

19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

ANÁLISE PARAMÉTRICA DA ESPESSURA DO LASTRO PARA DEFORMAÇÕES ELASTOPLÁSTICAS NO PAVIMENTO FERROVIÁRIO

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

*Maelckson Bruno Barros Gomes*¹; *Juliana Tanabe Assad dos Santos*²; *Bárbara Drummond Almeida*³; *Gleyciane Almeida Serra*⁴; *Antonio Carlos Rodrigues Guimarães*⁵

RESUMO

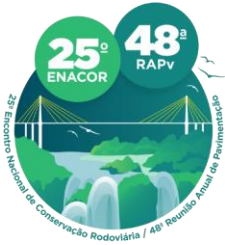
No contexto do aumento de investimentos no modo ferroviário no Brasil observado nos últimos anos, entende-se a necessidade de garantir a qualidade do pavimento assim como preparar a estrutura para o recebimento de mais cargas no futuro. Dessa forma, o presente trabalho propõe uma análise paramétrica da variação da espessura do lastro no que se refere às deformações elásticas e plásticas das camadas de lastro, sublastro e subleito. Para isso, foram utilizados dados de Módulo de Resiliência (MR) de materiais de lastro, sublastro e subleito disponíveis na literatura para simulação numérica no software systrain. Os dados de saída dessa ferramenta permitiram a avaliação das tensões e deformações elásticas de um pavimento de estrutura fixa com variação da espessura de lastro entre os valores de 20 cm e 40 cm. Para análise do comportamento plástico, foram utilizadas equações de Deformação Permanente (DP) dos mesmos materiais simulados e verificadas as deformações plásticas de cada camada considerando as tensões obtidas nas simulações considerando um número N típico de uma ferrovia *heavy haul*. Os resultados desse estudo indicaram que espessura da camada de lastro tem influência direta no desempenho estrutural do pavimento. Nesse sentido, observou-se que para os materiais selecionados, a espessura de 30 cm demonstrou o melhor desempenho dentro os cenários estabelecidos.

PALAVRAS-CHAVE: deformação elástica; deformação plástica; pavimento ferroviário; simulação numérica.

ABSTRACT

Considering the increase in investments in the railway mode in Brazil observed in recent years, it is understood the need to guarantee pavement quality as well as to prepare the structure to receive more loads in the future. Thus, the present work proposes a parametric analysis of ballast thickness variation regarding the elastic and plastic deformations of ballast, subballast and subgrade layers. For this, Resilient Modulus (RM) data of ballast, subballast and subgrade materials available in the literature were used for numerical simulation in the systrain software. The output data of this tool allowed the evaluation of elastic stresses and deformations of a pavement with a fixed structure with variation in ballast thickness between values of 20 cm and 40 cm. For plastic behavior analysis, Permanent Deformation (DP) equations of the same simulated materials were used and the plastic deformations of each layer were verified considering the stresses obtained in the simulations considering a typical N number of a heavy haul railroad. The results of this study indicated that ballast thickness has a direct influence on the structural performance of pavement. In this sense, it was observed that for the selected materials, the thickness of 30 cm showed the best performance within the established scenarios.

KEY WORDS: elastic deformation; plastic deformation; railway pavement; numerical simulation.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

Observa-se dentro do contexto brasileiro uma grande retomada nos investimentos no setor ferroviário, desde quando foram iniciadas as novas autorizações ferroviárias, em 2021, até o mês de maio de 2023 foram assinados 35 novos contratos de adesão, segundo dados publicados no site da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT, (2023). Esse crescimento também é apontado e estimulado por alguns cenários vistos no Plano Nacional de Logística - PNL 2035, (2021). Além do crescimento em termos logísticos e de investimento, esse interesse aponta para a necessidade pujante de construção de novas ferrovias e da renovação de trechos existentes. Nesse sentido, este trabalho traz informações relevantes quanto ao comportamento mecânico do lastro segundo à mecânica dos pavimentos.

Indraratna, Su e Rujikiatkamjorn (2011) afirmam que o lastro é composto por agregado angular uniformemente graduado em complemento a definição de Selig e Waters (1994) que apontam que lastro é o material granular selecionado e britado colocado como camada superior da estrutura em que os dormentes estão assentes. Selig e Waters (1994) também escrevem sobre algumas das principais funções do lastro, tais como a resistência vertical, resiliência e absorção de energia, drenagem, fácil rearranjo das partículas e manutenção da camada, além de distribuir as cargas para as camadas inferiores. É possível, portanto, entender que a avaliação da resiliência do lastro é fator importante para o dimensionamento das ferrovias.

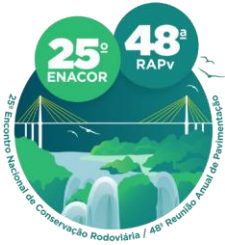
Em relação à análise do comportamento mecânico do lastro à luz da mecânica dos pavimentos, dois conceitos podem ser analisados, o Módulo de Resiliência (MR) e a Deformação Permanente (DP). Segundo Spada (2003), a relação entre as tensões transientes verticais e a correspondente deformação recuperável é por definição o módulo de resiliência (MR). Quanto à deformação permanente, Para Rangel *et al* (2015) no contexto de pavimentos ferroviários é o deslocamento vertical irreversível resultante da mesma solicitação, que tem o efeito de ser acumulativo ao longo das solicitações e assim provoca um dos principais defeitos da via que é o desnivelamento dos dormentes e trilhos.

Esses dois parâmetros podem ser obtidos realizando-se ensaios triaxiais cíclicos e podem ser utilizados na análise, simulação e dimensionamento do pavimento amparados dos demais ensaios de caracterização. Em relação ao MR, alguns fatores podem influenciar, Medina e Preussler (1982), Svenson (1980) e Li e Selig (1994) apontam os principais: razão de tensões principais; intensidade de tensões; número de repetições da tensão-desvio; história de tensões; duração e frequência de aplicação da tensão-desvio; tipo de agregado; percentagem de material que passa na peneira de malha #200; densidade e umidade de compactação; grau de saturação; método de compactação e número de aplicações de carga.

Já para a DP, Guimarães (2009) apresenta alguns dos fatores que afetam a deformação permanente em solos e britas, quais sejam: estado de tensões, rotação das tensões principais com o deslocamento da carga de roda e história de tensões; magnitude, número de aplicações, duração, frequência e sequência de carga; percentual de umidade, permeabilidade do material, grau de saturação e poro-pressão e tipo de agregado, forma da partícula, granulometria, porcentagem de finos, tamanho máximo dos grãos e massa específica real dos grãos.

Autores como Gonçalves (2021), Rosa *et al* (2019), Teixeira (2020), Silva Filho (2018), Witiuk *et al*. (2023), Gomes *et al* (2022), Fonte, Vieira e Oda (2022) e Rosa (2020) apresentam em seus estudos a utilização do *Software* Systrain. Essa ferramenta, permite utilizar elementos finitos para modelar a plataforma ferroviária e simular sua utilização, obtendo resultados de tensão e deformação máximas a que cada camada e/ou elemento é submetido durante o carregamento.

Lopes, Guimarães e Aragão (2018) analisaram, também utilizando o Systrain, a influência no comportamento mecânico causada pelo aumento da carga por eixo. Em seu estudo analisaram como



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



o aumento de 32 para 40 toneladas por eixo impactam em fatores como deflexão nos trilhos, pressão no contato dormente/lastro e tensões no sublastro e subleito. Como resultado do estudo, apontam que para o incremento de carga impactou de maneira considerável os parâmetros das camadas de sublastro e subleito.

A hipótese deste trabalho é que além de incrementos de carga o aumento da espessura da camada de lastro impacta significativamente no comportamento elastoplástico. Para isso, foram realizadas diversas simulações utilizando o *Software* Systrain e alterando-se a espessura da camada de lastro. Além disso, verificou-se também a influência do incremento da carga por eixo através de simulações com espessura fixa de 30 cm de lastro.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado como lastro é um agregado siderúrgico estudado por Gomes (2022), que em seus trabalhos submeteu o material a ensaios triaxiais cíclicos em corpos de prova 15x30cm obtendo o modelo de Módulo Resiliente composto médio para suas amostras. Já os solos definidos como sublastro e subleito foram estudados por Santos (2022), ambos foram encontrados próximo a região onde está sendo construída a Ferrovia de Integração Leste Oeste – FIOLO, na Bahia. O solo J é um solo não laterítico do tipo NA', ou seja, uma mistura de areias quartzosas com finos não lateríticos, já o solo A trata-se de solo argiloso não laterítico. Um resumo das características das camadas granulares é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades dos solos utilizados nas simulações.

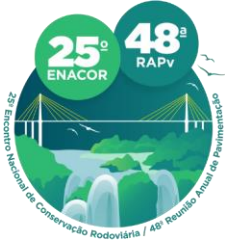
Nome	Camada	Espessura (cm)	Tipo	Massa Específica (kg/m ³)	K ₁ (*)	K ₂ (*)	K ₃ (*)	Poisson
Brita_Gomes (2022)	Lastro	Variável	Resiliente Comp.	1801	2030,3	0,60	0,10	0,30
Solo J_Santos (2022)	Sublastro	20	Resiliente Comp.	2020	2910,0	0,68	0,20	0,30
Solo A_Santos (2022)	Subleito	200	Resiliente Comp.	1830	1172,9	0,60	0,00	0,30

(*) Valores de K₁, K₂ e K₃ obtidos a partir do Modelo Composto, proposto por Macêdo (1996).

As características dos trilhos, dormentes e fixadores utilizados já vem por padrão no software, para esclarecimento, os materiais da grade utilizados para a modelagem são descritos na Tabela 2. Essas características foram mantidas em todas as simulações.

Tabela 2. Propriedades dos materiais definidos para simulações.

Nome	Camada	Tipo	Massa Específica (kg/m ³)	Módulo Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson
Aço	Trilho TR-57	Linear Isotrópico	7850	210	0,3
Concreto	Dormente	Linear Isotrópico	2400	32	0,3
Rigidez de Mola					
Grampo	Grampo	K _x	K _y	K _z (Tração)	K _z (Compressão)
		10000	10000	100000	170000



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Para análise das deformações no pavimento foram realizadas dez simulações numéricas tendo como base a caracterização física e mecânica dos materiais definidos. No que se refere às variações de parâmetros, as simulações foram divididas em dois grupos: O primeiro (simulações 1 a 5) busca realizar uma análise paramétrica considerando a variação da espessura do lastro. Já o segundo grupo (simulações 6 a 10) busca avaliar o comportamento do pavimento mediante o aumento das cargas atuantes. O resumo dos parâmetros adotados em cada simulação é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Resumo dos parâmetros das simulações executadas.

Simulação	Carga por eixo (t/eixo)	Espessura lastro (cm)
1	32	20
2	32	25
3	32	30
4	32	35
5	32	40
6	20	30
7	25	30
8	32	30
9	36	30
10	40	30

Existem diferentes modelos e equações matemáticas que buscam descrever a DP. A norma brasileira recomenda o modelo de Guimarães (2009), que foi desenvolvido para prever a contribuição de cada material para a DP total durante o dimensionamento mecanístico-empírico do pavimento, além de permitir verificar a tendência de ruptura ou acomodação das deformações.

Em vista disso, para o cálculo das DP's foi considerado que somente as camadas granulares deformam-se plasticamente, tendo em vista que foram avaliadas as deformações das camadas de lastro, sublastro e subleito para definir a DP do pavimento como um todo. Assim sendo, foi utilizada a Equação 1 para o cálculo da DP total do pavimento e a Equação 2 para o cálculo da DP de cada camada.

$$\rho_{total} = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{p(i)} \cdot h_i) \quad (1)$$

$$\varepsilon_p (\%) = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{ref}} \right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{ref}} \right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (2)$$

onde:

ρ = deslocamento plástico;

ε_p = deformação plástica;

h = espessura da camada;

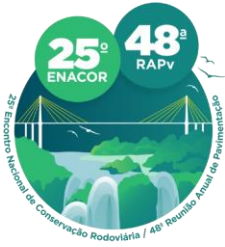
Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 e Ψ_4 = parâmetros regressão;

N = número de repetições de carga;

σ_{ref} = tensão de referência, considerada igual a pressão atmosférica (0,1 MPa);

σ_3 = tensão de confinamento (MPa);

σ_d = tensão desvio (MPa).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Os solos das camadas granulares também foram analisados quanto à deformação permanente, e na Tabela 4 são apresentados os coeficientes encontrados para cada um dos solos.

Tabela 4. Resumo dos parâmetros do modelo de Guimarães (2009) de deformação permanente para os solos estudados.

Nome	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	R^2
Brita_Gomes (2022)	0,0314	-0,0125	0,3880	0,1911	0,85
Solo J_Santos (2022)	0,2234	0,1407	0,5371	0,0634	0,90
Solo A_Santos (2022)	0,3495	-0,5448	0,4777	0,0536	0,71

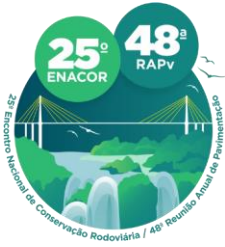
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tensões obtidas

As simulações realizadas permitiram observar a variação das tensões nas camadas. A tensão atuante no pavimento (σ_d e σ_3) são informações necessárias para estabelecer as DPs a longo prazo. Nesse sentido, os dados de saída do programa em relação a esses parâmetros encontram-se indicados na Tabela 5. As simulações permitiram também observar que as tensões máximas no subleito ocorrem até a profundidade máxima de 60 cm, medidas a partir do topo do subleito. Na Figura 1 observa-se a propagação das tensões no subleito em uma das simulações.

Tabela 5. Tensões desvio e confinante atuante nas camadas do pavimento.

Sim.	Carga por eixo (t/eixo)	Espessura lastro (cm)	Tensões no Lastro (kPa)		Tensões no Sublastro (kPa)		Tensões no Subleito (kPa)	
			σ_d	σ_3	σ_d	σ_3	σ_d	σ_3
1	32	20	120,20	46,20	62,60	24,00	58,40	47,40
2	32	25	125,60	48,00	60,10	22,90	50,40	52,60
3	32	30	108,40	49,30	57,60	23,30	48,80	53,60
4	32	35	109,30	49,90	55,40	23,90	50,50	57,30
5	32	40	101,30	52,30	54,10	24,20	46,30	58,70
6	20	30	59,20	31,10	36,00	19,80	34,20	47,10
7	25	30	66,00	36,50	45,10	22,30	39,30	47,40
8	32	30	108,40	49,20	57,60	24,00	48,80	48,00
9	36	30	128,40	69,20	64,20	23,10	55,10	48,10
10	40	30	132,80	91,46	71,10	23,30	64,30	52,00



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

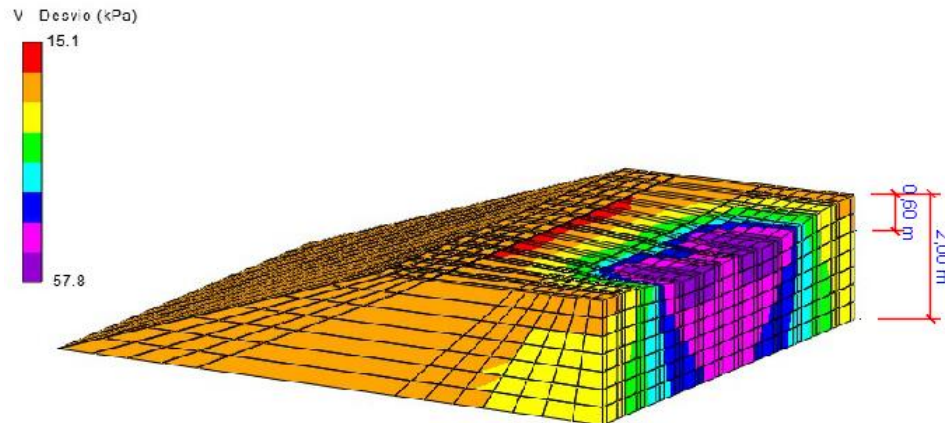


Figura 1: Bulbo de tensões no subleito.

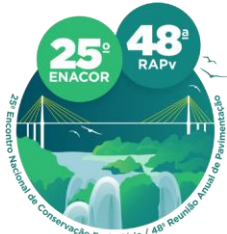
Com os dados de saída do programa, podem ser obtidas as deformações elásticas (DEs) previstas no pavimento com as condições estipuladas. Ademais, com o estado de tensões por camada obtido em cada simulação foram então utilizadas para o cálculo das DPs do pavimento através da equação de Guimarães (2009), cujos resultados são apresentados na Tabela 6. Foi considerado o valor N de 34.295.400, como resultado das seguintes considerações, típicas da operação de uma ferrovia *heavy haul*: 9 pares de trem ao dia, 2 locomotivas com 6 eixos, 84 vagões com 4 eixos, operação durante 365 dias por ano em um projeto com vida útil de 30 anos.

Tabela 6. Resultados de deslocamentos elásticos e plásticos das simulações.

Simulação	Espessura lastro (cm)	t/eixo (t)	Desloc. Elástico (mm)	Desloc. Plástico (mm) (*)
1	20	32	1,415	8,774
2	25	32	1,425	7,858
3	30	32	1,432	7,724
4	35	32	1,440	7,661
5	40	32	1,446	7,340
6	30	20	0,914	6,936
7	30	25	1,133	7,380
8	30	32	1,440	8,172
9	30	36	1,596	8,652
10	30	40	1,755	8,917

(*) Valores de Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 obtidos do modelo de regressão múltipla não linear.

Dessa forma, entende-se como a deformação do pavimento ao fim da vida útil, como os deslocamentos plásticos acumulados. Na Figura 2 tem-se a variação dos deslocamentos elásticos e plásticos em função da variação da espessura do lastro e em função da variação do carregamento.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

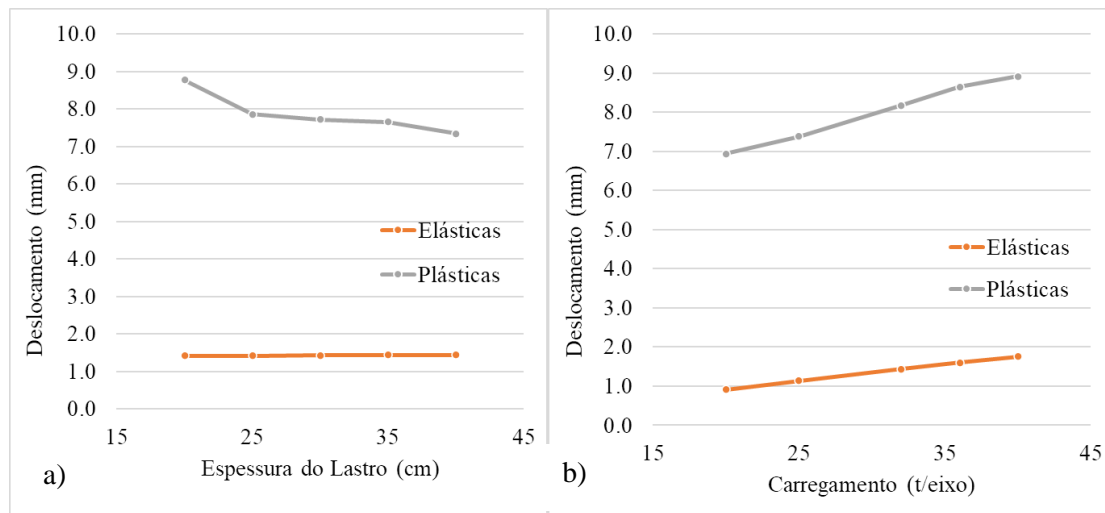


Figura 2. Resultados de deslocamentos elásticos e plásticos das simulações do Grupo 1 (a) e Grupo 2 (b).

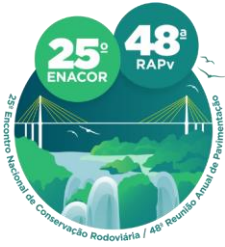
Preliminarmente, observa-se que a variação da espessura da camada de lastro pouco impactou no comportamento elástico do pavimento. Acredita-se que esse fenômeno está relacionado ao fato de que o comportamento resiliente do pavimento é comandado essencialmente pelo seu estado de tensões, uma vez que nos cenários de 1 a 5 o carregamento manteve-se constante, a deformação elástica entre os cenários pouco alterou-se. Por outro lado, a DP do pavimento apresentou variações mais acentuadas quando se modificou a espessura do lastro. Observa-se que conforme a espessura vai aumentando, as deformações vão diminuindo, até atingir um certo patamar. Com a espessura de 40 cm de lastro obteve-se as menores DPs quando fixadas todos os parâmetros constituintes das demais camadas e o carregamento, podendo assim, considerar-se a espessura de 40 cm como a “espessura ótima” para o lastro a partir das condicionantes estabelecidas e sob a ótica das deformações de longo prazo.

Em relação ao comportamento estrutural do pavimento quando ocorre a variação de carregamento e são fixadas as características dos materiais constituintes e as espessuras das camadas, observa-se, como esperado, que as DEs tendem a aumentar conforme há o incremento da carga. O mesmo ocorre com as DPs, que apesar de estar relacionado ao número de solicitações (número N), que foi mantido fixo, está relacionado também ao estado de tensões, que foi intensificado conforme houve o aumento do carregamento.

Para análise da aceitabilidade, no que diz respeito aos deslocamentos plásticos, os resultados foram comparados aos limites recomendados pela AREMA (2020). Conforme a Tabela 7, verificou-se a situação de não admissibilidade para os 10 cenários ao fim da vida útil. Todavia, essa análise deve ser avaliada com cautela. A informação obtida a partir da equação de Guimarães (2009) retorna a DP ao fim da vida útil de projeto e considerando que todas as características do pavimento se manterão invariáveis até o fim da vida útil. Ora, sabe-se que é improvável que o pavimento ferroviário mantenha o comportamento por um período tão longo, isso é justificado pelos constantes serviços de manutenção de via, a exemplo do serviço de renovação do lastro.

Tabela 7. Deslocamento do pavimento.

Cenário	Deslocamento previsto (mm)	Deslocamento máximo (mm)	Check Def.<Def. máx.	% acima
1	8.774	6,350	NOk!	38%



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



2	7.858	6,350	NOK!	24%
3	7.724	6,350	NOK!	22%
4	7.661	6,350	NOK!	21%
5	7.340	6,350	NOK!	16%
6	6.936	6,350	NOK!	9%
7	7.380	6,350	NOK!	16%
8	8.172	6,350	NOK!	29%
9	8.652	6,350	NOK!	36%
10	8.917	6,350	NOK!	40%

O lastro é um dos materiais que passa por modificações ao longo do tempo, quer seja por evolução granulométrica natural (quebra de partículas devido aos esforços e contato partícula-partícula), quer seja por contaminação oriunda dos vagões ou transportadas naturalmente pelo vento. Essa variação de comportamento geotécnico pode ser esperada das camadas abaixo do lastro também, como por exemplo, por variação do lençol freático, problemas relacionados à drenagem etc.

Nesse sentido, ao observar a magnitude das deformações, e sabendo que elas ocorrerão apenas ao fim de 30 anos, é salutar esperar que o pavimento proposto retorne bom desempenho estrutural caso sejam mantidas suas características geotécnicas, que podem ser obtidas, por exemplo, pelo serviço de reciclagem do lastro e manutenção dos dispositivos de drenagem.

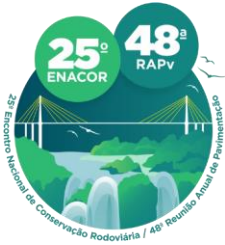
Todavia, ainda ao avaliar a magnitude das deformações e sabendo que os materiais geotécnicos possuem considerável heterogeneidade, recomenda-se que não seja utilizado um lastro com espessura de 20 cm (Cenário 1). Um lastro com essa espessura acarreta maiores tensões para as camadas subjacentes e, conseqüentemente, maiores deformações. Para o cenário em questão, foi observado uma deformação aproximadamente 40% maior do que a estabelecida como limite máximo pela AREMA (2020). Isso é um indicativo de que, apesar de existir maneiras de recompor o pavimento em termos geométricos, essa configuração de pavimento com um lastro de 20 cm deve ser evitada.

CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas foi possível observar o comportamento estrutural do pavimento com diferentes espessuras de lastro e diferentes cenários de carregamento. O lastro tem impacto direto em termos de desempenho a longo prazo. Nas Figuras 2a e 2b observa-se a variação da DP quando ocorre a variação da espessura do lastro e o aumento de carga, respectivamente.

Constatou-se que fixando-se o carregamento e variando a espessura do lastro, a resposta elástica do pavimento se mantém praticamente constante. Por outro lado, as DPs diminuem a um patamar mínimo quando a espessura do lastro varia de 20 cm para 30 cm, para em seguida diminuir sutilmente quando a espessura do lastro praticada é maior que 30 cm. Observa-se que uma espessura de lastro entre 30 e 40 cm retorna deformações semelhantes e que a espessura de 20 cm deve ser evitada.

Recomenda-se que sejam realizados estudos no sentido de introduzir na avaliação a longo prazo aspectos relacionados a perda de serventia, ou seja, parâmetros que descrevam as transformações que os materiais geotécnicos passam ao longo da vida útil de projeto, uma vez que a metodologia estabelecida nesse trabalho considera constantes as características dos materiais por todo o período de projeto.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Nos cenários estabelecidos foi observado que o pico de tensão no subleito foi da ordem de 70 kPa. Ao dimensionar um pavimento é necessário avaliar, além da magnitude das deformações impostas ao pavimento, onde está situado o nível de tensão que chega nas camadas menos nobre, como o subleito. Nesse sentido, os resultados aqui descritos são provenientes de uma análise que se ocupou em avaliar as deformações e as tensões impostas as camadas geotécnicas do pavimento, não excluindo a necessidade de situar as tensões impostas em cada camada, se inferiores ou superiores às respectivas tensões admissíveis de cada material.

As observações feitas nesse artigo podem contribuir para um dimensionamento do pavimento de maneira mais assertiva e uma correta seleção de materiais para compor o pavimento ferroviário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT. (2023). *Autorizações Ferroviárias*. ANTT. <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/autorizacoes-ferroviarias-1>

Fonte, F. S. M., Vieira, M. A. da S., & Oda, S. (2022). Análise da Influência da Umidade no Dimensionamento do Pavimento de uma Via Férrea Mediante o Uso da Modelagem Computacional. *36º ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino Em Transportes*.

Gomes, M. B. B. (2022). *Análise da deformabilidade do lastro ferroviário de agregado siderúrgico por meio de ensaios triaxiais de cargas repetidas*. Dissertação de mestrado em Engenharia Transportes. Instituto Militar de Engenharia. Rio Janeiro.

Gomes, M. B. B., Santos, J. T. A., Guimarães, A. C. R., & Serra, G. A. (2022). Análise Numérica Comparativa de um Pavimento Ferroviário em Função do Aumento da Espessura das Camadas de Lastro e Sublastro. *24º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 47ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)*.

Gonçalves, T. M. (2021). *Estudo Comparativo entre Modelos Numéricos de Simulação do Comportamento Tensão-Deformação de Pavimentos*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio Janeiro

Guimarães, A. C. R. *Um Método Mecânico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos*. 367 p. Tese de Doutorado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil — Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

Indraratna, B., J. Lackenby, and D. Christie. 2005. "Effect of confining pressure on the degradation of ballast under cyclic loading." *Géotechnique* 55 (4): 325–328. <https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.4.325>.

Indraratna, B., Ngo, T., & Rujikiatkamjorn, C. (2020). Performance of Ballast Influenced by Deformation and Degradation: Laboratory Testing and Numerical Modeling. *International Journal of Geomechanics*, 20(1), 04019138. doi:10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001515

Indraratna, B.; Su, L.; Rujikiatkamjorn, C. A new parameter for classification and evaluation of railway ballast fouling. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 48, n. 2, p. 322-326, 2011.

Kim, D., & Siddiki, N. Z. (2006). Simplification of resilient modulus testing for subgrades. *Joint Transportation Research Program*, 265.

Li, D.; Selig, E. T. Resilient modulus for fine-grained subgrade soils. *Journal of geotechnical engineering, American Society of Civil Engineers*, v. 120, n. 6, p. 939–957, 1994.

Lopes, L. S., Guimarães, A. C. R., & Aragão, F. T. S. (2018). *Análise Numérica da Influência do Aumento da Carga por Eixo no Comportamento Mecânico de Um Pavimento Ferroviário*. Monografia de Especialização em Transporte Ferroviário de Carga. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

MACÊDO, J. A. G. de. Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis. Tese (Doutorado) — Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro., Rio de Janeiro, 1996. 456 f.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Medina, J.; Preussler, E. S. Resilient characteristics of brazilian soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, v. 108, n. 5, p. 697–712, 1982.

Ministério da Infraestrutura. (2021). *Plano Nacional de Logística - PNL 2035*. Ministério da Infraestrutura. https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/politica-e-planejamento/politica-e-planejamento/RelatorioExecutivoPNL_2035final.pdf

Rangel, G. W. A., Aragão, F. T. S., e Motta, L. M. G. (2015) Proposta de uma Metodologia para Estimativa da Deflexão do Pavimento Ferroviário. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET (p. 239–251). Ouro Preto.

Rosa, A. C.; Teixeira, M. A. O.; Guimarães, A. C. R.; Cruz, L. O. S. R.; Pires, D. C. D. A. F; Freitas, R. G. (2019). Avaliação estrutural de pavimentos ferroviários do corredor centro sudeste paulista utilizando o software SysTrain. In: *33 Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*.

Rosa, A. C. (2020). *Análise mecânica do pavimento ferroviário de um trecho da Ferrovia Centro-Atlântica*. Dissertação de mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia. Rio Janeiro.

Santos, J. T. A. dos (2022). *Avaliação do Comportamento Mecânico de Solos Lateríticos Para Uso em Camada de Sublastro Ferroviário*. Dissertação de mestrado em Engenharia Transportes. Instituto Militar de Engenharia. Rio Janeiro.

Selig, E. T., & Waters, J. M. (1994). *Track Geotechnology and Substructure Management*. Thomas Telford Publications.

Silva Filho, J. C. (2018) Contribuição para o Desenvolvimento de um Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Ferroviários com Foco nos Solos Tropicais. Tese de doutorado em Engenharia de Defesa do Instituto Militar de Engenharia. Rio Janeiro.

Spada, J. L. G. (2003). Uma abordagem de mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento do mecanismo de comportamento tensão-deformação da via férrea. *Universidade Federal do Rio de Janeiro*.

Suiker, A. S. J., Selig, E. T., & Frenkel, R. (2005). Static and Cyclic Triaxial Testing of Ballast and Subballast. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(6), 771–782. doi:10.1061/(asce)1090-0241(2005)131:6(771)

Sussmann, T. R., & Selig, E. T. (2000). Resilient Modulus Backcalculation Techniques for Track. *Performance Confirmation of Constructed Geotechnical Facilities*. doi:10.1061/40486(300)27

Svenson, M. *Ensaio triaxiais dinâmicos de solos argilosos*. 144 p. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação de Engenharia — Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 1980

Teixeira, M. A. O. (2020). *Análise do Comportamento Estrutural do Pavimento Ferroviário Utilizando o Software Sysrain*. Dissertação de mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia. Rio Janeiro.

Witiuk, R. L., Fardin, A. R., Dias, S. de C., e Guimarães, A. C. R. (2023). Dimensionamento de Pavimento Ferroviário com Uso de Modelagem Numérica: Estudo de Caso para o Projeto de Ampliação da Ferronorte. *VI Simpósio de Engenharia Ferroviária*. Campinas.