

DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS EM VIA PERMANENTE PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE VIA

Robson Costa
Edson Moura
Liedi Bernucci
Rosângela Motta
Arthur Teixeira

Departamento de Engenharia de Transportes – PTR
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP

Fernando Sgavioli
Vale S.A.

RESUMO

Em diversas ferrovias, de diferentes continentes, um parâmetro usado como indicador da resposta elástica e qualidade da via permanente é o módulo de via (u), o qual requer a determinação de deslocamentos (deflexões) em campo. Entretanto, diferentes são os dispositivos usados, além dos métodos de cálculo para se obtê-lo. O presente trabalho tem o objetivo de mostrar um dispositivo de medição desenvolvido para registrar os deslocamentos verticais ocasionados com a passagem dos trens, cujos dados podem, posteriormente, ser usados no cálculo do módulo de via. Considerou-se o carregamento ocorrido em situação estática e dinâmica, com os levantamentos sendo feitos sob o tráfego de trens em baixa e alta velocidade. Para demonstrar sua viabilidade, o equipamento foi usado em medições de dois segmentos da Estrada de Ferro Carajás (EFC), em diferentes condições de lastro e dormente. Os resultados apontaram que o dispositivo se mostrou eficaz na realização das medições de deslocamentos e que há significativa influência do carregamento na forma dinâmica.

ABSTRACT

In several railways, from different continents, a parameter used to estimate the elastic response and quality of the railway is the track modulus (u), which requires the determination of displacements (deflections) in the field. However, different devices are used, in addition to different calculation methods to obtain it. This paper aims to show a measuring device designed to record the vertical displacements caused by the passage of trains. These data can be used to calculate the track modulus. It was considered the static and dynamic loading condition, with measurements done with train traffic at low and high speed. To demonstrate its viability, the equipment was used in measurements of two segments of the Estrada de Ferro Carajás (EFC) under different ballast and sleeper conditions. The results showed that the device was effective in performing the displacements' measurements, and that there is a significant influence of the dynamically loading.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda no escoamento de matérias primas, materiais ou grãos, tem exigido do modal ferroviário um aumento no volume da carga a ser transportada em um menor intervalo de tempo, gerando um maior número de solicitações em todos os componentes da superestrutura e infraestrutura da via permanente, ocasionando elevados níveis de tensões verticais, transversais e longitudinais. Dentre os componentes, o lastro é mais suscetível em apresentar resposta dinâmica diferente, pois se altera por ações de intempéries e pelas tensões elevadas provocadas pelo carregamento dinâmico, fazendo com que os agregados se desgastem por abrasão e/ou quebra. Essas alterações geram partículas indesejáveis, menores que 9,5 mm e 22,5 mm, segundo Selig e Waters (1994) e Esveld (2001).

O material indesejado altera a curva granulométrica, diminui a capacidade de drenagem e modifica a resposta resiliente do lastro (variando de acordo com o tipo de fino contaminante, seja na condição seca ou úmida). Esses fatores corroboram na modificação do comportamento mecânico da via permanente, e um dos parâmetros que tem sido usado em diversas ferrovias de diferentes continentes como indicador da resposta elástica e qualidade da ferrovia é o Módulo de via (u).

Estudos coordenados por Talbot (*American Railway Engineering Association*, 1918), quanto à análise de tensões na via permanente, introduziram o conceito de módulo de via (u), definindo-o como uma força pelo comprimento unitário que cada trilho requer para provocar um deflexão unitária na via. Muitos fatores podem influenciar no valor do módulo de via e, entre os mais significativos têm-se: o tipo e as dimensões do dormente; o tipo, a espessura e a capacidade de suporte do lastro; e o tipo e a capacidade de suporte do subleito (Lundgren e Hay, 1970).

O módulo de via pode ser um modelo-base de previsão de desempenho da via permanente, pois através do mesmo é possível analisar a interação entre os componentes da superestrutura e da subestrutura da via, provocada pela carga do material rodante e pelas deformações (Selig e Waters, 1994).

Diversos pesquisadores realizaram testes para análise de tensões e comportamento mecânico da via permanente, por meio do módulo de via (u), conforme descrito no item 2. Entretanto, cada estudo tem condição e parâmetros de via particularizada como: tipo de vagão, carga aplicada e velocidade empregada nos testes; uso de diferentes dispositivos na medição da deflexão vertical, com posicionamento em locais distintos (alguns no patim do trilho, outros na borda do dormente, por exemplo); e metodologia específica de cálculo do módulo de via.

O presente trabalho tem o objetivo de apresentar um dispositivo de medição desenvolvido para registrar *in situ* os deslocamentos verticais ocasionados pela passagem do material rodante na via permanente, cujos dados podem, posteriormente, ser usados no cálculo do módulo de via (u). Considerou-se o carregamento de forma dinâmica e estática, com os levantamentos sendo feitos sob tráfego de trens em baixa e alta velocidade. Para demonstrar sua viabilidade, o equipamento foi usado em medições de dois segmentos da Estrada de Ferro Carajás (EFC), em diferentes condições de lastro (novo e colmatado) e de dormente (concreto e madeira).

Sabe-se que o tipo de carregamento e a frequência em que a via permanente é solicitada, altera a resposta mecânica de todos os componentes. Para avaliar o comportamento frente às solicitações impostas pela carga das rodas dos veículos, foram realizados testes na via com vagões vazios (baixa solicitação de carga) e carregados (alta solicitação de carga), a saber: i) teste dinâmico em baixa velocidade no lastro colmatado; ii) teste dinâmico em alta velocidade no lastro colmatado; e iii) teste dinâmico no lastro novo.

O uso de um equipamento para medir deslocamentos em qualquer segmento da ferrovia, mantendo sua trafegabilidade normal, pode ser uma ferramenta útil para a gerência de manutenção ferroviária.

2. TESTES REALIZADOS EM DIFERENTES ESTUDOS

Os primeiros estudos referentes à análise de tensões na via permanente, por carregamento estático e dinâmico, foram coordenados por Talbot (*American Railway Engineering Association*, 1918). O trecho de campo usado durante os testes foi na estrada de ferro central de Illinois (Estados Unidos), onde se determinou segmentos homogêneos da via. Para tanto, preparou-se quatro segmentos, a uma pequena distância um do outro, com diferentes espessuras de lastro subjacentes aos dormentes, sendo uma com 0,15 m, uma com 0,60 m e duas com 0,30 m. As medições de deslocamento foram feitas na base do trilho, sendo

realizadas com uso de uma câmera, posicionada a 10 pés (3,048 m), pois a essa distância a vibração da câmera era muito pequena e não afetaria os resultados das medições, exceto em alta velocidade. O movimento vertical do trilho era produzido pela flexão do mesmo e pelo movimento vertical do dormente, lastro e fundação. Segundo Talbot (*American Railway Engineering Association, 1918*), mesmo que uma via esteja bem conservada, haverá pequenas deflexões entre o trilho e a placa de apoio, entre esta e o dormente, e entre esse último e o lastro, cujos valores variam entre 0,254 mm a 25,4 mm, ou mais. Para uma linha principal, em condições normais, o valor médio de deflexão é de 1,63 mm.

Em um segmento de via construído em laboratório, Zarembski e Choros (1979) realizaram testes para medir as deflexões da via em três locais usando LVDTs (*linear variable displacement transducers*). Avaliaram três diferentes métodos de cálculo do módulo de via vertical usando: (A) bacia de deflexão; (B) bacia de deflexão gerada pela carga da roda de veículo carregado e descarregado; e (C) viga contínua sobre apoios elásticos. Os autores recomendam o uso do método C para cálculo, pois o mesmo é determinado usando o nível de carga correspondente ao tráfego da ferrovia.

Kerr (1983) propôs um método para determinação do módulo de via usando uma locomotiva ou um veículo de cargas múltiplas. Entretanto, Selig e Waters (1994) apontam desvantagens desse método, pois o mesmo faz referência à deflexão gerada pelo veículo carregado e descarregado, incorporando a área de folga entre essas deflexões.

Anderson e Rose (2008) realizaram estudos, com medidas de tensões e deflexões no trilho, ocasionadas pela passagem de trens em duas linhas, sendo que o pavimento ferroviário continha uma camada de mistura asfáltica, aplicada em diferentes espessuras. Esses autores usaram LVDTs, posicionando-os na base do trilho, para medir as deflexões sob cargas dinâmicas ocorridas com a passagem dos trens.

Já em estudos desenvolvidos por Priest e Powrie (2009), há a proposição de cálculo do módulo dinâmico de via a partir de medidas de deslocamentos com geofones fixados próximo à borda de oito dormentes, mantendo a trafegabilidade normal da ferrovia. Neste trabalho o cálculo foi feito por dois métodos, a saber: i) *Displacement basin test* (DBT), o deslocamento total dos dormentes é obtido através de uma análise de vários pontos em um determinado instante de tempo, a partir de uma carga pontual aplicada; e ii) *Beam on an elastic foundation* (BOEF), propôs uma alteração na metodologia que considera a via como uma viga contínua sobre apoios elásticos.

Indraratna *et al.* (2011) usaram *settlement pegs* (hastes metálicas posicionadas verticalmente, de modo transversal na camada) para medir os deslocamentos verticais ocasionados pela passagem de trens, tanto de passageiros quanto de carga, em um segmento de uma ferrovia na cidade de Bulli (Austrália).

A contaminação do lastro é um fator preponderante na alteração do comportamento mecânico da via permanente, e conseqüentemente, do módulo de via. Para avaliar esses efeitos em campo, Zakeri e Abbasi (2012) realizaram estudos em cinco segmentos de uma ferrovia em uma região arenosa no deserto do Irã, sendo quatro com diferentes porcentagens de contaminação e uma não contaminada (seção de controle). Usaram LVDTs instalados na borda de vários dormentes adjacentes, de modo a medir a deflexão vertical da via em um certo

intervalo de tempo. Esses autores utilizaram dois tipos de carga, por meio de trens com carga pesada e carga leve, trafegando a uma velocidade de aproximadamente 15 km/h.

Dentre os estudos realizados no Brasil para determinação do módulo de via em campo, merecem destaque os trabalhos desenvolvidos nas linhas da FLUMITRENS no Rio de Janeiro. Cuconato (1998) montou um dispositivo para medição dos deslocamentos verticais; posteriormente, Silva (2002) e Spada (2003), usaram a viga Benkelman para medição das deflexões geradas pelo carregamento com a passagem de um vagão de teste, em diferentes segmentos e condições de lastro. Além disso, também se destacam os estudos realizados por Fernandes (2005) na Estrada de Ferro Vitória-Minas, ao medir as deflexões geradas igualmente usando a viga Benkelman.

3. ANÁLISE DE TENSÕES E DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE VIA

No decorrer do desenvolvimento da presente pesquisa, diversos métodos de análise da via permanente foram avaliados e, devido à simplificação e ampla aplicação, concluiu-se que a abordagem que se vale de apoios contínuos e elásticos sob o trilho era a mais adequada. Dentro deste contexto, o método desenvolvido por Talbot (*American Railway Engineering Association, 1918*) representa o comportamento da via em função de um carregamento, conforme Equação (I), onde a força é proporcional à deflexão.

$$p = -uy \quad (I)$$

Onde:

p = força por unidade de comprimento (kN);

u = módulo de via (kPa);

y = deflexão da via (m).

A equação diferencial (II) proposta tem como base a hipótese fundamental de Winkler (viga sobre apoio elástico), e é apresentada em (II), devendo-se utilizar a expressão (III):

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} + uy = 0 \quad (II)$$

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = -uy \quad (III)$$

Onde:

E = módulo de elasticidade do trilho;

I = momento de inércia do trilho.

A solução da equação (III), considerando a deflexão do trilho, $y(x)$, a qualquer distância, x , ao longo do trilho a partir de um carregamento simples P , é apresentada na equação (IV):

$$y = \frac{P}{(64EIu^3)^{1/4}} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sen \lambda x) \quad (IV)$$

Onde:

P = carga da roda (kN);

e = 2,7183 (Neperiano);

$\lambda = \left(\frac{u}{4EI}\right)^{1/4}$ = fator de amortecimento;

x = distância para qualquer ponto, a partir do carregamento ao longo do trilho (m).

As sucessivas derivações da equação da deflexão (IV) fornecem a inclinação, o momento fletor, o cisalhamento e a intensidade do carregamento. A deflexão máxima ocorre no ponto

de aplicação do carregamento (debaixo da roda), onde $x = 0$. Substituindo $x = 0$ em (IV), obtêm-se a equação (V), de deflexão máxima (y_0):

$$y_0 = \frac{P}{(64EIu^3)^{1/4}} \quad (V)$$

O módulo de via (u) não pode ser determinado através de uma medida direta. Entretanto, pode-se medir a deflexão e , substituindo-se esse valor na equação (V), obtém o módulo de via, conforme equação (VI):

$$u = \frac{\left(\frac{P}{y_0}\right)^{4/3}}{(64EI)^{1/3}} \quad (VI)$$

Na avaliação dos três diferentes métodos de cálculo do módulo de via vertical apresentados por Zarembski e Choros (1979) (citados anteriormente), esses autores chegaram à conclusão de que a proposição de Talbot (1918) se mostrou mais aplicável às medições obtidas em campo, requerendo um número mínimo de valores de deflexão da via.

Segundo Selig e Waters (1994), o módulo de via deve ser calculado a partir de medições das deflexões impostas pelo carregamento no campo. Além disso, os autores citam que existem basicamente três meios de se calcular, a partir de dados experimentais, os quais são: i) ensaio de carga pontual (equação VI); ii) ensaio da bacia de deflexão (equação VII); e iii) ensaio com veículos de cargas múltiplas (equação VIII).

$$P = u \cdot A_y \quad (VII)$$

Onde:

A_y = bacia de deflexão, diferença entre duas deflexões ocasionado por carregamento leve e pesado (m).

$$u = \sum P_i / a \sum_{i=1}^m y_i \quad (VIII)$$

Onde:

P_i = carga de cada eixo (KN);

a = espaçamento entre dormentes (m);

m = número de dormentes;

y_i = deflexão no trilho no i ésimo dormente (m).

4. DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DESENVOLVIDO E TESTES EM CAMPO

O primeiro dispositivo de medição desenvolvido pelo Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Universidade de São Paulo (LTP-USP) foi utilizado em uma medição de deslocamentos verticais em um ponto da Estrada de Ferro Vitória-Minas, servindo para o entendimento da movimentação dinâmica causada pela passagem dos trens (Merheb, 2014). Trata-se de um “braço” metálico em que há a instalação de sensor tipo LVDT em uma das extremidades, o qual fica apoiado no patim do trilho. O sensor, por sua vez, fica conectado a um sistema de aquisição de dados, que registra os deslocamentos.

Já o segundo dispositivo de medição de deslocamentos do referido laboratório (o qual é descrito no presente trabalho) foi desenvolvido para estudos na Estrada de Ferro de Carajás

(EFC). Neste caso, houve um aperfeiçoamento significativo em toda a estrutura, inclusive no que se refere ao comprimento total do braço (esse deveria ser tal, que ficasse fora da área de atuação da carga ocasionada pela passagem do material rodante, para não interferir na leitura obtida). Para tanto, foram usados perfis de alumínio com elevada rigidez, visando estabilidade entre as hastes de sustentação do braço, principalmente nos pontos de fixação dos LVDTs, os quais poderiam ser instalados em até quatro pontos do braço (por exemplo, um para medição de deslocamento transversal e os outros três para medição de deslocamento vertical).

Neste sistema, para a medição na ferrovia, os LVDTs são posicionados nos locais onde se pretende obter as medidas de deslocamento e, em seguida, faz-se a ligação dos sensores ao sistema de aquisição de dados que, por sua vez, pode ser conectado a qualquer computador usando a interface de rede padrão com protocolo UDP/IP. O computador usado nas medições já deverá estar configurado com os *softwares* de aquisição (no caso, foi usado o AqDados) e de análise (AqDAnalysis), respectivamente para coleta (a frequência é ajustável) e para análise dos dados. A Figura 1 mostra todo sistema instalado durante a medição de deslocamento em um segmento da EFC.

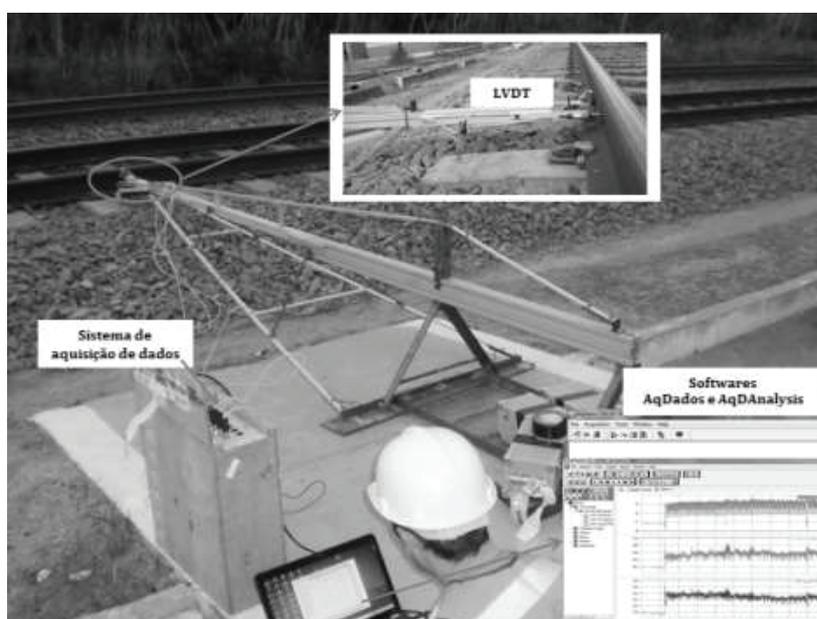


Figura 1: Sistema instalado na medição de deslocamento na EFC

As vantagens desse dispositivo de medição, é o baixo custo para montagem de todo o sistema, por ser móvel, pode ser usado em diferentes locais da via, simples montagem, fácil instalação, além de que os deslocamentos podem ser medidos mantendo a trafegabilidade normal da ferrovia.

Nesse estudo são apresentadas as primeiras medições de deslocamentos verticais realizadas entre outubro e novembro de 2014. A EFC possui bitola de 1,60 m, o trilho usado é o TR-68, o espaçamento entre dormentes é de 61 cm e o lastro composto de rocha britada. Os segmentos em que foram feitos os levantamentos localizavam-se próximo ao pátio da Vale, em Nova Vida (entre os municípios de Bom Jesus das Selvas e Buriticupu, no Maranhão). As duas linhas férreas no local apresentavam características distintas, a saber: i) linha antiga, com dormente de madeira e lastro colmatado; e ii) linha nova, com dormente de concreto e lastro novo.

Nos testes em campo para avaliar o comportamento mecânico da via frente às solicitações impostas pela carga das rodas dos veículos, foram usados vagões vazios (baixa solicitação de carga) e carregados (alta solicitação de carga), a saber: i) teste dinâmico em baixa velocidade no lastro colmatado; ii) teste dinâmico em alta velocidade no lastro colmatado; e iii) teste dinâmico no lastro novo.

4.1 Teste dinâmico em baixa velocidade no lastro colmatado

O teste dinâmico em baixa velocidade no local com lastro colmatado e dormente de madeira foi realizado com o vagão tipo *hopper* fechado (HFT), usado de forma corrente no transporte de grãos, farelo e fertilizantes. Este vagão possui peso médio vazio de 32 t, capacidade de carga de 98 t, comprimento de 14960 mm entre o centro dos truques de um vagão e de 1828 mm entre os eixos de um mesmo truque. Nesse teste todos os vagões estavam vazios (carga de 8 t/eixo), e os veículos foram reduzindo a velocidade até permanecerem parados próximos ao ponto onde estava o dispositivo de medição, com os LVDTs posicionados no patim do trilho (região mais solicitada pelo carregamento) e na borda do dormente (região menos solicitada pelo carregamento), conforme mostra a Figura 2.

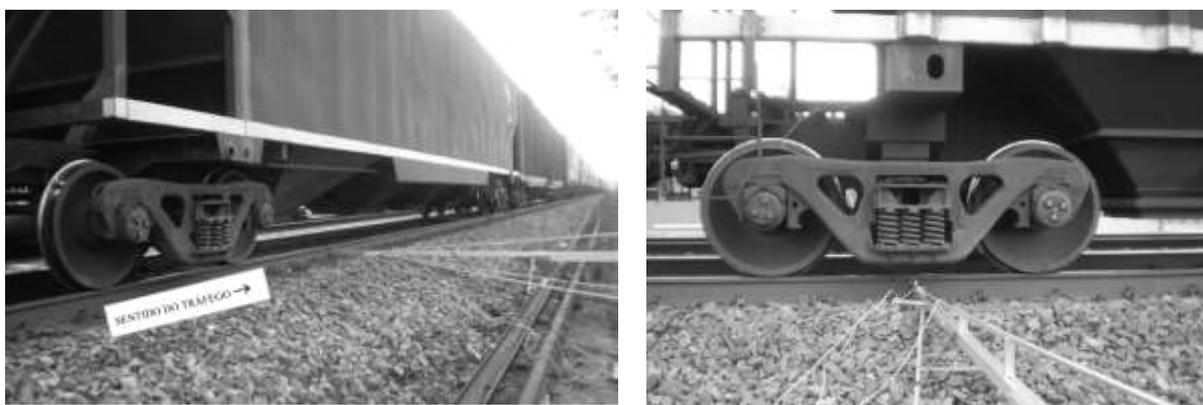


Figura 2: Passagem dos truques entre vagões no ponto de medição

4.2 Teste dinâmico em alta velocidade no lastro colmatado

O teste dinâmico no lastro colmatado foi realizado no mesmo ponto do teste estático, onde se manteve o dispositivo, registrando-se os deslocamentos ocasionados pela passagem de um trem carregado com minério de ferro. Este era composto por 334 vagões tipo GDT (distância de 5410 mm entre o centro dos truques de um vagão e de 1828 mm entre os eixos de um mesmo truque). A carga de cada vagão foi obtida por meio do histórico da composição fornecido pela Vale, em que o valor médio foi de 31,6 t/eixo. A Figura 3 mostra todo o sinal registrado pelos LVDTs no patim do trilho e na borda do dormente. Vale ressaltar que o histórico da composição, busca evidenciar uma das vantagens do dispositivo de medição de deslocamentos, que é a possibilidade de verificar e comparar o impacto do carregamento de cada tipo de veículo na via, entendendo melhor os esforços solicitantes.

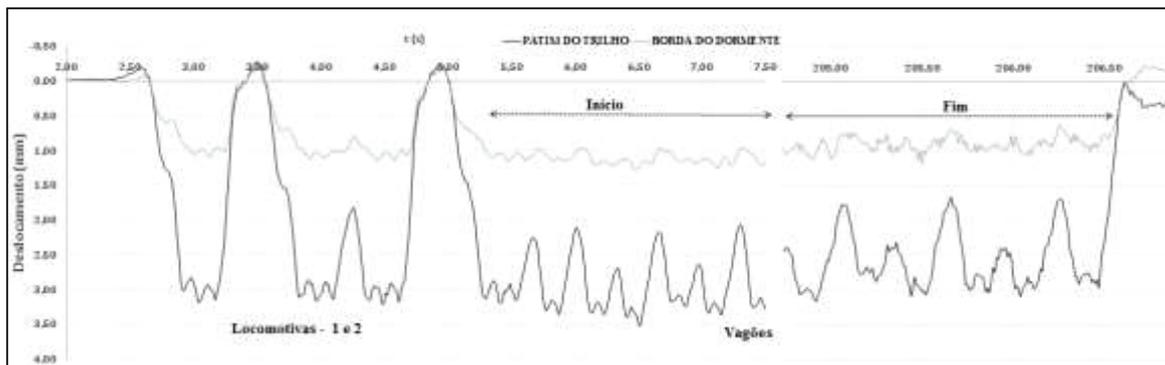


Figura 3: Sinal registrado pela passagem de um trem carregado com 334 vagões

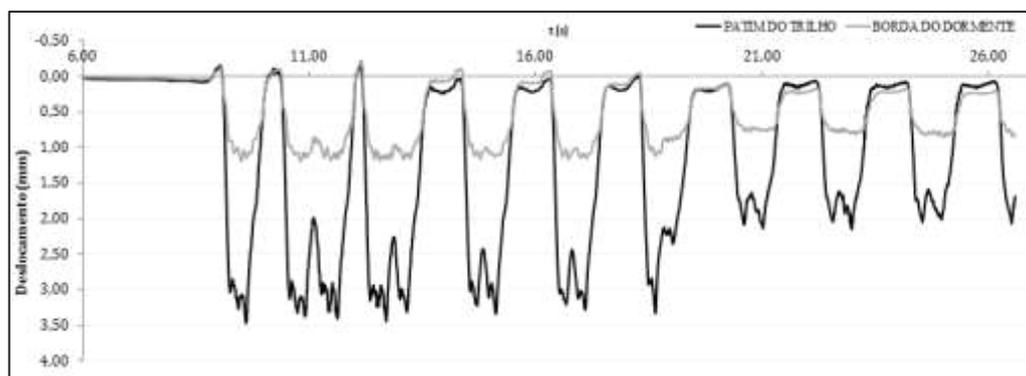
4.3 Teste dinâmico no lastro novo

No teste dinâmico em local com lastro novo e dormente de concreto, as medições de deslocamentos foram realizadas com a passagem de veículos vazios (carga de 5,75 t/eixo), compostos por vagões tipo GDU (distância de 5410 mm entre o centro dos truques de um vagão e de 1828 mm entre os eixos de um mesmo truque), que são usados no transporte de minério de ferro. Esse modelo possui peso médio vazio de 23 t e capacidade de carga de 127 t.

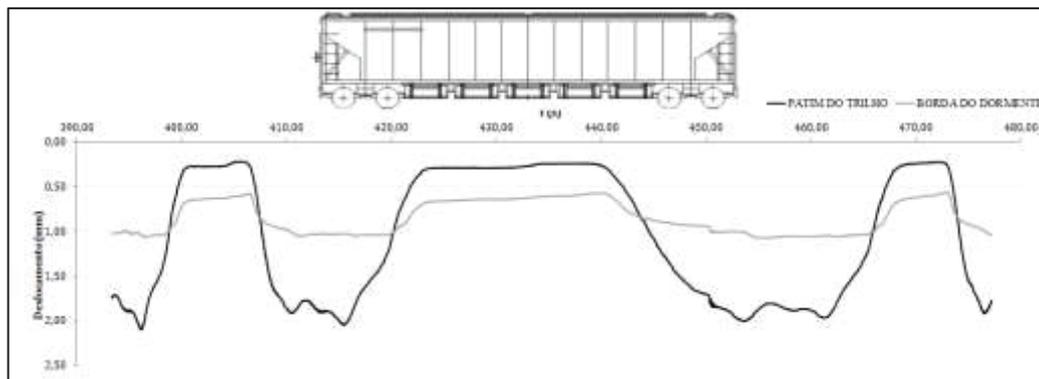
A intenção era também realizar medições com o veículo carregado com minério de ferro (para comparação com a situação anterior), entretanto, por questões logísticas não foi possível seguir o planejado. Neste caso, só foi possível fazer o levantamento com a passagem de um trem carregado com outros materiais (concentrado de cobre, ferro gusa e brita), composto por 164 vagões. A carga de cada vagão foi obtida por meio do histórico da composição fornecido pela Vale, considerando o modelo tipo GQT (distância de 6540 mm entre o centro dos truques de um vagão e de 1828 mm entre os eixos de um mesmo truque) transportando concentrado de cobre, em que o valor médio foi de 28,1 t/eixo.

4.4 Resultados

Os resultados das medições realizadas no teste com baixa velocidade no lastro colmatado usando vagões vazios HFT são mostrados nas Figuras 4 (a) registro inicial com os veículos (locomotivas e vagões) reduzindo a velocidade e (b) registro do vagão saindo da condição estática para dinâmica a uma velocidade de 2,5 km/h. Os valores médios entre as amplitudes máximas de deslocamento medidas no patim do trilho e na borda do dormente foram de 2,10 mm e 1,07 mm, respectivamente.



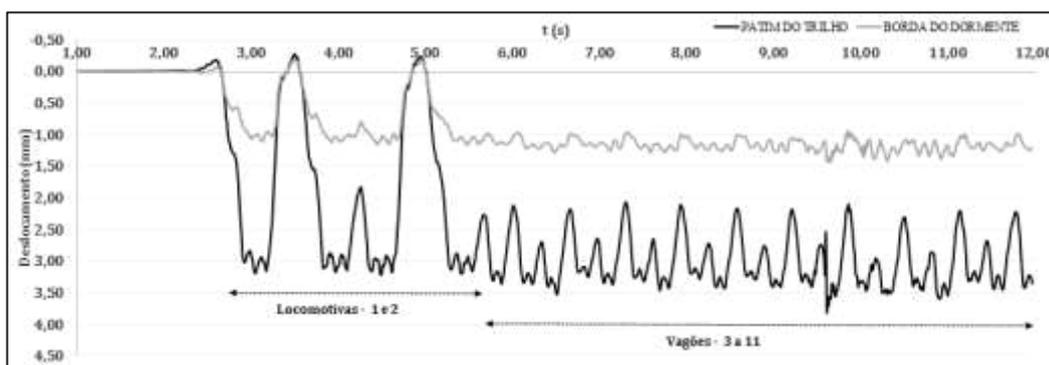
(a)



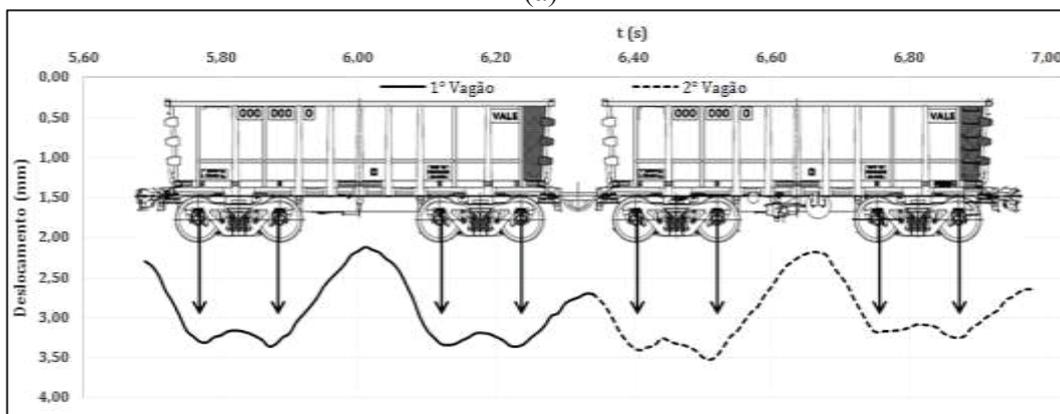
(b)

Figuras 4: Lastro colmatado e vagão vazio, (a) sob velocidade reduzida e (b) sob condição estática caminhando para dinâmica

As medições dinâmicas com vagões carregados GDT são mostradas nas Figuras 5; em (a) tem-se o registro do sinal no patim do trilho e na base do dormente das locomotivas (1 e 2) e de onze vagões e em (b) tem-se a ampliação do sinal para o primeiro e segundo vagão a uma velocidade de 55 km/h. Os valores médios entre as amplitudes máximas de deslocamentos medidas no patim do trilho e na borda do dormente foram de 3,50 mm e 1,18 mm, respectivamente. Vale ressaltar, que o pico de deslocamento observado entre os vagões 7 e 8, é causado pelo impacto da roda, indicando algum tipo de defeito.



(a)

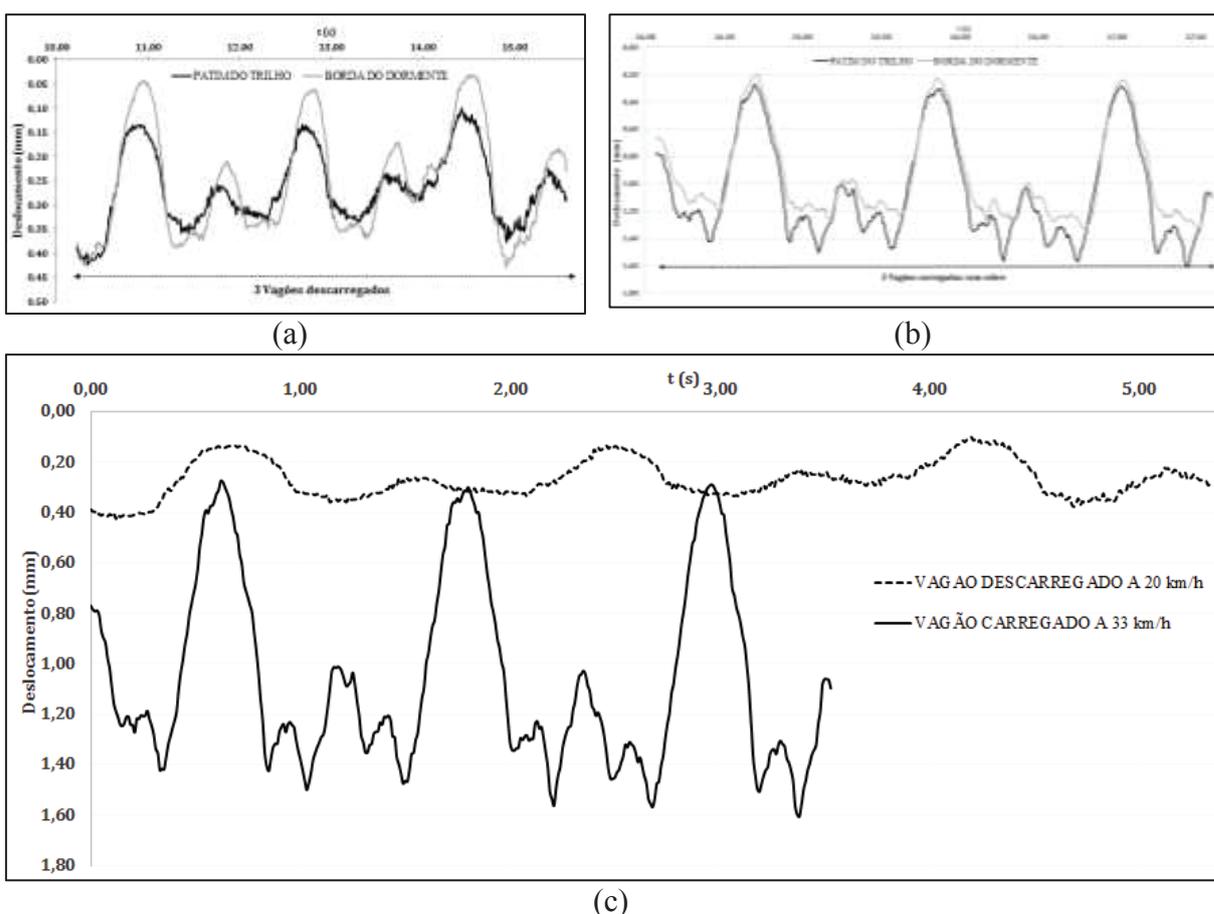


(b)

Figuras 5: Lastro colmatado e vagão carregado, (a) sob alta velocidade; (b) sinal ampliado do 1º e 2º vagões

Já se esperava que ao aumentar a velocidade dos vagões carregados, as solicitações impostas por eles à via, ocasionariam deslocamentos mais elevados, quando comparados com os vagões vazios em baixa velocidade, o que é perceptível nas figuras mostradas anteriormente. Ainda, observa-se que o aumento da velocidade faz com que os componentes (trilhos, dormentes, lastro, subleito) subjacentes ao impacto dos eixos de cada vagão se mantenham o tempo inteiro solicitados pela carga da roda, somente com um pequeno alívio de deslocamento no vão entre os eixos internos do vagão, intensificando-se entre os truques de dois vagões em sequência. Entretanto, a mesma afirmação não é válida para o carregamento em baixa velocidade, onde o alívio de deslocamento no vão entre eixos internos do vagão é maior e, além disso, a carga das rodas entre truques de dois vagões subsequentes geram praticamente as mesmas amplitudes de deslocamentos, mostrando que o impacto da carga na via permanente se deve à somatória desse conjunto.

Já na condição de lastro novo e dormente de concreto, pelo fato das amplitudes de deslocamentos terem sido muito parecidas em cada condição e modelo de vagão, serão mostrados nas Figuras 6 (a), (b) e (c), respectivamente, os resultados das medições dinâmicas realizadas com a passagem de vagões GDU vazios a 20 km/h e com vagões GQT carregados a 33 km/h, além da comparação entre deslocamentos no patim do trilho.



Figuras 6: Sinal no lastro novo e dormente de concreto, (a) com vagão vazio, (b) com vagão carregado e (c) comparação entre vagões

À medida que a via foi solicitada pela carga dos vagões vazios, os valores médios de amplitudes máximas de deslocamentos gerados no patim do trilho e na base do dormente, foram muito parecidas, 0,37 mm em ambos. Já com a carga dos vagões carregados, os valores médios entre as amplitudes máximas de deslocamentos medidas no patim do trilho e na borda do dormente foram de 1,57 mm e 1,25 mm, respectivamente. Ao comparar ambos os carregamentos solicitando a via com diferentes velocidades, fica evidente a diferença que há entre os valores médios de amplitudes de deslocamentos gerados no patim do trilho, entretanto, o mais importante a se notar aqui, é que ao aumentar a velocidade, há diminuição do repouso entre truques, aumentando o impacto gerado por cada roda na via.

As medições realizadas no local com lastro colmatado e dormente de madeira, com a passagem de vagão vazio foram 96% superiores no patim do trilho em relação aos da borda do dormente. Em seguida, já com o vagão carregado, os deslocamentos no patim do trilho passaram a ser 197% superiores aos da borda do dormente. Como já esperado, isso confirma que os deslocamentos são mais elevados ao se posicionar o LVDT próximo ao ponto de aplicação da carga (região mais solicitada), sendo mais adequado, do que medir na borda do dormente.

Com os valores das cargas que ocasionaram os deslocamentos em cada condição de lastro (colmatado e novo), e definição de uma metodologia de cálculo, pode-se determinar o módulo de via para os dois segmentos da EFC.

5. CONCLUSÃO

O dispositivo de medição de deslocamentos em via permanente desenvolvido nessa pesquisa, cujos resultados podem ser usados posteriormente na determinação do módulo de via, se mostrou prático e eficiente na obtenção de dados *in situ*, possibilitando a leitura dos deslocamentos verticais no patim do trilho e na borda do dormente com a passagem de vagões vazios e carregados, por solicitação de carga dinâmica em baixa e alta velocidade (respectivamente 2,5 km/h e 55 km/h). A forma de sinal registrado demonstra a validade dos deslocamentos, pois confere com os de estudos apresentados na literatura.

As medições de deslocamento no lastro novo e dormente de concreto com o vagão vazio mostraram que praticamente não há diferenças em se realizar a medida no patim do trilho ou na borda do dormente, ocorrendo somente um pequeno aumento com o vagão carregado, em comparação com o vazio, já que os deslocamentos no patim do trilho foram 26% superiores aos da borda do dormente. Entretanto, os valores médios de deslocamentos estão próximos do limite estabelecido por Talbot (*American Railway Engineering Association, 1918*) para uma via em condições normais de operação (que é de 1,63 mm). Vale ressaltar, que a diferença de rigidez que há entre dormentes (concreto e madeira), e a forma como cada um dissipam as tensões no lastro, implica em diferentes amplitudes de deslocamento.

Evidenciou que ao se realizar medições dinâmicas de deslocamento com uso de LVDTs, posicionados no patim do trilho e na borda do dormente, a amplitude dos valores são diferentes, aumentando significativamente quando o lastro se encontra colmatado.

O dispositivo de medição é de baixo custo, móvel (pode ser usado em diferentes locais da via), simples montagem, fácil instalação, deslocamentos medidos mantendo a trafegabilidade normal da ferrovia, e de análise rápida de dados. Mostra-se uma ferramenta útil para a

gerência de manutenção ferroviária.

Agradecimentos

À Vale S.A. pela parceria em projetos de pesquisa e à equipe de manutenção da via permanente da Estrada de Ferro Carajás.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Railway Engineering Association – AREA (1918), First Progress Report of the Special Committee on Stresses in Railroad Track. In: Bulletin of American Railway Engineering Association vol. 19, pp. 875-1058.
- Anderson, J. S.; Rose, J. G. (2008) In-Situ Test Measurement Techniques within Railway Track Structures. Joint Rail Conference, Wilmington, Delaware, USA, pp. 187-207.
- Cuconato, J. M. (1998) Estudo da Contaminação do Lastro Ferroviário e o Uso de Geossintéticos no Controle do Fenômeno. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, RJ, 110p.
- Esveld, C. (2001) Modern Railway Track, 2nd Edition. Delft University of Technology.
- Fernandes, G. (2005). Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 253p.
- Indraratna, B., Salim, W., Rujikiatkamjorn, C. In: Advanced Rail Geotechnology Ballasted Track, Taylor & Francis Group, London, UK, 2011.
- Kerr, A. D. (1983), A Method for Determining the Track Modulus Using a Locomotive or Car on Multi-Axle Trucks. In: Bulletin of American Railway Engineering Association 692 vol. 84, pp. 269-286.
- Lundgren, J. R., Martin, G. C., Hay, W. W. A Simulation Model of Ballast Support and the Modulus of Track Elasticity. Transportation Series N° 4. University of Illinois Urbana, Illinois, September, 1970, 111p.
- Merheb, A. H. M. (2014) Análise Mecânica do Lastro Ferroviário por Meio de Ensaio Triaxiais Cíclicos. Dissertação de mestrado, USP, SP, 148p.
- Priest, J. A.; Powrie, W. (2009) Determination of dynamic track modulus from measurement of track velocity during train passage. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135,(11), 1732-1740.
- Selig, E. T., Waters, J. M., (1994) Track geotechnology and substructures Management. Thomas Telford Services Ltd., Londres, 446p.
- Silva, L. F. M. (2002). Fundamentos Teórico-Experimentais da Mecânica dos Pavimentos Ferroviários e Esboço de um Sistema de Gerência Aplicado à Manutenção da Via Permanente. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, RJ, 333p.
- 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, COPPE/UFRJ, RJ, 240p.
- Zakeri, A. J.; Abbasi, R. (2012) Field Investigation on Variation of Rail Modulus in Ballasted Railway Tracks. Latin American Journal of Solids and Structures vol. 9.
- Zarembski, A. M. e Choros, J. (1979), “On the Measurement and Calculation of Vertical Track Modulus” In: Proceedings AREA, Bulletin 675, vol.81, pp. 157-173.

Robson Costa (costa.robsonc@gmail.com)

Edson Moura (edmoura@usp.br)

Liedi Bernucci (liedi@usp.br)

Rosângela Motta (rosangela.motta@usp.br)

Arthur Teixeira (arthur.mattar.teixeira@usp.br)

Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade São Paulo, Av Prof Almeida Prado, trav 2, n° 83 – São Paulo – SP – 05508-070

Fernando Sgavioli (fernando.sgavioli@vale.com)

Vale S.A. Projeto TIPLAM, SP-55-Rodovia Cândido Domenico Rangoni – km 65,8