

Contribuição para o uso de material alternativo em camada de sublastro de ferrovia heavy haul

José Carlos Silva Filho, Antonio Carlos Rodrigues Guimarães, Maria Esther Soares Marques, Carmen Dias Castro*

Instituto Militar de Engenharia (IME)

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

*carmendiascastro@yahoo.com.br

RESUMO: Este trabalho apresenta a caracterização geotécnica e mecânica de um solo arenoso fino laterítico (SAFL) e seu desempenho no campo como camada de sublastro em pavimento ferroviário. O SAFL é consagrado em pavimento rodoviário no Brasil, sua utilização em pavimento ferroviário requer especial atenção. O material foi caracterizado e submetido a ensaios de cargas repetidas, deformação permanente e ao Índice de Suporte Califórnia (CBR). Na avaliação “in situ” das propriedades mecânicas foi utilizado o Dynamic Cone Penetrometer. Ao se utilizar normas de seleção de materiais da AREMA, solos com predominância de finos são descartados por não satisfazerem os critérios de índice de plasticidade, granulometria e CBR. Porém, quando trata-se de solo tropical laterítico, este material possui cimentação natural, devido à grande concentração de óxido-hidróxido de Fe e Al, que proporciona a ele um comportamento estrutural peculiar. Resultados obtidos de módulo resiliente elevado e baixa deformação permanente validam o uso do SAFL.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento ferroviário. Módulo Resiliente. Sublastro..

ABSTRACT: This work is presenting the geotechnical and mechanical characterization of a fine sandy lateritic soil (SAFL) and your performance in the field as sublast layer in railway pavement. The SAFL is properly established in road pavement in Brazil, their use in railway pavement requires special attention. The material was characterized and subjected to repeated load tests, permanent deformation and the California Support Index,(CBR). In the “in situ” evaluation of the mechanical properties, the Dynamic Cone Penetrometer was used. When using AREMA material selection standards, soils with a predominance of fine soils are discarded because they do not meet the criteria of plasticity index (PI), grain size and CBR. However, when one is about tropical lateritic soil, this material present natural cementation, due to the high concentrations of oxide-hydroxides of Fe and Al, which gives this material a peculiar structural behavior. Results obtained, with high resilient modulus and low permanent deformation, corroborate the use of SAFL.

KEYWORDS: Railway pavement. Resilient Modulus. Sublast.

1. Introdução

A terraplenagem em obras de pavimentação, seja rodoviária ou ferroviária, é um dos itens mais onerosos e de maior impacto no cronograma de obras, seja pela dificuldade de se mapear possíveis áreas de empréstimos, seja pelas distâncias necessárias para transportar o

volume necessário de projeto. Por este motivo, assume vital importância qualquer possibilidade de ganho de produtividade e/ou otimização no processo de validação/exploração das áreas de empréstimo.

O trabalho de mapeamento de materiais para a obra é feito na fase de pesquisa de ocorrência de materiais locais. Porém, quando se trata

de construção de novas ferrovias, ou, mais especificamente da construção do pavimento ferroviário, utiliza-se como referência para material de sublastro no Brasil o contido em [1] ou [2] para selecionamento de material de sublastro, sendo que ambos os autores utilizam as faixas de granulometria da norma AASTHO.

Mesmo publicações mais recentes sobre infraestrutura ferroviária, tais como o Manual Técnico da Via Permanente da Vale (2013) e a Instrução de Serviço Ferroviário DNIT ISF-212 fazem menção as mesmas faixas granulométricas da norma AASHTO citada por [1] e a ISF-212 do DNIT.

Sublastro é a camada que fica entre o lastro pétreo e o subleito, composta de material natural previamente selecionado, sendo que nos países de clima temperado é constituída basicamente de material grosso (mais de 50% retido na peneira de número 200 – 0,075 mm de abertura da malha) com granulometria inferior à do lastro.

Dentre as funções destinadas ao sublastro, de acordo com [3], tem-se:

- Distribuições de tensões para as plataformas;
- Diminuição da espessura do lastro;
- Impedir o cravamento do lastro na plataforma;
- Servir como camada drenante, protegendo a camada de solo da fundação da ação da água da chuva; e, simultaneamente, impedindo a ascensão de finos do subleito para o lastro.
- Segundo [1], o material para sublastro deve atender às seguintes características:
- Índice de Grupo (IG) na classificação HRB (Highway Research Board): igual a 0 (zero);
- Limite de Liquidez (LL): máximo de 35;
- Índice de Plasticidade (IP): máximo de 6;
- Material que se enquadre, de preferência, no grupo A1 da classificação de solos HRB;

- Expansão máxima de 1%;
- CBR (Índice de Suporte Califórnia): mínimo de 30.
- Porém, para [2] algumas variações devem ser consideradas:
- LL da fração que passa pela peneira nº 40 dever ser menor que 25% e para solos lateríticos menor que 35%;
- IP da fração que passa na peneira nº 40 menor que 6%, e no caso de solos lateríticos menor que 10%;
- CBR mínimo de 20%;
- Expansão máxima de 0,5 %.

A composição granulométrica do material de sublastro deve ser enquadrada nas faixas A, B, C ou D da AASTHO, (**tabela 1**).

Tab. 1 – Faixas granulométricas para sublastro segundo a AASHTO.

Peneiras	A	B	C	D
2"	100	100	x	x
1"	x	75 – 90	100	100
nº 4	25 – 55	20 – 60	35 – 65	50 – 85
nº 10	15 – 40	20 – 60	25 – 50	40 – 70
nº 40	8 – 20	15 – 30	15 – 30	25 – 45
nº 200	2 - 8	5 – 15	5 – 15	5 – 20

Na **tabela 1**, observa-se que, entre a especificação de [1] e [2] já existe certa evolução ao se considerar o limite de IP até 10% para solos lateríticos, mas ainda assim têm-se neste valor e, no valor de CBR, grandes limitantes da utilização de solos tropicais – finos ou pedregulhosos – como camada de sublastro.

Sabe-se que, a faixa «D», admite maior porcentagem de finos, com até 70% na peneira nº 10 e até 20% passante na peneira nº 200. Alguns solos lateríticos pedregulhosos podem atender a este critério, mas há várias ocorrências

de lateritas pedregulhosas pelo país com maiores porcentagens de materiais passantes na peneira nº 200.

No caso de solos arenosos finos lateríticos, tal como definido por [4] e [5], isto é com 100% passante na peneira nº 10 têm sido amplamente utilizados como camada de base em pavimentos rodoviários pelo país, não há possibilidade de atendimento à especificação dita tradicional.

Portanto, verifica-se que não há espaço nos critérios tradicionais e atuais de selecionamento de material de sublastro para a inclusão de solos arenosos finos lateríticos, ou mesmo para solos tais que tenham mais de 70% de sua massa com granulometria inferior a 2 mm.

Um dos motivos para se evitar elevadas porcentagens de finos no sublastro, segundo [3], é a possibilidade de bombeamento destes finos a partir da ação do tráfego de veículos. Porém, desconsidera-se a possibilidade, típica dos solos finos de classificação LA' em especial, de formação de blocos mais rígidos a partir do trincamento da camada após a execução (e durante a cura somente).

Ainda, deve-se levar em consideração, o receio com relação ao cravamento do material do lastro no sublastro, devido a eventual granulometria fina do sublastro e, há além disso, a questão sobre a necessidade do sublastro satisfazer o chamado critério de filtro de Terzagui, o qual considera que o sublastro deve ter uma granulometria tal que permita a infiltração da água da chuva, evitando que o contato lastro/sublastro acumule água e solo, suscetível ao bombeamento.

Ou seja, quando se analisam as especificações tradicionais para selecionamento de material de sublastro há um aspecto mecânico e outro hidráulico que devem ser considerados. Quanto

à questão mecânica, fundamentada no ensaio de CBR, pode-se afirmar que os modernos ensaios da mecânica dos pavimentos - módulo resiliente e deformação permanente - substituem o ensaio de CBR, entre outros motivos porque simulam melhor a condição de trabalho de campo dos materiais do pavimento. Além disso, há uma clara tendência mundial de adoção destes ensaios na prática de pavimentação.

Considerando o pavimento como um sistema multicamadas submetido à ação de cargas repetidas, cada qual com sua espessura e rigidez, pode-se dar ao pavimento uma abordagem em termos de Mecânica dos Pavimentos, tal como exposto por [6] e [7].

No que diz respeito à questão hidráulica, entende-se que o critério de filtro não seja o mais adequado para pavimentos ferroviários nas regiões tropicais, porque exclui a possibilidade de uso de vários solos locais. Considera-se, também, que sua aplicação não seja adequada nem mesmo para as demais condições, porque o esqueleto pétreo tal que apresenta comportamento drenante pode ser mais frágil do que aquele com melhor intertravamento, gerando deformação permanente, principalmente em ferrovias Heavy Haul.

[4] e [5] através de estudos provaram que os solos com alta concentração de oxi-hidróxidos de Fe e Al possuem características específicas que habilitam certos tipos de materiais a aplicação na pavimentação, havendo experiência consagrada no uso destes solos como camada de pavimento em rodovias, em especial no interior de São Paulo.

Por ocasião da construção de um novo ramal - o ramal dos vagões de combustíveis - no pátio compartilhado pela VLI e a Vale S.A

em Açailândia/MA, com capacidade para 80 vagões e cerca de 1.200 metros de extensão, foi identificado que o próprio solo do subleito natural da via possui classificação MCT - amostra 34 do trabalho de [8] - sendo escolhido o referido material para compor a camada de sublastro do pavimento ferroviário daquele ramal. Trata-se do primeiro trecho ferroviário do Brasil no qual foi utilizado um solo arenoso fino laterítico de classificação LA' como camada de sublastro.

Dentro desta ideia, o objetivo do presente trabalho é analisar a possibilidade de utilização de um solo arenoso fino laterítico, de acordo com a classificação MCT, como material de sublastro em ferrovia tipo Heavy Haul, considerando estudos físicos, mecânicos e hidráulicos de laboratório e avaliação do desempenho em campo de um trecho experimental.

2. Materiais e métodos

Na região noroeste do Maranhão, cortada pela Estrada de Ferro Carajás (EFC) e pela Estrada de Ferro Norte Sul (EFNS), há dezenas de ocorrências de solos lateríticos tanto em jazidas próximas ao traçado da via, quanto nos cortes previstos no projeto de terraplanagem da obra de duplicação da via. Os resultados de caracterização geotécnica, mineralógica e resiliente destes solos encontram-se na forma de relatório referente ao projeto desenvolvido por [9] e, também podem ser consultados, no trabalho de mestrado desenvolvido por [8].

Uma oportunidade de utilização dos solos previamente estudados surgiu com a necessidade de construção de um ramal ferroviário - o ramal dos carros de combustíveis - dentro do terminal de Açailândia/MA, operado em conjunto pela Vale e VLI.

Foi observado que o solo que constitui o terreno

natural de quase todo o terminal ferroviário apresenta características homogêneas e similares a da amostra 34 (numeração do projeto IME/Vale), e, dessa forma, poderia ser trabalhado mecanicamente de modo a constituir o sublastro do ramal dos combustíveis.

Assim, foram coletadas e estudadas três amostras de aproximadamente 70 kg nos taludes de corte e no platô existente, no pátio ferroviário de Açailândia – MA, onde a geologia da região caracteriza-se pelas Formações Itapecurú, Grupo Barreiras e Coberturas Detríticas Lateríticas, que estão recobertas por formações recentes do período quaternário, representados pelos sedimentos aluvionares. Na área do pátio ferroviário predomina a unidade geológica detríticas e laterítica formada por sedimentos semi-consolidados, matriz areno-argilosa, com seixos de quartzo de cor amarela e avermelhada.

As três amostras apresentaram características similares e constituem solos arenosos finos lateríticos do grupo LA', típicos da metodologia MCT, de [4].

Ainda, devido à alta coesão do material, foi necessário a mobilização de uma retroescavadeira para auxiliar na abertura dos poços para realização das coletas, que foram efetuadas nos taludes de corte e no platô existente. Tal fato, combinando com a existências de trincas no talude natural, indicavam uma tendência deste material a apresentar um comportamento laterítico, conforme consta em [4].

Após a coleta, as amostras foram devidamente identificadas como amostra 01 referente à face norte do talude, amostra 02 referente à face sul do talude e amostra 03 coletada no acesso existente. Em seguida, foram despachadas para o Rio de Janeiro, para a realização dos ensaios de caracterização.

Como dito anteriormente, os solos arenosos finos lateríticos podem ser considerados como materiais alternativos para camada de sublastro ferroviário,

pois não satisfazem os critérios usuais, mesmo apresentando excelente desempenho como camadas de base de pavimentos rodoviários. Nesse sentido, a metodologia de análise da viabilidade do uso deste material como camada de sublastro envolveu os seguintes conjuntos de avaliações:

- Caracterização Geotécnica: incluindo ensaios de granulometria, limites de consistência, compactação proctore ensaio de classificação MCT;
- Comportamento Mecânico: ensaios triaxiais de cargas repetidas para determinação do módulo resiliente e avaliação da deformação permanente;
- Avaliação de Desempenho de Campo: ensaios com equipamento DCP, verificação do cravamento do lastro e bombeamento de finos.

3. Resultados

3.1 Caracterização Geotécnica

Na **tabela 2** apresentam-se as características geotécnicas dos solos estudados. Observa-se que as amostras apresentaram umidade ótima em torno de 13,5 %, porém com resultados de CBR abaixo dos parâmetros aceitáveis para camadas de sublastro ($CBR_{\text{sublastro}} > 20\%$).

A compactação foi realizada em moldes cilindros de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, sendo utilizada energia de compactação equivalente à do ensaio proctor normal, conforme projeto.

A granulometria do solo é apresentada na **tabela 3**, na qual pode-se perceber que se trata de um solo arenoso fino, contendo elevada fração de argila (33%), com insignificante fração de pedregulho. Assim, o solo se enquadra no critério de granulometria para classificação MCT, ou seja com porcentagem passante na peneira nº 10 (2,0 mm) superior a 97%.

Tab. 2 – Características geotécnicas dos solos estudados.

Amostra	Hot (%)	MEAS(g/cm ³)	Expansão %	LL/IP	CBR%	MCT Trad.
01	14,0	1,835	0,02	21,5/6,9	12,5	LA'
02	14,4	1,808	0,00	20,5/7,1	12,5	LA'
03	13,3	1,862	0,00	21,5/7,0	10,1	LA'

Onde: Hot – umidade ótima, MEAS – Massa específica aparente seca, LL – Limite de Liquidez, IP – Índice de Plasticidade, CBR – índice de Suporte Califórnia e MCT – Miniatura Compactado Tropical.

Tab. 3 – Composição granulométrica dos solos estudados.

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
33	7	27	26	6	1

Em resumo, pela análise das características geotécnicas, levando-se em consideração os ensaios realizados, o solo estudado apresentou resultados satisfatórios para camada de subleito, porém com resultados de CBR abaixo do praticado usualmente em projetos ferroviários (> 20%) para a camada de sublastro, porém se enquadraram como solos SALF, que possuem baixa deformabilidade e alto valor de módulo resiliente.

3.2 Comportamento Mecânico: Ensaios Triaxiais de Cargas Repetidas

3.2.1 Avaliação do Módulo Resiliente (MR)

A **tabela 4** refere-se aos valores dos MRs dos solos estudados, incluindo a umidade do corpo-de-prova, o valor médio e os parâmetros do modelo de MR em função da tensão desviatória. Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova de 10 x 20 cm, sendo adotada como referência a norma DNIT 134/2017.

Pela análise dos resultados apresentados na **tabela 4**, percebe-se que os solos estudados apresentaram valores de MR médio de 240 MPa,

ou seja, um valor elevado para solos finos, mesmo tendo sido preparadas as amostras com energia equivalente a do ensaio Proctor Normal.

NETO *et al* (1998), obtiveram valores de MR para camadas de base e subleito (fundação) de solos finos lateríticos através de estudos de retroanálise de pavimentos existentes do estado de São Paulo, sendo que alguns dos referentes resultados estão na Tabela 5, juntamente com os valores obtidos para o SAFL LA' deste estudo.

Conforme a Tabela 5 apresentada, nota-se que os valores de MR do LA' deste estudo (subleito) são compatíveis com os LA' de base do estudo de referência, confirmando o bom comportamento resiliente deste material. A **figural**, a seguir, representa a variação do MR em função da tensão desvio para as amostras estudadas.

Tab. 4 – Resultado do ensaio de MR.

Amostras	Umidade (%)	MR _{Médio} (MPa)	MR = $k_1 \cdot (\sigma_d)^{k_2}$		R ²
			k ₁	k ₂	
01	13,8	254,50	407,46	-0,24	0,600
02	14,1	241,00	417,65	-0,26	0,401
03	13,3	226,50	423,09	-0,29	0,636

Tab. 5 – Relação entre MR e Classificação MCT.

Solo		Módulo Resiliente e Coeficiente Estrutural		
Classificação MCT		Base (100% PI)		Fundação (100%PN)
Grupo	Tipo	MB	KB	MF
LG'	-	100	0,78	90 - 160
LG'	I	200	0,98	110 - 220
LA'	I	220-300	1,01 - 1,13	160 - 220
LA'	II	220-300	1,01 - 1,16	-
LA'	III	270	1,09	170
LA	IV	240	1,05	-
LA' estudado	-			240

Tab. 6 – Relação dos estados de tensões adotados para ensaio de deformação permanente

Ensaio	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)
1	70	70
2	210	70
3	200	100
4	300	100
5	360	120

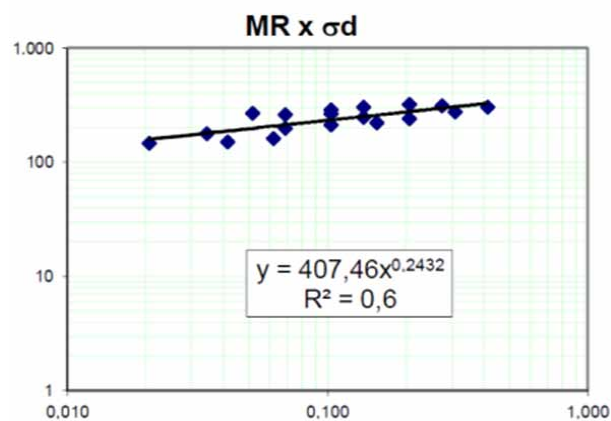


Fig. 1a – Variação do MR em função da Tensão Desvio para a amostra 01.

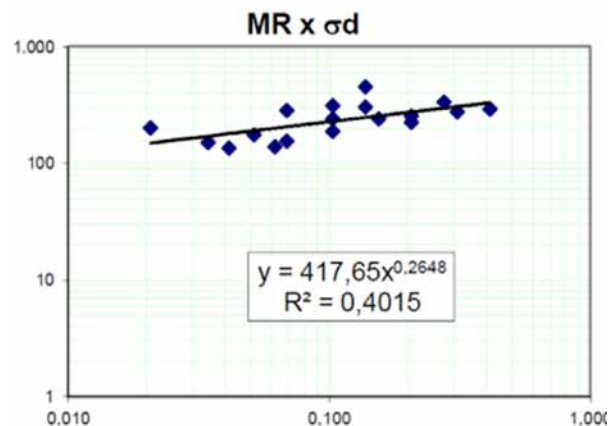


Fig. 1b – Variação do MR em função da Tensão Desvio para a amostra 02.

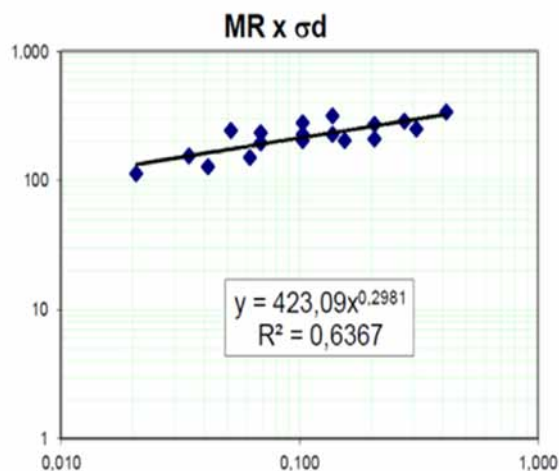


Fig. 1c – Variação do MR em função da Tensão Desvio para a amostra 03.

3.2.2 Avaliação da Deformação Permanente

A amostra 01 foi submetida a uma sequência de ensaios de carga repetida para avaliação da deformação permanente e pesquisa de ocorrência do *shakedown*, tal como descrito em [10]. Foram realizados cinco ensaios de cargas repetidas, utilizando-se estado de tensões na ordem de grandeza das tensões atuantes no campo nas camadas de sublastro de ferrovia *heavy haul*, ou um pouco acima destes valores, conforme mostrado na **tabela 6**.

[11] calcularam uma tensão vertical atuante no topo de sublastro de 251 kPa para pavimento ferroviário (Heavy Haul), contendo sublastro de cascalho de seixo rolado, com carga padrão de 160 toneladas (vagão Hopper). Tal estado de tensões se assemelha ao ensaio 3 apresentado na **tabela 6**.

Na **figura 2** apresentam-se os resultados de ensaios de deformação permanente acumulados, onde pode-se perceber que todos são superiores a 100.000 ciclos de aplicação de cargas. Ainda,

os ensaios 4 e 5 apresentaram deformações acumuladas superiores a 6 mm e 10 mm, respectivamente.

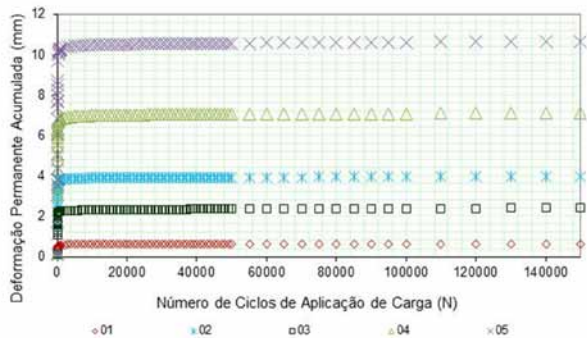


Fig. 2 – Deformação permanente acumulada para os ensaios realizados com a amostra 01 na umidade ótima.

Tais deformações não podem ser consideradas como baixas, entretanto, analisando-se a forma destas curvas de deformações, observa-se uma nítida tendência de acomodamento plástico, representada pelo fato da curva tornar-se quase horizontal à medida que o número de ciclos cresce. Ou seja, uma contribuição significativa para deformação permanente ocorreria apenas nos ciclos iniciais.

Ainda, não se pode afirmar ao certo se nestas condições de tensões - ensaios 4 e 5 - uma camada de sublastro constituída deste material apresentaria a mesma ordem de grandeza da deformação apresentada nos ensaios, porque é necessário levar-se em consideração as tensões e ciclos de carregamento existentes nas fases de execução da camada de lastro. Este aspecto, assim como um eventual fator-campo laboratório para deformação permanente, ainda constitui objeto de pesquisa. Entretanto, conforme já mostrado, as tensões atuantes na prática não devem ser superiores à utilizada no ensaio 3, o qual apresentou valor baixo de deformação

permanente total. Assim, a deformação permanente esperada para camada de sublastro constituída do solo arenoso fino laterítico ensaiado é baixa - no máximo de 4 mm -, conforme mostrado no gráfico da **figura 2**.

Estudos similares em pavimentos ferroviários, tais como [12] e [13], indicaram, também, um estado de tensões entre os utilizados nos ensaios 1 e 2 do presente estudo, corroborando a interpretação descrita acima.

A pesquisa de ocorrência do *shakedown* através de ensaios triaxiais de cargas repetidas para a amostra de SAFL selecionada é mostrada na **figura 3**, na qual é possível perceber que todos os ensaios atingiram uma taxa de acréscimo da ordem de 10^{-7} m/ciclo, condição de *shakedown* adotada por [10], apesar das curvas observadas apresentarem forma diferente daquelas obtidas por [14] e [15].

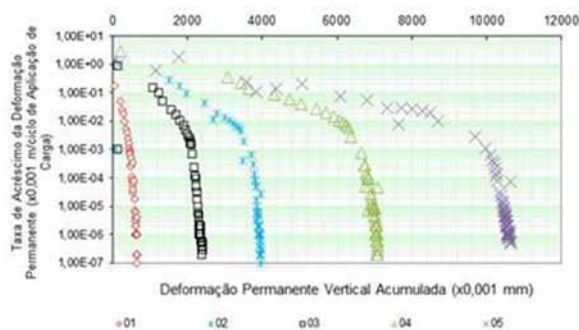


Fig. 3 – Pesquisa de ocorrência do *shakedown* para a amostra de SAFL estudada – Amostra 1 na umidade ótima.

Ou seja, em todos os estados de tensões ensaiados, o SAFL estudado apresentou acomodamento plástico ou *shakedown*, não havendo mais contribuição para o afundamento de trilha-de-roda a partir de um certo número de ciclos de aplicações de carga (N). Em termos práticos, tal fato indica que uma vez atingida à

condição de *shakedown*, a camada de sublastro não irá mais contribuir para o afundamento do pavimento ferroviário, portanto, as intervenções de manutenção limitar-se-ão aos trabalhos no lastro. Tal condição é, certamente, altamente desejável.

3.2.3 Avaliação do Desempenho no Campo

Após a execução da camada de sublastro foi possível realizar ensaios com o equipamento Dynamic Cone Penetrometer (DCP), que foi desenvolvido inicialmente na África do Sul para avaliação do pavimento “in situ”. Desde então, foi usado no Reino Unido, Austrália, Nova Zelândia, e vários estados dos Estados Unidos, como Califórnia, Flórida, Illinois, entre outros, para caracterização estrutural de camadas de pavimento e subleitos [16].

O equipamento foi projetado para uma rápida medição *in situ* das propriedades estruturais de pavimentos construídos com materiais heterogêneos a partir da relação de golpes necessários para a penetração de um cone de dimensões especificadas na camada em estudo. Trata-se de um equipamento portátil que pode fornecer importantes informações a respeito das condições de resistência da camada executada.

A relação do DCP com a resistência do solo (CBR) é definida pela declividade da curva que associa o número de golpes na abscissa pela profundidade de penetração (em mm/golpe) nas ordenadas, considerando um determinado segmento linear.

[17] mostra que as espessuras das camadas obtidas a partir dos ensaios de DCP são as mesmas obtidas nas sondagens realizadas, e concluíram que os testes com o DCP são uma alternativa segura para avaliação de pavimentos.

Os ensaios foram realizados no eixo da via projetada ao longo dos 1.200m, espaçados a cada 200m, sendo os resultados apresentados no gráfico da **figura 4**.

Conforme pode ser observado na **figura 4**, todas as curvas obtidas indicam que há três camadas distintas - definidas pela mudança de inclinação da curva - e uma quantidade muito elevada de golpes para a penetração da primeira camada.

Utilizando-se as equações propostas por [16] foi possível obter os seguintes valores de CBR para as três camadas identificadas: 144%, 64% e 40%. Em especial, o valor obtido para a primeira camada - de 144% - é muito elevado para qualquer tipo de material utilizado em pavimento, principalmente para um solo arenoso fino e, deve-se à formação de blocos muito rígidos após a “cura” da camada.

Muito embora os solos similares ao SAFL estudado não tenham sido ensaiados por [16], ou seja, não compõem a base de dados que fundamenta a equação de correlação, os resultados mostrados na **figura 2** evidenciam um elevado ganho de rigidez na camada.

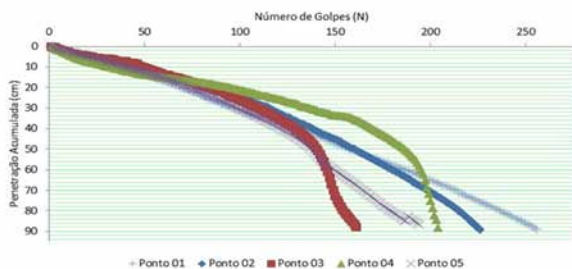


Fig. 4 – Pesquisa de ocorrência do shakedown para a amostra de SAFL estudada – Amostra 1 na umidade ótima.

Com relação ao trecho, o mesmo foi executado em 2014, sendo submetido até o

presente, a quatro períodos de chuvas da região Amazônica, encontrando-se em plena operação, sem necessidade de quaisquer intervenções para recuperação da geometria da via.

Após cerca de três anos da execução do referido trecho, foi possível realizar uma inspeção visual no sublastro, a partir da escavação do mesmo. Além disso, foi coletada amostra deformada para a realização de ensaios de MR e deformação permanente, em um ponto aleatório da via. Entretanto, a amostra coletada, apesar de visualmente similar à ensaiada na fase de projeto, apresentou umidade ótima um pouco inferior, na ordem de 9,5%, não sendo possível ensaiá-la na umidade original. Assim, foram feitos ensaios de MR com duas umidades de compactação: CP 5, umidade 11% e CP 6, umidade 9,5%.

Uma pequena variação entre as porcentagens da fração areia nas amostras pode ser a causa da variação da umidade ótima obtida, porém o material manteve as mesmas características de comportamento laterítico observadas anteriormente, inclusive mesma classificação MCT LA'.

Os resultados dos ensaios de MR para estes corpos-de-prova são apresentados nas **figura 5** e **6**, nas quais se pode observar que estes valores são elevados, se considerado que se trata de um solo fino.

Na **figura 7** apresenta-se o resultado de deformação permanente, no qual foram usados os seguintes pares de tensões: 150 kPa de tensão desvio e 70 kPa de tensão confinante, compatível com o estado de tensões esperado para esta camada na prática. Analisando-se a **figura 7**, pode-se observar que a deformação permanente total foi inferior a 0,5 mm após mais de 150.000 ciclos de aplicação de cargas, que é um valor muito baixo.

A partir da análise visual da superfície escavada após mais de três anos de operação do ramal não

foi verificado cravamento do material de lastro no sublastro, nem bombeamento de finos, indicando tratar-se de um excelente material para uso como camada de sublastro ferroviário.

número de ciclos de aplicação de carga (N) para o CP7 – Hot = 9,5%.

5. Conclusões e considerações finais

Pelo presente estudo, constata-se que o solo arenoso fino laterítico (SAFL) estudado no apresentou elevados valores de MR, mesmo considerando pequenas variações de umidade em torno da umidade ótima, indicando tratar-se de um material com potencial para constituir camada de sublastro de ferrovia.

Os ensaios triaxiais de cargas repetidas de longa duração - acima de 140.00 ciclos - indicaram que a deformação permanente apresentada pelo SAFL mostrou-se baixa para os estados de tensões similares aos esperados no campo para camada de sublastro em ferrovia *heavy haul*. Ainda, a pesquisa de ocorrência do *shakedown* do material indicou que para todos os estados de tensões utilizados, o material apresentou acomodamento das deformações permanentes. Tais fatores combinados indicaram que a camada de sublastro constituída do SAFL estudado não apresentará contribuições significativas ao longo da vida útil do pavimento.

Os ensaios de campo conduzidos com o equipamento DCP (Dynamic Cone Penetrometer) indicaram grande resistência à penetração após a execução da camada de sublastro em um trecho real de ferrovia, representada pelo elevado valor de CBR obtidos utilizando-se correlação disponível na literatura. Não foram identificadas deformações permanentes relevantes na plataforma do trecho teste desde sua construção em 2014.

Os resultados de ensaios de MR e deformação permanente realizados em uma amostra coletada aleatoriamente no campo com mais de três anos

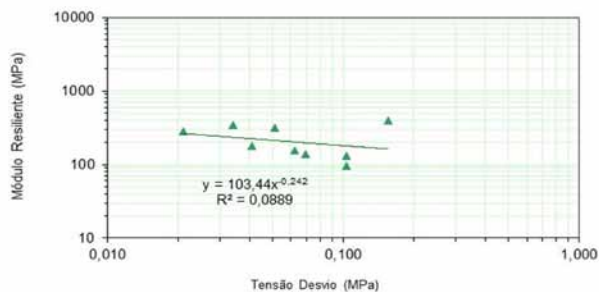


Fig. 5 – Variação do MR em função da tensão desvio. CP5 – MRmédio de 245 MPa.

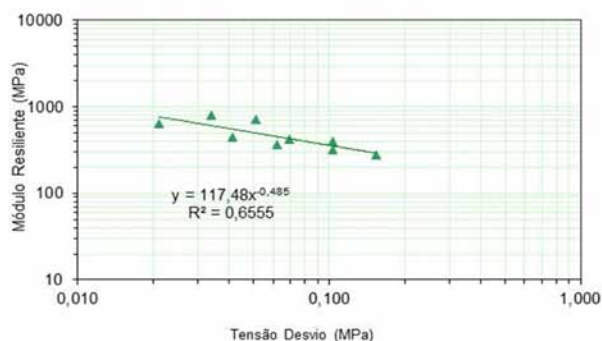


Fig. 6 – Variação do MR em função da tensão desvio. CP6 – MRmédio de 491 MPa.

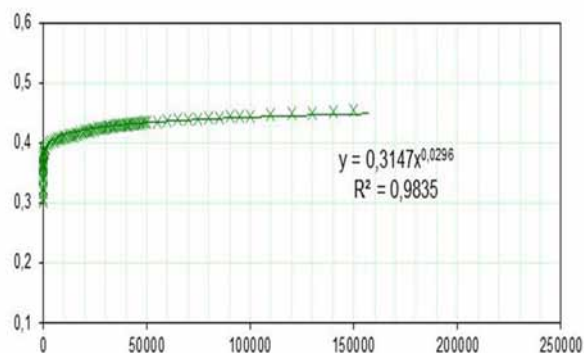


Fig. 7 – Deformação permanente acumulada (mm) versus

de operação indicaram elevado MR e baixa deformação permanente, apesar de apresentar variação da umidade ótima em relação à amostra estudada na fase de projeto.

Além disso, a análise visual do sublastro após mais de três anos de operação não indicou bombeamento de finos, nem cravação de material de lastro no sublastro, que constituía uma preocupação inicial.

Os resultados dos ensaios de laboratório, dos ensaios de campo e da observação do desempenho ao longo de quase três anos de operação indicam, claramente, um desempenho satisfatório do solo arenoso fino laterítico LA' estudado na condição de camada de sublastro de ferrovia tipo *heavy haul*, constituindo, assim, uma solução viável para diminuição de custos na implantação de novas ferrovias, ou segmentos de ferrovias, no Brasil.

Referências Bibliográficas

- [1] BRINA, H. L. Estradas de Ferro. V. 1. 2ª edição. Rio de Janeiro, UFMG, 1979.
- [2] STOPATTO, S. Via Permanente Ferroviária: conceitos e aplicações. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 1987. VALE S.A (2009). Manual Técnico da via permanente. 2009.
- [3] SELIG, E. T ; WATERS, J.M (1994). Track Geotechnology and Substructure Management. Thomas Telford. London.
- [4] NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. Ed. Villibor: São Paulo, Brasil, 1995.
- [5] VILLIBOR, F.D.; NOGAMI, J.S.; CINCERRE, J.R.; SERRA, P.R.M.; NETO, A. Z (2009). Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbana. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 2009.
- [6] MEDINA, J. e MOTTA, L. M. G da (2006). Mecânica dos Pavimentos 2ª Edição. ISBN 85-905987-1-3. Rio de Janeiro 2006.
- [7] SPADA, J.L.G (2003). Uma abordagem de mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento do mecanismo de comportamento tensão-deformação da via férrea. Tese submetida ao corpo docente da coordenação dos programas de pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [8] 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 2016). Programa de Engenharia de Transportes.
- [9] GUIMARÃES, A. C.R.; SANTANA, C.S.A. (2014) Caracterização de fino do rejeito de lastro ferroviário para emprego em pavimentação. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Goiânia. Anais do XVII COBRAMSEG.
- [10] GUIMARÃES, A. C. R. (2009). Um método Mecanístico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos (DoctoralThesis). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- [11] SILVA FILHO, J. C. ; GUIMARÃES, Antonio Carlos Rodrigues . Um Estudo sobre a Influência da Infraestrutura Ferroviária na Manutenção da Integridade Estrutural de uma Via Férrea Tipo Heavy Haul. Revista do CEDS periódico acadêmico semestral do Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável da UNDB, v. 1, p. 12-20, 2014. São Luís/MA.
- [12] DELGADO, BRUNO GUIMARÃES (2012). Análise da Deformabilidade de um Solo Tropical do Oeste do Maranhão como Material de Sublastro na Estrada de Ferro Carajás. Dissertação de Mestrado – UFOP. Ouro Preto 2012.

- [13] OSTEN, FABIANA BARTALINI VON DER. “Avaliação de Quatro Solos Tropicais para Sublastro da Estrada de Ferro Carajas”. Dissertação de mestrado. IME, Rio de Janeiro, 2012.
- [14] WERKMEISTER, S., DAWSON, A. R., WELLNER, F. (2011). Permanent Deformation Behavior of Granular Materials and the Shakedown Concept. Transportation Research Record nº 01-0152, Washington, DC.
- [15] WERKMEISTER, S. (2003). Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials in Pavement Constructions. Tese de Doutorado, Universidade Técnica de Dresden, 189 pg.
- [16] [16] TRICHÊS, G.; CARDOSO, A.B. Avaliação da capacidade de aterros e subleito de rodovias utilizando o penetrômetro dinâmico e a Viga Benkelman. Confederação Nacional do Transporte. Associação Nacional da Pesquisa e Ensino em Transporte. Número 6, 1999, p.35-49.
- [17] [17] NAZAAL, M.D. Field Evaluation of in situ Teste Technology for Qc/Qa During Construction of Pavement Layers and Embankments, 2003, USA, Louisiana State University.

