o Módulo de Resiliência (MR) dos materiais;
- Realizar ensaios de Deformação Permanente (DP) para variados estados de tensões com os materiais selecionados e obter os parâmetros de deformabilidade (ψ) propostos por Guimarães (2009);

Espera-se que esse trabalho possa contribuir para formulação de critérios normativos mais aderentes à realidade da geotecnia de pavimentos brasileira, contribuindo para uma seleção de materiais para sublastro mais assertiva.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O sublastro tem como funções: aumentar a capacidade de suporte da plataforma, aumentar a resistência do leito à erosão e permitir elasticidade ao apoio do lastro (Brina, 1988). Além disso, a camada apresenta função drenante, sendo este fator diretamente ligado à resistência ao cisalhamento e à distribuição granulométrica do material (Jing et al., 2015; Panadero; Contreras, 2010).

No Brasil, a nível de normativo técnico, são utilizadas como referências para seleção de materiais para camada de sublastro as publicações do DNIT ISF 212 - projeto de superestrutura da via permanente lastro e sublastro e a norma da INFRA S.A. SUP-00048 – Via Férrea - Sublastro. As normas, em resumo, recomendam que os materiais sejam obtidos in natura ou pela mistura de materiais de forma que apresente as seguintes características:

- a) a granulometria do material deve se enquadrar em uma das faixas A, B, C, D, e/ou F da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) segundo o método DNER-ME-80-94;

- b) Índice de Suporte Califórnia (ISC) mínimo admissível igual a 20 considerando a energia de compactação Proctor Intermediário definida pelo método DNIT 164/2013-ME;
- c) o agregado retido em peneira nº 10 deve ser constituído de partículas duras e duráveis, isentas de fragmentos moles, alongados ou achatados, assim como de matéria vegetal ou outra substância prejudicial;
- d) a porcentagem do material que passa na peneira nº 200 (0,074 mm), não poderá superar 2/3 do que passa na peneira nº 40 (0,42 mm); a fração que passa na peneira nº 40 deve apresentar um limite de liquidez (LL) inferior ou igual a 25% e um índice de plasticidade (IP) inferior ou igual a 6%;
- e) expansão máxima de 1,0%;
- f) o índice de grupo (IG) deverá ser igual a zero; e
- g) no caso de solos lateríticos a expansão máxima admitida será de 0,5% no ensaio de ISC; a fração que passa na peneira nº 40 deverá ter limite de liquidez inferior ou igual a 40% e índice de plasticidade inferior ou igual a 15%.

Nota-se que o principal critério mecânico adotado no Brasil é o ISC. Além disso, os procedimentos tradicionais mostram-se limitados no que se refere à aceitabilidade das amostras. Utiliza-se como base os índices de granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade, os quais são considerados insuficientes para a representação dos solos tropicais, como verificado experimentalmente por Nogami e Villibor (2007).

Não obstante, ao utilizar ensaios triaxiais para avaliação mecânica dos solos, observa-se um comportamento superior e mais compatível aos solos tropicais - principalmente os solos lateríticos. São relatados fatores como alta resistência à deformação permanente em umidade ótima e ocorrência do fenômeno de shakedown, especialmente para baixos níveis de tensão (Silva et al., 2021; Lima; Motta; Aragão, 2021; Lima et al., 2020; Guimarães; Motta; Castro, 2018; Lima et al., 2019).

O MR varia conforme a constituição do solo e das tensões aplicadas. Esse parâmetro indica a capacidade do material de retornar ao seu estado inicial ao fim da aplicação de tensões. Dessa forma, o MR do material está relacionado à deflexão do pavimento, geralmente limitado a 6,35 mm (ver norma americana AREMA, 2020).

Por sua vez, a DP dos solos refere-se à parcela plástica da deformação e, portanto, não recuperável após o fim da aplicação de tensões. Portanto, a patologia associada a esse fator é o desnivelamento do perfil longitudinal da via, geralmente limitado a 16,0 mm para uma flecha de 20 m (ver norma portuguesa GR.IT.VIA.018 - 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais analisados são provenientes da Ferrovia de Integração Oeste – Leste (EF-334), Lote 6F, localizado no trecho entre Figueirópolis/TO e Ilhéus/BA.

Foram realizados ensaios de caracterização exigidos por norma para utilização de material em sublastro. Foram obtidos os resultados de ISC, de granulometria, dos limites de consistência (LL e LP), de expansão e de compactação. Em seguida, foi feita a classificação dos materiais através das metodologias TRB e USCS, além da classificação dos finos pela metodologia MCT.

Por fim, a última etapa consistiu no estudo do comportamento mecânico das amostras na umidade ótima - obtida pelo ensaio de compactação da fase anterior. Nessa etapa, os ensaios realizados foram os de MR e de DP.

A partir dos resultados obtidos, foi feita uma avaliação das amostras segundo as normas vigentes e os resultados dos ensaios triaxiais foram comparados com os obtidos por outros autores, além de investigação da ocorrência de shakedown.

Os resultados foram analisados de forma a avaliar a viabilidade da utilização dos materiais estudados segundo a metodologia tradicional e a previsão do comportamento do solo no pavimento.

4 RESULTADOS

No que se refere à granulometria das amostras analisadas, observam-se elevadas quantidades de material fino (maior que 50%) para o solo B analisado, como é comum em solos tropicais finos. Além disso, nota-se que as amostras dos pontos A e J são mais bem distribuídas que o solo B.

Como apresentada na Revisão Bibliográfica deste trabalho a granulometria do material deverá se enquadrar nas faixas A, B, C, D, e/ou F da AASHTO. Observa-se que as amostras não se enquadram em nenhuma das faixas da AASHTO, o que resulta na rejeição dos materiais ou utilização condicionada a uma estabilização granulométrica prévia.

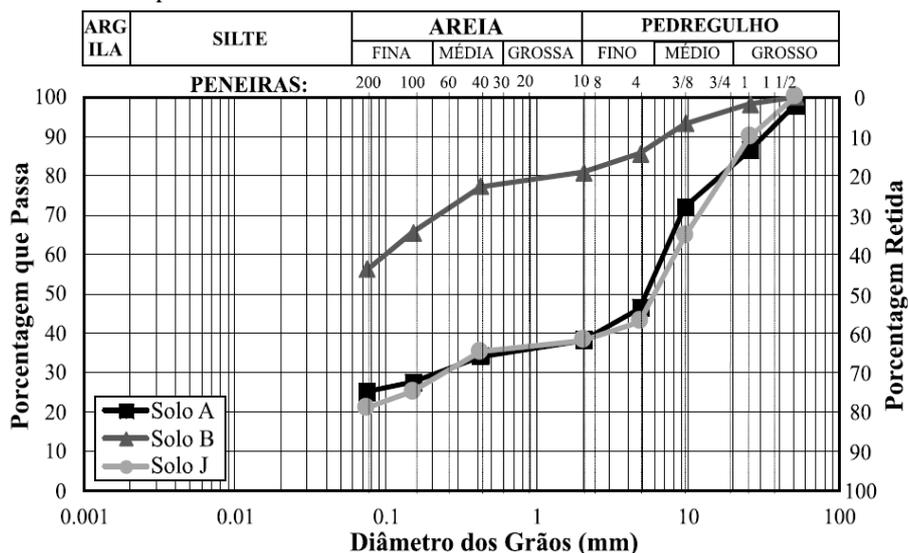


Figura 1. Distribuição granulométrica das 3 amostras estudadas.

Os resultados apresentados na Tabela 1 indicam que todos os solos apresentaram baixos valores de expansão (<0,5%), sendo considerado um fator importante para aplicação de solos em pavimentos. Os altos valores de ISC também foram superiores aos exigidos pelo DNIT e pela INFRA S.A.

Além disso, o valor do limite de liquidez do solo A não atende aos critérios normativos e o índice de plasticidade dos solos A e B extrapolaram consideravelmente os limites aceitos por norma. No caso do ponto J não foram obtidos os limites de consistência (LL e LP) visto que o solo é arenoso e, portanto, não plástico (NP). A partir desses estudos, foi feito o cálculo do índice de grupo, cujo valor encontrado foi 0 para todos os pontos analisados, adequado às exigências normativas.

Tabela 1. Parâmetros dos solos estudados comparados com os critérios normativos nacionais.

Ensaio	Solo A	Solo B	Solo J	Critério DNIT ou INFRA S.A. para solos não lateríticos	Avaliação
Limite de Liquidez (%)	26	24	-	≤ 25	Solo A: Nok e Solos B e J: Ok
Limite de Plasticidade (%)	14	13	-	-	-
Índice de Plasticidade (%)	12	11	NP	≤ 6	Solos A e B: Nok e Solo J: Ok
Índice de Grupo	0	0	0	0	Todos Ok
ISC (%)	39	40	94	≥ 20	Todos Ok
Expansão (%)	0,25	0,30	0,10	≤ 1,0	Todos Ok
Umidade ótima (%)	13,6	11,5	11,4	-	-

Massa específica máxima aparente seca (g/cm ³)	1,83	2,02	2,02	-	-
--	------	------	------	---	---

Observa-se que os aspectos divergentes foram, de forma geral, a composição granulométrica e o índice de plasticidade. O mesmo foi observado nos solos tropicais analisados por outros autores como Silva Filho (2018), Sousa (2016), Delgado (2012) e Osten (2012).

As amostras foram classificadas segundo três metodologias - TRB, USCS e MCT - e os resultados são exibidos na Tabela 2. A classificação MCT indica a ausência de solos de comportamento laterítico entre as amostras, sendo encontrados solos argilosos não lateríticos (NG') e areia não laterítica (NA').

Tabela 2. Classificação dos solos e MR Médio obtido a partir dos ensaios triaxiais de cargas repetidas.

Ensaio	TRB	USCS	MCT	Média do MR	Desvio Padrão
Solo A	A-2-6	GC	NG'	225	85
Solo B	A-6	CL	NG'	294	72
Solo J	A-2-4	GM	NA'	306	163

Os valores médios de MR encontrados - entre 225 e 306 MPa - foram similares às médias observadas na literatura para solos tropicais (FREITAS; REZENDE; JR., 2020; ROSA et al., 2019; SILVA FILHO, 2018; SOUSA, 2016; DELGADO, 2012; OSTEN, 2012).

De maneira geral, foram verificadas DP's próximos a 1% para os maiores pares de tensões indicados por norma. Esses valores são inferiores à maioria dos solos estudados por diversos autores como Lima, Motta e Aragão (2021), Lima et al. (2020), Guimarães, Motta e Castro (2018), Lima et al. (2019), Silva Filho (2018), Delgado (2012) e Osten (2012) para os pares de tensões equivalentes.

Os parâmetros de deformabilidade aplicáveis à equação de Guimarães (2009) para previsão de deformação permanente são apresentados na Tabela 3. Além disso, foi obtida a deformação plástica para uma tensão confinante de 40 kPa, uma tensão desvio de 150 kPa e N igual a 10⁶ valores típicos de uma ferrovia *heavy haul* para um período de projeto de 20 anos. Observa-se que cada solo daria uma contribuição diferente para o pavimento, em termos de deformações plásticas. O solo A é o mais deformável dos 3 estudados, todavia, ainda contribuiria com apenas 1,99% de DP. Considerando um sublastro de 25 cm, isso resultaria em uma DP de 4,99 mm, inferior ao limite de alerta para manutenção de vias recomendado pela norma portuguesa GR.IT.VIA.018 - 2017.

Tabela 3. Parâmetros de deformabilidade de Guimarães (2009) dos 3 solos e suas respectivas DP para um cenário típico de uma ferrovia *heavy haul*.

Solo	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	$\frac{\sigma_3}{\sigma_{re}}_f$	$\frac{\sigma_d}{\sigma_{re}}_f$	N	ϵ_p (%)
A	0,3495	-0,5448	0,4777	0,0536	0,0040	0,0150	10 ⁶	1,996
B	0,1228	0,7845	0,6292	0,0540	0,0040	0,0150	10 ⁶	0,001
J	0,2234	0,1407	0,5371	0,0634	0,0040	0,0150	10 ⁶	0,026

5 CONCLUSÃO

Os ensaios realizados nas 3 amostras permitiram avaliar que, no que se refere à granulometria, não houve o enquadramento de nenhuma das amostras às recomendações normativas. Além disso, duas delas também não atenderam ao critério do índice de plasticidade.

Entende-se que os critérios exigidos pela norma buscam garantir a qualidade e a durabilidade do pavimento. Com isso, no que se refere ao comportamento mecânico do solo, o protocolo adotado por esta pesquisa buscou verificar a qualidade do material através da análise de ensaios triaxiais de cargas repetidas.

Em relação às deformações permanentes, foram verificadas baixas DPs, com valores próximos a 2% para um par de tensão atuante na camada de sublastro frequentemente observado em ferrovias de transporte de carga, para um período de projeto de 20 anos.

Dessa forma, esta pesquisa corrobora com os diversos autores que indicam a necessidade de revisão das normas brasileiras (Silva Filho, 2018; Sousa, 2016; Delgado, 2012; Osten, 2012). Foi possível observar, assim como nos demais trabalhos, que os solos tropicais, abundantemente disponíveis no país, podem ser subutilizados em função de parâmetros inadequados de seleção para o clima e as condições brasileiras. Em alguns casos, pode ser indicado a necessidade realizar a estabilização visando o encaixe granulométrico em alguma faixa da AASHTO, em outros, pode ocorrer até mesmo o precipitado descarte do material.

Por fim, retomando-se o conceito de sublastro, observa-se que as funções desta camada permeiam, além de funções mecânicas - aumentar a capacidade de suporte da via e permitir elasticidade ao apoio do lastro -, funções drenantes. Com isso, entende-se que para garantir a confiabilidade da estrutura é necessário também verificar a erodibilidade da camada, a possibilidade de ascensão capilar e a dissipação da água nos poros.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Militar de Engenharia e ao 4^a BEC por permitirem o desenvolvimento dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AREMA (2020) *Manual for Railway Engineering*. third. [S.l.]: American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. v. 1.
- Brina, H. L. (1988) *Estrada de Ferro – Via Permanente*. second. [S.l.]: Livro Técnico e Científico S.A., v. 1.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes-DNIT (2015) ISF-212: projeto de superestrutura da via permanente – lastro e sublastro.
- Delgado, B. G. (2012) *Análise da deformabilidade de um solo tropical do oeste do Maranhão como material de sublastro na Estrada de Ferro Carajás*. Dissertação (Mestrado) —Universidade Federal de Ouro Preto.
- Freitas, J. B. de; Rezende, L. R. de; JR., G. de F. G. (2020) Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions. *Engineering Geology*.
- Guimarães, A. C. R. (2009) *Um Método Mecânico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos*. Tese (Doutorado) — UFRJ/COPPE.
- Guimarães, A. C. R.; MOTTA, L. M. G. da; Castro, C. D. (2018) Permanent deformation parameters of fine-grained tropical soils. *Road Materials and Pavement Design*.
- INFRA S.A. (2023) Via Férrea – Sublastro – SUP-00048.
- IP - Infraestruturas de Portugal (2017) Tolerâncias dos Parâmetros Geométricos da Via. GR.IT.VIA.018. Instrução Técnica de Via n.º 18, Lisboa, 1-32.
- Jing, G.; Wang, Z.; Huang, H.; Wang, Y. (2015) Permeability and direct shear tests characteristics of railway subballast. *The Open Civil Engineering Journal*.

- Lima, C. D. A. De; Motta, L. M. G. Da; Aragão, F. T. S.; Guimarães, A. C. R. (2019) Effects of compaction moisture content on permanent deformation of soils subjected to repeated triaxial load tests. *Journal of Testing and Evaluation*.
- Lima, C. D. A. (2020) *Avaliação da Deformação Permanente de Materiais de Pavimentação a Partir de Ensaio Triaxiais de Cargas Repetidas*. Tese (Doutorado) — COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Lima, C. D. A.; Motta, L. M. G.; Aragão, F. T. S. (2021) A permanent deformation predictive model for fine tropical soils considering the effects of the compaction moisture content on material selection. *Transportation Geotechnics*.
- Nogami, J. S.; Villibor, D. F. (2007) *Pavimentação de Baixo Custo com solos lateríticos*. [S.l.]: Vilibor.
- Panadero, C.; Contreras, J. L. S. (2010) Análisis de las propiedades del sub-balasto: contradicciones y procesos que afectan a su función. *Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente*.
- Rosa, A. C. da; Teixeira, M. A. de O.; Guimarães, A. C. R.; Cruz, L. O. e Silva R.. (2019) Avaliação estrutural de pavimentos ferroviários do corredor centro sudeste paulista utilizando o software systrain. *33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET*.
- Osten, F. B. V. D. (2012) *Avaliação de quatro solos tropicais para sublastro da Estrada de Ferro Carajás*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Militar de Engenharia.
- Sousa, M. A. da S. (2016) Análise Geotécnica de solos tropicais de ocorrência ao longo da Estrada de Ferro Carajás para uso como camadas de pavimento ferroviário. Dissertação (Mestrado) — Instituto Militar de Engenharia.
- Silva Filho, J. C. (2018) Contribuição para o Desenvolvimento de um Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Ferroviários com Foco nos Solos Tropicais. Tese (Doutorado) — Instituto Militar de Engenharia, 2018.
- Silva, M. F. Da; Ribeiro, M. M. P.; Furlan, A. P.; Fabbri, G. T. P. (2021) Effect of compaction water content and stress ratio on permanent deformation of a subgrade lateritic soil. *Transportation Geotechnics*.