

UM MÉTODO PARA A ESTIMATIVA DA DEFLEXÃO DO PAVIMENTO FERROVIÁRIO

George Wilton Albuquerque Rangel

Universidade Federal de Goiás (UFG)

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Engenharia de Transportes

Laura Maria Goretti da Motta

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia

RESUMO

Este artigo apresenta parte dos fundamentos teóricos e do desenvolvimento de um método para a estimativa da deflexão de pavimentos ferroviários lastreados e a comparação com medidas de campo, realizadas por outros pesquisadores. Foram realizadas 768 simulações computacionais utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) no software ABAQUS 2016 para parametrizar a influência de diferentes variáveis na estimativa de deflexões, como o carregamento, a bitola, trilhos, dormentes, a espessura e o módulo de resiliência das camadas no comportamento mecânico global do pavimento. Utilizou-se modelo elástico linear para a simulação dos trilhos, fixações e dormentes, o critério de Drucker-Prager para o lastro e o modelo de GUIMARÃES (2009) para o sublastro e subleito, implementado por intermédio da rotina UMAT. Os resultados obtidos foram utilizados para gerar um sistema matricial correlacionando o grupo de variáveis parametrizadas e as deflexões encontradas em cada simulação. A solução do sistema matricial permitiu a definição de uma equação genérica para estimar a deflexão de determinado pavimento ferroviário, dentre aqueles simulados ou outro similar. Comparações dos resultados da equação formulada com valores de deflexões medidas em campo por outros pesquisadores mostram a aplicabilidade do método como uma ferramenta eficiente para a previsão de deslocamentos verticais do pavimento ferroviário.

ABSTRACT

This paper presents part of theoretical and development of a method for estimation the deflection of railroads tracks and the comparison with field measurements carried out by other researchers. A total of 768 computational simulations were performed using the Finite Element Method (FEM) in the software ABAQUS 2016 to parameterize the influence of different variables in the estimation of deflections, such as loading, gauge, rails, sleepers, thickness and the modulus of resilience of the layers in the overall mechanical behavior of the pavement. A linear elastic model was used for the simulation of the rails, fastenings and sleepers, the Drucker-Prager criterion for the ballast and the GUIMARÃES (2009) model for the sublast and subgrade, implemented through the UMAT routine. The results obtained were used to generate a matrix system correlating the group of parametrized variables and the deflections found in each simulation. The solution of the matrix allowed the definition of a generic equation to estimate the deflection of a certain railways tracks, among those simulated or other similar. Comparisons of the results of the equation formulated with values of deflections, measured in the field by other researchers, show the applicability of the method as an efficient tool for the prediction of vertical displacements of the railway pavement.

1. INTRODUÇÃO

Durante a construção ou manutenção corrente de estradas de ferro não se tem verificado no Brasil o controle deflectométrico do pavimento ferroviário, a partir da medição da deflexão nos trilhos, exceto em pesquisas muito específicas, ficando a verificação da qualidade restrita a ensaios dos materiais que compõem as camadas do pavimento. Geralmente tais ensaios são insuficientes para uma análise mecânica consistente, visto que não refletem o comportamento da estrutura do pavimento frente a carregamentos móveis.

Segundo INDRARATNA *et al.* (2011), o dimensionamento inadequado do pavimento ferroviário ou a falta de manutenção adequada oriunda do não entendimento do comportamento mecânico da via permanente gera custos bilionários todos os anos no mundo. Na década de 2000, nos Estados Unidos, eram gastos em torno de 10 bilhões de

dólares todos os anos com a manutenção ferroviária, sendo grande parte desse custo oriundo de problemas com o lastro. No Canadá o custo girava em torno de 1 bilhão e na Austrália em torno de 2,1 bilhões.

Nesse aspecto, torna-se necessário o desenvolvimento de novos métodos para a análise e projeto, que proporcionem um melhor entendimento do comportamento do pavimento ferroviário, e que complementem os convencionalmente utilizados, tais como os de ZIMMERMANN (1888) e TALBOT (1918-1941), mencionados por SCHRAMM (1977), STOPATTO (1987), BRINA (1988), QUEIROZ (1990), SADEGHI (1997), BASTOS (1999), SILVA (2002), SPADA (2003), STEFFLER (2013), entre outros.

Segundo WERKMEISTER (2003), em dimensionamento de pavimentos, dois parâmetros devem ser seguidos como controle de qualidade: a deformação permanente e a deflexão. Assim, tem-se a necessidade da definição de tolerâncias e estimativas de tais parâmetros para diferentes tipos de vias férreas.

Neste artigo é apresentado parte da base teórica de um método para a estimativa da deflexão do pavimento ferroviário lastreado, completamente descrito em Rangel (2017). Em ferrovias recém construídas ou em manutenção, o estabelecimento de um parâmetro de deflexão a partir de simulações numéricas específicas (neste caso em 2D) ou utilizando a equação proposta, permite comparar a deflexão obtida em campo e avaliar o estado do pavimento.

Assim, objetiva-se apresentar um resumo da parte teórica desenvolvida, até a obtenção de uma equação para a estimativa de deflexões em pavimentos ferroviários. De conhecimento de tal equação, são apresentadas comparações de deflexões medidas em campo por diversos autores (que desconheciam tal equação) com as deflexões previstas pela equação de estimativa de deflexões.

2. A MEDIÇÃO DA DEFLEXÃO EM PAVIMENTOS FERROVIÁRIOS E MÉTODOS EXISTENTES PARA A PREVISÃO DA DEFLEXÃO

A medição da deflexão em ferrovias vem sendo realizada no Brasil utilizando-se a Viga Benkelman ou variações específicas, posicionando a sua ponta sobre a base do trilho, conforme a **Figura 1**.

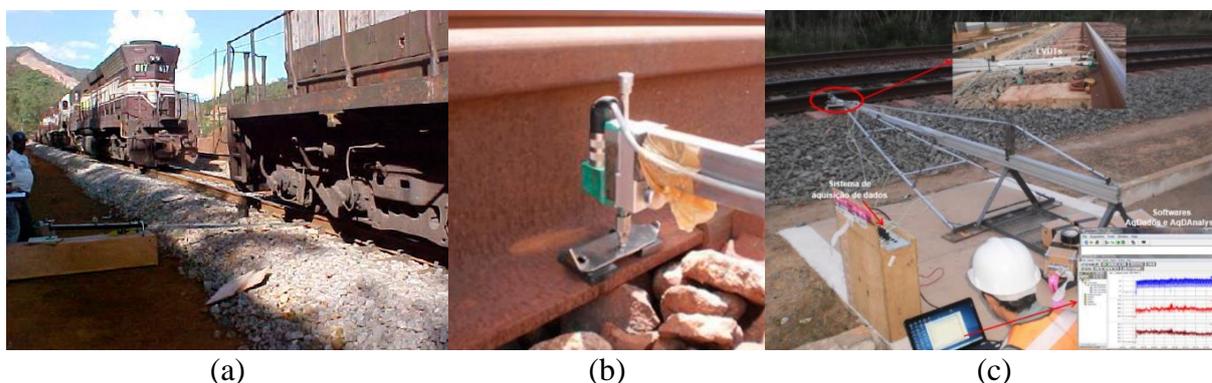


Figura 1: Exemplo de pesquisadores brasileiros que realizaram medidas deflectométricas em pavimentos ferroviários.

Fonte: (a) FERNANDES, 2005; (b) MERHEB, 2014; COSTA, 2016

Uma das primeiras instrumentações desta natureza foi feita por SPADA (2003) e a medida da deflexão foi realizada utilizando-se um relógio comparador com precisão milimétrica, medindo-se o deslocamento vertical sob o eixo de carga e em outros pontos distantes do eixo. Analisando diversos segmentos do ramal ferroviário de trens de passageiros na cidade do Rio de Janeiro, o autor encontrou deflexões variando na ordem de 2 a 7 mm para um vagão carregado com eixo pesando aproximadamente 232 kN.

FERNANDES (2005) apresentou valores de deflexões do pavimento ferroviário da ordem de 1,5 mm, solicitado por uma locomotiva de 8 eixos e 2 truques com um peso total de 1600 kN. A via era composta por trilhos TR-68, dormentes de aço e lastro de escória de aciaria.

COSTA *et al.* (2015) e COSTA (2016) apresentaram uma evolução da Viga Benkelman acoplada a um sistema digital de aquisição de dados em tempo real, permitindo analisar a deflexão do pavimento ferroviário com o trem em movimento. Em uma via nova, foram obtidas deflexões da ordem de 1,4 mm para vagões carregados com 316 kN de minério por eixo a 33 km/h e vagões vazios com 80 kN por eixo a 20 km/h. Também deflexões da ordem de 3,5 mm para vagões carregados a 55 km/h em uma via antiga.

Com base em critérios de durabilidade, sem ser específico nos carregamentos, mas considerando a deflexão no topo do trilho, LUNDGREN *et al.* (1970) incorporaram o diagrama da **Figura 2**, baseado na vida útil do pavimento, sendo o segmento:

- A, para deflexões de vias com durabilidade satisfatória;
- B, para deflexões normais em pavimentos de carga pesada, com boa combinação de rigidez e flexibilidade. Corresponde ao intervalo definido pela AREMA (2013);
- C, para limite desejável de deflexão em pavimentos com trilhos inferiores a 50 kg/m;
- D, para deflexões em vias com baixo nível de manutenção, apresentando algum problema e que irão se deteriorar rapidamente.

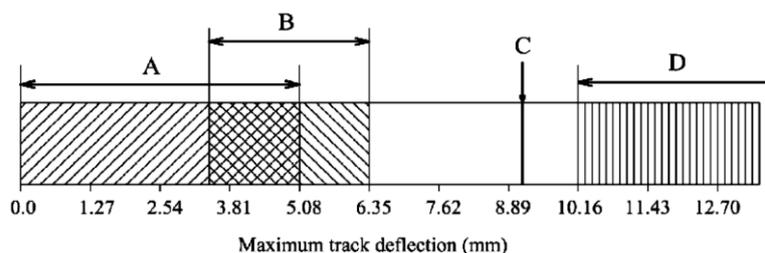


Figura 2: Critérios de deflexão do pavimento com base na durabilidade
Fonte: LUNDGREN *et al.*, 1970

Para a estimativa de deflexões mencionam-se as equações (1) e (2), oriundas das teorias clássicas de ZIMMERMANN (1888), sendo o módulo de via (U) um parâmetro bidimensional de rigidez da via permanente, podendo ser calculado pela equação (3).

$$y(x) = \frac{Q}{2 b C L} e^{-\frac{x}{L}} \left[\cos\left(\frac{x}{L}\right) + \text{sen}\left(\frac{x}{L}\right) \right], \text{ sendo } L = \sqrt[4]{\frac{4 E I}{C b}} \quad (1)$$

$$y(x) = \frac{Q}{2 U L} e^{-\frac{x}{L}} \left[\cos\left(\frac{x}{L}\right) + \text{sen}\left(\frac{x}{L}\right) \right], \text{ sendo } L = \sqrt[4]{\frac{4 E I}{U}} \quad (2)$$

$$U = \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{Q}{y}\right)^4}{64 EI}} \quad (3)$$

em que $y(x)$: função do deslocamento vertical do trilho [L];
Q: carregamento concentrado qualquer sobre o trilho [F];
b: largura do apoio [L];
C: coeficiente de deflexão de apoio [F][L]⁻³;
U: módulo de via [F][L]⁻²;
L: vão a ser considerado no cálculo [L];
E: módulo de elasticidade do aço do trilho [F][L]⁻²;
I: momento de inércia do trilho [L]⁴.

Para PROFILLIDIS (2006), cada um dos componentes do pavimento ferroviário colabora com o deslocamento vertical por um coeficiente de reação ou de rigidez (ρ). Conhecidos os coeficientes de reação de cada camada ou componente, a deflexão total pode ser calculada conforme a equação (4), resultando em valores geralmente variando entre 2 a 10 mm.

$$y = R \sum \frac{1}{\rho_n} \quad (4)$$

em que y : deslocamento no topo do trilho [L];
R: reação vertical do trilho sob carregamento [F];
 ρ_n : coeficiente de reação da camada n [F][L]⁻¹.

3. O MÉTODO PROPOSTO PARA A ESTIMATIVA DE DEFLEXÕES

3.1. A base teórica

Para cada um dos 768 pavimentos simulados foi considerado o modelo de GUIMARÃES (2009) para a estimativa das deformações no subleito e sublastro. Já para o lastro, corroborando com PROFILLIDIS (2006) e após comparações com métodos propostos por INDRARATNA *et al.* (2011), foi considerado o critério de Drucker-Prager. Trilhos, dormentes e acessórios de fixação foram representados por modelo elástico linear, dado a magnitude das tensões atuantes em comparação com resistência mecânica desses elementos. Em vias permanentes com determinado tempo de utilização é sabido que esses elementos sofrem severos desgastes, que foram desconsiderados.

Para a implementação do modelo de GUIMARÃES (2009) em elementos finitos, foi necessário o desenvolvimento da subrotina denominada UMAT (*User subroutine to define a material's mechanical behavior*), programada na linguagem FORTRAN e compilada pelo software ABAQUS 2016. Maiores detalhes são encontrados em Rangel (2017).

Com os resultados das simulações realizadas, tendo como parâmetro resposta de interesse a deflexão, montou-se o sistema matricial apresentado na equação (5), correlacionando as variáveis intervenientes, definidas com base nas propriedades relevantes do pavimento ferroviário.

A matriz [A] que correlaciona os fatores de influência é conhecida, e o vetor [C] do lado direito da igualdade é formado a partir das deflexões encontradas nas simulações numéricas realizadas. Calcula-se, portanto, o vetor produto das incógnitas $[a, \dots, g]_{7 \times 1}$, denominado [X], e devido a complexidade matemática foi utilizando o software MATLAB R2016a.

$$\begin{bmatrix} \sqrt{\frac{Q_{11}}{U_1}} & \sqrt[4]{\frac{I_{T12} \cdot E_{T12}}{U_1}} & \sqrt[4]{\frac{I_{D13} \cdot E_{D13}}{U_1}} & B_{14} & \frac{L_{15} \cdot ML_{15}}{U_1} & \frac{SL_{16} \cdot MSL_{16}}{U_1} & \frac{SU_{17} \cdot MSU_{17}}{U_1} \\ \sqrt{\frac{Q_{21}}{U_2}} & \sqrt[4]{\frac{I_{T22} \cdot E_{T22}}{U_2}} & \sqrt[4]{\frac{I_{D23} \cdot E_{D23}}{U_2}} & B_{24} & \frac{L_{25} \cdot ML_{25}}{U_2} & \frac{SL_{26} \cdot MSL_{26}}{U_2} & \frac{SU_{27} \cdot MSU_{27}}{U_2} \\ \sqrt{\frac{Q_{31}}{U_3}} & \sqrt[4]{\frac{I_{T32} \cdot E_{T32}}{U_3}} & \sqrt[4]{\frac{I_{D33} \cdot E_{D33}}{U_3}} & B_{34} & \frac{L_{35} \cdot ML_{35}}{U_3} & \frac{SL_{36} \cdot MSL_{36}}{U_3} & \frac{SU_{37} \cdot MSU_{37}}{U_3} \\ \sqrt{\frac{Q_{n1}}{U_n}} & \sqrt[4]{\frac{I_{Tn2} \cdot E_{Tn2}}{U_n}} & \sqrt[4]{\frac{I_{Dn3} \cdot E_{Dn3}}{U_n}} & B_{n4} & \frac{L_{n5} \cdot ML_{n5}}{U_n} & \frac{SL_{n6} \cdot MSL_{n6}}{U_n} & \frac{SU_{n7} \cdot MSU_{n7}}{U_n} \end{bmatrix}_{n \times 7} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ g \end{bmatrix}_{7 \times 1} = \begin{bmatrix} def_1 \\ def_2 \\ def_3 \\ def_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (5)$$

em que U_n : módulo de via da n ésima simulação $[F][L]^{-2}$;
 Q : carregamento aplicado $[F]$;
 E_T : módulo de elasticidade do trilho $[F][L]^{-2}$;
 I_T : momento de inércia do trilho $[L]^4$;
 E_D : módulo de elasticidade do dormente $[F][L]^{-2}$;
 I_D : momento de inércia do dormente $[L]^4$;
 B : bitola $[L]$;
 L : espessura da camada de lastro $[L]$;
 ML : módulo de resiliência do lastro $[F][L]^{-2}$;
 SL : espessura da camada de sublastro $[L]$;
 MSL : módulo de resiliência do sublastro $[F][L]^{-2}$;
 SU : espessura do subleito, recomenda-se considerar entre 2 a 5 m, conforme material $[L]$;
 MSU : módulo de resiliência do subleito $[F][L]^{-2}$;
 a, b, c, d, e, f, g : constantes a serem determinadas do sistema de matrizes;
 def_n : deflexão encontrada no topo do trilho na posição sob a carga em cada simulação realizada.

Para cada camada do pavimento, procurou-se dar preferência a parâmetros mecânicos, tais como rigidez do trilho e dormente (EI), o módulo de resiliência (MR) e espessuras das camadas geotécnicas. Como a deflexão é medida em unidade de comprimento, considerando o módulo de via (U) como o parâmetro de rigidez bidimensional do pavimento ferroviário, este foi escolhido como variável normalizadora de cada parcela interveniente, transformando-a na mesma unidade da deflexão. Resolvendo-se o sistema matricial $[A].[X]=[C]$, se obtém as constantes necessárias para a formação da equação genérica, utilizada na estimativa das deflexões de pavimentos similares aos simulados.

O uso de módulo de resiliência constante para os materiais de lastro, sublastro e subleito foi uma opção para diminuir a complexidade da análise, considerada válida pela condição geométrica do pavimento ferroviário e tendo em vista o nível das tensões atuantes.

A matriz que correlaciona os fatores de influência é flexível e fatores que não precisam ser parametrizados, como constantes de projeto, podem ser descartados e sua respectiva constante no vetor produto das incógnitas considerado igual a zero. É possível também inserir novos fatores, devendo serem sempre normalizados. A resolução do sistema matricial permite a definição das incógnitas $[a, \dots, g]$ e o desenvolvimento da equação genérica (6), considerada em módulo.

$$\left| a \sqrt{\frac{Q}{U}} + b \sqrt[4]{\frac{I_T \cdot E_T}{U}} + c \sqrt[4]{\frac{I_D \cdot E_D}{U}} + d \cdot B + e \frac{L \cdot ML}{U} + f \frac{SL \cdot MSL}{U} + g \frac{SU \cdot MSU}{U} \right| = def \quad (6)$$

Em resumo, a metodologia proposta contempla as seguintes etapas:

- a) definição dos parâmetros relevantes utilizados nas simulações do pavimento ferroviário, tais como bitola, tipos de trilho, tipos de dormente, características das camadas de lastro, sublastro, subleito, etc;
- b) definição dos valores típicos dos parâmetros que serão analisados parametricamente;
- c) formação do sistema matricial, utilizando o módulo de via (U) como variável normalizadora para transformar a dimensão das parcelas intervenientes na dimensão desejada;
- d) realização das simulações dos pavimentos ferroviários parametrizados para a alimentar o vetor de deflexões resultante do sistema, [C], utilizando um software capaz de modelar os inúmeros elementos e suas iterações;
- e) resolução do sistema matricial para obtenção das constantes do vetor [X] e formação de uma equação genérica para estimar a deflexão, aplicável principalmente no espaço de inferência dos valores assumidos das variáveis selecionadas.

3.2. As simulações realizadas

Para desenvolver a equação genérica (6), parametrizou-se 48 configurações de pavimentos, modificados por 16 variações de propriedades de materiais e carregamentos, totalizando 768 simulações da estrutura do pavimento ferroviário pelo Método dos Elementos Finitos. Assim, considerando as características típicas de ferrovias de carga brasileiras, foram parametrizadas as seguintes variáveis:

- a) dois tipos de carregamentos por eixo, 250 kN e 400 kN;
- b) dois tipos de trilhos, TR-57 e TR-68, com $E = 210$ GPa e $\nu = 0,3$;
- c) bitola métrica (1000 mm) e larga com 1600 mm;
- d) dormentes com 2 m de comprimento para bitola métrica e com 2,8 m para bitola larga (a geometria do dormente não é explicitada na matriz, desenvolvida na simulação numérica), sendo de:
 - a. madeira com $E = 13$ GPa, $\nu = 0,3$, 17 cm de altura e 24 cm de largura (momento de inércia igual a 9826 cm⁴);
 - b. concreto com $E = 33$ GPa, $\nu = 0,2$, 22 cm de altura e 25 cm de largura (momento de inércia igual a $22.183,33$ cm⁴);
 - c. Aço com $E = 205$ GPa, $\nu = 0,3$ e 6 cm de altura (seção U transformada para seção retangular de 15 x 6 cm, mantendo-se o momento de inércia de 270 cm⁴);
- e) sistema de fixação com metodologia apresentada por Rangel (2015b), onde o sistema de fixação é discretizado, considerando:
 - a. placa de apoio metálica para dormente de madeira com $E = 205$ GPa, $\nu = 0,3$ e 2 cm de espessura, sendo 30 cm de comprimento para trilho TR-57 e 40 cm para trilho TR-60;
 - b. palmilha polimérica para dormentes de concreto com $E = 1,0$ GPa e $\nu = 0,3$, conforme CANDIAN (2007), 0,5 cm de espessura, sendo 18 cm de comprimento para trilho TR-57 e 20 cm para trilho TR-60;
- f) lastro com espessuras de 25 e 40 cm, MR de 300 e 500 MPa, $\nu = 0,2$, ângulo de dilatação igual a 13° , ângulo de atrito interno igual a 40° , coesão nula e início de escoamento a 400 kPa, modelo de Drucker-Prager, conforme sugerido por INDRARATNA *et al.* (2011);

- g) sublastro com espessuras de 10 e 20 cm, 6 m de largura, MR de 200 e 300 MPa, $\nu = 0,3$, utilizando parâmetros de brita graduada, conforme o modelo de GUIMARÃES (2009);
- a) subleito com espessura fixada em 3 m, com 6 m de largura, suficiente para a dissipação das tensões críticas na camada, $\nu = 0,3$, utilizando o modelo de GUIMARÃES (2009) aplicando dois tipos de subleito:
- areia argilosa do Espírito Santo, MR = 150 MPa;
 - argila de Ribeirão Preto, MR = 250 MPa.

Um exemplo de um dos pavimentos simulados é apresentado na **Figura 3**. O estudo de convergência resultou nos quantitativos de elementos finitos apresentados na **Tabela 1**.

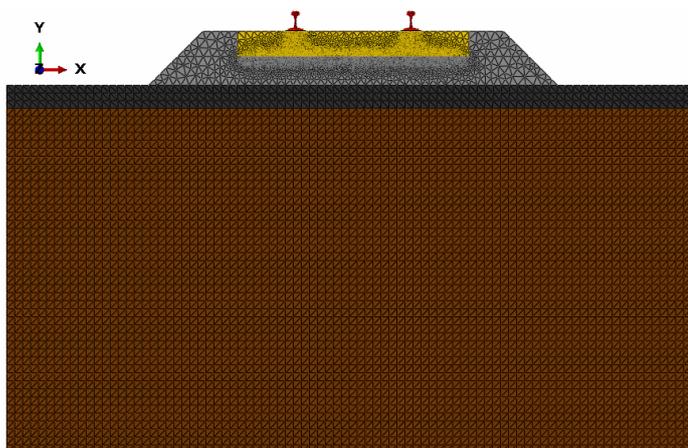


Figura 3: Pavimento simulado: subleito com 3 m, sublastro com 20 cm de espessura, lastro com 30 cm de espessura, bitola larga de 1,6 m, dormente de concreto e trilho TR-57

Tabela 1: Quantidade de referência de elementos finitos para a simulação dos pavimentos ferroviários conforme estudo de convergência do modelo em 2D

Componente do pavimento	Número de elementos finitos no pavimento completo
Trilhos	186 e modelo elástico linear
Dispositivos de apoio	152 e modelo elástico linear
Dormente	18.068 e modelo elástico linear
Lastro	9.618 e modelo elástico linear com critério de escoamento de Drucker-Prager
Sublastro	258 e modelo de GUIMARÃES (2009) considerando brita graduada
Subleito	3.698 e modelo de GUIMARÃES (2009) considerando argila ou areia

Todos elementos utilizados foram do tipo CPE3, triangular em estado plano de deformação, com 3 nós e 6 graus de liberdade.

4. RESULTADOS OBTIDOS E COMPARAÇÕES COM MEDIDAS DE CAMPO

Após a realização das 768 simulações e resolução do sistema matricial apresentado na equação (5), foi possível desenvolver a equação (7), genérica, para estimar a deflexão de pavimentos ferroviários com propriedades semelhantes àqueles dos intervalos simulados.

$$\left| 2,3640 \sqrt{\frac{Q}{U}} - 0,2284 \sqrt[4]{\frac{I_T}{U}} + 0,0001 \sqrt[4]{\frac{I_D \cdot E_D}{U}} + 0,0335 B + 0,0034 \frac{L \cdot ML}{U} + 0,0075 \frac{SL \cdot MSL}{U} + 0,0049 \frac{MSU}{U} \right| = \text{def} \quad (7)$$

Onde:

U = módulo de via entre 10,56 e 123,96 MPa;

Q = carregamento estático de uma roda de 125 kN a 200 kN;

I_T = momento de inércia do trilho, entre 2730,5 cm⁴ (TR-57) a 3850,1 cm⁴ (TR-68);

E_D = módulo de elasticidade do dormente: 205 GPa para aço; 33 GPa para concreto; 13 GPa para madeira.

I_D = momento de inércia do dormente: 270 cm⁴ para aço; 22183,33 cm⁴ para concreto; 9826 cm⁴ para madeira.

B = bitola entre 1 e 1,6 m;

L = espessura da camada de lastro entre 0,25 e 0,40 m;

ML = módulo de resiliência do lastro entre 300 e 500 MPa;

SL = espessura da camada de sublastro entre 0,10 e 0,20 m;

MSL = módulo de resiliência do sublastro entre 200 e 300 MPa;

MSU = módulo de resiliência do subleito entre 150 a 250 MPa;

def = deflexão no topo do trilho em mm.

É proposta ainda a equação (8), corrigida, onde é subtraído 1,9 mm, média das diferenças entre as deflexões estimadas pela equação (7) e as deflexões simuladas, objetivando fazer com que a média das deflexões obtidas pela equação (8), corrigida, seja igual à média das deflexões simuladas, conforme demonstrado na **Tabela 2**.

Com a equação corrigida, a média percentual das diferenças entre as deflexões simuladas e as deflexões calculadas, considerada como o erro entre a simulação e o resultado das equações, foi reduzida de 93 % para 28 %, e o desvio padrão reduzido de 56 % para 23 %. Para uma deflexão estimada pela equação (8), corrigida, de 3 mm, o erro médio seria de $\pm 0,84$ mm com um desvio padrão de $\pm 0,70$ mm, ou seja, a deflexão real medida no campo teria em média de 2,16 a 3,84 mm, com valores limites entre 1,46 a 4,54 mm.

$$\left| 2,3640 \sqrt{\frac{Q}{U}} - 0,2284 \sqrt[4]{\frac{I_T}{U}} + 0,0001 \sqrt[4]{\frac{I_D \cdot E_D}{U}} + 0,0335 B + 0,0034 \frac{L \cdot ML}{U} + 0,0075 \frac{SL \cdot MSL}{U} + 0,0049 \frac{MSU}{U} - 1,90 \right| = \text{def} \quad (8)$$

Tabela 2: Resumo estatístico das simulações realizadas e das equações formuladas

	Deflexões simuladas (mm) [A]	Deflexões da equação (7) (mm) [B]	Diferença (mm) [B] - [A]	Diferença (%) [B] - [A]	Deflexões da equação (8), corrigida (mm) [C]	Diferença (mm) [C] - [A]	Diferença (%) [C] - [A]
Média	2,49	4,39	1,90	93	2,49	0,64	28
Desvio padrão	1,08	1,16	0,85	56	1,16	0,56	23
Coef. de variação	43 %	26 %	45 %	60	47 %	87 %	84
Máximo	7,16	8,86	4,60	224	6,96	2,70	75
Mínimo	1,00	2,36	0,06	0,84	0,46	0	0

Distribuindo os resultados de todas as simulações em grupos de deflexões, cada grupo acrescido em 1 mm em relação ao anterior, tem-se o seguinte:

- 74 % das deflexões são até 3 mm e 91 % até 4 mm;
- o trilho é a principal camada responsável pela variação da deflexão;
- o dormente de aço apresenta as maiores deflexões, seguido do dormente de madeira e concreto;
- acima de 3 mm, a bitola métrica tem aproximadamente 10 % mais deflexões que a bitola larga. Acima de 2 mm, aproximadamente 13 % mais deflexões, mostrando que o espaçamento entre os trilhos tem influência na deflexão do pavimento ferroviário;
- quanto menor a espessura da camada de lastro, maior a deflexão do pavimento. Em virtude da menor espessura, as tensões não são dissipadas na mesma proporção de

- quando o lastro é mais espesso, assim as tensões chegam a uma magnitude maior na camada do subleito, geralmente mais sensível às tensões;
- f) o MR do lastro mostrou-se um parâmetro de relevância na deflexão do pavimento e quanto maior a rigidez do lastro, menor a deflexão do pavimento. Pavimentos com $MR = 300$ MPa no lastro apresentaram o dobro de deflexões maiores que 4 mm, em relação aos pavimentos com $MR = 500$ MPa;
 - g) a espessura e a rigidez do sublastro granular não se mostraram relevantes para a deflexão do pavimento, talvez pela natureza do modelo do material considerado para a camada;
 - h) a rigidez do subleito se mostrou relevante na deflexão do pavimento. O subleito com $MR = 150$ MPa apresentou 45 % mais deflexões, maiores que 3 mm, em relação ao sublastro com $MR = 250$ MPa. Para o subleito com $MR = 250$ MPa, 96 % das deflexões são até 3 mm;
 - i) a maior parte dos módulos de via (26 %) estão situados no intervalo entre 40 e 50 MPa, com uma deflexão máxima de 3 mm. Aproximadamente 82 % dos módulos de via estão situados entre 20 e 60 MPa. Todas as deflexões acima de 3 mm têm módulos de via inferiores a 40 MPa. Módulos de via acima de 80 MPa apareceram apenas 3 vezes e podem ser considerados raridade em pavimentos ferroviários. Pavimentos com U até 30 MPa têm deflexões maiores que 2 mm.

Organizando em sentido crescente todas as deflexões das 768 simulações, plotando-as em relação às deflexões acumuladas ou em relação aos módulos de via (figuras disponíveis em Rangel, 2017) e agrupando-as conforme condição de análise, verifica-se que:

- a) o carregamento é o principal influenciador da magnitude da deflexão. Nas duas curvas inferiores do gráfico predomina o carregamento com 125 kN e nas duas curvas superiores predomina o carregamento com 200 kN;
- b) as maiores deflexões ocorrem para pavimentos com o trilho TR-57, menos rígido que o TR-68. O carregamento e o trilho são as duas principais variáveis na variação da deflexão, praticamente regendo o comportamento da curva característica deflexão vs módulo de via;
- c) as maiores deflexões ocorrem nos pavimentos com bitola métrica, verificando a influência entre os bulbos de tensões oriundos de trilhos adjacentes;
- d) o MR do lastro é mais relevante para pavimentos que apresentam deflexões acima de 2 mm e quanto maior a rigidez do material menores são as deflexões;
- e) para o sublastro as diferenças começam a aparecer para pavimentos apresentando deflexões acima de 4 mm. Menores espessuras de sublastro apresentam maiores deflexões e a variação do MR não se mostrou relevante para o intervalo parametrizado. Contudo, com base no trabalho de RANGEL *et al.* (2015a), que simulou sublastros em CBUQ e granulares, sabe-se que o MR da camada passa a ter relevância para valores maiores que 2 GPa;
- f) a diferença de deflexões considerando os subleitos adotados foi significativa, sendo uma das propriedades que mais impactam na deflexão.

Comparações das equações (7) e (8) foram realizadas com deflexões medidas em campo por COSTA (2016), FERNANDES (2005) e SPADA (2003), respectivamente apresentadas na **Tabela 3**, **Tabela 4** e **Tabela 5**. Verifica-se que os valores medidos em campo são compatíveis com aqueles estimados pelas equações (7) e (8) propostas.

Tabela 3: Comparações entre deflexões medidas em campo por COSTA (2016) e as estimadas pelas equações (7) e (8) propostas

Condição do lastro	Carga (kN/eixo)	Tipo de dormente	Módulo de via		Deflexão			Propriedades principais dentro do intervalo das simulações?	
			calculado por Costa (2016) (MPa)	Medida em campo (mm)	Estimada pela equação (7) (mm)	Estimada pela equação corrigida (8) (mm)	Com o desvio padrão como erro ($\pm 23,35\%$) Limite inferior Limite superior		
Novo com 30 cm de espessura	58	Concreto	42	0,37	1,37	0,53	0,40	0,65	Não
	281		50	1,57	3,39	1,49	1,14	1,84	Sim
	93		34	0,63	2,15	0,25	0,19	0,31	Não
	316		84	1,19	2,73	0,83	0,64	1,03	Sim
Desguarnecido com 40 cm de espessura	93*	Concreto	5	3,05	6,59	4,69	3,60	5,79	Não
	316		20	3,45	5,98	4,08	3,13	5,03	Sim
	318		49	1,80	3,69	1,79	1,37	2,20	Sim
	318		43	1,97	3,96	2,06	1,58	2,54	Sim
Colmatado com 27 cm de espessura	80	Madeira	6	2,10	5,43	3,53	2,70	4,35	Não
	316		20	3,50	5,97	4,07	3,12	5,02	Sim
	50		9	1,02	3,23	1,33	1,02	1,64	Não
	316		28	2,73	4,98	3,08	2,36	3,80	Sim
	318		17	3,92	6,55	4,65	3,56	5,73	Sim

* Costa (2016) acredita que a deflexão medida para a carga de 93 kN/eixo superior em relação a carga de 316 kN/eixo deve-se à falta de contato (gap) entre o dormente e o lastro

Tabela 4: Comparações entre deflexões medidas em campo por FERNANDES (2005) e as estimadas pelas equações (7) e (8) propostas

Seção experimental	Módulo de via estimado (MPa)	Medida em campo (mm)	Deflexão			Propriedades principais dentro do intervalo das simulações?	
			Estimada pela equação (7) (mm)	Estimada pela equação corrigida (8) (mm)	Com o desvio padrão como erro ($\pm 23,35\%$) Limite inferior Limite superior		
01	39,93	1,32	3,09	1,19	0,91	1,47	Não
02	39,93	1,32	3,09	1,19	0,92	1,47	Não
03	64,61	0,92	2,36	0,46	0,35	0,57	Não
04	25,64	1,84	3,96	2,06	1,58	2,54	Não
05	54,87	1,04	2,59	0,69	0,53	0,85	Não
06	8,87	4,08	7,09	5,19	3,98	6,40	Não
07	8,99	4,04	7,04	5,14	3,94	6,34	Não

Tabela 5: Comparações entre deflexões medidas em campo por SPADA (2003) e as estimadas pela equação (8) proposta

Trecho	Módulo de via estimado (MPa)	Medida em campo (mm)	Estimada pela equação (7) (mm)	Deflexão		Propriedades principais dentro do intervalo das simulações?
				Com o desvio padrão como erro ($\pm 23,35\%$) Limite inferior Limite superior		
C	47,25	2,68	3,16	2,42	3,90	Não
OC	41,15	3,46	3,42	2,62	4,22	Não
BR	63,98	2,82	2,69	2,06	3,32	Não
R	43,4	4,24	3,31	2,54	4,08	Não
NI	54,1	8,12	2,93	2,24	3,61	Não
EP	63,60	2,15	2,69	2,06	3,32	Não
DC	54,00	5,48	3,00	2,30	3,70	Não

5. CONCLUSÕES

O método proposto resulta em uma equação genérica para a estimativa da deflexão em pavimentos ferroviários, parâmetro necessário para a avaliação qualitativa da estrutura, podendo ser utilizada para comparar com as deflexões medidas em campo.

As deflexões estimadas pelas equações (7) e (8) foram comparadas de maneira satisfatória com os valores medidos em campo por COSTA (2016), FERNANDES (2005) e SPADA (2003) em diversas ferrovias do território brasileiro, portanto tornando o método uma alternativa interessante para a estimativa de deflexões de pavimentos ferroviários.

A vantagem do uso desta metodologia proposta é a facilidade na estimativa de deflexões em pavimentos ferroviários, além da parametrização das propriedades do pavimento, visto que a matriz dos fatores de influência é flexível, variando seu tamanho conforme o número de variáveis e os valores escolhidos. Já a desvantagem é a necessidade de realizar várias simulações do pavimento para a formação do sistema matricial a fim de correlacionar os diferentes tipos de vias, solicitações e suas respectivas deflexões.

Com base nas análises paramétricas e na bibliografia pesquisada, pode-se concluir que:

- a) o carregamento imposto é o principal responsável pela magnitude da deflexão;
- b) o trilho tem a função principal de distribuir os carregamentos para os dormentes, sendo a camada de maior relevância frente às deflexões. Quando mais rígido o trilho, maior a distribuição das tensões e menores tendem ser as deflexões;
- c) as maiores deflexões ocorrem para vias com dormentes de aço, seguido pelo dormente de madeira e monobloco de concreto;
- d) quando não é considerado a degradação da camada de lastro, essa não tem influência significativa na deflexão. No entanto, as bibliografias pesquisadas mostram ser uma das camadas de maior influência na deformação permanente ao longo do tempo e provavelmente será preciso buscar um modelo que possa expressar tal degradação juntamente com as deflexões;
- e) o sublastro granular não se mostrou relevante para as deflexões medidas. Sua contribuição está mais ligada à transição entre o lastro e o subleito ou filtro, sendo uma camada de importância para garantir a durabilidade do pavimento, evitando a aceleração da degradação do lastro;
- f) o subleito é uma camada de extrema relevância no controle das deflexões, principalmente quando todas as camadas superiores não colaboram para a distribuição das tensões. Subleitos mais rígidos resultam em deflexões menores, enquanto subleitos menos rígidos resultam em deflexões maiores. O módulo de resiliência da camada está intimamente relacionado com a umidade, mais uma vez remetendo à importância do sublastro na durabilidade do pavimento.

A metodologia para o cálculo das deflexões do pavimento ferroviário apresentado nesta pesquisa não considerou explicitamente o espaço vazio entre o dormente e o lastro (gap), o que invariavelmente aumenta o valor da deflexão mensurada em campo, evidenciado na tese de SPADA (2003). Tal variável é de grande importância na mensuração de pavimentos com deficiências de compactação, recomendando-se para pesquisas futuras a medida mais precisa do gap, onde a deflexão total deverá ser um somatório da deflexão oriunda das camadas do pavimento mais o gap, que varia conforme o estado de conservação da via férrea.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AREMA. American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association. Lanham, MD. 2013.
- BASTOS, P. S. S. Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçado com fibras de aço. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, p. 255. 1999. Tese (Doutor em engenharia de estruturas).
- BRINA, H. L. Estradas de ferro: via permanente. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, v. 1, 1988.
- CANDIAN, L. M. Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais. Escola

- de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 167. 2007. Dissertação (mestre em estruturas).
- COSTA, R. C. Proposição de dispositivo de medidas "in situ" para avaliação do comportamento mecânico de lastro ferroviário: Estudo de caso da Estrada de Ferro Carajás. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 176. 2016.
- COSTA, R.; MOURA, E.; BERNUCCI, L.; MOTTA, R.; TEIXEIRA, A.; SGAVIOLI, F. Dispositivo de medição de deslocamentos em via permanente para determinação do módulo de via. Ouro Preto - MG, p. 12. 2015.
- FERNANDES, G. Comportamento de estruturas de pavimentos ferroviários com utilização de solos finos e/ou resíduos de mineração de ferro associados a geossintéticos. Universidade de Brasília. Brasília, p. 253. 2005. Tese (Doutor em geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.
- GUIMARÃES, A. C. R. Estudo de deformação permanente em solos e a teoria do Shakedown aplicada a pavimentos flexíveis. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 184. 2001. Dissertação (Mestre em Ciências).
- GUIMARÃES, A. C. R. Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 367. 2009. Tese (Doutor em Engenharia Civil).
- INDRARATNA, B.; SALIM, W.; RUJIKIATKAMJORN, C. Advanced Rail Geotechnology. 1. ed. New York: CRC Press, 2011.
- KLINCEVICIUS, M. G. Y. Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 171. 2011. Dissertação (Mestre de Engenharia).
- LUNDGREN, J. R.; MARTIN, G. C.; HAY, W. W. A simulation model of ballast support and the modulus of track elasticity. University of Illinois. Urbana, Illinois, p. 120. 1970.
- MERHEB, A. H. M. Análise mecânica do lastro ferroviário por meio de ensaios triaxiais cíclicos. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 148. 2014.
- PROFILLIDIS, V. A. Railway management and engineering. 3. ed. Burlington: Ashgate, 2006. 469 p.
- QUEIROZ, R. C. Estudo experimental de tensões e deformações em camadas da infraestrutura e superestrutura ferroviária. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 223. 1990. Tese (Doutor em Engenharia Civil).
- RANGEL, G. W. A. Um método para a estimativa da deflexão do pavimento ferroviário lastreado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 395. 2017. Tese (Doutor em Engenharia Civil).
- RANGEL, G. W. A.; ARAGÃO, F. T. S.; MOTTA, L. M. G. Modelam computacional do pavimento ferroviário usando concreto asfáltico como alternativa para a construção da camada de sublastro. Reunião Anual de Pavimentação, 44ª RAPV. Foz do Iguaçu, p. 15. 2015a.
- RANGEL, G. W. A.; ARAGÃO, F. T. S.; MOTTA, L. M. G. Avaliação computacional da rigidez da fixação pandrol e-clip para utilização em simulações do pavimento ferroviário. 44ª Reunião Anual de Pavimentação. Foz do Iguaçu, PR, p. 16. 2015b.
- SADEGHI, J. Investigation of characteristics and modelling of railway track system. University of Wollongong. Wollongong, Austrália, p. 262. 1997. (Tese de Doutorado).
- SCHRAMM, G. Técnica e economia na via permanente. Tradução de R. A. Volkmann. Rio de Janeiro: Darmstadt, 1977. 297 p.
- SILVA, L. F. M. Fundamentos teórico-experimentais da mecânica dos pavimentos ferroviários e esboço de um sistema de gerência aplicado à manutenção da via permanente. Universidade Federal Do Rio De Janeiro. Rio de Janeiro, p. 347. 2002. Tese (doutorado em Engenharia Civil).
- SPADA, J. L. G. Uma abordagem de mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento do mecanismo de comportamento tensão-deformação da via férrea. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 200. 2003. Tese (Doutor em ciências em engenharia).
- STEFFLER, F. Via permanente aplicada: guia teórico e prático. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 314 p.
- STOPATTO, S. Via permanente ferroviária: conceitos e aplicações. São Paulo: T.A. Queiroz, 1987. 251 p.
- TALBOT, A. N. (1918-1941). Stresses in railroad track, Report of the Special Committee on Stresses in Railroad Track. Proceeding of the AREA. First progress report. Vol. 19, pp. 73-1062 (1918). Second progress report. Vol. 21, pp. 645-814 (1919-1920). Fifth progressive report. Vol. 30, pp. 34-35 (1929). Six progressive report. Vol. 45, pp. 68-848 (1933). Seventh progressive report. Vol. 42, pp. 753-850 (1941).
- WERKMEISTER, S. Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials in Pavement Constructions. University of Technology Dresden. [S.l.], p. 189. 2003.
- ZIMMERMANN, H. (1888). Die berechnung des eisenbahnoberbaues. Verlag W. Ernst & Sohn.

George Wilton Albuquerque Rangel (george.rangel@ufg.br)
Laura Maria Goretti da Motta (laura@coc.ufrj.br)