

Análise das propriedades físicas e mecânicas de um subleito ferroviário de solos tropicais

Artur Cortês da Rosa¹, Antonio Carlos Rodrigues Guimarães², Luiz Francisco Muniz da Silva³

¹ Arterro – ACDR Engenharia Geotécnica Ltda, Pompeu Loureiro, 90 – Copacabana, Rio de Janeiro - RJ

² Instituto Militar de Engenharia, Praça Gen. Tibúrcio, 80 - Urca, 22290-270, Rio de Janeiro - RJ

³ Muniz E Spada Engenheiros Consultores, R. Barão de Jaguaripe, 402 - Ipanema, 22421-000, Rio de Janeiro - RJ

e-mail: artur.c.rosa@gmail.com, guimaraes@ime.eb.br, muniz@munizspada.com.br

Resumo O subleito possui grande influência no comportamento do pavimento ferroviário, devendo ter rigidez e capacidade de carga suficiente para resistir as tensões e evitar deformações plásticas, influenciando a via permanente. Visando analisar as propriedades físicas e mecânicas do material de subleito de um pavimento ferroviário de dois pontos da Ferrovia Centro-Atlântica, ensaios de *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) foram realizados de modo a determinar a resistência do material de subleito e estimar valores de *California Bearing Ratio* (CBR). Amostras destes materiais de subleito foram ensaiadas em laboratório: ensaios de caracterização completa do solo, ensaios da metodologia MCT e ensaios triaxiais de cargas repetidas em diferentes teores de umidade, para obtenção de valores de módulo resiliente dos materiais estudados. Embora as metodologias tradicionais de classificação dos solos não recomendam o tipo de material estudado para aplicação em pavimentos, os resultados apontaram que se tratam de solos com comportamento laterítico, e adequados para finalidade de pavimentação ferroviária, suportando as cargas operacionais e com bom comportamento diante da variação da umidade.

Palavras-Chaves: Subleito, DCP, CBR, Ensaio triaxial de cargas repetidas.

1. INTRODUÇÃO

O subleito é um componente da infraestrutura ferroviária de grande importância, pois é responsável pelo suporte da estrutura da via, recebendo através do lastro e/ou sublastro as tensões devidas ao tráfego e das demais instalações necessárias à operação ferroviária [1]. [2] afirmam que o subleito é o componente de maior influência sobre a deformabilidade da via, contribuindo substancialmente para a deflexão elástica do trilho sob carregamento das rodas dos trens. Acreditam que a resiliência do subleito influencia decisivamente a velocidade de deterioração do lastro, dormentes e trilhos, sendo a principal fonte de recalque diferencial da via. [3], com base em dados experimentais obtidos na Alemanha,

afirma que, da deformação total da via, só 30% correspondem à contribuição do lastro; os restantes 70% são devidos ao subleito. Além disso, devido às suas distintas unidades pedológicas e geológicas, o subleito pode apresentar composição, resistência e desempenho do solo que variam ao longo da ferrovia [4].

O subleito ferroviário é governado por duas características - resistência e deformação [5]. A resistência refere-se às propriedades de resistência ao cisalhamento do solo, e se essa resistência mobilizada no solo foi ou não excedida pela tensão de cisalhamento aplicada. Essa característica é frequentemente quantificada por meio da capacidade de suporte ou parâmetros de resistência ao

cisalhamento não drenados. Nesse sentido, é de grande importância que os solos aplicados em pavimentação sejam devidamente classificados e apresentem aceitáveis propriedades geotécnicas, para corroborar seus empregos.

1.1 Metodologias tradicionais de seleção de materiais e dimensionamento para subleito:

Alguns dos métodos de classificação de solos mais comumente usados na engenharia de transportes, são: HRB (Highway Research Board) e o Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS), que inclusive são recomendados por [6] para classificar solos para ferrovias.

Porém, estas classificações podem não ser adequadas para solos tropicais.

1.2 Metodologia MCT: Segundo [7] existem duas grandes classes que podem ser destacadas dentre os solos tropicais: os solos lateríticos e os solos saprolíticos. Os solos lateríticos são solos homogêneos de camadas superficiais da ordem de alguns metros de espessura, que possuem coloração vermelha ou amarela devido à presença de óxidos de ferro e alumínio, minerais estáveis e pouco erodíveis. Já os solos saprolíticos são solos de camadas com dezenas de metros de espessura, proveniente da decomposição da rocha matriz, herdando suas feições, com presença de minerais não estáveis e susceptíveis à erosão.

Os estudos de [8] relataram que a partir de 1970 o uso adequado de solos finos lateríticos começou a ser avaliado para uso em camadas de base de pavimentos. Após desenvolverem uma metodologia denominada MCT (Miniatura Compactada para Solos Tropicais), que difere das classificações tradicionais de solos, [8] observaram que os valores de CBR (California Bearing Ratio) obtidos com solos finos lateríticos eram geralmente maiores do que os previstos pela análise granulométrica tradicional e os parâmetros de limites de Atterberg. Embora as classificações tradicionais indicaram que o solo não deveria ser usado como camada de sub-base de um pavimento, após anos de operação não

houveram variações no desempenho no trecho em que a sub-base foi composta de solo laterítico argiloso e arenoso.

Juntamente aos métodos de classificação de solos tropicais, é necessário se determinar características resilientes dos materiais utilizados na via férrea, através de realizações de ensaios triaxiais de cargas repetidas. Estudos de [2] mostraram que o comportamento resiliente de solos com classificação fina, utilizados no pavimento ferroviário, dependem de:

- Condições de carregamento ou estado de tensões (intensidade do número de ciclos de carregamento e das tensões de desvio e confinamento);
- Tipo de solo e estrutura inicial e, para solos compactados, método de compactação e energia;
- Estado físico do solo (definido pelo teor de umidade e pelos valores de densidade seca).

Considerando que solos finos dependem dessas variáveis, alguns estudos da literatura internacional trazem valores típicos de solos de subleito, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores típicos de solos de subleito da literatura internacional

Localidade [Estudo/Autor]	Material	MR (MPa)
Solos de subleito na Europa [9]	Subleito de má qualidade (S1)	12,5
	Subleito de média qualidade (S2)	25
	Subleito de boa qualidade (S2)	80
	Subleito de rocha (R)	3.000
Solos de subleito nos EUA [10]	Subleito rígido	80
	Subleito médio	40
	Subleito flexível	20
Solo pavimento ferroviário na Austrália [11]	Subleito	34,2

Por outro lado, valores muito superiores foram encontrados para diversos solos brasileiros. [12] encontrou laterita do Acre, classificação LA', módulo de resiliência variando entre 300 a

900 MPa para uma variação da tensão desvio de 35 a 400 kPa; e argila de Ribeirão Preto, classificação LG', módulo de resiliência variando entre 210 a 300 MPa (Proctor normal) e entre 60 a 295 MPa (Proctor intermediário) em função da tensão confinante de 20 kPa a 150 kPa. Em trechos da Supervia no Rio de Janeiro, [13] encontrou valores de módulo de resiliência de solos do subleito na ordem de 100 a 400 MPa. [14] apresenta em seu estudo, solos do tipo LA' com valores de aproximadamente $CBR=12,5\%$, porém resultando em valores de MR de 226 a 254 MPa (Proctor normal). [15] atestam que o aumento do grau de saturação do subleito pode provocar drástica redução no módulo de resiliência do subleito. Mas, os solos tropicais, principalmente aqueles de comportamento laterítico, podem apresentar capacidades de suporte e módulos de deformabilidade elevados, mesmo quando há aumento de umidade, dentro de certos limites. Em um trecho da Estrada de Ferro Carajás [16], assim como [8], observaram que pela classificação SUCS, e pela classificação HRB, o material não seria indicado para aplicação em pavimentos. Entretanto, a classificação expedida do MCT indicou LA' - LG (Laterítico arenoso ou argiloso), e ensaios triaxiais resultaram em valores de MR aproximadamente 600 MPa e 300 MPa, respectivamente, para umidade de 12,7% (umidade ótima) e 14,6% (umidade 1,9% acima da umidade ótima). Portanto os métodos de classificação do solo SUCS e HRB do material de amostra da EFC, poderiam descartar o uso deste material analisado, por não refletir a singularidade dos solos tropicais finos que podem, no caso de serem lateríticos, eventualmente apresentar bom comportamento mecânico.

A rigidez e resistência do solo são propriedades diretamente relacionadas entre si, no sentido de que solos com baixa resistência também tendem a apresentar baixa rigidez [2]. Assim, para analisar essas propriedades em campo, o uso do Penetrômetro de Cone Dinâmico (DCP) pode ser útil. [17], através de ensaios de DCP, calcularam valores de CBR de solos do subleito de um trecho da Malha Paulista da

Ferrovia Centro-Atlântica, a partir da formulação empírica de correlação com o índice de penetração (PI). [18] relatam que era de extrema importância caracterizar a rigidez da plataforma existente, no processo de renovação de uma antiga ferrovia em Portugal. Ensaios de DCP foram utilizados para avaliar o pavimento ferroviário, sendo constatado como uma forma eficaz desta caracterização *in situ*. Os resultados dos ensaios *in situ* de DCP do estudo de [1] mostraram que ambos subleitos das duas seções ensaiadas, apresentaram acréscimo de resistência (aumento de valor de CBR) com a profundidade.

Portanto, este estudo tem como objetivo analisar as propriedades físicas e mecânicas do material de subleito da Ferrovia Centro-Atlântica (FCA). Dois pontos foram selecionados para realização de ensaios *in situ* de DCP. Além disso, ensaios triaxiais de carga repetida foram realizados em laboratório, a fim de determinar o módulo resiliente dos materiais no teor de umidade ótima e teores de umidade acima da ótima. Por fim, as características dos materiais ensaiados foram comparadas através de diferentes metodologias de classificação de solos e aplicações em pavimentação, demonstrando a particularidade dos solos tropicais.

2. ENSAIOS DE CAMPO E LABORATÓRIO

A Ferrovia Centro-Atlântica possui 7.220 quilômetros de extensão, passando por sete estados brasileiros, e atualmente é controlada pela VLI Logística.

Dois pontos da FCA foram selecionados para esta pesquisa, km 314+200 e km 335+900, localizados a nordeste do estado de São Paulo.

2.1 Ensaios com DCP: O ensaio de cone de penetração dinâmica (DCP) foi originalmente desenvolvido como uma alternativa para avaliar as propriedades de solos de pavimentos ou subleitos. O DCP consiste em hastes superiores e inferiores. A parte superior possui um martelo de 8 kg (17,6 lb) com uma altura de queda de 575 mm (22,6 pol.) e está anexado a haste inferior através da bigorna. A parte inferior contém uma bigorna e um cone preso à extremidade da haste. O cone é

substituível e possui um ângulo de cone de 60 graus para ser penetrado a superfície ensaiada. Paralela a haste inferior, tem-se uma régua graduada que mede a profundidade de penetração a cada golpe. Na Figura 1 tem-se representado o ensaio de DCP sendo executado.



Figura 1 – Ensaio de DCP

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma [19], para determinar a capacidade de suporte do subleito. O resultado do ensaio é o índice de penetração (PI), que indica quantos golpes foram necessários para o equipamento penetrar a certa profundidade. De posse do PI, pode-se estimar valores de CBR, através da equação 1, do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA.

$$CBR = \frac{292}{PI^{1,12}} \quad (1)$$

A resistência do solo é influenciada diretamente pelo teor de umidade este que possui, portanto juntamente ao ensaio de DCP foram medidos os teores de umidade *in situ*.

2.2 Ensaio de laboratório: Os ensaios laboratoriais foram realizados a partir das amostras coletadas nos km 314+200 e km 335+900 da FCA. Foram realizados ensaios, seguindo as respectivas normas, de análise granulométrica de solos [20], limites de Atterberg – limite de liquidez (LL) [21] e limite de plasticidade (LP) [22], classificação de solos SUCS [23] e HRB [24], ensaios da metodologia MCT [25] e [26] e classificação MCT [27]. Este último pode indicar uma classificação mais adequada, devido ao fato de o material ser de uma região tropical brasileira com ocorrência de solo laterítico.

Ademais, foram realizados ensaios de compactação na energia intermediária [28] e ensaios triaxiais de carga repetida [29] (Figura 2) em corpos de prova na umidade ótima, e também em corpos de prova com umidades acima da ótima, induzidas em laboratório. Este procedimento de adição de umidade contou com a colocação dos corpos de prova sobre uma pedra porosa, e esta imersa em um recipiente com água, saturando os corpos de prova por capilaridade, como também apresentado na Figura 2.



Figura 2 – Corpo de prova em processo de adição de umidade e ensaio triaxial de cargas repetidas

Para cada amostra, três corpos de prova foram ensaiados, um no teor de umidade ótima (w_{ot}),

e outro dois acima da umidade ótima (w_{sat1} e w_{sat2}). Para a adição de umidade w_{sat1} os corpos de prova foram deixados sobre uma pedra porosa imersa durante 30 minutos para cada extremidade. Já para a adição de umidade w_{sat2} a duração de saturação por capilaridade era de 1 hora para cada extremidade do corpo de prova. O procedimento procurou reproduzir nos corpos de prova as umidades elevadas de campo constatadas nos estudos *in situ*, mesmo este estando compactado.

3. RESULTADOS

3.1 Ensaios com DCP: Os resultados do ensaio DCP são apresentados na Figura 3. Aplicando a equação 1 obteve-se a correlação do PI com valores de CBR para cada inclinação de reta, indicando diferentes perfis de solo no subleito.

No ponto km 314+200 obteve-se uma maior resistência nos primeiros 10 cm de penetração do DCP, com um valor de CBR=48%. Após, até 50 cm de profundidade, obteve-se um outro perfil de solo com CBR=22%. A umidade *in situ* encontrada foi de $w_{in situ} = 16,3\%$.

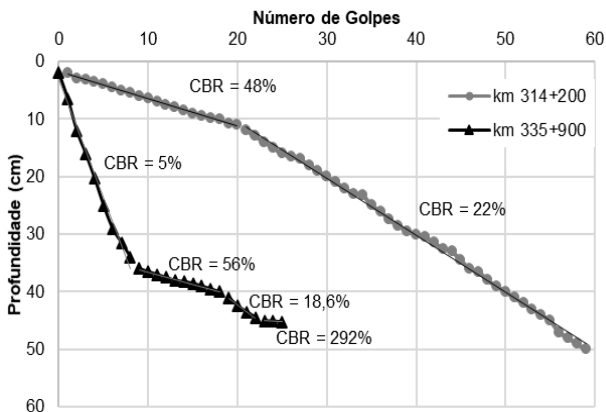


Figura 3 – Resultados de ensaio DCP correlacionado a valores de CBR

Já o ponto km 335+900 apresentou um solo de baixa capacidade de suporte, até aproximadamente a profundidade de 35 cm, com valor de CBR= 5%. Após, até aproximadamente 45 cm de profundidade,

notou-se um evidente ganho de resistência com crescentes valores de CBR. Vale ressaltar que o ponto apresentou um elevado teor umidade *in situ*, de $w_{in situ} = 33,2\%$.

3.2 Ensaios de laboratório: O resultado da análise granulométrica dos materiais coletados pode ser observado na Figura 4.

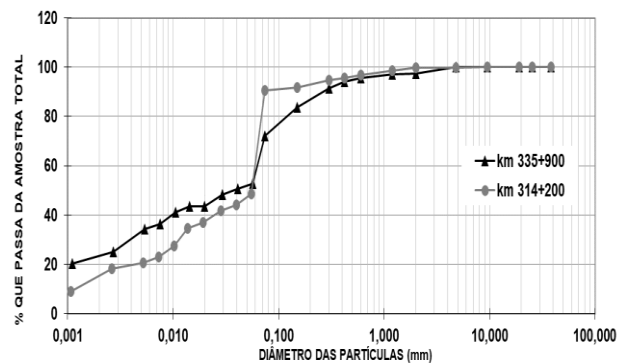


Figura 4 – Distribuição granulométrica do material estudado

O material do km 314+200 apresentou aproximadamente 47% de areia, 19% de silte e 34% de argila, enquanto o solo do km 335+900 apresentou aproximadamente 51% de areia, 28% de silte e 20,5% de argila. Estas frações podem ser melhor visualizadas pela Figura 5.

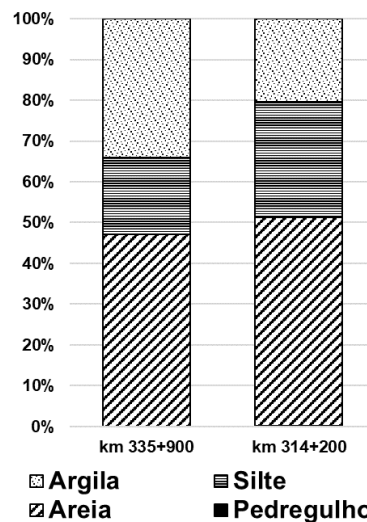


Figura 5 – Frações granulométricas das amostras estudadas

Para os limites de Atterberg, o solo do km 314+200 obteve valores de $LL=30,1\%$ e $LP=21,8\%$, resultando em um Índice de Plasticidade (IP) = $8,3\%$. Para o solo do km 335+900 obteve-se $LL=41,3\%$, $LP=24,5\%$ e $IP=16,8\%$. A partir destas informações, juntamente da distribuição granulométrica, pôde-se realizar a classificação destes solos. Os solos do km 314+200 e km 335+900 foram classificados pela classificação SUCS como CL – argila de baixa plasticidade, e respectivamente pela classificação HRB como A-4 (solo silteoso) e A-7-6 (solo argiloso). Segundo a classificação HRB, os materiais A-7 são geralmente considerados os que apresentam pior desempenho em relação à construção de estradas, sendo necessário em alguns casos, intervenções para estabilização química ou estrutural. Por outra lado, através da classificação MCT, os solos do km 314+200 e 335+900 resultaram em solos com comportamento laterítico, sendo respectivamente classificados como LA' (solo arenoso laterítico) e LG' (solo argiloso laterítico). Estes são solos indicados para aplicação em pavimentos, por apresentar bom comportamento mecânico.

O bom comportamento mecânico dos solos estudados, foi comprovado pelos resultados de módulo resiliente (MR) a partir dos ensaios triaxiais de cargas repetidas. Estes estão demonstrados nas Figura 6 e Figura 7, representados por gráficos em função da tensão desvio (σ_d).

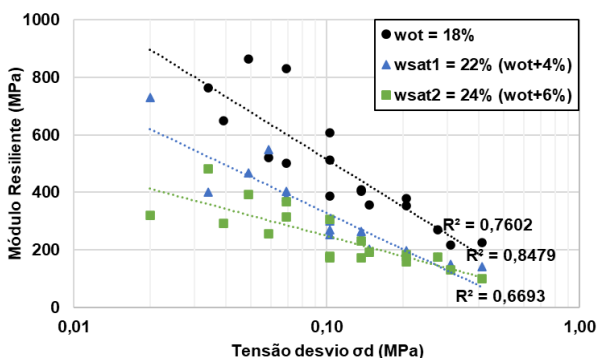


Figura 6 – Módulo Resiliente do material do km 314+200

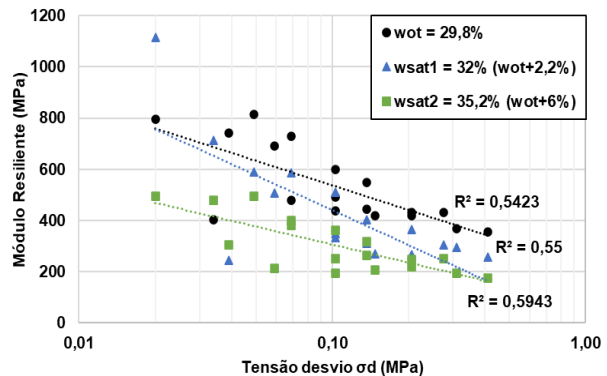


Figura 7 - Módulo Resiliente do material do km 335+900

Notou-se que o material do km 335+900 (LG') apresentou valores médios de MR na condição ótima $MR_{w_{ot}} = 533$ MPa, e nas condições acima do teor de umidade ótima $MR_{w_{sat1}} = 435$ MPa e $MR_{w_{sat2}} = 303$ MPa, ou seja somente após adição de +6% (w_{sat2}), o valor de MR diminuiu aproximadamente 57%, caracterizando-se ainda assim como um solo muito resistente mesmo diante de tamanha variação de umidade. O mesmo comportamento ocorreu no solo do km 314+900 (LA'), que apresentou em média valores de MR na condição ótima $MR_{w_{ot}} = 459$ MPa, e nas condições acima do teor de umidade ótima $MR_{w_{sat1}} = 433$ MPa e $MR_{w_{sat2}} = 264$ MPa, reduzindo, também, em aproximadamente 57% os valores de MR, após adição de +6% (w_{sat2}). Pela Figura 8 pode-se visualizar, de maneira mais clara, o decréscimo dos valores médios de MR apresentados pelos solos estudados, em função do aumento de umidade.

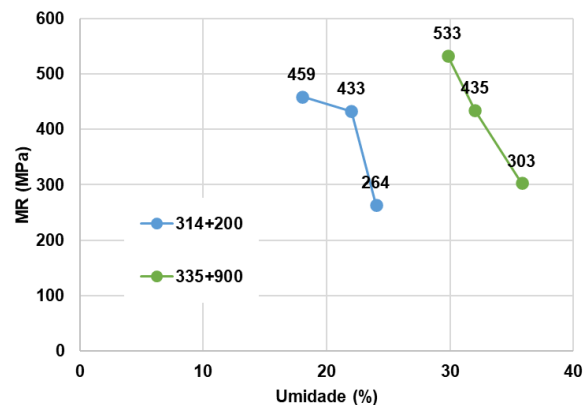


Figura 8 - Valores de MR dos solos estudados nas umidades w_{ot} , w_{sat1} e w_{sat2}

4. CONCLUSÕES

Embora as metodologias tradicionais de classificação dos solos não recomendem o tipo de material estudado para aplicação em pavimentos, os resultados apontaram que se tratam de solos com comportamento laterítico, e adequados para finalidade de pavimentação ferroviária, suportando as cargas operacionais e com bom comportamento diante da variação da umidade.

Analisando o comportamento dos solos foi notado uma redução nos valores de MR, frente ao aumento do teor de umidade, sendo apresentado maiores valores de MR nas amostras na condição wot que na wsat1 e wsat2, como se era esperado. Porém ambas amostras remaneceram com valores aceitáveis para utilização em pavimentos.

As normas utilizadas no Brasil, e em regiões tropicais, de seleção de materiais para aplicação em pavimentação ferroviária, devem ser revistas, e não simplesmente baseadas em normas de países de clima temperado, como os do hemisfério norte. (AREMA – EUA, e UIC-França e Europa);

Assim, gera-se economia com menores DMT, pois transporte a distâncias excessivas pode onerar desnecessariamente o empreendimento, sustentabilidade com menores emissões de CO2 para transporte de materiais de maiores distâncias, menor exploração de recursos naturais em busca de materiais adequados à pavimentação, uma vez que as jazidas poderão encontra-se mais próximas à obra.

REFERÊNCIAS

- [1] Muniz da Silva, L. F. Fundamentos Teórico-Experimentais da Mecânica dos Pavimentos Ferroviários e Esboço de um Sistema de Gerência Aplicado à Manutenção da Via Permanente. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, RJ, 333p., 2002.
- [2] Selig, E. T.; Waters, J. M. Track geotechnology and substructure management. Thomas Telford, 1994
- [3] Schramm, G. Técnica e economia na via permanente. Tradução de R. A. Volkmann. Rio de Janeiro: Darmstadt, 297p, 1977.
- [4] Hay, W.W. Railroad Engineering, John Wiley & Sons, 1982
- [5] Selig, E. T.; Lutenegeger, A. J. Assessing Railroad Track Subgrade Performance Using in Situ Tests. Department of Civil Engineering, University of Massachusetts, 1991
- [6] AREMA - American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. Manual for Railway Engineering. American Railway Engineering and Maintenance. Washington, D.C. 2013.
- [7] Nogami, J. S.; Villibor, D. F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. Ed. Villibor. São Paulo. 1995
- [8] Nogami, J.S. & Villibor, D.F. Use of lateritic fine-grained soils in road pavement base courses. Geotechnical and Geological Engineering, No 9, 167–182, 1991
- [9] Profillidis, V. A. Railway management and engineering. 3ª edição. Burlington: Ashgate, 469 p. 2006
- [10] Li, D.; Selig; Ernest T. Method for railroad track foundation design. I: Development. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, v. 124, n. 4, p. 316-322, 1998.
- [11] Indraratna B.; Salim, W.; Rujikiatkamjorn, C. Advanced rail geotechnology–ballasted track. Taylor & Francis Group, 413 p. 2011
- [12] GUIMARÃES, A. C. R. Um Método Mecânico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil, 2009
- [13] Spada, J. L. G. Uma Abordagem de Mecânica dos Pavimentos Aplicada ao Entendimento do Mecanismo de Comportamento Tensão-Deformação da Via Férrea. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. 2003
- [14] Silva Filho, J.C. Contribuição para o desenvolvimento de um método de dimensionamento mecânico-empírico de dimensionamento de pavimentos ferroviários com foco nos solos tropicais. Tese de Doutorado, PGED/IME, Rio de Janeiro, Brasil. 2018.
- [15] Núñez, W.P., Rodrigues, M.R., Ceratti, J., Gehling, W.Y.Y. E Oliveira, J.A. A Influência da Sucção no Módulo Resiliente de um Solo de

- Comportamento Laterítico – Resultados de Laboratório e de Campo com Emprego do Simulador de Tráfego UFRGS–DAER/RS. In: 30a Reunião Anual de Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação, Salvador, BA. 1996
- [16] Costa, R.; Motta, R.; Bernucci, L. L. B.; Moura, E. D.; Pires, J.; Oliveira, L. Bearing Capacity Evaluation Of A Subgrade In A Heavy Haul Railway In Brazil. In: The 10th International Conference On The Bearing Capacity Of Roads, Railways And Airfields, Athenas, 2017.
- [17] Rosa, A. C.; Teixeira, M.; Guimarães, A. C. R.; Cruz, L. O.; Pires, D.; Freitas, R. Avaliação estrutural de pavimentos ferroviários do corredor centro sudeste paulista utilizando o software SysTrain. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET. 12 p., 2019.
- [18] Fortunato, E. & Pinelo, A. & Fernandes. M.M. In situ characterization of an old railway platform with DCP. Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2009
- [19] American Society for Testing and Materials. (ASTM). ASTM. D6951/D6951M-09. Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications. 2009
- [20] DNER-ME 051/94: Solos - análise granulométrica. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.
- [21] DNER-ME 122/94: Solos - determinação do limite de liquidez. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.
- [22] DNER-ME 082/94: Solos - determinação do limite de plasticidade. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.
- [23] American Society for Testing and Materials. (ASTM). D2487-11. Standard Practice for Classification of soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). 2011
- [24] American Society for Testing and Materials. (ASTM). D3282-15. Standard Practice for Class. of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. 2015
- [25] DNER-ME 256/94 - Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.
- [26] DNER-ME 258/94 - Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-MCV. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.
- [27] DNER-CLA 259/96 - Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.
- [28] DNER-ME 162/94 - Solos - ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.
- [29] DNIT 134/2010-ME: Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência. 2010.