

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Análise de Solos para Serem Utilizados em Camadas de Subleito e Sublastro

Ronderson Queiroz Hilário

Professor, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte, Brasil, ronderson@etg.ufmg.br

Hebert da Consolação Alves

Técnico de Laboratório, Escola de Minas - UFOP, Ouro Preto, Brasil, hebertalvesa@yahoo.com.br

Talita Caroline Miranda

Professora, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte, Brasil, talita@etg.ufmg.br

Gilberto Fernandes

Professor, Escola de Minas - UFOP, Ouro Preto, Brasil, gilberto@gorceix.org.br

RESUMO : O Brasil possui uma malha ferroviária extremamente pequena em comparação com outras desenvolvidas e em desenvolvimento. Existem projetos ampliar essa malha. Sabendo que o custo de implantação de uma ferrovia é alto, estudar as soluções que permitem a redução é de grande importância. Mas os parâmetros dos materiais utilizados nas camadas de subleito e sublastro são de outros países, o que pode fazer com que o custo aumente para atender a estes parâmetros que não são para solos tropicais. O presente estudo teve como objetivo caracterizar dois solos com granulometrias diferentes, e verificar por meio de parâmetros de resistência e análise mineralógica, utilizando solos finos (tropicais), seu possível uso ou não como uma camada de pavimento ferroviário, e realizar uma análise crítica dos padrões que são utilizados para dimensionar e/ou verificar se um determinado solo pode ser utilizado nessas camadas. Para isso, foram realizados os seguintes ensaios: Granulometria, Limites de Atterberg, Compactação, Índice de Suporte Califórnia (CBR ou ISC), Expansão, Ensaio de Classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), Triaxial Dinâmico e Difração de Raio-X. Pelos resultados, pôde-se constatar que apesar de um dos solos analisados ser fino, ele apresentou resultados satisfatórios em relação ao seu uso em camadas do pavimento ferroviário. Foi verificado que é preciso utilizar ensaios mais modernos, com foco no dimensionamento mecanístico para dimensionamento de camadas de pavimento.

PALAVRAS-CHAVE: subleito, sublastro, MCT, solos tropicais.

ABSTRACT: Brazil has an extremely small limited network compared to other developed and developing ones. There are projects to expand this mesh. Knowing that the cost of implementing a railroad is high, study how solutions that allow the reduction of great importance. But the parameters of the materials used in the subgrade and subballast layers are from other countries, which can cause the cost to increase to meet these parameters that are not for tropical soils. The present study aimed to characterize two soils with different particle sizes, and to verify through strength parameters and mineralogical analysis, using fine soils (tropical), its possible use or not as a layer of railway pavement, and to carry out a critical analysis of the standards that are used to scale and/or verify whether a particular soil can be used in these layers. For this, the following tests were performed: Granulometry, Atterberg Limits, Compaction, California Support Index (CBR or ISC), Expansion, MCT Classification Test (Miniature, Compacted, Tropical), Dynamic Triaxial and X-Ray Diffraction. From the results, it could be seen that although one of the soils promotes being thin, it presented satisfactory results in relation to the use in layers of the railway pavement. It was verified that it is necessary to use more modern tests, focusing on mechanistic dimensioning for dimensioning pavement layers..

KEYWORDS: subgrade, subballast, MCT, tropical soils.

1 Introdução

De acordo com Brina (1988), um pavimento ferroviário é dividido entre infraestrutura e superestrutura. A infraestrutura é constituída pela terraplenagem, assim como todos os serviços necessários a serem



executados abaixo do greide de terraplenagem. Já a superestrutura constitui-se pelos seguintes elementos principais: sublastro, lastro, dormentes e trilhos. O último, constitui o apoio e superfície de rolamento dos veículos ferroviários. Essa divisão entre infraestrutura e superestrutura não é aconselhável, pois contraria uma visão sistêmica do pavimento.

De acordo com Brina (1988), o sublastro é a camada da superestrutura de uma ferrovia que está ligada diretamente à infraestrutura. Ele possui as seguintes funções:

- Aumento da capacidade de suporte da plataforma, permitindo elevar a taxa de trabalho no terreno, quando forem transmitidas as cargas por meio do lastro, fazendo com que sua camada tenha uma espessura menor;
- Evitar a penetração do lastro na plataforma, protegendo a camada de subleito;
- Aumentar a resistência do leito (superfície acabada da plataforma ferroviária) à erosão, penetração de água, melhorando, assim, a drenagem da via;
- Permitir uma elasticidade ao apoio do lastro, fazendo com que a via não fique rígida.

De acordo com Spada (2003), a camada de subleito é a fundação de uma ferrovia, que tem como principal função a garantia de uma camada estável para a estrutura de uma linha férrea, dificultando o enfraquecimento da toda a estrutura por redução da capacidade de carga ou até mesmo recalques significativos.

O Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP) construiu, entre o final da década de 60 e início da década 70, pistas experimentais utilizando como bases solos arenosos finos, que eram até então, não utilizados nessas camadas. Mas foi constatado que o bom desempenho desses materiais finos, mostrando que os critérios utilizados eram falhos em relação à caracterização e classificação dos solos utilizados em camadas de pavimentos no Brasil, apresentando boa resistência de durabilidade (Oliveira, 2018).

Segundo Nogami e Villibor (1995), isso mostrou a necessidade de se desenvolverem critérios mais apropriados, não relacionados demasiadamente às propriedades índices tradicionais, porém mais ligados a propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos compactados.

Nogami e Villibor (1985) acharam extremamente difícil aplicar os sistemas normalmente usados para classificar solos em regiões tropicais, e então propor outra classificação, que foi chamada de MCT Metodologia (Miniatura, Compactada, Tropical). Segundo Villibor e Alves (2017), esta metodologia foi desenvolvida para estudar solos tropicais delgados, lateríticos e saprolíticos.

Foi baseado em testes que forneceu análises das propriedades mecânicas e da água, utilizando corpos de prova com menores dimensões, compactadas de materiais que passam pela peneira de 2,0 mm.

Nogami e Villibor (1995) dividiram os solos tropicais em solos lateríticos e saprolíticos.

2 Materiais e Métodos

O sub-lastro e os materiais de subleito são provenientes da Ferrovia Norte-Sul. Eles foram enviados ao Laboratório de Ferrovia e Asfalto da Escola de Minas de Ouro Preto. Lá foram separados para realização dos testes de caracterização.

Nas de sublastro e subleito, foram realizados ensaios segundo as seguintes normas: DNER ME 093/94; DNER ME 122/94; DNER ME 082/94; DNIT 164/2013 ME; DNIT 172/2016 ME; DNIT 134/2018 ME; DNER ME 228/94; DNER ME 256/94. O DNIT é o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte.

O Teste de Difração de Raios-X também foi realizado nas amostras de solo, para identificar, caracterizar e quantificar as fases minerais que constituem o solo. Este ensaio foi realizado no Nanolab (Laboratório do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto).

3 Resultados e Análises

3.1 Caracterização do Material de Subleito

A Figura 1 apresenta o gráfico de granulometria do material de subleito estudado na pesquisa. A Tabela 4.1 apresenta a porcentagem passante nas peneiras.

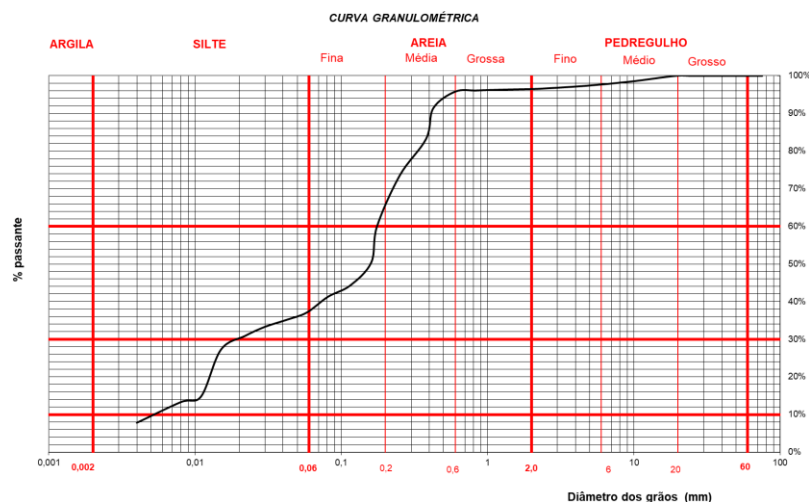


Figura 1. Curva granulométrica do subleito.

Pela análise da curva granulométrica do material, foi possível obter as porcentagens de argila, silte, areia e pedregulho. As frações dos materiais estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Proporções dos materiais de acordo com a granulometria.

Camada	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Grossa (%)	Pedregulho (%)
Subleito	13,32	16,99	61,11	5,08	3,5

De acordo com Figura 1 e a Tabela 2, relacionadas ao subleito, concluiu-se que o material possui maior porcentagem da fração arenosa, com pouco pedregulho.

Para o cálculo dos parâmetros de uniformidade e curvatura do material, foram obtidos os valores de D_{10} , D_{30} , e D_{60} , e estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Índices característicos da curva granulométrica.

Camada	D_{10}	D_{30}	D_{60}	CNU	C_c
Subleito	0,006	0,020	0,17533	31	0,42

Identificado que o material em estudo tem predominância na fração areia, foram realizadas mais análises. Os solos podem ser bem graduados ou mal graduados. Quando o solo é bem graduado, apresenta grãos em diversos diâmetros, o que pode indicar um melhor comportamento para o seu uso em engenharia.

Quando é observada a presença de partículas menores, essas ocupam os vazios correspondentes aos grãos maiores, criando um imbricamento, ocasionando uma menor compressibilidade e, consequentemente, uma maior resistência. Para isso, foram analisados os valores de CNU e C_c . Pelos valores calculados, foi possível concluir que a curva granulométrica do material de subleito é não uniforme e o material é mal graduado.

Em relação ao CNU, seu valor indica um solo que apresenta uma distribuição granulométrica que possibilita um bom uso nas obras de engenharia, pois apresenta grãos em diversos tamanhos.

O valor encontrado para a Densidade Real dos Grãos foi de 2,79. De acordo com Pinto (2006), não há muita variação do valor encontrado de solo para solo. Quando são realizados serviços com solos mais arenosos, a densidade dos grãos costuma apresentar valores próximos de 2,65.

Os valores de Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade foram respectivamente, 23,4 e 4,4.

Os valores preconizados pelo DNIT (2006), para ser utilizado em camadas de pavimento, são (esses valores são designados para solos de clima temperado, não abrangendo os solos de clima tropical, lateríticos):

- $LL \leq 25$;
- $IP \leq 6$.

O Índice de Grupo encontrado foi 0 (zero)

Feita a análise da granulométrica e de LL e LP, é possível determinar-se a classificação TRB (AASHTO) do material. Por essa classificação, o material se enquadra como A-2-4, que é um material pedregulhoso ou areias siltosas ou argilosas. Sabendo-se que a classificação AASHTO é um solo A-2-4, a classificação SUCS do material de subleito se enquadra no grupo GM-SM.



Os resultados dos parâmetros do ensaio de compactação, expansão e CBR estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados dos Parâmetros do ensaio de Compactação, Expansão e CBR.

Camada	Wót (%)	$\rho_{\text{máx}}$ (g/cm ³)	Expansão (%)	CBR (%)
Subleito	14,4	1,896	0,08	17,5

Os coeficientes da metodologia MCT do subleito (c' , d' , e' e P_i), obtidos por meio da compactação Mini-MCV e por perda de massa por imersão, estão apresentados na Tabela 5 e a classificação aparece na Figura 2.

Tabela 5. Parâmetros da Metodologia MCT.

Camada	Parâmetros de Compactação Mini-MCV			
	d'	c'	e'	P_i (%)
Subleito	50,0	0,98	0,77	5,00

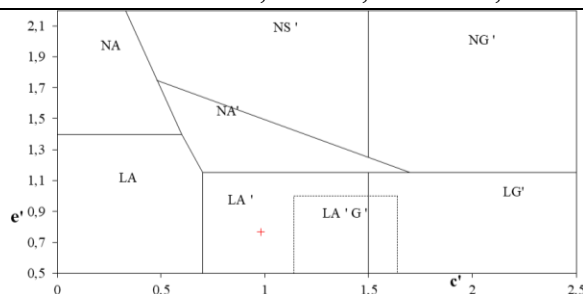


Figura 2. Classificação MCT do Subleito.

A Figura 3 apresenta o gráfico do modelo composto. O resultado da regressão linear desse modelo está apresentado na Tabela 6.

Modelo Composto Subleito - CP 01

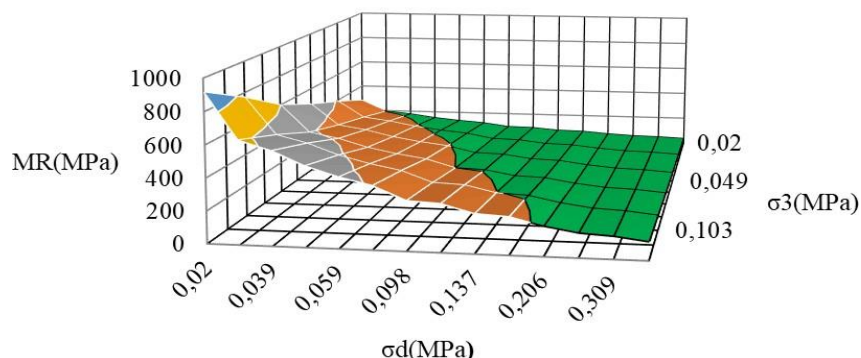


Figura 3: Gráfico do Modelo Composto.

Tabela 6. Resultado do Modelo Composto.

Camada	$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$			
	k_1	k_2	k_3	R^2
Subleito	205	0,6147	-0,6955	0,947

O valor médio do Módulo de Resiliência encontrado foi de 187,99.
 A Figuras 4 apresenta o resultado do ensaio de Difração de Raio-X.

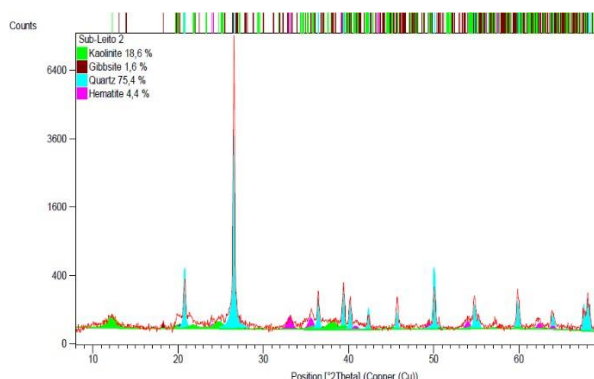


Figura 4. Resultado de Difração de Raio-X.

No ensaio de Difração de Raio-X da amostra do subleito, foi encontrado uma maior quantidade de Quartzo, seguido por Caulinita. Foram encontrados, também, Hematita e Gibbsita, mas, em menores quantidades.

A predominância de Quartzo e Caulinita tem influência direta nos resultados de expansão e resistência do solo de subleito. Esses são minerais que apresentam boa resistência e baixa expansibilidade. Isso mostra que solos finos, podem ser utilizados em camadas de subleito, em muitos casos. Pela caracterização MCT (ficou evidente a presença de solos lateríticos) e pelo resultado do Módulo de Resiliência (que apresentou um valor aplicável), fica evidente a presença dos argilo-minerais encontrados nos ensaios de Difração de Raio-X.

3.2 Caracterização do Material de Sublastro

O gráfico da Figura 5 apresenta a curva granulométrica do material da camada de sublastro. As frações dos materiais estão apresentadas na Tabela 4.12.

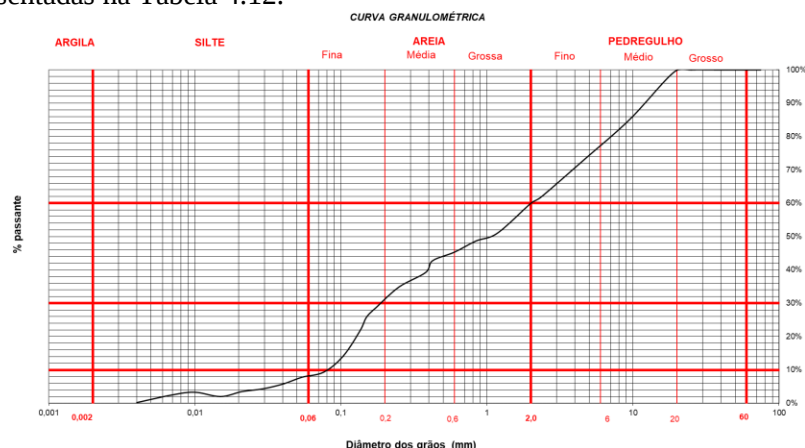


Figura 5.: Curva granulométrica do material de sublastro.

Tabela 7.: Proporções dos materiais de acordo com a granulometria.

Camada	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Grossa (%)	Pedregulho (%)
Sublastro	2,48	16,44	24,03	17,02	40,03

Analisando a Figura 5 e a Tabela 7, concluiu-se que o material possui uma porcentagem na fração areia (41,05%) muito equilibrada em relação à fração pedregulhosa (40,04%). A porcentagem de material passante na peneira de abertura de 0,075 mm foi bem menor quando comparado com as porcentagens de areia e pedregulho, totalizando 18,92%.

Os valores de D_{10} , D_{30} , D_{60} , C_u e C_c estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Índices característicos da curva granulométrica.

Camada	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_u	C_c
Sublastro	0,080	0,190	2,00485	25	0,22



De acordo com os valores de CNU e Cc, o material de sublastro é não uniforme e mal graduado. O solo utilizado como sublastro apresenta uma distribuição granulométrica que possibilita seu uso nas obras de engenharia com eficiência, pois seus grãos possuem diversos tamanhos. Chega-se a esta conclusão quando feita a análise do valor de CNU.

O valor da Densidade Real dos Grãos encontrado foi d₂ 2,88. De acordo com Pinto (2006), quando são realizadas obras de engenharia, utilizando solos mais arenosos, a densidade dos grãos costuma apresentar valores próximos de 2,65.

Em relação aos resultados de LL e IP deu não aplicável. Isso se deve pelo fato da fração areia e pedregulhosa ser predominantes, o solo não tem plasticidade. Isso está de acordo com o material areia. O valor do Índice de Grupo encontrado foi 0 (zero).

Analizando-se a curva granulométrica e os valores de LL e LP, a classificação TRB (AASHTO) do material de sublastro é A-1-b. Essa classificação inclui materiais constituídos principalmente de areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado. De acordo com a classificação TRB, o material se caracteriza como de “excelente a bom” para ser utilizado em camadas de pavimento. De acordo com Brina (1979), o material de sublastro deve se enquadrar na faixa A-1 da classificação TRB.

Sabendo-se que, pela classificação AASHTO, trata-se de um solo A-1-b, a classificação SUCS do material de subleito o enquadra no grupo GM.

Os resultados dos parâmetros do ensaio de compactação, expansão e CBR estão apresentados da Tabela 9.

Tabela 9. Resultados dos Parâmetros do ensaio de Compactação, Expansão e CBR.

Camada	W _{ót} (%)	ρ _{máx} (g/cm ³)	Expansão (%)	CBR (%)
Sublastro	8,8	2,308	0,02	45,3

O ensaio de MCT não foi realizado no material de sublastro, pois a porcentagem passante na peneira de 2,0 mm foi de 59,97%. Para a realização do ensaio, deveria ter no mínimo 95% de solo passante, de acordo com Barroso (2002), isto é, um ensaio para caracterização de solos finos.

A Figura 6 apresenta o gráfico do modelo composto para o material de sublastro e o resultado da regressão linear do modelo composto está apresentado na Tabela 10.

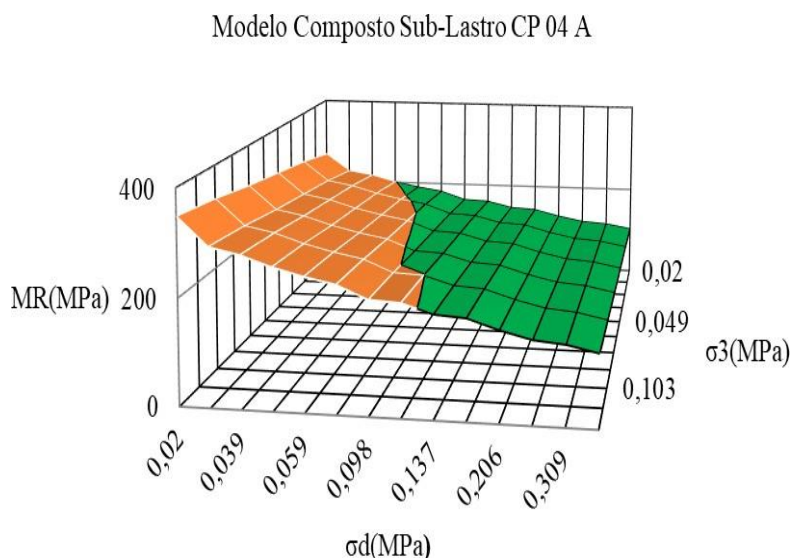


Figura 6. Gráfico do Modelo Composto – Sublastro.

Tabela 10: Resultado do Modelo Composto.

Camada	MR = k ₁ * σ ₃ ^{k₂} * σ _d ^{k₃}			
	k ₁	k ₂	k ₃	R ²
Sublastro	136	0,1418	-0,3132	0,574

O valor do médio MR encontrado foi de 199,76 MPa.

A Figuras 7 apresenta o resultado do ensaio de Difração de Raio-X da amostra de sublastro.

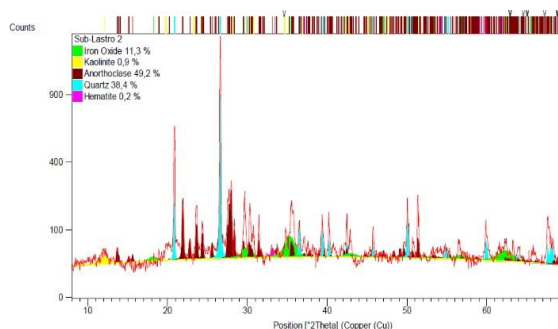


Figura 7. Resultado do Ensaio de Difração de Raio-X.

No ensaio de Difração de Raio-X da amostra do sublastro foi encontrada uma maior quantidade de quartzo e anortoclásio. Também pôde ser observada caulinita, óxido de ferro e hematita, mas em menores quantidades.

Esses valores corroboram com os resultados dos ensaios de expansão e resistência do material. O valor da massa específica do material de sublastro ter ficado acima do valor estabelecido por Pinto (2006), ocorreu devido aos minerais férricos presentes na amostra.

5 Conclusão

De acordo com os resultados apresentados, conclui-se que o material estudado no trabalho pode ser utilizado como camada de subleito de uma ferrovia, pois se enquadrou em todos os valores exigidos pelos parâmetros de normas brasileiras.

Fazendo uma análise mais criteriosa, é possível ser mais crítico aos valores de referência e aos ensaios utilizados. Isso porque os parâmetros utilizados pelas normas brasileiras são oriundos de valores preconizados por outros países, isto é, para solos que não têm as características dos solos brasileiros.

Um exemplo é o valor encontrado de CBR para a camada de subleito. Segundo valores preconizados pelo DNIT e VALEC, o material não poderia ser utilizado como camada de sublastro de ferrovias e sub-base de rodovias. É sabido que o ensaio de CBR tem origem na década de 20 do século passado, oriundo do Estado da Califórnia, nos Estados Unidos. Apesar do solo utilizado na pesquisa para a camada de subleito ser mais fino, ele tem boa capacidade de carga por ser um solo laterítico.

Para solos tropicais, no caso do Brasil, temos o ensaio MCT, que mostrou que o material de subleito, em estudo, tem uma boa capacidade de carga, é pouco expansivo e de baixa deformabilidade, o que o habilita a ser utilizado em várias camadas do pavimento, seja rodoviário ou ferroviário. Isso fica evidente quando comparamos os valores do ensaio Módulo de Resiliência do material com os valores de outros estudos.

O ensaio de triaxial dinâmico, que fornece o MR, deveria ser mais utilizado para caracterização de materiais empregados em pavimentação, pois fornece uma melhor característica por ser aplicada na amostra de cargas dinâmicas, diferente do ensaio de CBR, que é uma carga pontual, apresentando a resistência do solo à penetração.

Rangel et al (2015) utilizaram material para subleito com valores de MR entre 60 e 120 MPa. O valor do MR encontrado no presente estudo foi de 187,99 MPa.

É possível que aconteçam perdas de materiais de excelente qualidade, quando for realizada a classificação TRB em solos brasileiros, por não serem feitas as classificações e os parâmetros para os solos brasileiros.

Em alguns casos, para atender os valores hoje preconizados, ou é feito o descarte desse material ou é realizada uma estabilização (química ou granulométrica), o que torna o custo da obra maior, sem necessidade.

Em relação à conclusão dos materiais que são usualmente utilizados em camadas de subleito e sublastro, é preciso realizarem ensaios que verifiquem a verdadeira capacidade de carga para solos tropicais. São necessários ensaios e parâmetros que apresentem resultados coerentes para solos brasileiros, e não simplesmente serem utilizados parâmetros importados de outros países.

Ensaio mineralógicos dos materiais são de extrema importância, pois são observados minerais/elementos que proporcionariam melhores parâmetros de resistência, baixa deformabilidade e baixa



expansibilidade, características importantes para que os materiais sejam utilizados nas camadas de subleito e sublastro.

Além disso, é preciso utilizarem ensaios mais modernos, que tenham o foco no dimensionamento mecânico, e não no empírico, como hoje é utilizado para dimensionamento de camadas de pavimentos ferroviários. Portanto, ficou evidenciado, nos ensaios, que a utilização de solos finos granulares são indicados para camadas de pavimento ferroviário.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao NUGEO, a Universidade Federal de Ouro Preto e a Universidade Federal de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barroso, S. H. A. Estudo dos solos da região metropolitana de Fortaleza para aplicação na engenharia rodoviária. Tese de Doutorado, USP - São Carlos, 2002.
- Brina, H. L. Estradas de Ferro I – Via Permanente. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos S.A. 1979.
- Brina, H. L. Estradas de Ferro. Rio de Janeiro, 1988.
- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem – DNER-ME 082/94. Limites de Consistência – LP.
- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem – DNER-ME 093/94. Solos – determinação da densidade real.
- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem – DNER-ME 093/94. Solos – Análise Granulométrica.
- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem – DNER-ME 122/94. Limites de Consistência – LL.
- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem – Solos – Determinação do Módulo de Resiliência. DNER - ME 131/94.
- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - DNER-ME 228/94 – Compactação em Equipamento Miniatura.
- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - DNER-ME 256/94 – Solos Compactados em Equipamento Miniatura – Determinação da Perda de Massa por Imersão.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de Pavimentação, 2006.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Pavimentos Flexíveis – Solos – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio. DNIT 134/2009 ME.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. DNIT 164/2013 ME.
- Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. DNIT 172/2016 ME.
- Nogami, J. S.; Villibor, D. F. Estabilização Granulométrica ou Mecânica. 1st International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, Brasília, 1985.
- Nogami, J. S.; Villibor, D. F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo: Villibor, 1995.
- Pinto, C. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. 3ª Edição, São Paulo, 2006.
- Oliveira, F. G. Análise da aplicabilidade da classificação MCT na execução de bases rodoviárias com utilização de solos lateríticos estabilizados, Dissertação de Mestrado, NUGEO/UFOP, 2018.
- Rangel, *et al.* Proposta de uma Metodologia para Estimativa de Deflexão do Pavimento Ferroviário, XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, 2015.
- 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, 2003.
- Villibor, D. F.; Alves, D. M. L. Classificação de solos tropicais de granulação fina e grossa. Revista Pavimentação, nº 43, jan-mar2017, ABPv-Associação Brasileira de Pavimentação. Rio de Janeiro, 2017.