

Estudo numérico computacional e analítico do comportamento estrutural de pavimentos ferroviários com diferentes estruturas

Computational numerical and analytical study of the structural behavior of railway tracks with different structures

Paulo André Moraes Pereira¹, Talita de Freitas Alves¹, Rosângela dos Santos Motta¹, Liedi Légi Bariani Bernucci¹, Edson de Moura¹

¹Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo – Brasil

contato: paulompereira@usp.br,  (PAMP); talitadfalves@usp.br,  (TFA); rosangela.motta@usp.br,  (RSM); liedid@usp.br,  (LLBB); edmoura@usp.br (ED)

Recebido:

30 de setembro de 2022

Aceito para publicação:

14 de março de 2023

Publicado:

14 de abril de 2023

Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

Palavras-chave:

Ferrovia.
Dimensionamento.
Modelagem numérica.
Modelos analíticos.

Keywords:

Railway.
Railway design.
Numerical modeling.
Analytical models.

DOI: 10.58922/transportes.v31i1.2848

RESUMO

Modelos computacionais são comumente empregados para análise estrutural de ferrovias, possibilitando o estudo de pavimentos compostos por diferentes tipos de materiais, tal como o sublastro betuminoso (SLB). Por outro lado, equações empíricas de Talbot et al. (1920) e *Japanese National Railways* (JNR) ainda são muito utilizadas no dimensionamento de vias, mesmo baseando-se em hipóteses simplificadoras que podem não representar muitas possíveis condições estruturais de campo. Este artigo realiza um estudo paramétrico com o objetivo de avaliar as diferenças entre a transmissão das tensões nos componentes de infraestruturas calculadas por um modelo numérico computacional calibrado com dados de campo e pelas equações de Talbot et al. (1920) e da JNR. Para tanto, foram estudadas 36 configurações de via permanente com valores de carga de roda e materiais aplicados em camadas de infraestrutura presentes em ferrovias brasileiras. O comportamento da via com uso de SLB também é discutido. Em algumas situações, as tensões dormente/lastro por Talbot et al. (1920) foram inferiores às do modelo. Em geral, as tensões lastro/sublastro e sublastro/subleito calculadas através das equações analíticas foram superiores aos valores calculados com o modelo, sendo a JNR menos conservadora dentre as equações utilizadas. O SLB aumentou a rigidez da via, reduziu as tensões verticais e a relação de tensão desviadora/confinante no subleito.

ABSTRACT

Computational models are commonly employed for structural analysis of railways, making it possible to study pavements composed by different types of materials, such as bituminous subballast (BS). On the other hand, empirical equations by Talbot et al. (1920) and Japanese National Railways (JNR) are still widely used in railway design, even though they are based on simplifying assumptions that may not faithfully represent field conditions. This paper performs a parametric study in order to evaluate the differences between the stress transmission in the infrastructure components calculated by a computational numerical model calibrated with field data and by the equations of Talbot et al. (1920) and JNR. For this, 36 permanent way configurations were studied



with wheel load values and materials applied in infrastructure layers present in Brazilian railways. The behavior of the track containing a BS is also discussed. In some situations, the sleeper/ballast stresses by Talbot et al. (1920) were lower when compared to the model. In general, ballast/subballast and subballast/subgrade stresses calculated by the analytical equations were higher than the values calculated with the model, being the JNR least conservative among the equations used. The BS increased the track stiffness, reduced the vertical stresses and the deviator/confining stress ratio in the subgrade.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, têm sido cada vez mais recorrente o uso de modelos numéricos computacionais na análise estrutural de pavimentos ferroviários, tais como o *Kentrack*, *Geotrack*, *Ferrovias*, *Systrain*, modelos desenvolvidos no *software Abaqus* e *Ansys*, entre outros. Estes modelos são capazes de analisar a via permanente como um sistema em camadas, considerando a geometria complexa dos seus componentes, além de possibilitar a adoção de diferentes modelos constitutivos (elástico, plástico, elastoplástico, viscoelástico, etc.) na representação do comportamento de cada material da via (Profillidis, 2006). Tais métodos têm se mostrado muito importantes no estudo de vias permanentes com o emprego de diferentes materiais para a infraestrutura (lastro, sublastro e subleito), como observado em estudos nacionais que avaliaram o uso de sublastro betuminoso (SLB) em alternativa ao tradicional sublastro granular (SLG) (Alves et al., 2022; Rangel, Aração e Motta, 2015). Dentre diversas vantagens, os modelos computacionais também possibilitam a determinação do completo estado de tensões da camada de subleito (tensões verticais, confinantes e desviadoras), podendo ser calibrados com resultados experimentais e medidas de campo.

Por outro lado, modelos analíticos clássicos de transmissão de esforços ainda são muito utilizados, seja para uma estimativa inicial dos níveis de tensões nos componentes da via ou em projetos de novas ferrovias. Estas soluções podem ser baseadas em modelos teóricos ou equações semi-empíricas e empíricas que, por sua vez, partem de hipóteses simplificadoras, tais como admitir cada componente como parte individual e incluir aproximações na transmissão de tensões entre estes. Dentre estas abordagens, a AREMA (2020) contempla os modelos empíricos de Talbot et al. (1920) e da JNR (*Japanese National Railways*). Estes foram determinados experimentalmente e partem do pressuposto que a distribuição de tensões no lastro não depende do material utilizado. Apesar de serem facilmente aplicados, estes modelos não permitem representar muitas possíveis características ou condições estruturais de diferentes vias permanentes, uma vez que não é possível assumir diferentes rigidezes e/ou modelos constitutivos para todos os seus materiais e componentes. Além disso, na aplicação dos modelos analíticos, não é possível considerar diretamente a contribuição estrutural da camada de sublastro no cálculo das tensões atuantes no topo do subleito, uma vez que os seus estudos experimentais consideraram somente as tensões atuantes na camada de lastro. Nesse sentido, a AREMA (2020) recomenda a soma das espessuras do lastro e sublastro para determinação das tensões do subleito, mesmo sabendo-se que estas camadas contribuem de forma diferente na distribuição de tensões devido às suas diferentes rigidezes.

Dentro desse contexto, Klinevicius (2011) comparou resultados obtidos pelos modelos de Talbot et al. (1920) e da JNR e observou que o primeiro é o mais conservador.

Posteriormente, a autora também comparou os resultados de Talbot et al. (1920) com os de um modelo numérico computacional 2D em elementos finitos, admitindo o comportamento elástico-linear como modelo constitutivo para todos os elementos da via. No estudo numérico computacional, modelou-se somente a camada de lastro assentada diretamente sobre o subleito com a aplicação de um carregamento distribuído de 225 kPa na região onde haveria o contato do dormente com o lastro. Como resultados, os valores de tensões verticais nos componentes da infraestrutura foram muito diferentes, possivelmente gerados pela limitação do modelo computacional em admitir um estado plano de deformações, o que não ocorre com a equação de Talbot et al. (1920).

Em outro estudo comparativo, Monteiro (2015) também reportou diferenças significativas entre os resultados dos modelos analíticos com os obtidos através do *software Ferrovias 3.0*. Este software modela a via tridimensionalmente, utilizando elementos finitos e comportamento elástico-linear para a análise estrutural da superestrutura (trilho, fixações e dormentes) e teoria das camadas finitas na modelagem da infraestrutura, considerando a elasticidade não-linear dos solos e materiais granulares. Como resultados, o método clássico de Talbot et al. (1920) superestimou as tensões no sublastro, enquanto que a equação da JNR subestimou as tensões no subleito. Todavia, em seu estudo comparativo, os valores de tensão calculados pelos modelos analíticos tomaram como referência apenas dois valores de módulo de via, que é uma medida de rigidez de suporte oferecida pelo trilho sob carregamento (Talbot et al., 1918). Os valores de módulo de via utilizados foram os recomendados pela AREMA (2020) para dormentes de madeira (20,7 MPa) e de concreto (41,4 MPa). Por outro lado, nas simulações computacionais foram variados os módulos de elasticidade do subleito de 19,6 MPa a 196 MPa. Desta forma, é provável que Monteiro (2015) tenha comparado estruturas distintas, uma vez que as alterações na rigidez do subleito, simuladas pelo modelo computacional, possivelmente geraram módulos de via diferentes dos empregados nos cálculos utilizando as equações analíticas.

Os estudos realizados por Klinevicius (2011) e Monteiro (2015) são pioneiros e permanecem muito importantes dentro do contexto de dimensionamento e avaliação de pavimentos ferroviários. No entanto, para que os modelos analíticos possam ser aplicados com maior segurança, são necessários estudos comparativos de seus resultados com métodos mais modernos, tais como modelos numéricos computacionais 3D em elementos finitos. Seguindo este princípio, este artigo realiza um estudo paramétrico com o objetivo de avaliar as diferenças entre a transmissão das tensões nos componentes de infraestruturas calculadas por um modelo numérico computacional calibrado com dados de campo e pelas equações de Talbot et al. (1920) e da JNR. Para tanto, foram estudadas 36 configurações de via permanente com valores de carga de roda e materiais aplicados em camadas de infraestrutura presentes em ferrovias brasileiras, das quais algumas consideram o uso de SLB em alternativa ao tradicional SLG. A consideração de diversos materiais se faz extremamente necessária em um país de dimensões continentais, dentro do qual as condições climáticas e de solo de suporte podem variar drasticamente de uma região para a outra, assim como as solicitações da via em termos de velocidade e carga por eixo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Descrição do modelo numérico computacional e sua calibração

Neste trabalho foi utilizado um modelo numérico computacional 3D em elementos finitos no *software Abaqus*. Na concepção deste modelo foi levada em consideração a estrutura de um trecho experimental construído e monitorado por Pereira (2018), localizado na região de Cubatão (SP), na via Piaçaguera – Raiz da Serra, sob operação da MRS Logística. Esta via possui demasiada importância por prover a integração entre a malha atualmente operada pela MRS Logística com o Porto de Santos (SP). O trecho experimental tem como características: (i) bitola larga (1,60 m); (ii) trilhos TR-57; (iii) placa de apoio PA-57; (iv) dormentes de madeira (2,80 m x 0,24 m x 0,17 m) com espaçamento de 0,54 m; (v) clipe flexível do tipo Deenik; (vi) placa de apoio PA-57 e (vi) lastro granítico com espessura de 0,18 m e granulometria dentro da faixa N° 3 da AREMA (2020); e (viii) sublastro granular com espessura de 0,10 m.

Para a camada de subleito do modelo computacional, foram adotadas as mínimas dimensões necessárias para evitar a influência das suas extremidades nas simulações, resultando em 6 m de profundidade e 4 m de largura a partir do final do talude do sublastro. Como condições de contorno, foi assumida simetria na direção transversal da via, a fim de reduzir o esforço computacional, e engaste nas demais extremidades. O modelo possui 11,34 m de extensão (21 dormentes), considerando o carregamento de dois truques (um localizado no final de um vagão e outro no começo do vagão subsequente), com o objetivo de simular um efeito mais crítico de superposição de rodas. As interações nas interfaces roda/trilho, clipe/trilho e trilho/placa de apoio foram consideradas não-aderidas com um coeficiente de atrito de 0,78 (Sharma e Kumar, 2016), enquanto que as restantes foram consideradas totalmente aderidas. Como modelo constitutivo, adotou-se como simplificação o comportamento elástico-linear para todos os materiais componentes da via, mesmo sabendo-se que os materiais geotécnicos (lastro, sublastro e subleito) podem possuir comportamento não-linear. O estudo de convergência de malha considerou os parâmetros de deflexão no patim do trilho e deflexão e tensão nas interfaces dormente/lastro, lastro/sublastro e sublastro/subleito. Foi admitido que a malha havia convergido quando a variação nos resultados foi inferior a 5%. Mais informações sobre o modelo computacional podem ser obtidas em Alves et al. (2022). Na Figura 1 é apresentado o modelo numérico computacional utilizado neste estudo com maiores detalhes.

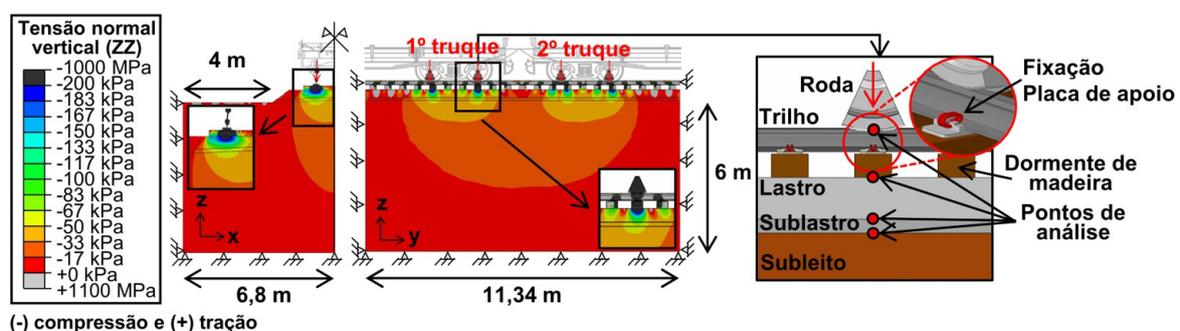


Figura 1. Modelo numérico computacional utilizado neste estudo

A calibração do modelo computacional ocorreu utilizando valores de deflexão vertical no patim do trilho e tensão vertical de compressão na interface dormente/lastro, levantados durante campanhas de medições realizadas por Pereira (2018) no trecho experimental da via Piaçaguera – Raiz da Serra (Figura 2a). Os resultados de uma das campanhas são mostrados na Figura 2b, correspondentes à passagem de duas locomotivas de modelo GE-U23C (30 tf/eixo) e 10 vagões do tipo plataforma de modelo PES (24 tf/eixo, em média) a 10 km/h. Os resultados apresentaram um valor de tensão de pico na interface dormente/lastro de 120 kPa para a passagem da locomotiva (30 tf/eixo), sendo este valor 13% inferior aos 138 kPa medidos por Rose et al. (2018) em uma via permanente com trilho TR-68 e dormente de madeira. Tal diferença pode estar relacionada por um maior efeito dinâmico ocorrido nas medições Rose et al. (2018), uma vez que estes utilizaram uma locomotiva com carga 30 tf/eixo à uma velocidade de 55 km/h.

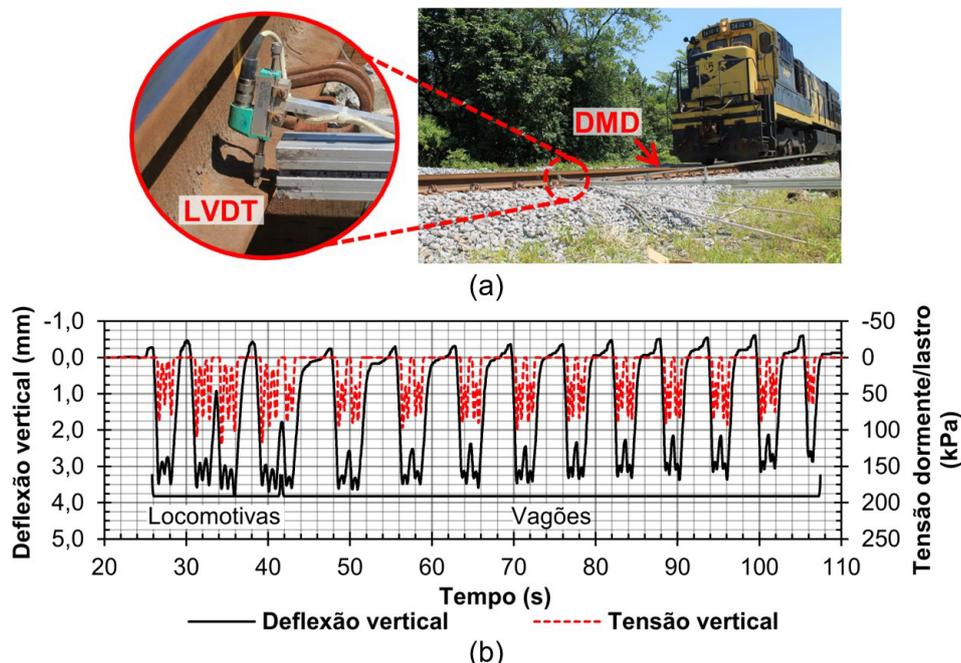


Figura 2. (a) medição e (b) resultados da deflexão vertical no patim do trilho e tensão vertical de compressão na interface dormente/lastro medidas em campo [dados de Pereira (2018)]

Devido a baixa velocidade de circulação na Piaçaguera – Raiz da Serra (10 km/h), nas simulações deste modelo foram empregados valores de carga de roda estática, pois o fator de impacto recomendado pela AREMA (2020) para esta velocidade tem valor desprezível. Por último, na etapa de calibração e no restante das simulações deste trabalho foram consideradas as características de carga e geometria correspondentes aos vagões plataforma. Inicialmente, durante a etapa de calibração, foram adotados módulos de elasticidade para o trilho, fixações e dormentes de acordo com a literatura. Posteriormente, os módulos de elasticidade/resiliência correspondentes aos componentes da infraestrutura foram ajustados até que os resultados do modelo computacional fossem próximos aos observados em campo. Na Tabela 1 são apresentados os resultados de deflexão vertical no

patim do trilho e da tensão na interface dormente/lastro, obtidos tanto pelo modelo (após a etapa de calibração) como pela medição em campo [valores de pico e 90° percentil, tal como Li (2018)]. Em termos de deflexão vertical, a diferença entre o modelo e os valores de campo ficou em torno de 2% a 3%, enquanto a diferença entre os valores de tensão dormente/lastro ficou em torno de 6% a 15%.

Tabela 1 – Deflexão vertical e tensão vertical de compressão na interface dormente/lastro determinadas pelo modelo computacional (após calibração) e pelas medições de campo

Parâmetro	Modelo computacional	Campo	
		Valor de Pico	90° percentil
Deflexão vertical (mm)	3,53	3,64	3,59
Tensão dormente/lastro (kPa)	104,0	98,5	90,2

Na Tabela 2 são mostrados os resultados de módulos de elasticidade determinados após a etapa de calibração do modelo computacional, bem como os detalhes da malha de elementos finitos de cada componente da via. O baixo valor de módulo de resiliência do lastro é explicado pela condição recém-construída do trecho experimental, com solicitação de apenas 2,6 MTBT's (Milhões de Toneladas Brutas Transportadas) até então, valor este provavelmente insuficiente para causar maior densificação na camada, uma vez que nos primeiros ciclos de carregamento são esperadas maiores deformações na camada de lastro, ocorrendo certa estabilização com o enrijecimento causado pela densificação oriunda do rearranjo das partículas de lastro que é gerada pelas solicitações do tráfego (Selig e Li, 1994; Sevi, 2008). Por outro lado, o valor de módulo de 150 MPa para o sublastro granular está coerente com o determinado por Pereira (2018), através de ensaio triaxial de cargas repetidas, uma vez que este material apresentou em laboratório módulos de resiliência entre 107 MPa a 270 MPa (na umidade ótima e tensão confinante de 20 kPa a 138 kPa). O módulo determinado através do modelo computacional para o subleito (20 MPa) foi abaixo do também determinado por Pereira (2018), através de ensaio triaxial de cargas repetidas, uma vez que este material apresentou em laboratório módulos de resiliência entre 42 MPa a 90 MPa (na umidade ótima e tensão desvio de 68 kPa a 309 kPa). Tal diferença decorre do fato do solo possuir baixa capacidade de suporte e de que foi verificado que este em campo, à época do estudo, se encontrava com teor de umidade de 37%, aproximadamente duas vezes acima da umidade ótima determinada em laboratório. Pereira (2018) classificou experimentalmente o solo do subleito segundo a classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), TRB (*Transportation Research Board*) e MCT (Miniatura, Compactado, Tropical). O resultado obtido determinou que o solo era OL (material orgânico siltoso ou argiloso), A-4 (solos siltosos) e NS'/NA' (não laterítico siltoso/não laterítico arenoso). Destaca-se que os valores de módulos de elasticidade, determinados após a etapa de calibração do modelo computacional, corroboram com os de outros pesquisadores para camada de lastro ou subleitos com baixa capacidade de suporte. Por exemplo, Paixão e Fortunato (2010) e Rangel, Aração e Motta (2015) consideram um valor de 130 MPa para a camada de lastro.

Por outro lado, Indraratna et al. (2019) consideram um valor de 20 MPa como módulo de elasticidade para a camada de subleito.

Tabela 2 – Parâmetros mecânicos dos componentes da via obtidos após calibração com os dados de campo e detalhes da malha de elementos finitos

Componente/Camada	Módulo de elasticidade	Poisson (ν)	Nº de elementos	Elemento
Roda AAR S-621-79			19.368	
Trilho TR-57	205 GPa	0,30	156.238	C3D6
Placa de apoio PA-57			2.812	
Clipe flexível Deenik			342	
Dormente de madeira	13 GPa	0,30	102	
Lastró	125 MPa	0,35	25.137	C3D8R
Sublastro granular	150 MPa	0,35	5.292	
Subleito	20 MPa	0,40	88.064	C3D6

2.2. Estruturas simuladas e parâmetros avaliados

Após a calibração do modelo computacional, representando a condição estrutural do trecho experimental na Via Piaçaguera – Raiz da Serra, foram selecionadas diversas cargas por eixo e módulos de elasticidade dos componentes da infraestrutura, objetivando simular diferentes condições operacionais e estruturais de ferrovias de carga nacionais. Na Figura 3 são mostradas as estruturas simuladas, os parâmetros avaliados pelos modelos computacional e analíticos e suas respectivas fontes na literatura. Foram efetuadas 36 simulações, levando em consideração todas as cargas e estruturas descritas. Por fim, nas simulações foram adotadas as mesmas características descritas na seção 2.1., diferindo apenas na espessura de 0,30 m da camada de lastro, que é um dos valores mais comumente empregados em vias permanentes.

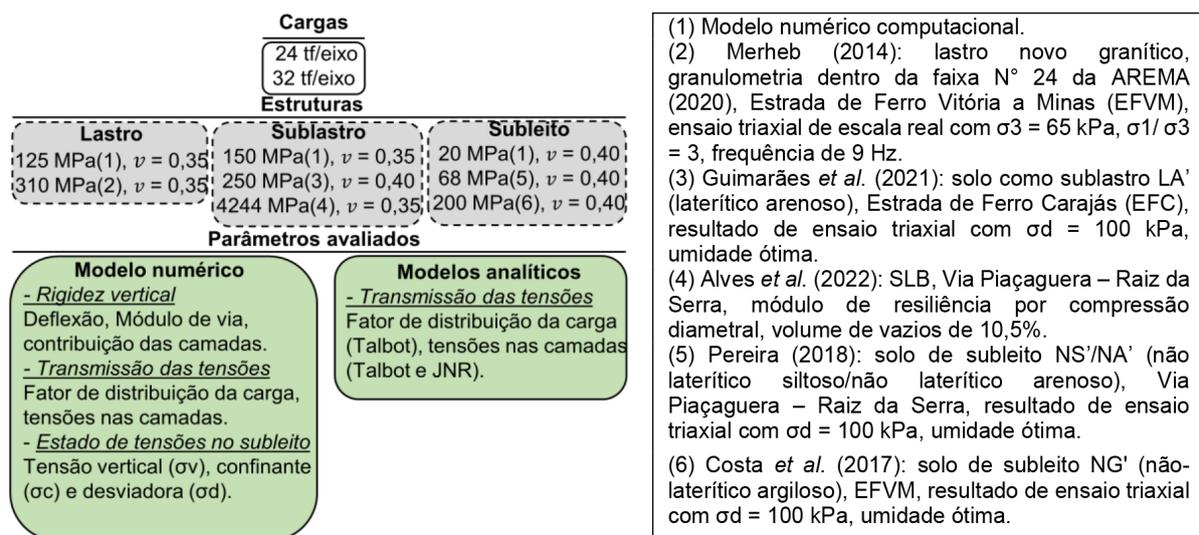


Figura 3. Estruturas simuladas e parâmetros analisados

Em termos de cargas por eixo, adotou-se a mesma da Via Piaçaguera – Raiz da Serra (24 tf/eixo), e a que é operada na EFC (32 tf/eixo), sob velocidade de 10 km/h (considerando carga estática). Quanto aos módulos de resiliência para a camada de lastro, selecionou-se o valor determinado pelo modelo computacional e o encontrado por Merheb (2014) em ensaios triaxiais de escala real. Por outro lado, para os módulos de resiliência do sublastro admitiu-se o valor determinado pelo modelo computacional (granular), além do relatado por Guimarães, Silva Filho e Castro (2021) e Alves et al. (2022) para a EFC (Solo Arenoso Fino Laterítico, SAFL) e Via Piaçaguera – Raiz da Serra (SLB), respectivamente. Por último, como módulo de resiliência do subleito adotou-se o valor determinado pelo modelo computacional (18,5% acima da umidade ótima), além do resultado encontrado por Pereira (2018) para o mesmo solo do trecho experimental (verificado na umidade ótima) e por Costa et al. (2017) para a EFVM (não-laterítico argiloso).

Quanto aos parâmetros avaliados, inicialmente foram tomadas as deflexões no patim do trilho e calculadas as porcentagens correspondentes a cada camada da infraestrutura, em todas as simulações do modelo computacional. Posteriormente, foram também calculados os módulos de via, segundo a Equação 1 de Talbot et al. (1918), que serviram de base para a determinação da transmissão das tensões pelos modelos analíticos.

$$u = \frac{(C_R/y_0)^{4/3}}{(64.E.I)^{1/3}} \quad (1)$$

Em que u : módulo de via [MPa];

C_R : carga de roda [kN];

y_0 : deflexão vertical máxima [m];

E : módulo de elasticidade do trilho [MPa];

I : momento de inércia do trilho [mm⁴].

Posteriormente, realizou-se a comparação entre o fator de distribuição da carga da roda no dormente central, determinados pelo modelo computacional e Talbot et al. (1920). Para tanto, calculou-se a força solicitante no dormente exatamente abaixo da roda através das Equações 2 e 3. Na sequência, ambos os valores calculados foram relacionados com a carga de roda aplicada no trilho.

$$F_{MC} = \sigma_{dl/MC} \cdot A_{ef} \quad (2)$$

$$F_{Talbot} = \frac{\lambda \cdot C_R \cdot s}{2} \quad (3)$$

Em que F_{MC} : força no dormente abaixo da roda pelo modelo computacional [kN];

F_{Talbot} : força no dormente abaixo da roda pelo modelo de Talbot et al. (1920) [kN];

$\sigma_{dl/MC}$: tensão dormente/lastro pelo modelo computacional [kPa];

A_{ef} : 1/3 da área da base do dormente [m²];

λ : $(u/4 \cdot E \cdot I)^{1/4}$ [m⁻¹];

s : espaçamento entre dormentes [m].

As tensões nas interfaces dormente/lastro, lastro/sublastro e sublastro/subleito foram obtidas diretamente através do modelo computacional. Para comparação com os modelos de Talbot et al. (1920) e JNR, foram utilizadas as Equações 4, 5 e 6. Destaca-se que, para o cálculo das tensões na interface sublastro/subleito, foi empregada a soma das espessuras do lastro e sublastro, tal como recomenda a AREMA (2020).

$$\sigma_{dl/Talbot} = \frac{F_{Talbot}}{A_{ef}} \quad (4)$$

$$\sigma_{ls,ss/Talbot} = \frac{53,87}{h^{1,25}} \sigma_{dl/Talbot} \quad (5)$$

$$\sigma_{ls,ss/JNR} = \frac{50}{10+(100z)^{1,35}} \sigma_{dl/Talbot} \quad (6)$$

Em que $\sigma_{dl/Talbot}$: tensão dormente/lastro pela equação de Talbot et al. (1920) [kPa];

$\sigma_{ls,ss}$: tensão lastro/sublastro ou sublastro/subleito [kPa];

h : espessura do lastro ou lastro + sublastro [cm];

z : espessura do lastro ou lastro + sublastro [m].

Por fim, também foram avaliadas as tensões verticais, confinantes e desviadoras no topo da camada de subleito com os diferentes tipos de cargas e rigidezes das camadas da infraestrutura. Para esta avaliação, foram determinadas apenas as tensões pelo modelo computacional, uma vez que não é possível obter resultados semelhantes através do modelo de Talbot et al. (1920) e JNR. Para tal, foram tomadas as tensões no topo do subleito, na região de projeção abaixo do trilho, sob carregamento (região considerada crítica após avaliação prévia). Posteriormente, foram medidas as tensões horizontais na direção longitudinal e transversal da via, sendo a tensão confinante considerada como a menor entre as duas (condição mais crítica).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da deflexão vertical e módulo de via são mostrados nas Figura 4a e Figura 4b. Cada coluna representa o resultado de um cenário estudado, de cima para baixo: subleito, sublastro, lastro e carga. Ressalta-se que o comportamento elástico-linear do modelo computacional gera, para alguns parâmetros, resultados semelhantes para as diferentes cargas de 24 tf/eixo e 32 tf/eixo. Por este motivo, em algumas figuras, não serão feitas distinções entre cargas. É possível observar a maior influência da rigidez do subleito na deflexão vertical e no módulo de via, em conformidade com o relatado por Selig e Li (1994) e Rangel (2017). Além disso, nas simulações em que o subleito apresentava maior rigidez, foram observados módulos de via maiores do que 70 MPa e 63 MPa, que são considerados, respectivamente, por Raymond (1985) e Silva (2002) como valores máximos para que a via possa ter uma boa condição estrutural. Destaca-se que, nas simulações realizadas neste estudo, não foram adotadas palmilhas elásticas abaixo do trilho (*rail pads*) que poderiam contribuir na elasticidade da via. Comportamento similar foi observado por Babu e Sujatha (2010), através da simulação de uma via permanente com dormente de madeira por meio de um modelo tridimensional em elementos finitos (*software Ansys*).

Neste estudo, os autores encontraram um módulo de via de 154 MPa, quando o módulo de elasticidade do subleito era de 215 MPa. Do mesmo modo, não foram detectadas variações significativas no módulo de via para diferentes rigidezes dos materiais de lastro e sublastro, como também apontou Rangel (2017) em seu estudo paramétrico utilizando um modelo bidimensional em elementos finitos. Por outro lado, nota-se que o uso do SLB resultou em um acréscimo de rigidez entre 4,1% a 23,3% (Figura 4c), corroborando com o valor de 19% relatado por Li (2018) em um trecho experimental na FAST (*Facility for Accelerated Service Testing*), e o valor de 12,4% relatado por Rangel, Aragão e Motta (2015) em uma simulação numérica computacional por elementos finitos. Outro aspecto importante do uso do SLB foi a ocorrência de um maior acréscimo de rigidez da via com a elevação do módulo de resiliência do lastro e tendência contrária com a elevação do módulo do sublastro e subleito.

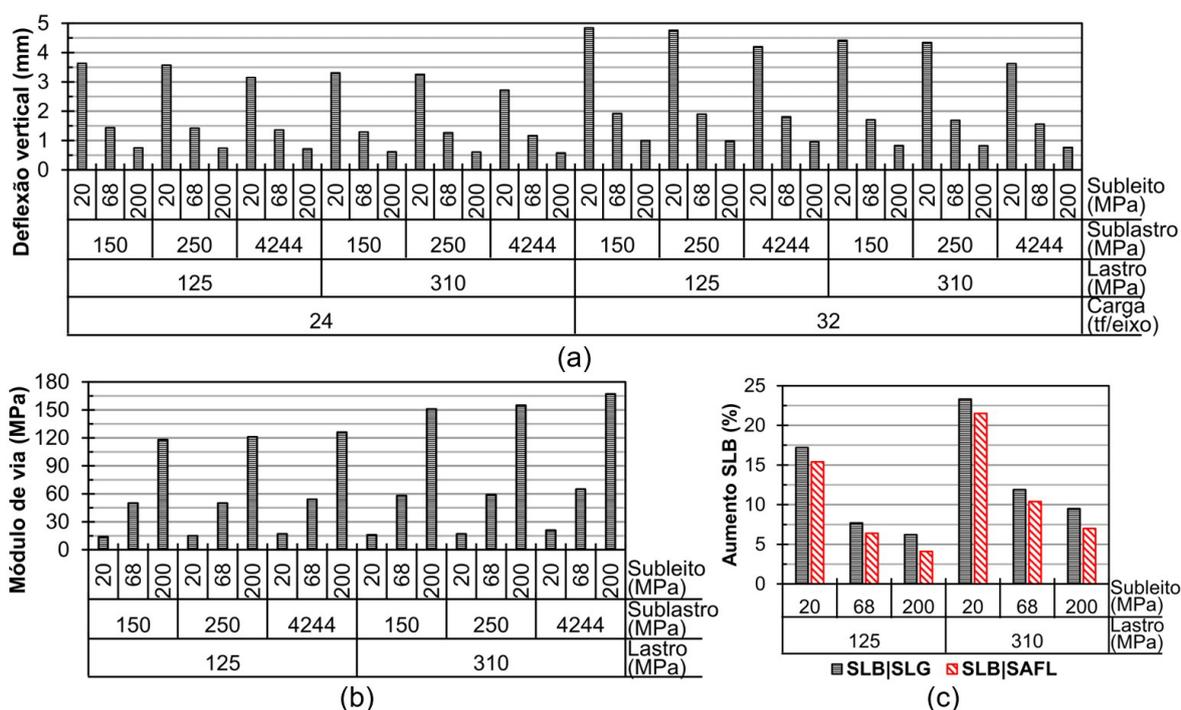


Figura 4. Resultados de (a) deflexão vertical e (b) módulo de via do modelo computacional; e (c) aumento da rigidez da via com o emprego do SLB

Complementarmente, na Figura 5 são apresentadas as contribuições de cada camada da infraestrutura na deflexão total. A camada de subleito apresentou maiores contribuições (58% a 96%), seguida pela camada de lastro (3,5% a 36,7%). Os valores de contribuição do lastro ficaram abaixo dos 75% relatados por Costa (2016) na EFC, podendo esta diferença ser relacionada à rigidez três vezes superior do subleito relatada por este autor (600 MPa, resultado de ensaio triaxial com $\sigma_d = 100$ kPa, umidade ótima). De modo geral, estes resultados apontam a importância do lastro para garantir elasticidade à via, principalmente em subleitos com elevada rigidez inicial ou compactados pelo tráfego.

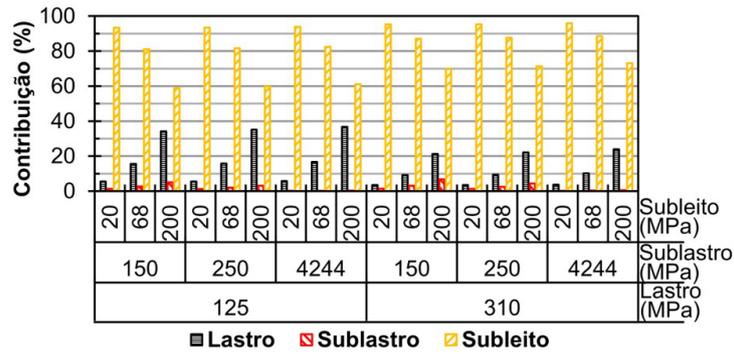


Figura 5. Contribuições dos componentes da infraestrutura na deflexão total da via

Os fatores de distribuição de carga, calculados pelo modelo computacional e pelo proposto por Talbot et al. (1920), são mostrados na Figura 6. De modo geral, os resultados ficaram abaixo do valor de 60% citado por Atalar et al. (2001) e de 50% relatado por Indraratna, Salim e Rujikiatkamjorn (2011), estando mais próximo aos 40% mencionado por Profillidis (2006). Ainda, os fatores calculados pela equação de Talbot et al. (1920) diferiram entre 0,10% a 11,1% dos valores determinados pelo modelo computacional, em cada condição simulada. Quando o módulo de resiliência do lastro foi de 125 MPa (mais flexível), houve acréscimo na diferença entre modelo computacional/Talbot et al. (1920) com a elevação da rigidez do subleito. Por outro lado, quando o módulo de resiliência do lastro foi de 310 MPa (menos flexível), ocorreu uma tendência contrária, com uma redução da diferença com a elevação da rigidez do subleito.

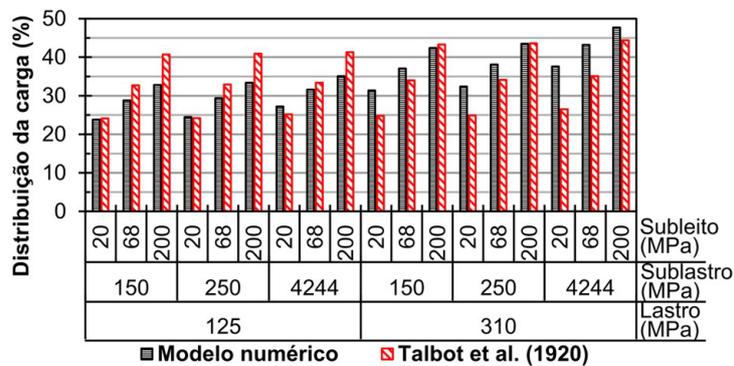


Figura 6. Distribuição da carga da roda no dormente central pelo modelo computacional e pela equação de Talbot et al. (1920)

Adicionalmente, na Figura 7 são apresentados os valores de tensão nas interfaces dormente/lastro, lastro/sublastro e sublastro/subleito pelo modelo computacional e pelos propostos por Talbot et al. (1920) e JNR. É importante ressaltar que as simulações computacionais não levaram em consideração o peso próprio da superestrutura e infraestrutura da via. Em relação à tensão dormente/lastro, em certas condições simuladas, os valores calculados pelo modelo de Talbot et al. (1920) foram inferiores aos determinados pelo modelo computacional. Ainda, de modo semelhante ao fator de distribuição de carga, quando o módulo do lastro foi de 125 MPa (mais flexível), houve acréscimo na diferença entre modelo

computacional/Talbot et al. (1920) com a elevação da rigidez do subleito. Por outro lado, quando o módulo do lastro foi de 310 MPa (menos flexível), ocorreu uma tendência contrária, com uma redução da diferença com a elevação da rigidez do subleito. Quanto às tensões nas interfaces lastro/sublastro e sublastro/subleito, em todas as condições simuladas, tanto o modelo de Talbot et al. (1920) como o da JNR obtiveram valores superiores aos do modelo computacional, diferentemente dos resultados de Monteiro (2015) que apontavam que a equação da JNR subestimava as tensões no subleito. Ainda, em todas as condições simuladas, houve um acréscimo nestas diferenças com a elevação da rigidez do lastro e subleito. Por último, o modelo da JNR obteve valores mais próximos aos encontrados pelo modelo computacional, portanto, sendo menos conservador do que o proposto por Talbot et al. (1920). Nesse sentido, para vias com estruturas semelhantes às simuladas neste trabalho, o uso da equação de Talbot et al. (1920) poderia contribuir em dimensionamentos mais onerosos pela superestimação das tensões no sublastro e subleito, uma vez que seria necessária uma maior espessura das camadas de lastro e/ou sublastro para redução das tensões no sublastro e subleito, visando a proteção destas camadas contra deformações permanentes excessivas.

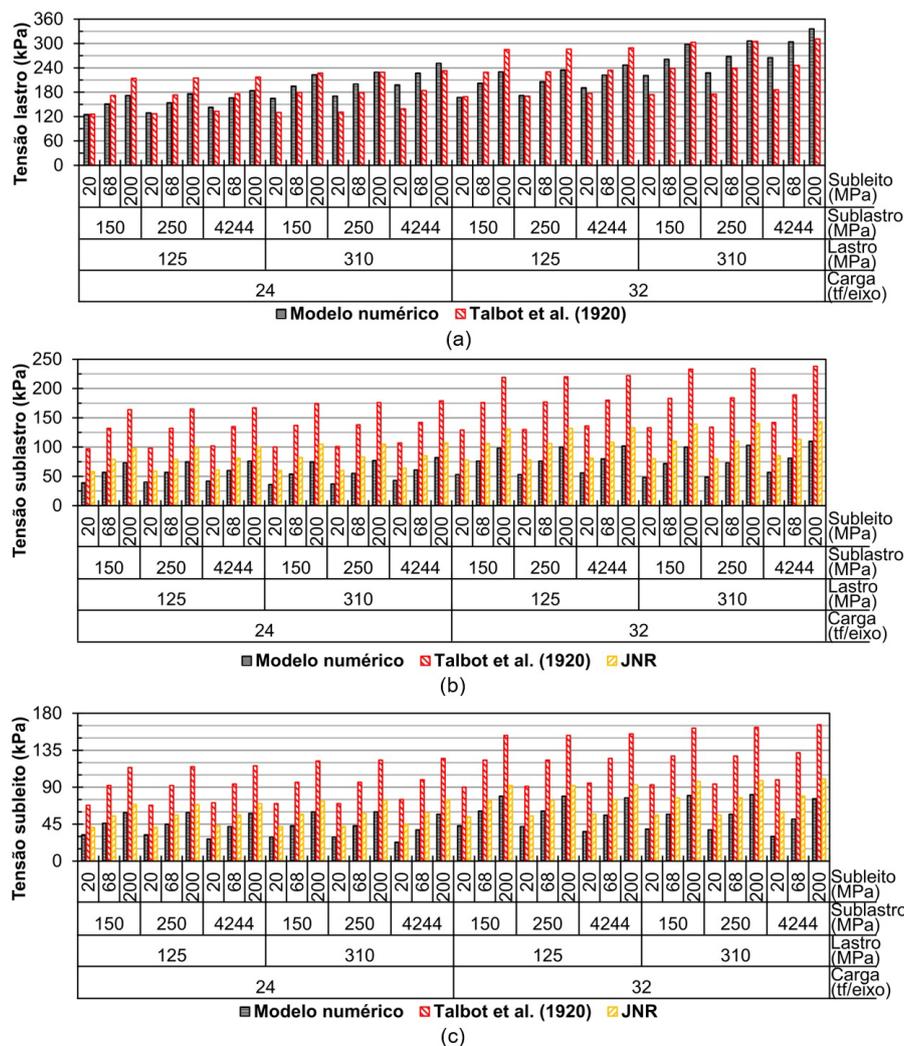


Figura 7. Tensões verticais de compressão nas interfaces (a) dormente/lastro; (b) lastro/sublastro; e (c) sublastro/subleito pelo modelo computacional e pelas equações de Talbot et al. (1920) e JNR

Considerando todos os casos simulados pelo modelo numérico computacional e os limites inferiores (3,18 mm) e superiores (6,35 mm) de deflexão recomendados AREMA (2020), um valor de módulo de via adequado estaria em torno de 20 MPa. Por exemplo, na carga de 32 tf/eixo (condição mais crítica), a estrutura com lastro de 310 MPa, sublastro de 250 MPa e subleito de 68 MPa geraria uma deflexão no trilho de 4,34 mm e tensões nas camadas de lastro, sublastro e subleito de 228 kPa, 49 kPa e 38 kPa (respectivamente). Este valor de módulo de via também está de acordo com o valor de 20,7 MPa da AREMA (2020) que corresponde à uma via com dormente de madeira compactada pelo tráfego.

Outro aspecto importante foi a redução entre 2,4% a 22% da tensão na interface sublastro/subleito com o uso do SLB (Figura 8), novamente corroborando com o valor de 9,7% do estudo de Rangel, Aragão e Motta (2015). Entretanto, os valores encontrados foram menores que os 42% de redução relatados por Li (2018), diferença essa podendo ser relacionada à presença de uma camada granular adicional de 0,10 m de espessura no estudo de Li (2018), posicionada abaixo do SLB. Ademais, observa-se a ocorrência de uma maior redução de tensão no subleito com a elevação do módulo de resiliência do lastro e a tendência contrária com a elevação do módulo de resiliência do sublastro e subleito. Por último, destaca-se que os modelos analíticos não foram capazes de determinar quaisquer reduções das tensões no subleito com o uso de SLB.

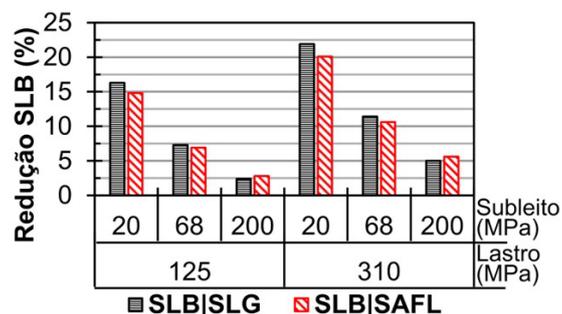


Figura 8. Redução da tensão vertical de compressão na interface sublastro/subleito com o emprego do SLB

Os estados de tensões no topo da camada de subleito, determinados pelo modelo numérico computacional, são apresentados na Figura 9. De modo geral, os valores se mostraram próximos aos citados por Li (2018), que encontrou uma tensão vertical de 73 kPa, confinante de 31 kPa e desviadora de 42 kPa para uma via com dormente de madeira e módulo de via de 14,5 MPa, solicitada por vagões carregados com 34,5 tf/eixo sob velocidade de 64 km/h. Por fim, observa-se que as tensões verticais e desviadoras aumentam conforme eleva-se a rigidez do subleito.

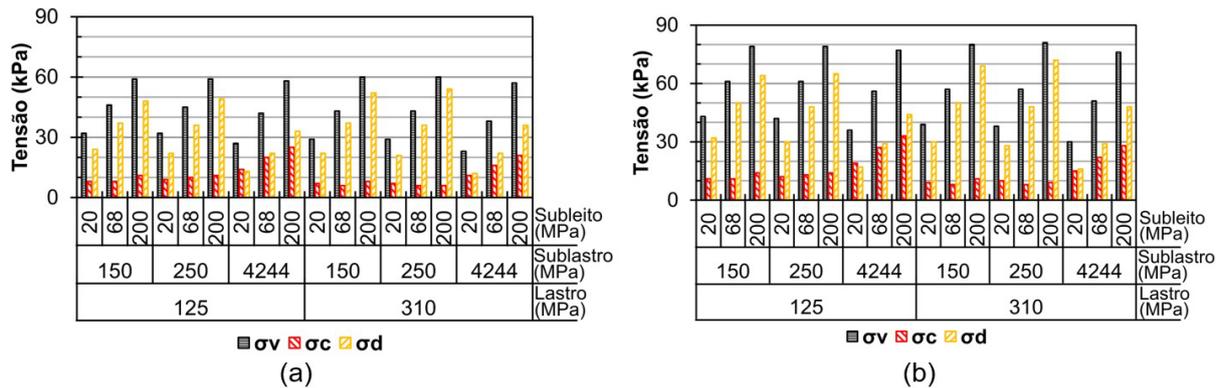


Figura 9. Tensões verticais de compressão (σ_v), confinantes (σ_c) e desviadoras (σ_d) no topo do subleito, na projeção abaixo do trilho com (a) 24 tf/eixo e (b) 32 tf/eixo

Adicionalmente, também foram calculadas as relações de tensão σ_d/σ_c (Figura 10). Em geral, ocorreram acréscimos nestas relações conforme aumentava-se a rigidez do subleito. Sobre o emprego do SLB, constata-se que, além de gerar uma redução nas tensões verticais no topo do subleito, este também reduz a relação de σ_d/σ_c pela elevação das tensões confinantes (como pode ser visto na Figura 9). Esta redução da relação de σ_d/σ_c , com o emprego do SLB, é benéfica por gerar uma situação mais estável de deformação, uma vez que leva a um estado de tensões mais homogêneo.

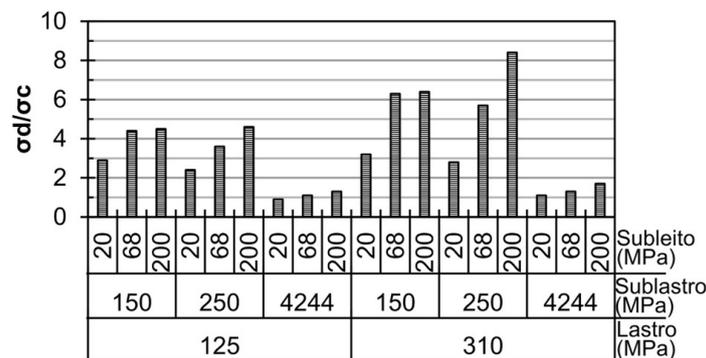


Figura 10. Relações de tensão desviadora (σ_d) e confinante (σ_c) pelo modelo numérico computacional

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados observados, as seguintes conclusões podem ser extraídas:

- As diferenças entre os valores de distribuição de carga pelo modelo computacional e pela equação de Talbot et al. (1920) foram dependentes da rigidez da infraestrutura. Em decorrência disso, em certas condições simuladas, as tensões dormente/lastro calculadas por Talbot et al. (1920) foram inferiores às do modelo computacional. Dessa forma, nem sempre o uso desta equação ocasionará em valores de tensão a favor da segurança, no caso de dimensionamento ou análise estrutural de vias permanentes;
- As tensões lastro/sublastro e sublastro/subleito, em todas as condições simuladas, foram superiores em ambos os modelos analíticos, diferentemente dos resultados de Monteiro

(2015) que apontaram que a equação da JNR subestima as tensões no subleito. Para as condições simuladas neste trabalho, o modelo da JNR mostrou-se menos conservador do que o proposto por Talbot et al. (1920), uma vez que apresentou resultados mais próximos dos oriundos do modelo computacional. Portanto, para vias com estruturas semelhantes às simuladas neste trabalho, o uso da equação da JNR poderia contribuir em dimensionamentos menos onerosos quando comparada com a de Talbot et al. (1920);

- O uso do SLB aumentou a rigidez da via e reduziu a tensão sublastro/subleito. Além disso, o SLB também reduziu a relação de σ_d/σ_c . Tal redução é benéfica por gerar uma condição mais estável de deformação, uma vez que gera um estado de tensões mais homogêneo. Por último, destaca-se que os modelos analíticos não foram capazes de determinar quaisquer reduções das tensões no subleito com o uso de SLB. Assim, para uma avaliação mais abrangente e fiel de pavimentos ferroviários recomenda-se o uso de modelos computacionais, especialmente se camadas betuminosas compõem a estrutura da via.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à MRS Logística por todo suporte na construção e monitoramento do trecho experimental citado neste trabalho, ao Laboratório de Inovação em Vias Metroferroviárias (LIM) e Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (LTP), ambos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

REFERÊNCIAS

- Alves, T.; P.A.M. Pereira; R. Motta et al. (2022) Three-dimensional numerical modelling of railway track with varying air voids content bituminous subballast. *Road Materials and Pavement Design*, v. 23, n. 2, p. 414-32. DOI: 10.1080/14680629.2020.1828150.
- AREMA (2020) *Manual for Railway Engineering*. Lanham: AREMA.
- Atalar, C.; B.M. Das; E.C. Shin et al. (2001) Settlement of geogrid-reinforced railroad bed due to cyclic load. In *XV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Londres: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, p. 2045-8.
- Babu, K.G. e C. Sujatha (2010) Track modulus analysis of railway track system using finite element model. *Journal of Vibration and Control*, v. 16, n. 10, p. 1559-74. DOI: 10.1177/1077546309341600.
- Costa, R.; R. Mota; J. Pires et al. (2017) Avaliação estrutural in situ de uma via férrea reforçada com geogrelha. In *XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET*. Rio de Janeiro: ANPET, p. 1098-109.
- Costa, R.C. (2016) *Proposição de Dispositivo de Medidas "in situ" para Avaliação do Comportamento Mecânico de Lastro Ferroviário: Estudo de Caso na Estrada de Ferro Carajás*. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-30092016-140923/>> (acesso em 14/03/2023).
- Guimarães, A.C.R.; J.C. Silva Filho e C.D. Castro (2021) Contribution to the use of alternative material in heavy haul railway sub-ballast layer. *Transportation Geotechnics*, v. 30, p. 100524. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100524.
- Indraratna, B.; W. Salim e C. Rujikiatkamjorn (2011) *Advanced Rail Geotechnology – Ballasted Track*. Londres: Taylor and Francis Group. DOI: 10.1201/b10861.
- Indraratna, B.; Y. Qi; T. Ngo et al. (2019) Use of geogrids and recycled rubber in railroad infrastructure for enhanced performance. *Geosciences*, v. 9, n. 1, p. 30. DOI: 10.3390/geosciences9010030.
- Klincevicus, M.G.Y. (2011) *Estudo de Propriedades, de Tensões e do Comportamento Mecânico de Lastros Ferroviários*. Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI: 10.11606/D.3.2011.tde-27032012-121114.
- Li, D. (2018) 25 years of heavy axle load railway subgrade research at the Facility for Accelerated Service Testing (FAST). *Transportation Geotechnics*, v. 17, p. 51-60. DOI: 10.1016/j.trgeo.2018.09.003.
- Merheb, A.H.M. (2014) *Análise Mecânica do Lastro Ferroviário por Meio de Ensaio Triaxiais Cíclicos*. Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI: 10.11606/D.3.2014.tde-20052015-160602.

- Monteiro, D.T. (2015) *Influência da Rigidez Vertical no Comportamento Mecânico e Dimensionamento da Via Permanente Ferroviária*. Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI: 10.11606/D.3.2016.tde-22062016-104819.
- Paixão, A. e E. Fortunato (2010) Rail track structural analysis using three-dimensional numerical models. In Benz, T. e S. Nordal (eds.) *Proceedings of the Seventh European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. Boca Raton: CRC Press, p. 575-80. DOI: 10.1201/b10551-105.
- Pereira, P.A.M. (2018) *Estudo do Uso do Geocomposto em Via Permanente Ferroviária*. Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI: 10.11606/D.3.2018.tde-04052018-135218.
- Profillidis, V.A. (2006) *Railway Management and Engineering* (3a ed.). Hampshire: Ashgate Publishing Ltd.
- Rangel, G. (2017) *Um Método para a Estimativa da Deflexão do Pavimento Ferroviário Lastreado* Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11422/9808>> (acesso em 30/03/2023).
- Rangel, G.W.A.; F.T.S. Aragão e L.M.G. Motta (2015) Modelagem computacional do pavimento ferroviário usando concreto asfáltico como alternativa para a construção da camada de sublastro. In *44º Reunião Anual de Pavimentação. 18º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária*. Curitiba: Secretaria de Infraestrutura e Logística do Paraná/Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná, p. 1-15.
- Raymond, G.P. (1985) Analysis of track support and determination of track modulus. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1022, n. 1, p. 80-90.
- Rose, J.G.; D.B. Clarke; Q. Liu et al. (2018) Application of granular material pressure cells to measure railroad track tie/ballast interfacial pressures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2672, n. 10, p. 146-55. DOI: 10.1177/0361198118775872.
- Selig, E.T. e D. Li (1994) Track modulus: its meaning and factors influencing it. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1470, p. 47-54.
- Sevi, A.F. (2008) *Physical Modeling of Railroad Ballast Using the Parallel Gradation Scaling Technique Within the Cyclic Triaxial Framework* Tese (doutorado). Missouri University of Science and Technology, Rolla. Disponível em: <https://scholarsmine.mst.edu/doctoral_dissertations/1929> (acesso em 30/03/2023).
- Sharma, S.K. e A. Kumar (2016) Dynamics analysis of wheel rail contact using FEA. *Procedia Engineering*, v. 144, p. 1119-28. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.05.076.
- Silva, L.F.M. (2002) *Fundamentos Teórico-Experimentais da Mecânica dos Pavimentos Ferroviários e um Esboço de um Sistema de Gerência Aplicado* Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/146-2002/924-luiz-francisco-muniz-da-silva>> (acesso em 30/03/2023).
- Talbot, A.N.; W.M. Dawley; A.S. Baldwin et al. (1918) Stress in railroad track. In *Nineteenth Annual Convention of the American Railway Engineering Association*. Washington: American Railway Engineering Association, vol. 19, p. 875-1058. DOI: 10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- Talbot, A.N.; W.M. Dawley; A.S. Baldwin et al. (1920) Second progress report of the Special Committee on Stresses in Railroad Track. In *Proceedings of the Twenty-first Annual Convention of the American Railway Engineering Association*. Lanham: AREMA, p. 645-814.