

## UM ESTUDO PARA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DA PLATAFORMA FERROVIÁRIA

**Laila O. S. R. Cruz**  
**Antonio Carlos R. Guimarães**  
**Carmen D. Castro**  
Instituto Militar de Engenharia

### RESUMO

Grande maioria das malhas ferroviárias brasileiras são antigas e apresentam níveis de degradação em vários trechos prejudicando a operação das ferrovias. Este trabalho apresenta um método simplificado para avaliar as condições da infraestrutura com uma sequência de ações considerando ensaios de campo com DCP e LWD, ensaios de laboratório para verificar o módulo resiliente e a deformação permanente, e a simulação numérica para analisar a plataforma ferroviária. Para as etapas realizadas, verificou-se que a infraestrutura do trecho apresenta subleito com módulos resilientes altos enquanto o lastro e o sublastro o módulo tem valores baixos e desproporcionais no mesmo ponto.

### 1. INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário no Brasil representa um dos modais estratégicos que auxilia no desenvolvimento da economia. A operação das ferrovias é prejudicada pelos problemas ocorridos nos elementos da infraestrutura, acarretando interrupções na circulação da via gerando custos diretos e indiretos. Atualmente as empresas estão investindo em sistemas de gestão e controle, visando assim diminuir os custos de manutenção e reduzir as falhas na infraestrutura. Porém, mesmo com esses investimentos, não existe um procedimento de análise para identificação das condições estruturais da plataforma ferroviária. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de um estudo para a avaliação da integridade estrutural da plataforma ferroviária, utilizando modernos conceitos associados à mecânica dos pavimentos. Para tanto, considerou-se ensaios de campo com os equipamentos DCP (Dynamic Cone Penetrometer) e LWD (Light Weight Deflectometer) e o ensaio de laboratório de módulo de resiliência. E com os dados obtidos, irá gerar uma simulação numérica do comportamento estrutural da plataforma no software SysTrain.

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A plataforma ferroviária pode ser dividida em duas categorias: superestrutura e infraestrutura. Onde a infraestrutura é constituída pelo lastro, sublastro e subleito (Selig e Waters, 1994).

O lastro é um material granular que pode ser constituído por granito, basalto, escória e cascalho e tem a função de resistir verticalmente, lateralmente e longitudinalmente as forças aplicadas aos dormentes. A degradação do lastro pode ocorrer durante a construção e manutenção da via, pelo efeito da carga de tráfego e pelas alterações ambientais, e quando essa degradação ocorre, acaba-se gerando uma camada entre o lastro e o sublastro denominada interlayer ou lastro contaminado (Selig e Waters, 1994).

O sublastro é a camada entre o lastro e o subleito e consiste em distribuir as tensões oriundas dos dormentes para o subleito, evitar a penetração do lastro no subleito e a migração do material fino do subleito para o lastro.

O subleito é a última camada da infraestrutura, podendo ser de solo natural existente no local ou de solo colocado que consiste de um preenchimento de solo para substituir a parte inadequada do solo existente ou para elevar a plataforma até o nível de projeto. Ele influencia

tanto no desempenho quanto na manutenção da via.

### 2.1. Light Weight Deflectometer (LWD)

O Falling Weight Deflectometer (FWD) vem sendo usado nas ferrovias desde 1995 por muitos autores como por exemplo Abdulrazagh e Hendry (2016) e Sharpe e Govan (2014), para avaliar a infraestrutura ferroviária. E segundo Nazaal (2003), o uso do LWD é uma alternativa simples para o FWD e mesmo sendo ainda muito recente o uso do LWD na ferrovia para avaliar as propriedades do pavimento, alguns autores como Lamas-Lopez et al. (2016), Costa et al. (2017) e Rubin et al. (2018) já estão utilizando o LWD para ensaios nas camadas de lastro, sublastro e subleito, onde encontraram valores de módulo resiliente em campo na faixa de 40 a 80MPa para o lastro e 30 a 80MPa para o interlayer (lastro contaminado).

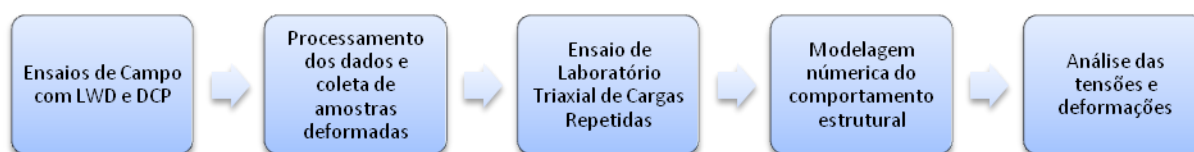
### 2.2. Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

Segundo Claus e Ferreira (2014), uma das vantagens da realização do ensaio de DCP é o fato dele ser semi não destrutivo e de ocorrer menores perturbações na estrutura. Além disso, a realização do ensaio é rápido e eficaz para medir as resistências de camadas superficiais tanto de solos naturais quanto de solos compactados.

Muitas pesquisas referente ao uso do DCP já foram desenvolvidas na área de ferrovia, como Lamas-Lopez et al. (2016), Rubin et al. (2018) e Costa et al. (2017) são alguns autores que utilizaram o ensaio com o DCP mais recentemente em suas pesquisas.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho apresenta uma sequência de etapas que podem ser visto na Figura 1, a qual reúne ensaios de campo e de laboratório, seguido de simulação numérica a qual tem por objetivo analisar a condição estrutural da plataforma ferroviária. Atualmente, existem diversos ensaios e tipos de análises para verificar as condições da via e neste trabalho visou um modelo de procedimento para ordenar e orientar os ensaios mais adequados. Esta metodologia foi aplicada para um trecho ferroviário nacional, no estado de São Paulo, conhecido como Corredor Centro Sudeste Paulista.



**Figura 1:** Fluxograma da Metodologia

Para este trabalho foram selecionados 10 pontos a serem analisados, sendo denominados Amostra 01 até Amostra 10 para os km 313+100, km 368+000, km 391+500, km 394+200, km 210+500, km 226+700, km 240+900, km 242+600, km 258+900 e km 261+000, respectivamente.

O ensaio com LWD é feito por meio de ensaio dinâmico de placa de carga e o principal parâmetro fornecido pelo LWD é o  $E_{LWD}$  que é o módulo de deflexão dinâmica ou módulo de resiliência em MPa. O ensaio com DCP é utilizado para determinar a resistência do solo a ser estudado. A penetração medida é identificada como DPI ou Índice de Penetração Dinâmica. O

ensaio triaxial de cargas repetidas foi desenvolvido para reproduzir, em um meio controlado, os efeitos impostos pelo carregamento dinâmico do tráfego sobre a estrutura do pavimento. Os módulos resilientes obtidos no ensaio é possível avaliar o comportamento mecânico do solo. Para solos arenosos e materiais granulares, o módulo aumenta com a tensão confinante podendo assim utilizar o modelo linear. Para solos finos coesivos, siltosos e argilosos, o módulo de resiliência é mais influenciado pela tensão desvio, podendo assim utilizar o modelo elástico bilinear. Existem um terceiro modelo, denominado Composto, visto na equação 1, que atende os dois tipos de solos, sendo mais vantajoso e obtendo o valor do módulo com maior precisão que os outros dois modelos.

$$MR = K_1 \times \sigma_3^{K_2} \times \sigma_d^{K_3} \quad (1)$$

em que MR: módulo de resiliência [MPa];  
K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> e K<sub>3</sub>: parâmetros de resiliência;  
σ<sub>3</sub>: tensão confinante [MPa]; e  
σ<sub>d</sub>: tensão desvio [MPa].

#### 4. RESULTADOS

Ao realizar os ensaios de campo identificou-se as camadas, verificando que as Amostras 03, 04, 07, 08 e 10 apresentaram apenas a camada de interlayer e subleito, visto que a camada de lastro era inferior a 5cm. Com o resultado obtidos nos ensaios de campo, construiu-se o gráfico da curva DCP para os 10 pontos estudados, conforme visto na Figura 2. Ao analisar as curvas de cada ponto, o trecho estudado apresenta variações de comportamento, indicando a não homogeneidade do material.

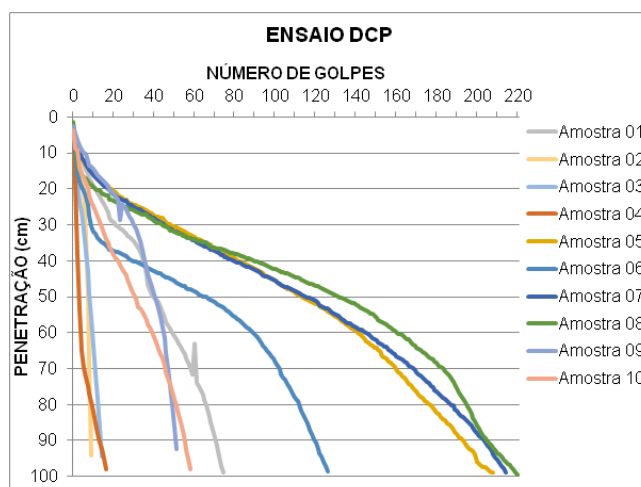


Figura 2: Curva DCP

Além disso, é possível verificar que nos 10 pontos estudados ocorrem 3 padrões de comportamento do solo, sendo o primeiro com deformação elevada representado pelas Amostras 01, 02, 03, 04, 09 e 10. O segundo, classificado como intermediário visto na Amostra 06 e o terceiro com pouca deformação constituído pelas Amostras 05, 07 e 08.

Para os ensaios realizados com LWD, obteve-se os resultados como mostra na Tabela 1 para o lastro ou interlayer e subleito.

Tabela 1: Módulo Resiliente com LWD

Amostra	Lastro ou Interlayer	Subleito
---------	----------------------	----------

	Esquerdo E <sub>Lwd</sub> (MPa)	Eixo E <sub>Lwd</sub> (MPa)	Direito E <sub>Lwd</sub> (MPa)	Esquerdo E <sub>Lwd</sub> (MPa)	Direito E <sub>Lwd</sub> (MPa)
01	44,9	43,8	47,7	47,3	-
02	17,2	41,0	18,2	-	44,1
03	56,5	35,2	41,1	-	47,9
04	49,9	56,9	37,6	26,7	-
05	48,0	36,2	46,3	67,0	-
06	19,0	43,4	36,6	-	46,9
07	35,6	32,4	-	23,2	-
08	43,4	-	32,7	8,0	-
09	36,4	40,1	41,5	-	20,9
10	19,8	48,2	18,5	9,3	-

Como verificado por Miranda et al. (2014), uma das razões para que os valores do módulo resiliente obtido no lastro estarem relativamente baixos e desproporcionais no mesmo ponto estudado pode ser pelo fato do subleito nesses pontos estarem saturados conforme verificado visualmente em campo o que proporcionaria uma acomodação diferente das partículas e com isso a variação no ensaio de campo.

Para os ensaios de laboratório, o modelo que obteve melhor resultado foi o composto, como é possível ver na Tabela 2. Com os resultados, verificou-se que o materiais no subleito apresentam alta resistência.

**Tabela 2:** Módulo Resiliente do Subleito no Modelo Composto

Amostra	MR (MPa)
01	$MR = 935,8 \times \sigma_3^{0,53} \times \sigma_d^{-0,21}$
02	$MR = 851 \times \sigma_3^{0,53} \times \sigma_d^{-0,24}$
03	$MR = 507,9 \times \sigma_3^{0,53} \times \sigma_d^{-0,33}$
04	$MR = 1018,2 \times \sigma_3^{0,53} \times \sigma_d^{-0,23}$
05	$MR = 832,8 \times \sigma_3^{0,57} \times \sigma_d^{-0,30}$
06	$MR = 796,8 \times \sigma_3^{0,50} \times \sigma_d^{-0,28}$
07	$MR = 497,1 \times \sigma_3^{0,43} \times \sigma_d^{-0,46}$
08	$MR = 656,9 \times \sigma_3^{0,46} \times \sigma_d^{-0,36}$
09	$MR = 307,2 \times \sigma_3^{0,51} \times \sigma_d^{-0,58}$
10	$MR = 906,9 \times \sigma_3^{0,46} \times \sigma_d^{-0,35}$

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Já foram finalizados todos os ensaios de campo e de laboratório e a modelagem numérica está em andamento. A análise dos resultados dos ensaios já concluídos permite afirmar que a condição estrutural da infraestrutura possui um subleito resistentes quando ensaiado na umidade ótima e adequado, porém as camadas superiores apresentam módulos abaixo do esperado tendo como possível causa a saturação dos trechos nesses pontos. Após a finalização da modelagem, será realizado a análise completa das tensões.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulrazagh, P. H. e M. T. Hendry (2016) Case Study of use of falling weight deflectometer to investigate railway infrastructure constructed upon soft subgrades. *Canadian Geotechnical Journal*, v.53, n. 12, p. 1991-2000.
- Claus, R. P. e S. R. M. Ferreira (2014) Uma proposta para se avaliar o grau de compactação e a homogeneidade da camada compactada utilizando DPI. *XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Goiânia.
- Costa, R.; R. Motta; L. L. B. Bernucci; E. Moura; J. Pires e L. Oliveira (2017) Bearing capacity evaluation of a

- subgrade in a heavy haul railway in Brazil. *The 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, Athenas, Grécia.
- Lamas-Lopez, F.; Y. J. Cui; S. C. D'Aguiar e N. Calon (2016) Geotechnical auscultation of a french conventional railway track-bed for maintenance purposes. *Soils and Foundations*, v. 56, n. 2, p. 240-250.
- Miranda, L. P.; M. D. T. Casagrande e L. M. G. Motta (2014) Comportamento deflectométrico de pavimento reforçado com geogrelha. *XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Goiânia.
- Nazaal, M. D. (2003) *Field evaluation of in situ test technology for  $Q_c/Q_a$  during construction of pavement layers and embankment*. Louisiana State University, USA.
- Rubin, A. J.; C. L. Ho e C. P. Oden (2018) A comparison of railroad ballast elastic modulus as estimated from light weight deflectometer (LWD) and Dynamic Cone Penetrometer (DCP). *Transportation Research Board 97th Annual Meeting*, Washington, DC, USA.
- Selig, E. T. e J. M. Waters (1994) *Track Geotechnology and Substructure Management*. Editora Thomas Telford, Londres, Inglaterra.
- Sharpe, P. e C. Govan (2014) The use of falling weight deflectometer to assess the suitability of routes for upgrading. *2nd Int. Conf. Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, Corsica, França.

---

Laila O. S. R. Cruz (lailaoliveira.eng@gmail.com)

Antonio Carlos R. Guimarães (cap-guimaraes@hotmail.com)

Carmen D. Castro (carmendc14@gmail.com)

Departamento de Pós Graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia  
Praça General Tibúrcio, 80 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil