

DETERMINAÇÃO DO FATOR DE DEFLEXÃO DA VIA PERMANENTE POR MEIO DE MEDIÇÕES “IN SITU” COM O DMD

Robson Costa
José João Pires
Edson Moura
Guilherme A. Pinto
Rosângela Motta
Liedi Bernucci

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

Luciano de Oliveira
Vale S.A.

RESUMO

O impacto gerado nos componentes da via permanente pelo carregamento dinâmico tem sido mensurado com base em parâmetros que não levam em consideração defeitos existentes na superestrutura. Em ferrovias de transporte de cargas, o aumento das tensões atuantes e número elevado de solicitações propiciam o desgaste excessivo dos componentes tornando importante a obtenção de dados baseados nos efeitos que acontecem na via permanente. É neste contexto que se insere o presente trabalho, cujo objetivo foi determinar o fator de deflexão (FD) da via por meio de medições “in situ”. Para tanto, mantendo a trafegabilidade, utilizou-se um dispositivo para medição de deslocamentos (DMD), adotando-se três segmentos (com e sem defeito superficial no trilho) em uma ferrovia de transporte de carga. Em geral, os valores de FD a partir das medições de deslocamentos e análise das amplitudes das bacias de influência resultaram em aumento deste em função do aumento de velocidade dos veículos rodantes e das descontinuidades e defeitos superficiais do trilho.

ABSTRACT

The impact generated in the components of the railway by the dynamic loading has been measured based on parameters that do not take into account defects existing in the superstructure. In freight transport railways, the increase of the stress acting and the high number of application lead to excessive wear of the components, making it important to obtain data based on effects that occur on the railway. The present work is inserted in this context and its objective was to determine the deflection factor (FD) of the track by means of measurements "in situ". In order to maintain the trafficability, a device for displacement measurement (DMD) was used, adopting three segments (with and without surface defect in the rail) on a freight railroad. In general, the values of FD from the displacement measurements and analysis of the influence basin amplitudes resulted in an increase of this factor in function of the increase of the vehicles' speed and the discontinuities and surface defects of the rail.

1. INTRODUÇÃO

A principal função dos trilhos é guiar as rodas na direção do eixo da via, devendo possuir rigidez suficiente para servir como vigas que transferem as cargas concentradas das rodas sobre os dormentes e, estes para os materiais subjacentes, minimizando a deflexão entre os mesmos (Hay, 1982). Entretanto, em função da combinação entre o impacto da carga de roda dos veículos e a redução de rigidez nas juntas do trilho, ocorrem maiores tensões sobre o lastro e o subleito, gerando deformações plásticas que acarretam no desnivelamento da via e aceleram o desgaste de todos os componentes (Selig e Waters, 1994). As interações que há entres eles geram uma combinação complexa entre carga estática e forças dinâmicas “em movimento” (Indraratna, et. al. 2013).

De acordo com Profillidis (2006), a análise de comportamento mecânico no sistema do trilho, até agora, foi baseada na suposição de que ambos os trilhos e rodas são lisos e livres de defeitos. Irregularidades na superfície do trilho, sob ação dinâmica dos veículos, geram alternância no carregamento e descarregamento exercido pelas rodas na via (Lichtberger,

2005). Caso essas irregularidades sejam caracterizadas como defeitos, elas estimulam o sistema, causando cargas dinâmicas adicionais que podem atingir valores de até 50% da carga da roda (Profillidis, 2006). Ainda de acordo com o mesmo, as cargas dinâmicas podem ser divididas em três categorias, de acordo com a respectiva frequência de vibração: entre 0,5 Hz < f < 15,0 Hz - massas suspensas (material circulante); 20 Hz < f < 100 Hz – massas não suspensas (rodas, trilhos e dormentes), que dependem principalmente da qualidade e rigidez da via; e 100 Hz < f < 2000 Hz – corrugações com comprimento de ondas curtas e longas na superfície do trilho. Nessa última, Esveld (2001) inclui também, soldas e rodas planas.

O impacto dinâmico associado ao defeito aumenta significativamente as tensões transmitidas das rodas para o trilho e, caso os níveis de tensões sejam elevados no interior desse componente, ele as repassa para os demais materiais. Por outro lado, se estiver acima do seu limite de resistência, há uma tendência de ruptura. Também, um número elevado de aplicação de tensões abaixo do limite de resistência diminui o tempo de vida útil para o qual foi projetado. A forma de degradação é análoga para os componentes subjacentes (dormente, lastro, sublastro e subleito) e, um dos meios que podem ser usados na avaliação do impacto na elasticidade e rigidez desses materiais, dentre os diferentes métodos já propostos, é o da bacia de deflexão, o qual requer a medição de deslocamentos em campo.

É nesse contexto que se insere o presente estudo, cujo objetivo foi determinar um fator de deflexão (FD) da via permanente por meio de medições “in situ”. Para tanto, visando manter a trafegabilidade da via, utilizou-se um dispositivo para medição de deslocamentos (DMD), realizando um estudo de caso em três segmentos (considerando precipitação elevada e lastro colmatado), com e sem defeito superficial no trilho, em uma das principais ferrovias de carga do Brasil.

2. FATORES PARA AVALIAÇÃO DE IMPACTO NA VIA

Dentre os diferentes estudos já realizados para determinação de um modelo matemático que represente os impactos dinâmicos na via por meio de um fator, no que se refere à obtenção de carga dinâmica para projeto ou avaliação da via, Doyle (1980), Dyk (2013) e Pires (2016), citaram alguns fatores dinâmicos que levam em consideração aspectos do veículo (como velocidade, diâmetro da roda, carga de roda estática, massa não suspensa, centro de gravidade e condição de manutenção da locomotiva) e/ou da via permanente (como módulo de via, rigidez na junção do trilho, ângulo de mergulho da junção, deficiência de superelevação, raio da curva e condição de manutenção). Porém, a maioria dos modelos existentes engloba a velocidade e o diâmetro da roda como fatores para calcular o fator de impacto dinâmico.

Em termos de deslocamentos, não há um modelo ou fator para uso na avaliação da via, somente para limites de deflexão, como os propostos por Lundgren, Martin e Hay (1970). Baseado nos dados desses autores, Sussmann et al (2001), relatam que um dos requisitos para uma via estável é a capacidade da mesma suportar a carga aplicada com menos de 6,4 mm de deflexão total. Afirmam que a deflexão precisa ser considerada como parâmetro fundamental na avaliação da via. Enquanto que Li et al. (2016), avaliou a resposta das bacias de deflexão do subleito geradas sob carregamento dinâmico por espaçamentos entre eixos de dois veículos (curto e longo) na determinação do número de aplicações de carga para as camadas de lastro e subleito. Em relação a estas, citam que é importante caracterizar a forma e a duração do pulso de carga aplicada. Além de que, por meio de medições em campo, é possível obter o

comprimento da bacia de influência da carga de roda do veículo para as profundidades de lastro e subleito.

Um método “*in situ*” de medição de deslocamentos com o DMD foi desenvolvido por Costa (2016) e permite, após tratamento dos dados registrados e definição do modelo de cálculo, a obtenção do módulo de via. Após avaliação de diferentes condições de lastro pelo tráfego solicitante, definiu esse parâmetro como um indicador a ser usado na avaliação de elasticidade e rigidez da via. Por fim, uma forma de se avaliar a qualidade da via permanente, que pode ser relacionada à verificação de impacto na via, é sugerida por Esveld (2001), que propõe o parâmetro de comprimento característico da via, definindo os limites de 1,3 m (ruim) e 0,70 m (boa) na caracterização das condições da fundação.

3. METODOLOGIA

Para se atingir o objetivo deste estudo, foram realizadas medições de deslocamento “*in situ*”, caracterização da plataforma e amostragem de lastro. Adotando-se três segmentos da EFC (região Parauapebas – PA), foram considerados precipitação elevada, lastro colmatado, trilho contínuo (sem solda) e trilho com junção de solda sem e com defeito superficial. Tais trechos foram selecionados com base na proximidade da via com o local de extração de minério na Serra dos Carajás, cuja colmatagem do lastro é ocasionada por queda de minério dos vagões.

Avaliando diferentes locais da EFC (entre os kms 866 e 878), foram definidos os segmentos: i) km 866+600 m, trilho sem defeito superficial na junção da solda; ii) km 867 + 423 m, trilho contínuo sem defeito superficial; e iii) km 867 + 430 m, trilho com defeito superficial na junção da solda e sem fixação. A intenção de se estudar a influência dos defeitos do trilho em suas deflexões, a partir da solicitação deste componente por cargas dos veículos, justifica a escolha de dois trechos em região de solda e outro em trilho contínuo. Também, nas proximidades desses segmentos, realizou-se uma caracterização “*in situ*” com o *Dynamic Cone Penetrometer – DCP* (ASTM D6951/6951M-09), de modo a verificar a capacidade de suporte da plataforma, além da amostragem de lastro da via permanente para verificar a porcentagem de colmatagem. Na realização das medições “*in situ*” foi necessário adequar o dispositivo para medição de deslocamentos (DMD) desenvolvido por Costa (2016). No intuito de avaliar diferentes pontos medidos no patim do trilho, fixou-se uma haste prolongadora em cada lateral da extremidade do dispositivo, permitindo adicionar quando necessário, mais sensores (dois ou três). Com isso, em um dos segmentos o DMD foi posicionado na via (Figura 1), fixando-se três *Linear Variable Displacement Transducers - LVDTs* (dois deles dispostos entre eixos de dois dormentes consecutivos e um no ponto de solda do trilho).

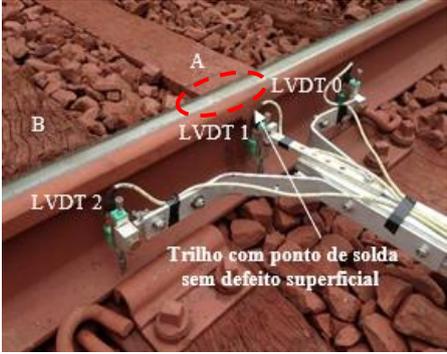
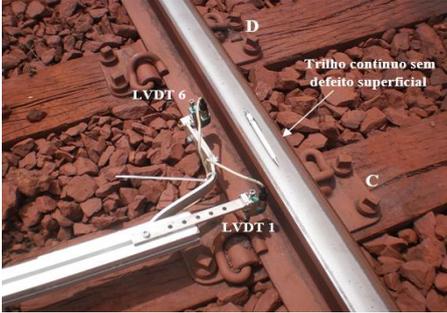
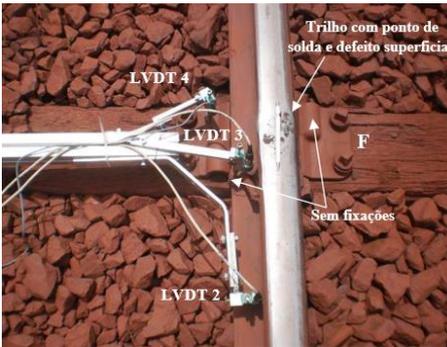
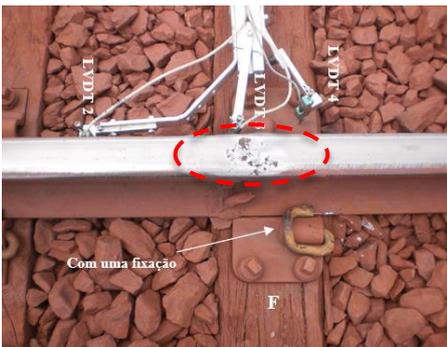


Figura 1: Aspectos e detalhes do DMD

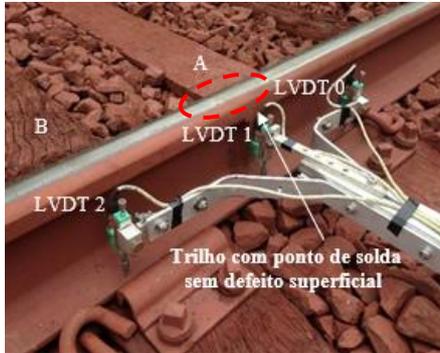
As medições foram realizadas na terceira semana de março (2017), período em que as precipitações são elevadas, e segundo dados fornecidos pelo Instituto Meteorológico

(INMET) da estação meteorológica A230 (Serra dos Carajás), o índice médio foi de 50 mm. A Tabela 1 apresenta informações sobre a localização da via, condição do trilho, identificação e posição dos LVDTs. Cabe ressaltar que a seção com trilho contínuo (sem defeitos superficiais) situava-se próximo do trilho com ponto de solda e defeito superficial, pois buscou-se obter dados com a passagem do mesmo veículo para posterior comparação.

Tabela 1: Informações sobre a localização da via, identificação e posição dos LVDTs

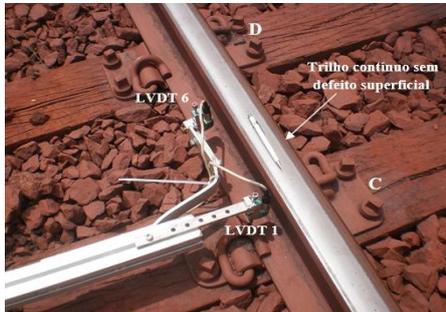
Localização	Identificação dos LVDTs	Posição dos LVDTs
Km 866 + 600 m Trilho com ponto de solda (sem defeito superficial)		LVDT 0 – no patim do trilho centralizado no eixo do dormente A;
		LVDT 1 – no patim do trilho centralizado no ponto de solda entre os dormentes A e B;
Km 867 + 423 m Trilho contínuo (sem defeito superficial)		LVDT 1 – no patim do trilho centralizado no eixo do dormente C;
		LVDT 6 - no patim do trilho centralizado entre os dormentes C e D*;
Km 867 + 430 m Trilho com ponto de solda (com defeito superficial) Sem fixações		LVDT 2 – no patim do trilho centralizado a E 300 mm do dormente F;
		LVDT 3 – no patim do trilho centralizado no ponto de solda;
Km 867 + 430 m Trilho com ponto de solda (com defeito superficial) Com uma fixação		LVDT 4 – na borda da placa de apoio do dormente F.
		Idem ao anterior

Km 866 + 600 m
Trilho com ponto de solda
(sem defeito superficial)



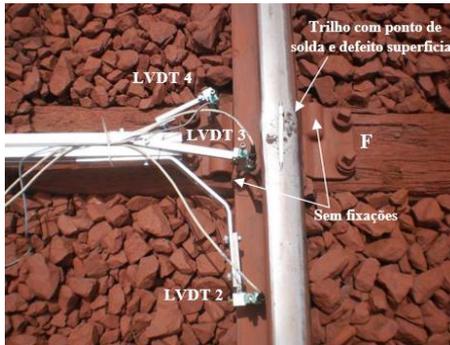
LVDT 0 – no patim do trilho centralizado no eixo do dormente A;
LVDT 1 – no patim do trilho centralizado no ponto de solda entre os dormentes A e B;
LVDT 2 – no patim do trilho centralizado no eixo do dormente B;

Km 867 + 423 m
Trilho contínuo
(sem defeito superficial)



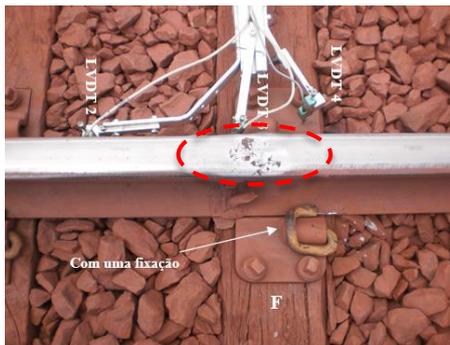
LVDT 1 – no patim do trilho centralizado no eixo do dormente C;
LVDT 6 - no patim do trilho centralizado entre os dormentes C e D*;
*Uma vez que no caso do trilho com ponto de solda (acima), os valores de deflexões foram muito próximos, no caso do trilho contínuo adotou-se apenas dois LVDTs

Km 867 + 430 m
Trilho com ponto de solda
(com defeito superficial)
Sem fixações



LVDT 2 – no patim do trilho centralizado a E 300 mm do dormente F;
LVDT 3 – no patim do trilho centralizado no ponto de solda;
LVDT 4 – na borda da placa de apoio do dormente F.

Km 867 + 430 m
Trilho com ponto de solda
(com defeito superficial)
Com uma fixação



Idem ao anterior

Pelo fato das medições terem sido realizadas em dias diferentes, buscou-se configurações de material rodante que solicitou a via permanente com cargas muito próximas por eixo dos veículos (obtidas a partir da pesagem realizada durante o carregamento). A Tabela 2 apresenta para cada segmento o modelo de trem e veículo [locomotiva (L) – seis eixos; e vagões (V) – quatro eixos], com as cargas (usadas na análise desse estudo) médias referentes aos mesmos. Vale ressaltar que as distâncias entre os eixos dos veículos podem ser verificadas na figura 8.

Observe-se que somente as cargas das locomotivas M008 e M006 foram iguais, enquanto que o veículo M010 apresentou maior valor e o M019 um valor um pouco menor que este último. No que se refere aos vagões carregados há uma pequena diferença de carga entre todos eles; no entanto, adotando-se como referência os vagões do trem M008, a carga dos M010 deveria ser inferior em 0,63 %, enquanto que a dos M006 precisariam aumentar em 3,27 %. Também, ressalta-se que foi incluso um veículo com vagões vazios para comparação de dados.

Tabela 2: Informações do segmento, modelo do trem, veículo e carga estática

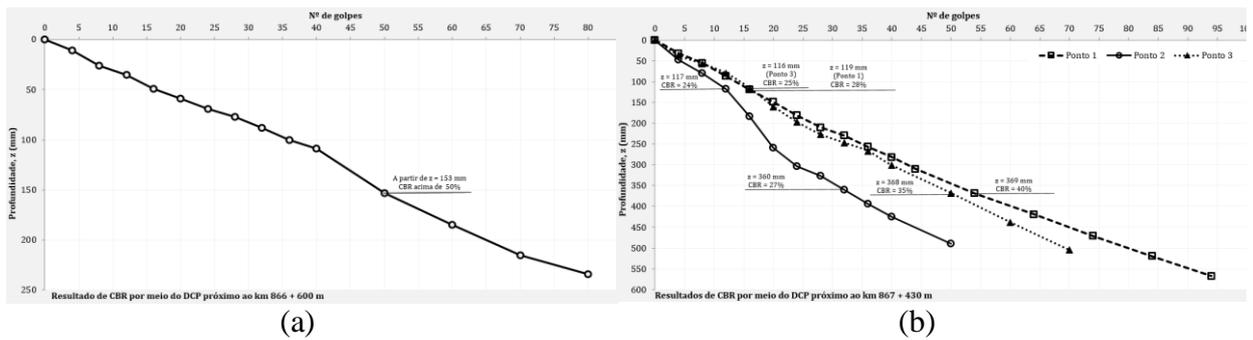
Segmento	Modelo do trem	Veículo	Carga estática por veículo (ton)
Km 866 + 600 m	M008	L	182,0
Trilho com ponto de solda (sem defeito superficial)	(1L+110V+1L+110V+1L+110V)	V (carregado)	126,4
Km 867 + 423 m	M006	L	182,0
Trilho contínuo (sem defeito superficial)	(2L+110V+1L+110V+1L+110V)	V (carregado)	122,4
Km 867 + 430 m	M019	L	196,4
Trilho com ponto de solda (com defeito superficial) Sem fixações	(1L+110V+1L+110V+1L+110V)	V (vazio)	21,2
Km 867 + 423 m		L	202,2
Trilho contínuo (sem defeito superficial)			
Km 867 + 430 m	M010		
Trilho com ponto de solda (com defeito superficial) com uma fixação	(1L+110V+1L+109V+1L+109V)	V (carregado)	127,3

4. RESULTADOS

Os resultados do estudo serão apresentados da seguinte forma: i) caracterização “in situ” com o DCP; ii) Ensaio de granulometria no lastro para determinar a colmatação; iii) medições de deslocamento “in situ”; iv) determinação do fator de deflexão (FD) da via.

4.1 Caracterização “in situ” com o DCP

Os resultados da caracterização “in situ” da plataforma em um substrato paralelo à via permanente com uso do DCP nos segmentos desse estudo são mostrados nas Figuras 2 (a) e (b). Nestas, são mostrados valores de CBR obtidos a partir do DCP próximos ao km 866 + 600 m (a) e km 867 + 430 m (b), por meio da equação recomendada (*US Army Corps of Engineers*) pela norma da ASTM D6951, já mencionada. A partir das Figuras 2, observa-se que próximo a esse km, foram obtidos resultados em três pontos e, a partir da profundidade de 360 mm, o valor de CBR entre eles foi em média 34%. Porém, próximo ao km 866 +600 m, em virtude da rigidez (provavelmente por existência de grãos de cascalho no interior da camada), só foi possível realizar uma medição, que apresentou a partir de 153 mm, valores de CBR acima de 50%.



Figuras 2: Valores de CBR obtidos por meio do DCP próximo ao (a) km 866 + 600 m e (b) km 867 + 430 m

4.2 Ensaio de granulometria no lastro

Para determinar a porcentagem de colmatção do lastro amostrado entre os kms 866 + 600 m e 867 + 430 m, realizou-se em laboratório o ensaio para determinação da distribuição granulométrica de acordo com o método da ASTM C136 – 06. A Figura 3 mostra o resultado da análise granulométrica, juntamente com os limites da especificação para fornecimento de lastro da ferrovia em questão (recomendam a gradação N° 24 da AREMA), destacando as porcentagens passantes nas principais peneiras, cuja presença é inadequada no lastro segundo Esveld (2001). Observe-se que a presença de partículas menores que 22,0 mm e 4,75 mm no lastro desguarnecido, foi respectivamente de 43% e 30%. Quanto aos coeficientes de gradação, a inclinação da curva granulométrica, representado pelo coeficiente de não uniformidade (CNU), foi de 167. Indraratna et al. (2011), recomenda que esse valor esteja na ordem de 2,3 a 2,6. Os resultados a partir da granulometria e do CNU indicam um material com elevado nível de colmatção.

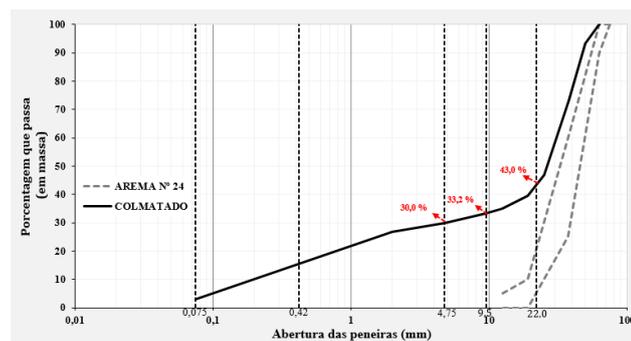


Figura 3: Resultado da análise granulométrica

4.3 Medições de deslocamento “in situ”

Os resultados das medições “in situ” são mostrados de acordo com a seqüência dos veículos apresentados na Tabela 2. Nesse contexto, os resultados das medições de deslocamento vertical no km 866 + 600 m, local de trilho com ponto de solda sem defeito superficial (posicionados no patim do trilho os LVDTs 0, 1 e 2), considerando a passagem de um trem modelo M008 (locomotivas de 30,3 ton/eixo) com vagões carregados (em média com 31,6 ton/eixo), cuja velocidade média foi de 32 km/h. A Figura 4 mostra o registro de parte do sinal no intervalo de 6 s (entre os tempos 257,5 s e 263,5 s), após a passagem de 224 veículos no sentido do Porto (MA). Observe-se que há uma defasagem entre os sinais em função do espaçamento (300 mm) entre os três LVDTs (0, 1 e 2), em geral, as amplitudes de deslocamentos mantiveram-se muito próximos. No entanto, cabe ressaltar que o valor medido no LVDT 1 (posicionado no ponto de solda), ficou um pouco acima dos demais, com

amplitude média máxima de 5,43 mm (carga por eixo dos vagões de 31,6 toneladas). Nota-se também, que entre os truques da locomotiva, em virtude da maior distância entre os eixos internos (10406, 4mm), a bacia do sinal é maior (tende a se aproximar de zero), ficando menor entre os truques de um mesmo vagão (cuja distância entre eixos internos é de 3582 mm) e muito menor entre truques de vagões adjacentes (em que a distância entre eixos é de 2562 mm).

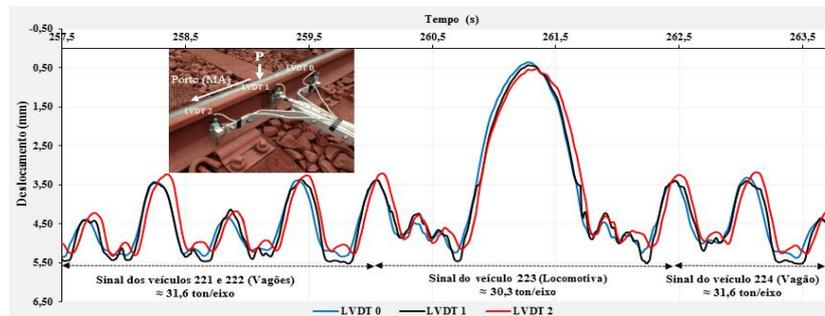


Figura 4: Registro de parte do sinal no intervalo de 6 s (entre os tempos 257,5 s e 263,5 s), após a passagem de 224 veículos no sentido do Porto (MA)

Já os resultados das medições entre os kms 867 + 423 e 867 + 430 m, foram obtidos simultaneamente. O primeiro veículo que solicitou a via permanente foi o modelo M006, composto por quatro locomotivas (L) de 30,3 ton/eixo, e vagões carregados com minério de ferro, sendo os 110 primeiros e os 220 últimos, em média respectivamente, com 30,6 ton/eixo e 31,5 ton/eixo. Ambos os veículos trafegaram a uma velocidade média de 54 km/h. A Figura 5 mostra o registro completo do sinal com a passagem da carga solicitante (do LVDT 4 para o 6 no sentido do porto) de todos os veículos, como também, uma ampliação dos sinais das locomotivas e vagões.

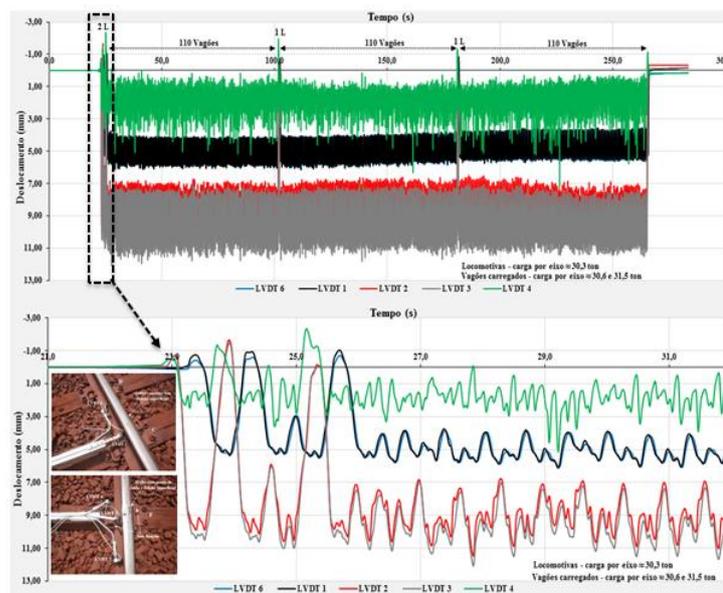


Figura 5: Registro completo e ampliação do sinal com a passagem de vagões carregados

É possível verificar que há uma diferença significativa nas amplitudes máximas de deslocamentos entre os pontos sem e com defeito superficial no trilho (considerando o ponto de solda). Além de que a falta do sistema de fixação, fez com que a placa de apoio se movimentasse de tal forma que o registro de sinal das amplitudes de deslocamento (LVDT 4)

não representasse a bacia de deflexão gerada por cada eixo do material rodante, além de ter apresentado grande oscilação. No que se refere às amplitudes máximas de deslocamentos ocasionadas no ponto sem defeito no trilho com os primeiros vagões carregados (30,6 t/eixo), ficaram muito próximos, em média 5,83 mm (LVDT 6) e 5,84 mm (LVDT 1). Ainda, no ponto com defeito superficial no trilho em um ponto de solda, os deslocamentos médios foram de 10,75 (LVDT 2) e 11,27 mm (LVDT 3). O segundo veículo a trafegar no segmento já mencionado anteriormente, foi o modelo M019 composto por 3 locomotivas de 32,7 ton/eixo e vagões vazios com cargas dos primeiros 110 vagões e os 220 últimos, respectivamente de 5,3 ton/eixo e 5,5 ton/eixo. A velocidade média foi de 67 km/h. O registro do sinal completo e uma ampliação é mostrado na Figura 6.

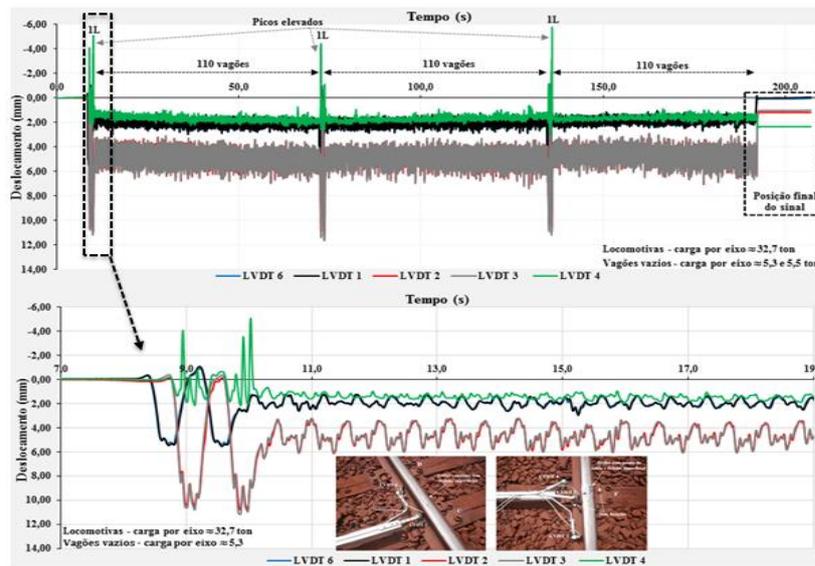


Figura 6: Registro completo e ampliação do sinal com a passagem de vagões vazios

A partir dos dados, observe-se que houve uma movimentação significativa na placa de apoio (LVDT 4), quando solicitado pela carga de roda das locomotivas, apresentando picos elevados de sinais negativos. Ao final, com a saída de todo o carregamento da via, somente os sinais dos LVDTs no trilho sem defeito que retornaram à posição final zero. Em geral, os LVDTs 1 e 6 posicionados no local sem defeito no trilho apresentaram o mesmo formato de bacia e amplitude média máxima de 2,37 mm. Analisando-se o ponto com defeito no trilho sem fixações, houve uma pequena diferença na bacia e nos valores máximos de deslocamentos, em média 5,88 (LVDT 2) e 5,91 (LVDT 3).

Ainda no mesmo segmento, com uma fixação interna ao trilho, registrou-se sinais de um terceiro veículo (modelo M010, composto por 3 locomotivas de 33,7 ton/eixo e vagões carregados com minério, sendo os primeiros 219 e os 109 últimos, respectivamente, com cargas de 31,8 ton/eixo e 31,2 ton/eixo), a uma velocidade média de 52 km/h (Figura 7). A partir da figura, nota-se que a colocação de um fixador entre o trilho e a placa de apoio, diminuiu a movimentação deste, fazendo com que a forma do sinal do LVDT 4 (sobre a placa de apoio) se aproximasse dos demais (LVDT 2 e 3) posicionados nas proximidades do local com defeito superficial. Já os demais sinais mantiveram-se com o mesmo formato de bacia das medições anteriores. Entretanto, no que diz respeito à amplitude máxima de deslocamentos, na seção de trilho contínuo sem defeito superficial, os valores médios foram de 4,63 (LVDT 6) e 5,13 mm (LVDT 1). Enquanto que na seção com ponto de solda, defeito

superficial no trilho e uma fixação, as amplitudes médias dos LVDTs 2, 3 e 4, foram respectivamente, 9,63, 10,42 e 10,10 mm.

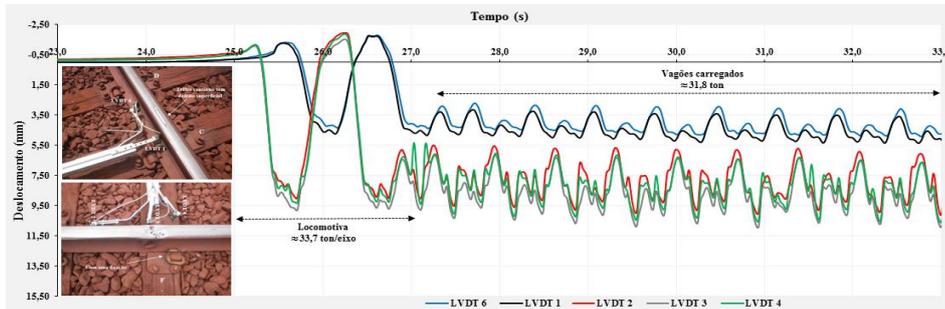


Figura 7: Registro inicial do sinal no intervalo de 10 s (entre os tempos 23,0 s e 33,0 s)

Por fim, apresenta-se nas Tabelas 3 (trilho com ponto de solda sem defeito superficial) e 4 (trilho contínuo sem defeito superficial com ponto de solda e defeito superficial), um resumo de resultados das amplitudes médias máximas de deslocamentos em função da velocidade e carga dos veículos (locomotiva e vagões). Torna-se importante mencionar que em termos de impacto observado na via para a mesma velocidade (52 Km/h) nas medições entre as seções com trilho sem e com defeito superficial, respectivamente LVDT 1 (contínuo) e LVDT 3 (com ponto de solda) refere-se à contribuição do defeito superficial no aumento da amplitude do pulso de deslocamento em relação ao trilho sem o mesmo.

Tabela 3: Resumo de resultados das medições de deslocamentos no km 866 + 600 m

Local	Modelo	Velocidade (km/h)	Veículo	Carga estática por eixo (ton)	Deslocamentos medidos no trilho sem defeito superficial (mm)		
					LVDT 0	LVDT 1	LVDT 2
Km 866+600 m	M008	32	L	30,3	5,00	5,09	4,99
			V (carregado)	31,6	5,23	5,43	5,18

Tabela 4: Resumo de resultados das medições de deslocamento nos kms 867+423 m e 867+430 m

Local	Modelo	Velocidade (km/h)	Veículo	Carga estática por Eixo (ton)	Deslocamentos medidos no trilho (mm)				
					Sem defeito superficial		Com defeito superficial		
					LVDT 6	LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3	LVDT 4
Km 867+423 m e Km 867+430 m	M006	54	L	30,3	5,28	5,36	10,17	10,66	**
			V (carregado)	30,6	5,83	5,84	10,75	11,27	**
	M019	67	L	32,7	5,32	5,43	10,62	10,87	**
			V (vazio)	5,3	2,37	2,36	5,88	5,91	**
	M010	52	L	33,7	4,31	4,69	8,86	9,68	9,18***
			V (carregado)	31,8	4,63	5,13	9,63	10,42	10,10***

**LVDT posicionado na placa de apoio. Houve oscilação significativa do sinal, em função de falhas no sistema de fixação. Dessa forma não foi indicado o valor máximo de deslocamento.

***LVDT posicionado na placa de apoio. Com um fixador interno ao trilho acoplado a placa de apoio.

Tal fato, fez com que o impacto gerado pelo carregamento dinâmico nos componentes subjacentes aumentasse significativamente, conforme é visto por meio do comprimento da

bacia de influência das cargas de rodas das locomotivas (sem e com defeito) e dos vagões carregados (sem defeito, pois no ponto com o mesmo, manteve a mesma tendência da locomotiva), respectivamente nas Figuras 8 (a) e (b). No que se refere ao formato dos sinais registrados nessas medições, mostraram que na via avaliada o tipo de pulso é *haversine*. O mesmo está de acordo com o relatado por Li et al. (2016), e pode ser usado como modelo de aplicação em ensaios laboratoriais.

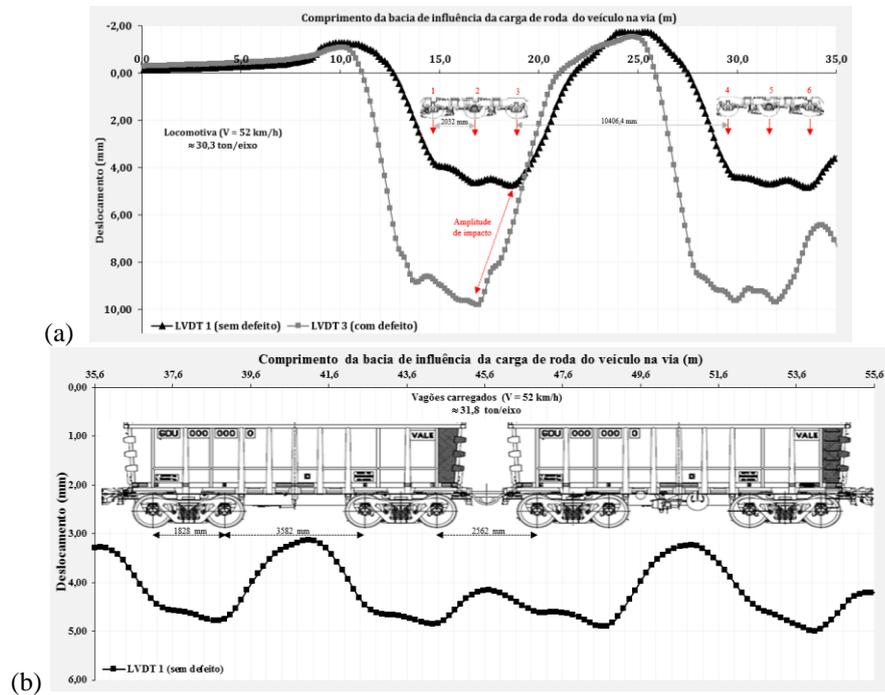


Figura 8: comprimento da bacia de influência das cargas de rodas (a) das locomotivas (sem e com defeito) e (b) dos vagões carregados (sem defeito)

4.4 Determinação do fator de deflexão (FD)

A fim de se avaliar a diferença entre os deslocamentos medidos, utilizou-se o Fator de Deflexão (FD) da via permanente, gerado com a passagem de carga dos veículos (locomotivas e vagões). A avaliação foi realizada com base nas medições “in situ” utilizando-se o DMD entre os kms 866 + 600 m e 867 + 430 m. Para tanto, adotou-se como sendo representativo desses segmentos os dados da seção de trilho contínuo, sem defeito superficial e com a passagem dos veículos (locomotivas e vagões carregados) na velocidade de 52 km/h. O parâmetro sugerido (FD), apresentado na equação 1, é definido pela divisão dos deslocamentos a serem avaliados em cada cenário (*Desloc.m*) pelo valor de deslocamento adotado como referência do conjunto de medições (*Desloc.ref*), e é utilizado como forma de normalizar a influência dos impactos na via, adquirido a partir das medições de deflexões dos componentes da mesma.

$$FD = \frac{Desloc.m}{Desloc.ref} = x \quad (1)$$

em que: *FD*= Fator de deflexão; *Desloc.m* = deslocamento medido; e *Desloc.ref*= deslocamento de referência.

Dessa forma, a partir de todos os dados das medições apresentados no item 4.3, selecionou-se somente os valores de deslocamentos dos LVDTs posicionados no patim do trilho em pontos semelhantes. As tabelas 5 e 6 mostram os valores de FD calculados a partir dos deslocamentos ocasionados, respectivamente, pelo carregamento das locomotivas e vagões.

Comparando-se os valores de FD das locomotivas no trilho contínuo sem defeito superficial, nota-se que ao aumentar a velocidade, ocorre um pequeno aumento em relação ao valor de referência (adotando-se $Desloc.ref = 1$). No entanto, comparando-se esse valor com o do ponto de solda sem defeito superficial, em menor velocidade, houve um pequeno aumento. Essa mesma tendência não se manteve para o ponto de solda com defeito superficial, em que o aumento dos valores ficou acima de 100%. Também, pode-se afirmar que os valores de FD dos vagões para as diferentes seções de trilho avaliadas, considerando o mesmo carregamento, foram semelhantes aos da locomotiva. Entretanto, para um menor carregamento, (5,3 ton/eixo) na velocidade de 67 km/h, observou-se um menor valor de FD (0,46) na seção de trilho contínuo sem defeito superficial, enquanto que no ponto de solda com defeito superficial houve um pequeno aumento do FD em relação ao valor referência.

Tabela 5: Resultados de FD das locomotivas

Velocidade (km/h)	Carga estática por Eixo (ton)	Impacto das locomotivas no Trilho					
		Ponto de solda sem defeito superficial (LVDT 1)		Ponto de solda com defeito superficial (LVDT 3)		Contínuo sem defeito superficial (LVDT 1)	
		Desloc. (mm)	FD	Desloc. (mm)	FD	Desloc. (mm)	FD
32	30,3	5,09	1,09	-	-	-	-
52	33,7	-	-	9,68	2,06	4,69 (Desloc.ref)	1,00
54	30,3	-	-	10,66	2,27	5,36	1,14
67	32,7	-	-	10,87	2,32	5,43	1,16

Tabela 6: Resultados de FD dos vagões

Velocidade (km/h)	Carga estática por Eixo (ton)	Impacto dos vagões no Trilho					
		Ponto de solda sem defeito superficial (LVDT 1)		Ponto de solda com defeito superficial (LVDT 3)		Contínuo sem defeito superficial (LVDT 1)	
		Desloc. (mm)	FD	Desloc. (mm)	FD	Desloc. (mm)	FD
32	31,6	5,43	1,06	-	-	-	-
52	31,8	-	-	10,42	2,03	5,13 (Desloc.ref)	1,00
54	30,6	-	-	11,27	2,20	5,84	1,14
67	5,3	-	-	5,91	1,15	2,36	0,46

5. CONCLUSÕES

Em relação à caracterização do subleito, em geral, os resultados de CBR obtidos por meio do DCP nos segmentos da EFC mostram que a plataforma possui elevada capacidade de suporte e, provavelmente, é baixa a sua contribuição nos deslocamentos medidos. No que se refere ao lastro amostrado, este mostrou-se com elevado nível de colmatação, provavelmente influenciando os resultados dos deslocamentos medidos.

As medições de deslocamentos realizadas com dois ou três LVDTs posicionados equidistantes no patim do trilho entre dois dormentes (com ou sem ponto de solda), apresentaram formato de sinal e amplitude muito próximos, confirmando que, em termos de deslocamentos verticais, não houve influência nas seções avaliadas. Mostrou-se também que o espaçamento deixado entre a placa de apoio e o trilho, devido à falta de fixações, gerou um impacto

significativo pelo carregamento dinâmico entre esses componentes, sendo normalizado apenas após a colocação de uma fixação. Comparando-se na mesma velocidade de solicitação de carregamento, mesmo comprimento da bacia de influência da carga de roda (locomotivas e vagões) em seções de trilho sem e com defeito superficial, constatou-se que este aumenta a amplitude do pulso de deslocamento (que é do tipo *haversine*) em relação àquele, intensificando o impacto nos componentes da via.

Por fim, a partir de deslocamentos medidos com a passagem de diferentes veículos nos segmentos de via considerados (trilho sem e com defeito superficial) e análise das bacias de influência, determinou-se o fator de deflexão (FD). Este, em geral, apresentou valores que aumentaram em função do aumento de velocidade, das descontinuidades e dos defeitos superficiais do trilho. Os valores de FD determinados neste trabalho mostraram-se úteis como indicadores do desempenho da via a partir dos deslocamentos medidos.

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

- ASTM C136 – 06 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates
ASTM D6951/6951M-09–Method for Use of The Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications
- Costa, R.; Moura, E.; Bernucci, L.; Motta, R.; Teixeira, A. e Oliveira, L. (2016) Dispositivo de medição de deslocamentos em via permanente para determinação do módulo de via. *Transportes*, v. 24, n. 4, p.32-38.
- Doyle, N. F. (1980) *Railway Track Design: A review of current practice*, Occasional Paper N° 35, Bureau of Transport Economics, BHP Melbourne Research Laboratories, 302p.
- Dyk, B. J. V.; Dersch, M. S.; Edwards, J. R.; Ruppert Jr., C. J.; Barkan, C. P. L. Evaluation of Dynamic and Impact Wheel Load Factors and Their Application for Design. TRB 14-4714, Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, 2014.
- Esveld, C. (2001) *Modern Railway Track*. (2ª ed). Delft University of Technology.
- Hay, W. W. (1982) *Railroad Engineering*. Ed. John Wiley & Sons, 784 p.
- Indraratna, B., Salim, W., Rujikiatkamjorn, C. In: *Advanced Rail Geotechnology Ballasted Track*, Taylor & Francis Group, London, UK, 2011.
- Li, D, Hyslip, J., Sussmann, T., and Chrismer, S., (2016) *Railway Geotechnics*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 584p.
- Lichtberger, B. (2005) *Track Compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics*, Eurailpress, ISBN: 3-7771-0320-9, 374p.
- 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.
- Pires, J. (2016) *Integrated Maintenance Model for Heavy Haul Tracks*. Escola Politécnica da Universidade de Lausanne, Suíça, 189 p.
- Profillidis, V. A. *Railway Management and Engineering*. THIRD. ed. [S.l.]: Ashgate Publishing Limited, 2006.
- Selig, E. T., Waters, J. M., (1994) *Track geotechnology and substructures Management*. Thomas Telford Services Ltd., Londres, 446p.
- Sussmann, T. R.; Ebersohn; Selig, E. T. (2001) *Fundamental Nonlinear Track Load-Deflection Behaviour for Condition Evaluation*. Transportation Research Record 1742, Paper N° 01-2916. 2001

Robson Costa (costa.robsonc@gmail.com)

José João Pires (eng.josejoao@gmail.com)

Edson Moura (edmoura@usp.br)

Guilherme A. Pinto (guilhermeantonio.1012@gmail.com)

Rosângela Motta (rosangela.motta@usp.br)

Liedi Bernucci (liedi@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

Luciano de Oliveira (oliveira.luciano@vale.com)

Vale S.A. Centro de Excelência. Av Dante Michelini, 5500 – Jardim Camburi – Vitória – ES – 29090-900