

Análise Mecânica da Aplicabilidade de Solos Constituintes de Sublastro em Pavimentos Ferroviários, por meio de Parâmetros obtidos por Correlações com a Classificação MCT para Solos da Região Norte do Brasil.

Alana da Cruz Cavalcante

Universidade Federal do Pará - UFPA, Belém, Brasil, alanacruzcavalcante@gmail.com

Maria Rafaela Bezerra de Macedo Ribeiro

Universidade Federal do Pará - UFPA, Belém, Brasil, ribeiro_rafaela95@outlook.com

Carlo Yukio Nunes

Universidade Federal do Pará - UFPA, Belém, Pará, Brasil, carlo.nunes@maraba.ufpa.br

João Guilherme Mota de Sousa

Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, Brasil, joao@ufpa.br

Bruno Guimarães Delgado

Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, Brasil, brunogdelgado@hotmail.com

RESUMO: Durante a construção do pavimento ferroviário, a constituição de suas camadas de suporte são definidas, geralmente, por métodos empíricos baseados notadamente no Índice de Suporte Califórnia (ISC) e no Índice de Plasticidade (IP) do solo. Estas técnicas geralmente descartam a possibilidade do uso de alguns solos tropicais na pavimentação, por constatarem elevados valores de IP na matriz do solo. No entanto, a adequação destes solos lateríticos foi comprovada por pesquisas recentes, que apontam o seu bom desempenho em camadas de pavimento, baseada em metodologias mais adaptadas a gênese dos nossos solos, destacando-se neste contexto a metodologia de Classificação MCT (Miniatura-Compactado-Tropical), sistema de classificação brasileiro que visa prever a laterização do solo e sua aplicabilidade em camadas de pavimentos, bem como ao desenvolvimento de métodos mecânicos semi-empíricos para análise do desempenho da via, que utilizam como principal parâmetro de dimensionamento o Módulo de Resiliência (MR) do solo. O presente trabalho apresenta uma avaliação do comportamento de solos lateríticos quando aplicados como materiais constituintes da camada de sublastro de uma estrada de ferro, a partir do MR de solos da região Norte do Brasil, obtidos por correlação com a classificação MCT. Correlação esta, que têm se verificado de bom enquadramento em estudos diversos. Dessa forma, foram realizados ensaios de classificação MCT no âmbito de um grupo de pesquisa de solos tropicais no Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, tendo sido os resultados obtidos correlacionados com valores de MR da literatura de forma a possibilitar a análise de uma via férrea com o emprego destes solos por meio do programa de análise numérica Ferrovia 3.0. A partir da comparação da deformação, obtida por análise numérica, com os limites preconizados por normas de projetos ferroviários, os resultados obtidos indicaram adequação dos solos lateríticos ensaiados.

PALAVRAS-CHAVE: sublastro, pavimento ferroviário, solos tropicais, dimensionamento, correlações.

1 INTRODUÇÃO

Na expectativa do crescimento da malha ferroviária brasileira, há também o indício de investimentos em tecnologia para o desenvolvimento de projetos ferroviários. Neste contexto, o pavimento ferroviário assume importância fundamental face à crescente demanda por transporte de cargas, especialmente a sua infraestrutura. Logo, torna-se importante conhecer as propriedades de tensão-deformação dos solos constituintes da camada de infraestrutura.

Os critérios de seleção dos solos para dimensionamento e classificação de solos para as camadas subjacentes do pavimento ferroviário são baseados em critérios notadamente empíricos, como o limite de plasticidade (LP) e o Índice de Suporte Califórnia (ISC ou do inglês CBR), que possuem conceitos baseados em solos típicos de clima temperado. Contudo, a classificação de solos obtida nestes métodos tradicionais, não é satisfatória como critério de seleção para solos tropicais laterizados, típicos de regiões de climas tropicais (Delgado, 2012).

Nesse contexto, a abordagem conhecida como MCT (Miniatura-Compactada-Tropical), desenvolvida por Nogami e Villibor, na década de 80, associada à ensaios mecânicos de módulo de resiliência e deformação permanente ganham relevância, por serem abordagens mais eficientes e adaptadas à gênese dos nossos solos.

O uso conjunto da classificação MCT e o emprego dos ensaios de cargas repetidas aplicados à pavimentação, têm possibilitado a obtenção de parâmetros de projeto com mais confiabilidade em detrimento dos métodos empíricos ainda comumente empregados no Brasil. Esses procedimentos permitem a previsão de fadiga (deformação resiliente) e plastificação (deformação permanente) frente à aplicação cíclica das cargas impostas pela passagem dos veículos. Segundo Godoy (1997), os solos lateríticos adquirem altas resistências e capacidade de suporte, quando solicitados em determinadas condições específicas e quando em contato com água, apresentam perda mínima desta capacidade. Devido a isto, estes solos apresentam variadas formas de aplicação, além da composição de pavimentos, como matéria-

prima de obras de terra, aterros e proteção de taludes, conforme o interesse geotécnico do projeto (Santos, 2006).

A região norte do país, devido às altas temperaturas e regime pluviométrico, apresenta grande ocorrência de solos lateríticos. Delgado (2012) relata que a experiência brasileira em utilizar solos lateríticos como base e sub-base de pavimentos rodoviários, tem sido aproveitada com sucesso também para o caso do pavimento ferroviário.

Nogami e Villibor (2009) constataram que em relação à construção de estradas, com solos de comportamento laterítico, as propriedades das camadas executadas são bastante superiores às avaliadas pelas classificações tradicionais. Já para os solos de comportamento não laterítico, ocorre o inverso. Para Alvarez Neto *et al* (1998), os valores de módulo de resiliência obtidos com os solos lateríticos compactados são similares aos de materiais granulares, corroborando o que tem sido utilizado como prática consagrada pela engenharia nas áreas de ocorrência de solos lateríticos. No entanto, Marangon (2004) ressalta que tal comparação não é simples e direta uma vez que depende, entre outras considerações, do nível de tensão considerado.

2 BASE TEÓRICA

2.1 Sublastro

O sublastro é uma camada do pavimento ferroviário composta por geomaterial pré-selecionado, sendo que, tal camada deve possibilitar o incremento da capacidade de suporte da plataforma, evitar ascensão de finos e proporcionar uma relativa elasticidade ao sistema como um todo. Geralmente constituído por solos locais, isto implica em um esforço da engenharia no sentido de viabilizar este aproveitamento de forma a não onerar o custo do pavimento ferroviário. A sua importância está no fato de que essa camada de material natural, em geral de solo previamente selecionado com o intuito de separar a camada de lastro do subleito, reduza as tensões sobre o mesmo aumentando a resistência do subleito à

erosão e a penetração da água, dentre outros, fornecendo assim o “amortecimento” da carga.

Cumprindo essas funções, o sublastro reduz a necessidade de uma espessura maior da camada de lastro, que é material britado mais caro do que o material natural. Porém, o sublastro tem outras funções importantes que não podem ser cumpridas pelo lastro. (Selig e Waters, 1995)

Esse pavimento, por sua vez, apesar de assemelhar-se ao tradicional rodoviário, por suas estruturas apoiadas em solos de fundação, divididas em camadas, se distingue pela transmissão da carga à estrutura de camadas, bem como seu tamanho e frequência (Spada, 2003). A Figura 1 a seguir apresenta uma seção transversal típica de um pavimento ferroviário, indicando a estrutura em camadas.

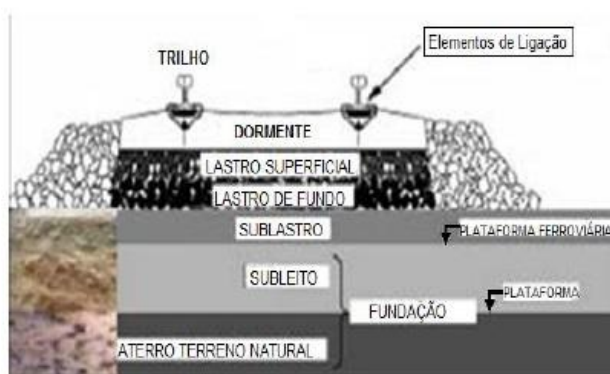


Figura 1. Pavimento ferroviário (Delgado, 2012).

Estudos realizados com solos lateríticos em camadas de sublastro ferroviário indicaram que as frações finas lateríticas numa matriz envolvente de concreções, por exemplo, influenciam positivamente para o desempenho do solo como um todo, proporcionando uma maior estabilidade natural para a camada (Delgado, 2012).

2.2 Classificação MCT

Desenvolvido por Nogami e Villibor, em 1981 e posteriormente aperfeiçoado, o método consiste, em ensaios laboratoriais capazes de classificar solos conforme procedimentos específicos, baseados em suas propriedades mecânicas e hidráulicas, enquadrando os mesmos em um ábaco específico próprio desta metodologia, apresentado na Figura 2, conforme atualização de 2009.

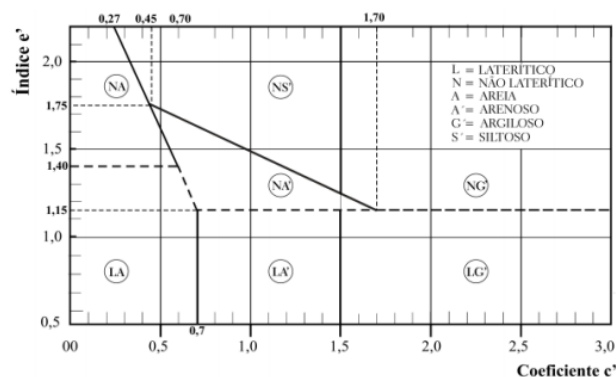


Figura 2. Ábaco de Classificação MCT (Nogami e Villibor, 2009).

Segundo o ábaco, o solo pode ser classificado como:

LG': Argilas lateríticas e argilas lateríticas arenosas;

LA': Areias argilosas lateríticas;

LA: Areias com pouca argila laterítica;

NG': Argilas, argilas siltosas e argilas arenosas não-lateríticas;

NS': Siltes caulíníticos e micáceos, siltes arenosos e siltes argilosos não-lateríticos;

NA': Areias siltosas e areias argilosas não-lateríticas;

NA: Areias siltosas com siltes quartzosos e siltes argilosos não-lateríticos.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), a classificação MCT tem como finalidade principal separar solos de comportamento laterítico daqueles de comportamento não-lateríticos, uma vez que os lateríticos exibem propriedades peculiares como elevada resistência, baixa expansibilidade e plasticidade. Essa classificação foi concebida para solos que passam integralmente na peneira Nº 10 (2,00 mm), o que enquadra grande parte dos solos considerados inadequados pelos métodos de classificação tradicionais.

Para Nogami e Villibor (2009), esta classificação veio permitir a verificação do comportamento laterítico, ou não, dos solos e dar subsídios à avaliação das propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos típicos dos climas tropicais úmidos. Com essa solução foram superados muitos problemas geotécnicos, incluindo os ocorridos na escolha de solos para fins rodoviários, todos oriundos do uso das classificações tradicionais, baseadas nas propriedades índices (granulometria e IP),

compreendendo aquelas conhecidas por Classificação Unificada de Solos (USCS) e HRB-AASHTO.

Assim, alguns solos considerados por aquelas classificações como inadequados para bases de pavimentos, frequentemente, possuíam elevada capacidade de suporte. Como resultado, o uso daquelas classificações para a escolha preliminar de solos a serem utilizados em rodovias resultava, muitas vezes, no descarte de materiais competentes, aumentando os custos do empreendimento.

2.3 Módulo de Resiliência e Deformação Permanente

Spada (2003) conceitua o Módulo de Resiliência (MR) como “a relação entre as tensões transientes verticais e a correspondente deformação recuperável”. O valor do MR é determinado a partir do seu estado de tensões e deformações medidos, aplicados à Lei de Hooke generalizada.

A Deformação Permanente atua quando o pavimento é solicitado diante às cargas dos veículos e pode ser afetada por fatores como: tensão, carregamento, umidade e agregado (Guimarães, 2009).

2.4 *Shakedown*

De acordo com Faria (1999), quando em um corpo submetido a um carregamento cíclico cessam as deformações plásticas, ou permanentes, a partir de um determinado número de aplicações de cargas, diz-se que ele entrou em *Shakedown*. A partir desse instante a resposta do material à solicitação externa será estritamente elástica, e a inexistência de deformação plástica é justificada a partir do surgimento de tensões residuais. Portanto, o surgimento de tensões residuais é condição essencial para o surgimento do *Shakedown*.

A teoria do *Shakedown* vem sendo muito utilizada para descrever o comportamento de estruturas de engenharia submetidas a carregamentos cíclicos, com principal finalidade verificar se a deformação permanente da estrutura pode conduzi-la à ruptura ou se tende a estabilização. Essa teoria foi introduzida no estudo de pavimentos por Sharp e Brooker

em 1984.

Segundo Guimarães (2009), a condição de acomodamento das deformações plásticas está diretamente associada ao surgimento de tensões residuais, mais precisamente a um campo auto-equilibrado de tensões residuais que surge em materiais submetidos à ação de cargas repetidas, que passa a interagir com o carregamento aplicado. As tensões residuais tendem a aumentar ao longo do tempo, diminuindo o efeito da carga aplicada em cada ciclo de carregamento, até que a tensão atuante no material não atinja a condição de escoamento plástico, e o material apresente apenas deformações elásticas.

No dimensionamento de pavimentos com baixos níveis de tensões, esses solos apresentam tendência de acomodamento em pavimentos flexíveis em vias de baixo volume de tráfego.

Alvarez Neto (1997) em sua pesquisa propôs um método com a utilização de solos lateríticos, apresentando-os em uma tabela, onde associa cada solo classificado pela metodologia MCT com os resultados para a faixa provável do módulo de resiliência (M_R), em função das condições de compactação no campo obtidos a partir de retroanálises.

Em estudos posteriores, Marangon (2004) fez um comparativo dos resultados, obtendo valores para as energias Proctor Normal (PN) e Proctor Intermediária (PI), apresentados na Tabela 1.

2.5 Uso de solos lateríticos em pavimentos

Delgado (2012), realizou um estudo com aplicação de solo fino laterítico em camada de sublastro em um trecho do pavimento ferroviário da Estrada de Ferro Carajás (EFC). De maneira geral o solo apresentou comportamento adequado para ser utilizado. Em sua análise o solo estava apto a suportar as solicitações impostas pela passagem das composições (40 t/eixo) em mais de 150.000 ciclos de aplicação de carga sem deformação plástica acentuada, para os níveis de tensões correspondentes à esta camada. Segundo Guimarães (2009) as deformações permanentes acumuladas inferiores a 1,5 mm após cerca de 150.000 ciclos tendem ao acomodamento (teoria do *Shakedown*), já as deformações

permanentes superiores a 1,5 mm podem ser consideradas excessivas e nem sempre podem apresentar a estabilização das deformações plásticas.

Tabela 1. Tabela de Aptidão proposta por Alvarez Neto (1997) e comparativo de Marangon (2004).

Solo		Alvarez Neto Retroanálise M_R (MPa)		Marcio Marangon Laboratório M_R (MPa)		
Classificação MCT		Base (100 % PI)	Subleito (100 % PN)	Base (100 % ~PI)	Base (100 % ~PN)	Subleito (100 % ~PN)
Grupo	Tipo	M_B	M_F	M_B	M_B	M_F
LG'	-	100	90 - 160	Média: 280 Mediana: 271 Intervalo: 104 – 425	Média: 146 Mediana: 132 Intervalo: 70 - 307	Média: 165 Mediana: 159 Intervalo: 75 – 275
LG'	I	200	110 - 220	444*	207*	223*
LA'	I	220 - 300	160 - 220	446*	309*	295*

*Resultado de apenas uma amostra.

3 METODOLOGIA

Para a realização do estudo foram analisados solos da região nordeste do estado do Pará.

Este trabalho utiliza a Metodologia MCT de classificação de solos tropicais.

As classificações serão utilizadas para correlações com o Módulo de Resiliência propostas pelos trabalhos dos autores Marangon (2004) e Alvarez Neto (1997), conforme a Tabela 4, para posterior emprego dos parâmetros obtidos na análise numérica com uso do programa computacional Ferrovia 3.0.

3.1 Procedimento de Análise

O software Ferrovia 3.0, consiste da análise de tensões e deformações nas camadas do pavimento ferroviário. As informações inseridas no programa estão relacionadas às características da grade (conjunto de trilhos, dormentes e fixações), a fundação (lastro, sublastro e subleito) e as cargas aplicadas.

O trilho utilizado foi o TR-68 e o dormente do tipo monobloco de concreto. As cargas aplicadas são referentes a dois pares de rodas de um vagão do tipo GDT com 40 t/eixo. As características das camadas constituintes da infraestrutura do pavimento, bem como os seus espaçamentos, e características referentes a superestrutura da ferrovia estão indicadas nas Tabelas 2 e 3.

Dados gerais:

- Bitola: 160 cm;
- Espaçamento entre dormentes: 61 cm;
- Módulo K: 7.000 kgf/cm.

Tabela 2. Dados referentes às características da grade ferroviária.

Características	Trilho	Dormente
E (kgf/cm ²)	2.100.000	320.000
Largura (cm)	15,24	30
Comprimento (cm)	***	280
Área da seção (cm ²)	86,12	612,5
Inércia (cm ⁴)	3.950,1	31.365,15

Tabela 3. Dados referentes a infraestrutura da ferrovia.

Características	Lastro	Sublastro	Subleito
Espessura (cm)	35	25	200
ν	0,3	0,35	0,4
Coesão	0	0,1	0,05
Ângulo de atrito	0	32	30
M_R (kgf/cm ²)	2.000	***	800

As cargas aplicadas de 40 t/eixo, foram distribuídas como cargas verticais concentradas de 20 tf em cada roda. O módulo de resiliência da camada de sublastro será referente as correlações obtidas dos solos classificados, e realizadas posteriores comparações para analisar a deflexão ocorrida.

4 RESULTADOS

4.1 Tabela de correlações dos solos classificados pela metodologia MCT.

Com base no banco de dados disponível em Marangon (2004), foi realizado o tratamento estatístico e gerado a Tabela 4, com um resumo das classes e grupos de solos propostos pela metodologia MCT.

denominados como B05, BNV01, BNV02, PM01 e OUR01.

Através dos ensaios realizados foi possível caracterizar os solos das jazidas da cidade de Benevides/PA, Primavera/PA e solos aplicados em obras da cidade de Belém/PA, identificando a presença de solos lateríticos arenosos LA' e areias lateríticas LA, segundo a classificação MCT. Os parâmetros de classificação estão resumidos na Tabela 5.

Tabela 4. Módulo de Resiliências das classes de solos, banco de dados de Marangon (2004).

Classe	LA (Tipo IV)	NA	LA'	NA'	NS'	LG'	NG'	LA' (Tipo I)	LA' (Tipo II)
M _r Média	331,6	303,6	411,2	302,1	160,7	368,4	340,9	387,9	398,8
Mediana	334,1	295,5	410,4	341,8	159,7	345,6	300,0	361,4	470,8
M _r (MPa) Máx	2.504,5	356,1	755,6	490,9	400,9	1.134,6	779,9	1.134,6	606,2
Mín	183,7	267,3	123,7	103,2	61,7	143,8	114,1	143,8	123,7
S _d	85,3	37,7	180,3	146,0	50,1	157,7	200,1	154,7	197,5
Nº de Amostras	11	4	20	9	11	107	16	51	7
Outlier	1	0	0	0	1	0	0	1	0
M _r Média	3.382	3.096	4.194	3.080	1.639	3.757	3.477	3.955	4.067
(kgf/cm ²) Mediana	3.407	3.014	4.185	3.485	1.628	3.524	3.059	3.685	4.800

No tratamento dos dados foi encontrado valores considerados *outliers*, sendo descartados e os dados refinados para uma melhor análise dos valores médios e da mediana dos M_R.

Ao avaliarmos a mediana das classes, é notável a diferença entre os solos lateríticos e não lateríticos, em que os lateríticos apresentam maior M_R, em relação ao seu correspondente não laterítico.

Dentre as classes, a que apresentou a menor mediana foi a NS'.

Na Tabela 4, foram convertidos os valores de MR em MPa para kgf/cm², o qual será usado no programa Ferrovias 3.0. Para o Grupo III, não houve dados para posterior correlação.

4.2 Classificação de solos da região nordeste do Pará.

Foram caracterizados cinco solos possíveis de serem aplicados como material de sublastro em pavimento ferroviário, com realização dos ensaios de granulometria (DNER-ME 080/94), Mini-MCV e perda de massa por imersão, de acordo com os procedimentos contidos em Nogami e Villibor (2009). Esses solos foram

Avaliando os resultados, é notável que os solos da região podem ser utilizados como sublastro ou reforço de subleito de pavimentos de baixo custo na região nordeste do Pará.

Tabela 5. Solos classificados.

Solo	c'	d'	Pi	e'	Classe	Grupo
B05	0,73	69,62	0	0,66	LA'	III
PMV01	1,39	62,63	64	0,99	LA'	-
BNV01	1,12	35,03	20	0,92	LA'	II
BNV02	0,12	28,64	203	1,40	LA	-
OUR01	0,11	50,45	140	1,22	LA	-

4.3 Dimensionamento e Análise do pavimento ferroviário

Os resultados obtidos pelo software Ferrovias 3.0, mostraram que as deflexões verticais dos trilhos de acordo com as variações de espaçamento do sublastro e alterações do módulo de resiliência apresentaram baixos deslocamentos do solo. A AREMA (*American Railway Engineering Maintenance Association*) propôs um limite para os deslocamentos verticais. De acordo com esta recomendação, as deflexões do trilho devem ser mantidas dentro da faixa 3,175 a 6,35 milímetros. Ludgren *et al.*

(1970) incorporaram esta recomendação e propuseram um diagrama apresentado na Figura 3, que mostra os limites de valores de deflexão vertical dos trilhos. Este diagrama é baseado na capacidade da faixa de realizar a sua tarefa de projeto.

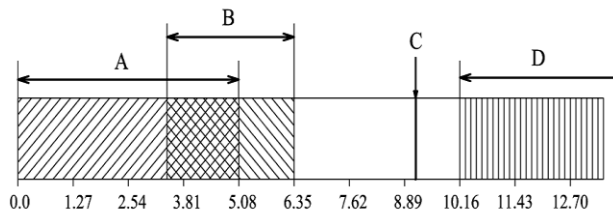


Figura 3. Faixas de deflexões máximas (Ludgren et al., 1970, adaptado).

As letras A, B, C e D indicam faixas de segurança em que:

A: Representa a deflexão para a qual a faixa vai durar por um longo tempo, são materiais mais propensos a entrar em *shakedown*;

B: Representa a deflexão máxima desejável normal para a faixa pesada para uma boa combinação entre flexibilidade e rigidez;

C: Representa o limite de desvio desejável para o controle de construção leve (para trilhos que pesem menos de 50 kg/m); e

D: Fracos ou mal conservados, irão deteriorar-se rapidamente.

A Tabela 6 indica os valores referentes aos deslocamentos dos solos lateríticos classificados e na qual se constata que todos se enquadram na faixa de segurança A.

Tabela 6. Deflexões verticais referentes a cada solo (Ludgren et al., 1970, adaptado).

Solo	Deflexões (mm)
LA (OUR01 e BNV02)	-1,92
LA' (PMV01)	-1,92
LA' III (B05)	-1,91
LA' II (BNV01)	-1,90

Segundo Selig e Waters (1995) se adequadamente projetado e construído, o sublastro trabalhará quase que exclusivamente

isento de deformações permanentes, na medida em que estas deformações ocorrem primeiramente no lastro. Se o lastro for submetido a intervenções periódicas visando a restituição de suas propriedades granulométricas originais (isenta de contaminação por finos oriundos da própria degradação da camada ou por contaminação externa), permitirá uma vida útil ao sublastro e ao subleito praticamente coincidente com a vida útil da própria via permanente projetada.

5 CONCLUSÃO

O uso de solos lateríticos em pavimento ferroviário é de particular interesse para o Brasil, visto que são frequentes em território nacional e muitas vezes configura a alternativa mais econômica para a construção das vias férreas.

Os solos lateríticos apresentam de maneira geral elevados Módulos de Resiliência e comportamento favorável diante da estabilização das deformações permanentes. Com base nisso, na impossibilidade de se realizarem ensaios triaxiais sob carregamento repetido, o uso de correlações do módulo resiliente com as classes dos solos lateríticos, torna-se uma alternativa mais interessante do que o emprego de propriedades índice e do CBR como parâmetros empíricos de projeto.

Para os solos estudados, foi constatado que os solos lateríticos atenderam ao limite de deflexão, sugerido pela AREMA, referente a faixa A que caracteriza materiais de longa duração e com propensão a entrarem em *Shakedown*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração da equipe do Laboratório de Solos II da UFPA pelo fornecimento de material para ensaio e ao Laboratório de Estudos e Misturas Asfálticas (LEMA) por disponibilizar toda a infraestrutura para realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- American Railway Engineering and Maintenance of Way Association – AREMA. (2013) *Economics of Railway Engineering and Operations – Construction and Maintenance Operations*, Manual for Railway Engineering, Lanham, MD, USA, Vol. 4, 374 p.
- Alvarez Neto, L. (1997) *Proposta de um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis para vias de baixo volume de tráfego com a utilização de solos lateríticos*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 288 p.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P. E.; Soares, J. B. (2008). *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros*, Petrobras, ABEDA, Rio de Janeiro, 475 p.
- 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 de Mestrado, Núcleo de Geotecnia (NUGEO), Universidade Federal de Ouro Preto, 131 p.
- Faria, P.D.O. (1999) *Shakedown Analysis in Structural and Geotechnical Engineering*, Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, University of Wales, Swansea.
- Guimarães, A. C. R. (2009) *Um Método Mecânico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos*, Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 56 p.
- Godoy, H., Bernucci, L.L.B. e Carvalho, A. (1997) *O Uso de Recursos Pedológicos no Estudo Geotécnico Preliminar para Obras Viárias utilizando o Método das Pastilhas MCT*. In: 1º Simpósio Internacional de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego, Rio de Janeiro, pp. 527-540.
- Lundgren, J. R.; Martin, G. C. E Hay, W. W. (1970) *A simulation model of ballast support and the modulus of track elasticity*, Masters Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois. 120 p.
- Marangon, M. (2004) *Proposição de estruturas típicas de pavimentos para região de Minas Gerais utilizando solos lateríticos locais a partir da pedologia, classificação MCT e Resiliência*, Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 442 p.
- Ministério dos Transportes – MT. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (1994) *Solos – Análise granulométrica por peneiramento – Método de Ensaio: DNER-ME 080/94*. Brasília. 4 p.
- Selig, e. T. E Waters, J. M. (1995) *Track Geotechnology and Substructure Management*, Thomas Telford Services: London, 456 p.
- Spada, J. L. G. (2003) *Uma abordagem de mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento do mecanismo de comportamento tensão-deformação da Via Férrea*, Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 240 p.
- Santos, E. F. (2006) *Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificação geotécnica aplicada a solos tropicais*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 107 p.
- Sharp, R.W. e Booker, J.R. (1984) *Shakedown of pavements under moving surface loads*. Journal of Transportation Engineering, ASCE Vol. 110, pp. 1-14.
- Villibor, D. F. E Nogami, J. S. (2009) *Pavimentos Econômicos: Tecnologia do uso dos Solos Finos Lateríticos*. Editora Arte e Ciência, São Paulo, 291 p.
- Von der Osten, F. B. (2012) *Avaliação de Solos Tropicais para Sublastro da Estrada de Ferro Carajás*. Dissertação de Mestrado, Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, 86 p.