

Influência do Procedimento do Alteamento do Lastro no Comportamento Estrutural de Plataforma de Ferrovia Tipo *Heavy Haul* Utilizando MEF

Jefferson Santos Soares

Mestrando, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, jefferson.soares@ime.eb.br

Nádyá Frauzino Salgado

Mestranda, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, frauzino.nadya@ime.eb.br

Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

Cel. Chefe SE/2, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, guimaraes@ime.eb.br

Filipe Almeida Corrêa do Nascimento

Docente, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, filipe.nascimento@ime.eb.br

Álvaro Vieira

Docente, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, alvaro@ime.eb.br

RESUMO: O lastro ferroviário é uma camada granular que se encontra imediatamente abaixo dos dormentes e que desempenha funções críticas no sistema ferroviário, amortecendo as tensões nas camadas subjacentes, proporciona estabilidade ao pavimento ferroviário e permite o escoamento adequado da água da chuva. Ao longo da vida útil do pavimento ferroviário, as condições iniciais do lastro mudam devido ao desgaste dos agregados e à entrada de partículas finas provenientes das camadas inferiores e da superfície. Isso resulta na obstrução da camada, conhecida como colmatação. A técnica preferencial para restaurar as características desejadas é o desguarnecimento do lastro mediante a substituição parcial ou total da camada. No entanto, devido ao alto custo associado a esse procedimento, alguns operadores ferroviários optam por uma alternativa conhecida como "alteamento do lastro". Essa técnica envolve a adição de uma nova camada de lastro sobre a estrutura existente. Este estudo se dedica a avaliar o impacto estrutural da aplicação de diferentes espessuras de "alteamento do lastro" em uma ferrovia do tipo Heavy Haul, sujeita a cargas normalmente utilizadas nesse tipo de pavimento, variando entre 27,5 a 40 toneladas por eixo. Para esse propósito, foram realizadas simulações no *software SysTrain*, utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF), com dados provenientes de ensaios já realizados no laboratório de solos do Instituto Militar de Engenharia (IME), provenientes da Ferrovia Centro Atlântica - FCA. Os resultados obtidos indicam que, embora o "alteamento do lastro" resulte em um aumento na espessura da camada, usando material de boa qualidade, a resiliência da estrutura como um todo é afetada, pelo fato do material degradado permanece no pavimento. Além do acréscimo nos níveis de tensões que chegam às camadas menos nobres como o subleito, devido o aumento do peso da estrutura. Incrementos na carga aplicada em diferentes espessuras resultaram em deslocamentos elásticos variando de 3,64 a 6,45 mm. Para uma carga de 40 tf/eixo e uma espessura de 60 cm, uma deformação vertical de 6,45 mm foi observada, ultrapassando os limites estabelecidos pela Arema (2013). Portanto, os resultados deste estudo destacam a importância de uma avaliação minuciosa dos impactos estruturais ao considerar o "alteamento do lastro" como uma alternativa de manutenção ferroviária, particularmente em ferrovias de carga pesada, a fim de garantir a segurança, a eficiência e a durabilidade do sistema ferroviário.

PALAVRAS-CHAVE: Lastro ferroviário; Manutenção preventiva; Colmatação; Alteamento do lastro e Impacto estrutural

ABSTRACT: Railway ballast is a granular layer that lies immediately below the sleepers and performs critical functions in the railway system, cushioning the stresses in the underlying layers, providing stability to the railway sidewalk and allowing rainwater to run off properly. Over the lifetime of the railway sidewalk, the

initial condition of the ballast changes due to the wear of the aggregates and the ingress of fine particles from the lower layers and the surface. This results in the clogging of the layer, known as plugging. The preferred technique for restoring the desired characteristics is to strip the ballast by partially or completely replacing the layer. However, due to the high cost associated with this procedure, some railway operators opt for an alternative known as "ballast lifting". This technique involves adding a new layer of ballast on top of the existing structure. This study is dedicated to evaluating the structural impact of applying different thicknesses of ballast on a Heavy Haul railroad, subjected to the loads normally used on this type of sidewalk, ranging from 27.5 to 40 tons per axle. For this purpose, simulations were carried out in the SysTrain software, using the Finite Element Method (FEM), with data from tests already carried out in the soil laboratory of the Military Engineering Institute (IME), from the Ferrovia Centro Atlântica - FCA. The results obtained indicate that, although "ballast lifting" results in an increase in the thickness of the layer, using good quality material, the resilience of the structure as a whole is affected because the degraded material remains in the sidewalk. This is in addition to the increase in stress levels reaching the less noble layers such as the subgrade, due to the increased weight of the structure. Increases in the load applied at different thicknesses resulted in elastic displacements ranging from 3.64 to 6.45 mm. For a load of 40 tf/shaft and a thickness of 60 cm, a vertical deformation of 6.45 mm was observed, exceeding the limits set by Arema (2013). Therefore, the results of this study highlight the importance of a thorough assessment of structural impacts when considering "ballast lifting" as a railroad maintenance alternative, particularly on heavy-load railroads, in order to guarantee the safety, efficiency and durability of the railroad system

KEYWORDS: Railway ballast; Preventive maintenance; Fouling; Ballast Elevation and Structural Impact

1 INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário desempenha um papel de extrema importância no cenário econômico e de infraestrutura de uma nação, e sua relevância vai além de questões puramente logísticas. A capacidade de transporte em grande escala, eficiência energética, baixo impacto ambiental, além da segurança e eficiência econômica, tornam o modal ferroviário uma ferramenta crucial para o desenvolvimento sustentável de regiões e países.

Nesse contexto, é importante compreender o comportamento da estrutura do pavimento ferroviário, a fim de garantir seu correto funcionamento e eficiência econômica em todas as fases das operações ferroviárias, incluindo construção, operação, manutenção, expansão e integração com outros modais de transporte.

Segundo Steffler (2013), a via permanente pode ser entendida como a infraestrutura necessária destinada a sustentar e distribuir as cargas ferroviárias, viabilizando a circulação segura, confiável e disponível dos trens.

Para Spada (2003), a via férrea pode ser considerada como um sistema composto por várias camadas que suportam cargas verticais. Essa representação fornece uma base sólida para prever o desempenho da ferrovia, ajudando na escolha de soluções técnicas e econômicas viáveis em projetos ferroviários, bem como na definição de procedimentos eficientes de manutenção para as vias em funcionamento.

No que diz respeito à confiabilidade do sistema, conforme ressaltado por Selig e Waters (1994), as interações entre os diversos componentes da via férrea, quando sujeitas às cargas dinâmicas dos trens, influenciam no desempenho do sistema como um todo.

As vias permanentes ferroviárias podem ser divididas em duas categorias distintas: as tradicionais, que utilizam lastro, e as não lastreadas, que são construídas com lajes de concreto. Este estudo concentra-se nas vias ferroviárias lastreadas, que, segundo Indraratna et al. (2011), apresentam como vantagens alta condutividade hidráulica na camada de lastro, relativa economia e maior facilidade de manutenção.

Por outro lado, os autores apontam a degradação do lastro como principal desvantagem desse tipo de via, conforme o número de ciclos de carga aumenta. Isso resulta na fratura das bordas das partículas no ponto de contato e na produção de partículas finas, o que reduz a capacidade de drenagem da camada. Como resultado, pode ocorrer acúmulo de deformações permanentes e alteração da geometria da via ao longo do tempo.

Para garantir a segurança e a eficiência das operações ferroviárias, bem como uma boa elasticidade, drenagem e capacidade de suporte o desguarnecimento do lastro é uma prática importante visando manter o lastro em boas condições de operação.

No entanto, devido ao alto custo associado a esse procedimento, alguns operadores ferroviários optam por uma alternativa conhecida como "alçamento do lastro", técnica que envolve a adição de uma nova camada de lastro sobre a estrutura existente que apresenta problemas estruturais. Contudo, essa prática pode gerar impactos negativos à estrutura da ferrovia, já que abaixo da camada a ser adicionada existe um lastro degradado. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo avaliar o impacto estrutural do uso da técnica "alçamento do lastro" em uma ferrovia Heavy Haul, através de simulações realizadas com o software Systrain, baseado em dados provenientes de ensaios já realizados em materiais provenientes da Ferrovia Centro Atlântica - FCA.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Pavimento Ferroviário

Conforme proposto por Medina & Motta (2015), o termo "pavimento ferroviário" refere-se a um sistema estratificado composto por subleito, sublastro, lastro, dormente e trilhos (Figura 1), com a finalidade de resistir aos esforços provocados pela passagem das composições ferroviária.

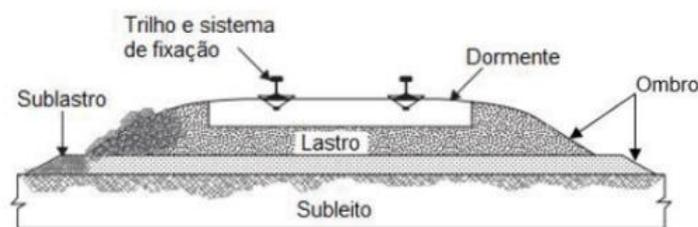


Figura 1. Pavimento ferroviário, adaptado de Indraratna *et al.* (2011)

Adicionalmente, os componentes da via permanente são subdivididos entre superestrutura e infraestrutura, sendo que há divergências entre divisão considerada por autores nacionais e internacionais (MEDINA; MOTTA, 2015). Para fins deste trabalho, será adotada a divisão feita por Li *et al* (2015), que considera como camada de infraestrutura os elementos de lastro, sublastro e subleito. Sendo os elementos de trilho, dormentes e elementos de fixação constituintes da camada de superestrutura.

A metodologia adotada para o dimensionamento dos pavimentos ferroviários é baseada em estudos empíricos e analíticos desenvolvidos por inúmeros autores sobre a interação entre as camadas de forma isolada, não considerando a estrutura em conjunto. Ainda assim, o dimensionado deve ser realizado de modo a atender os limites de: tensões de flexão de trilhos; tensões de flexão dos dormentes; deflexão dos trilhos ou da via permanente; tensão do lastro; tensões ou deformações do subleito; e módulo de via ou rigidez da via permitida. A Tabela 1 apresenta alguns valores limite a serem considerados na elaboração de projetos de pavimento ferroviário.

Tabela 1. Valores limite para projetos de pavimento ferroviário, adaptado de Gomes (2022)

	Valor admissível	Referência
Tensão na interface dormente /lastro	448 kPa (dormente de madeira)	(AREMA, 2013; ASSAD, 2007)
	586 kPa (dormente de concreto)	
	500 kPa (dormente de plástico reciclado)	
Deflexão	6,35 mm	(AREMA, 2013; HAY, 1991; LUNDGREN; MARTIN; HAY, 1970; SILVA FILHO, 2018)
	5,00 mm	
	5,10 mm	
	4,40 mm	
Tensão no subleito	175 kPa	(AREMA, 2013)
Tensão no trilho	175 kPa	(AREMA, 2013)
Módulo de via	$u > 28$ MPa	(SELIG; LI, 1994;
	$35 \text{ MPa} < u < 70 \text{ MP}$	RAYMOND, 1985a)

Dentre as premissas a serem consideradas no dimensionamento, Medina & Motta (2015) citam: tráfego, clima, geologia, geotecnia, condições ambientais, topografia, drenagem e aspectos operacionais. Ademais, características como granulometria, deformação permanente e módulo de resiliência devem ser avaliadas na escolha dos materiais.

2.2 Módulo de Resiliência

Conforme exposto por Arema (2009), um dos principais indicadores da qualidade do material a ser empregado nas camadas dos pavimentos é o Módulo de Resiliência (MR), sendo este essencial para a definição das tensões e deformações previstas nas camadas de infraestrutura do pavimento, assim como para a avaliação do sistema como um todo.

Estudos conduzidos por Selig e Waters (1994) identificaram que o MR de materiais sem coesão, como o lastro, aumentava significativamente à medida que a tensão confinante aumentava. Além disso, observou-se que o MR era menos sensível ao aumento da tensão desvio.

Nos termos da DNER-ME 134/2018, o MR pode ser obtido por meio de ensaios triaxiais de cargas repetidas, sendo aplicados 18 pares de tensões, com frequência de 1Hz, entre outros aspectos, podendo ser expresso pela Equação 1:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad \text{Eq. 1}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\delta_r}{H_0} \quad \text{Eq. 1.1}$$

Onde: MR – Módulo Resiliente (geralmente expresso em MPa ou kPa); σ_d – Tensão desvio ou tensão desviadora ($\sigma_1 - \sigma_3$); ε_r – Deformação recuperável ou resiliente (%); δ_r – Deslocamento resiliente ou recuperável (mm); e H_0 – Altura de referência do medidor de deslocamento (LVDT - Linear Variable Differential Transformer), descontado o deslocamento plástico ou permanente acumulado correspondente à tensão desvio usada no cálculo (mm).

Bathurst e Raymond (1987) destaca a relevância do comportamento resiliente, que em se tratando de lastro de ferrovias é fundamental para entender as características dos materiais componentes da subestrutura que afetam a degradação e deformação da via.

2.3 Software SysTrain

Desenvolvido em 2016, por meio da parceria entre as empresas VALE, Elgayer e o Instituto Militar de Engenharia (IME), o *software SysTrain* possibilita utilizar o Método dos Elementos Finitos para simular a plataforma ferroviária, permitindo analisar o comportamento estrutural de pavimentos ferroviários submetidos às cargas dos vagões, auxiliando no dimensionamento dos trilhos, dormentes e camadas.

Além disso, o software contém uma ferramenta denominada MRCal, que permite a obtenção dos valores de Módulo de Resiliência dos materiais a serem usados nas camadas de infraestrutura através dos seguintes modelos de cálculo (Tabela 2).

Tabela 2. Modelos para previsão de MR

Modelos de Referência	Formulação
Composto (Svenson, 1980; Macêdo, 1996)	$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$
Witczak e Rada (1981)	$MR = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_{sum}}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_3}$
Witczak e Uzan (1988)	$MR = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_{sum}}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_{oct}}{P_a} \right)^{k_3}$
Titi et al. (2006)	$MR = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_{sum}}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_3}$

Ni et al. (2002)	$MR = k_1 \left(\frac{\sigma_3}{P_a} + 1 \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$
NCHRP 1-28A (2004)	$MR = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$

Em que: MR: Módulo de Resiliência (MPa); k_1 , k_2 e k_3 : Coeficientes de regressão; σ_{sum} : soma das tensões principais/invariante de tensões (kPa); σ_{oct} : Tensão octaédrica (kPa); P_a : Pressão atmosférica; σ_3 : Tensão confinante (kPa); σ_d : Tensão desvio (kPa).

Dentre os citados, no Brasil o Modelo Composto é um dos que mais se destaca por sua capacidade de representar o comportamento elástico dos materiais granulares (SVENSON, 1980; MACÉDO, 1996).

3 METODOLOGIA

Para a simulação numérica da estrutura do pavimento ferroviário foi considerada a geometria existente, conforme dados levantados em campo por Rosa (2020), sendo o perfil da via composto pelas camadas de subleito, uma camada média de 40 cm de lastro degradado, e uma camada de lastro de 20 cm.

O dado de entrada referente à camada de subleito foi obtido pelo estudo desenvolvido por Rosa (2020), que coletou amostras em diversos pontos da Ferrovia Centro-Atlântica (FCA), entre as cidades de Ituverana e Ribeirão Preto, em São Paulo. A partir das fichas de ensaio triaxiais de cargas repetidas presentes em seu estudo, foi obtido o Módulo de Resiliência da amostra, utilizando a ferramenta MRCal, presente no SysTrain. Como referência para o cálculo do MR foi considerado o Modelo Composto, sendo este o que mais se adequou aos resultados em função das tensões desviatória e de confinamento.

Os parâmetros relacionados ao lastro em condição de colmatção foram retirados do banco de dados de ensaios realizados no laboratório de solos do Instituto Militar de Engenharia (IME). As amostras analisadas foram coletadas da mesma seção da Ferrovia Centro Atlântica - FCA que foi estudada por Rosa (2020). As características do material são apresentadas na Tabela 3. Já para camada de lastro foi utilizada a informação do *software SysTrain* para material granular como um MR de 200 Mpa.

Tabela 3. Módulo de Resiliência do lastro colmatado

Amostra	MR Médio (MPa)	MR Composto - <i>Systrain</i>			
		k_1	k_2	k_3	R^2
E 375+900	189,11	928,88	0,52	0,08	0,9595

A Tabela 4 apresenta as características relativas aos itens de trilhos, dormentes e fixadores utilizados nas simulações. Cabe ressaltar que as características desses elementos se mantiveram inalteradas nas simulações.

Tabela 4. Propriedades dos materiais da grade definidos para simulações, adaptado de Rosa (2020)

Nome	Camada	Tipo	Massa	Módulo	Coef. de Poisson
			Específica (kg/m ³)	Elasticidade (GPa)	
Aço	TR -68	Linear isotrópico	7.850	210	0,30
Concreto	Dormente	Linear isotrópico	2.400	32	0,30
Rigidez de Mola					
Grampo	Grampo	K_x	K_y	K_z (Tração)	K_z (Compressão)
		10.000	10.000	100.000	170.000

Adicionalmente, em todas as simulações foram consideradas as mesmas configurações de geometria para os demais elementos de superestrutura, infraestrutura e composição de trem, a saber: (1) bitola de 1,00m; (2) espaçamento entre os dormentes de 0,6m; ombreira do lastro de 40cm; declividade do talude do lastro (H:V) de 1,5; declividade de fundo do lastro de 3% para ambos os lados, considerando encobrimento de

dormente; (3) ombreira do lastro colmatado de 0,5m; talude do lastro colmatado (H:V) de 1,2; declividade de fundo do lastro colmatado de 1%; altura do subleito de 200cm; ombreira do subleito de 2m; talude do subleito (H:V) de 1,5; declividade de fundo do subleito de 1%; (4) vagões tipo Hooper, com 2 truques, distância do engate ao eixo de 1,21m, distância entre eixos de 1,7m, distância entre truques de 13,945m, composição com 2 membros, carga variando entre 110 e 160 toneladas cada, considerando efeitos dinâmicos dos vagões nesta modelagem; seção em análise considerada a partir quarto eixo do primeiro vagão, com quantidade de 2 eixos consecutivos, levando em conta a simetria, localizada no meio do vão entre dormentes, tendo como referência o quarto eixo e considerando para efeitos de cálculo, quatro dormentes além das cargas externas; e (5) posição do carregamento correspondendo a localidade mais crítica do carregamento da composição, correspondendo a região entre 2 vagões. Portanto a carga é formada pelo rodeiro traseiro do segundo truque em um vagão, e no vagão seguinte sendo composta pelo rodeiro dianteiro do primeiro truque, conforme apresentado na Figura 2.

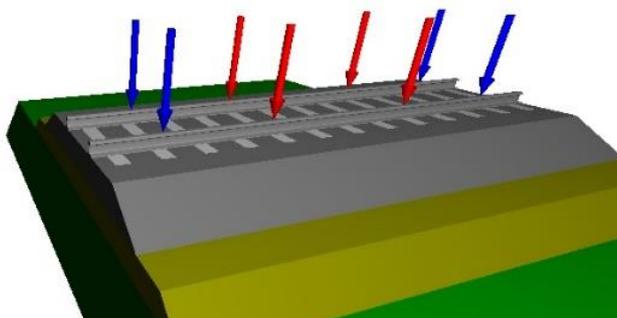


Figura 2. Posicionamento do carregamento para modelagem computacional

Para avaliar o comportamento estrutural do pavimento, foram realizadas 15 simulações. A partir da condição inicialmente existente, foram simulados cenários nos quais a camada de alteamento de lastro variou entre 20 e 60 cm, com um incremento de 10 cm a cada simulação. Além disso, para cada faixa de alteamento, foram verificadas as condições da via submetida às cargas de 110, 130 e 160 t por vagão, ou seja, 27,5, 32,5 e 40 tf/eixo, cargas usualmente utilizadas nesse tipo de via, acrescida de um fator de magnitude dinâmico, expresso pela Equação 2 (LI e SELIG,1998; AREMA, 2013):

$$P_{di} = \left(1 + \left(\frac{0,0052V}{D} \right) \right) P_{si} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde: P_{di} é a carga dinâmica, os valores calculados para serem utilizados nas simulações foram de 134,12, 174,36 e 214,59 toneladas, respectivamente; V é a velocidade de tráfego (km/h), considerada 60 km/h; D é o diâmetro da roda (m), considerado diâmetro da roda de 36 polegadas (0,9144m); e P_{si} é a carga estática;

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio das simulações realizadas no *software SysTrain*, foi possível avaliar o comportamento do pavimento ferroviário em diferentes alturas de lastro e sob diferentes tensões aplicadas. A Tabela 5 apresenta os valores de deslocamento (z), em mm, para cada cenário simulado.

Tabela 5. Deslocamento z simulado

Altura lastro (cm)	Deslocamento z (mm)		
	Carga de 27,5 tf/Eixo	Carga de 32,5 tf/Eixo	Carga de 40 tf/Eixo
20 cm	3,64	4,72	5,81
30 cm	3,75	4,87	5,98
40 cm	3,85	5,00	6,15
50 cm	3,95	5,13	6,30
60 cm	4,04	5,25	6,45

O deslocamento vertical do pavimento aumenta à medida que a espessura da camada de lastro aumenta. Para um lastro com espessura de 50 cm, sujeito a uma carga de 40tf/eixo, o deslocamento máximo se aproxima do limite estabelecido pela Arema (2013) de 6,35 mm. No entanto, para uma altura de lastro de 60 cm e mesma carga, o deslocamento excede o valor máximo especificado pela Arema (2013) (Figura 2), demonstrando que, em relação ao deslocamento, com a técnica de “alteamento de lastro”, ao manter o solo colmatado e aumentar a espessura da camada, há um impacto negativo nos parâmetros de segurança da via, evidenciado em ferrovias que transportam cargas mais elevadas.

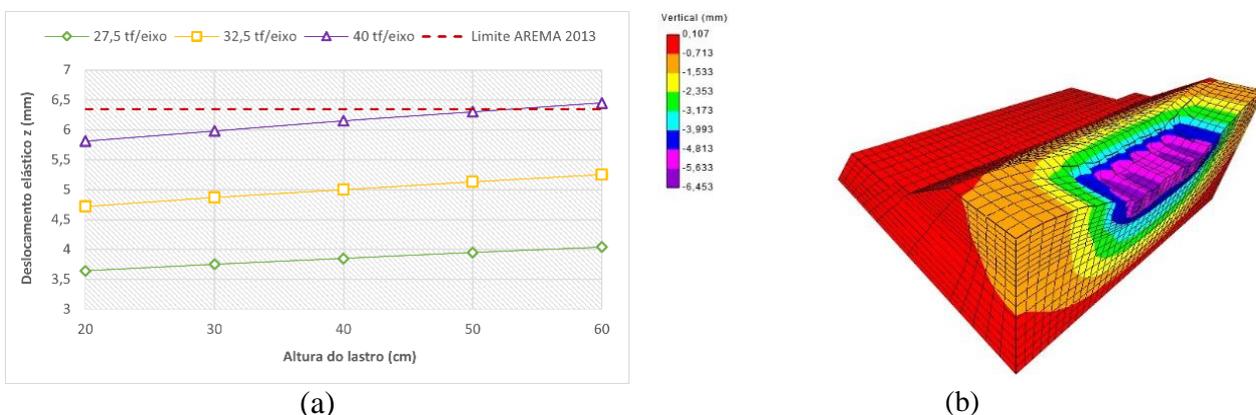


Figura 2. (a) Deslocamento elástico z em função da altura do lastro e da carga e (b) Deslocamento elástico da simulação no *software SysTrain*

Conforme destacado por Sousa Pinto (2000) e Selig e Waters (1994), quando a quantidade de materiais finos no lastro excede 30% em massa, o comportamento do conjunto passa a ser controlado por esse material, resultando na redução do Módulo de Resiliência devido ao aumento das deformações plásticas. Esse fenômeno pode ser ainda agravado pela presença de água, que faz com que os finos atuem como lubrificantes no contato entre os agregados, resultando em um maior deslocamento do conjunto sujeito à carga. Indraratna et al (2011) também indicam que, devido à retenção de água pelos materiais finos, a rigidez do sistema diminui e a abrasão entre os agregados maiores aumenta. Ainda, como constatado por Merheb (2014), a contaminação da estrutura pela umidade provoca danos à ferrovia, acarretando o aparecimento de defeitos geométricos, desgaste dos componentes da via, e maior recorrência da necessidade de manutenção. Conforme constatado por Rosa (2020), nos pontos de estudo, verificou-se a presença de água em afloramento na altura do lastro degradado, corroborando com os resultados obtidos na simulação.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos nas simulações, foi possível observar como diferentes espessuras de lastro e cenários de carregamento afetam o comportamento estrutural do pavimento. As avaliações realizadas neste estudo foram limitadas a avaliar as deformações elásticas no pavimento, sem excluir a necessidade de considerar as tensões aplicadas em cada camada, sejam elas inferiores ou superiores às tensões admissíveis correspondentes de cada material.

Os dados mostram que aumentar a espessura da camada de lastro sem tratar adequadamente o material degradado resulta em maiores deformações verticais, o que prejudica a segurança e durabilidade da estrutura. Para cargas mais pesadas, de 40 tf/eixo, e uma espessura de 60 cm de lastro, a deformação vertical observada excede os limites de segurança estabelecidos pela Arema (2013) de 6,35 mm.

Nesse contexto, a suposta redução de custos ao implementar o "alteamento do lastro" pode acarretar maiores despesas com a manutenção da via e, eventualmente, comprometer a segurança operacional. Portanto, é necessária uma avaliação minuciosa dos impactos estruturais ao considerar o "alteamento do lastro" como uma alternativa para a manutenção ferroviária, especialmente em ferrovias com cargas pesadas tipo *heavy haul*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AREMA (2009). *Manual for Railway Engineering*. American Railway Engineering. Washington, D.C.
- AREMA (2013). *Manual for Railway Engineering*. American Railway Engineering Engineering and Maintenance. Washington, D.C.
- Bathurst, R.J.; Raymond, G.P. (1987). *Geogrid reinforcement of ballasted track*. Transportation Research Record, TRB, Vol 1153, pp. 8-14.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). DNIT-ME 134/18. *Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Indraratna B.; Salim, W.; Rujikiatkamjorn, C. (2011). *Advanced rail geotechnology–ballasted track*. Taylor & Francis Group, 413 p.
- Li, D.; Hyslip, J.; Sussmann, T.; Chrismer, S. (2015). *Railway geotechnics*. [S.l.]: CRC Press.
- Li, D.; Selig; Ernest T. (1998). *Method for railroad track foundation design*. I: Development. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, v. 124, n. 4, p. 316-322.
- Macêdo, J. A. G. D. (1996). *Interpretação de Ensaios de Defletométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Medina, J. L., Motta, L. M. G. (2015). *Mecânica dos Pavimentos*. Editora Interciência, 3ª ed.
- Merheb, A. H. M. (2014) *Análise mecânica do lastro ferroviário por meio de ensaios triaxiais cíclicos*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. 148 p.
- NHCRPP 1-28A. (2004) *Summary of the 2000, 2001, and 2002 AASHTO guide for the design of new and rehabilitated pavement structures*. National Cooperative Highway Research Program.
- Ni, B.; Hopkins, T.; Sun, L.; Beckham, T. (2002). *Modeling the resilient modulus of soils*. In: *Proceedings of the 6th international conference on the bearing capacity of roads and airfields*. Lisbon, Portugal: 24-26 junho 2002. v. 2.
- Rosa, A. C. (2020). *Análise mecânica do pavimento ferroviário de um trecho da Ferrovia Centro-Atlântica*. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 318 p.
- Rosa, A. F. (2019). *Efeito Da Granulometria E Da Litologia No Comportamento De Lastros Ferroviários Em Laboratório E Por Análise Computacional*. Masters Thesis, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Selig, E. T.; Waters, J. M. (1994). *Track geotechnology and substructure management*. London: Thomas Telford, 450 p.
- Sousa, P. C. (2000). *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*. 3ª Edição. São Paulo. Oficina de Textos. 247 p.
- Spada, J.L.G., (2003) *Uma abordagem de mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento do mecanismo de comportamento tensão-deformação da via férrea*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Steffler, F., (2013) *Via permanente aplicada: guia teórico e prático*. Rio de Janeiro: LTC, 306 p. il. ISBN 978-85-216-2191-1.
- Svenson, M. (1980). *Ensaio triaxiais dinâmicos de solos argilosos*. Dissertação de Mestrado. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 144 p.
- Tití, H. H.; Elias, M. B.; Helwany, S. (2006). *Determination of typical resilient modulus values for selected soils in Wisconsin*. [S.l.], 2006.
- Witczak, M. W. ;Rada, G. (1981). *Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Moduli Results for Granular Material*. Transportation Research Record, p. 23–33.
- Witczak, M.; Uzan, J. (1988). *The universal airport pavement design system, report i of iv: Granular material characterization*. University of Maryland, College Park, MD.