

ANÁLISE DE MODELOS DE PREVISÃO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE LASTRO COM BASE EM DADOS DE DIFERENTES MODELOS FÍSICOS DE PAVIMENTO FERROVIÁRIO

Fernando Henrique Paim da Silva, MSc.¹, Laura Maria Goretti da Motta, DSc.¹

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Civil, Av. Athos da Silveira Ramos, nº149, 21941-909 Rio de Janeiro - RJ, Brasil

email: fernandopaim@coc.ufrj.br <http://www.coc.ufrj.br>

Sumário

O presente trabalho apresenta a construção de dois segmentos de lastro em um modelo físico de verdadeira grandeza, considerando um sistema de múltiplas camadas, para análise do comportamento mecânico resultante das aplicações de ciclos de cargas, por meio de instrumentação própria. O objetivo foi observar o desempenho do lastro construído com agregados utilizados em trechos de vias férreas no Rio de Janeiro e confrontar os dados de deformação permanente com modelos propostos pela literatura. Os modelos estudados apresentaram uma boa correlação de forma geral. Porém, certos modelos de previsão sofrem problemas devido à sua origem ser de resultados obtidos em corpos prova de pequenas proporções. A utilização destes modelos em campo pode gerar estimativa não adequada da vida útil do material de lastro.

Palavras-chave: ferrovias; lastro; modelos de previsão.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil a implantação de novas ferrovias tem-se mostrado necessária, especialmente porque, por várias décadas, nada se construiu de novo. O Plano Nacional de Logística Integrada 2015-2035 (PNLI) tem como uma das suas premissas a meta de ampliar a quantidade de carga geral e de granel agrícola transportado nas ferrovias, com a construção e modernização das vias férreas de bitola larga (1,6 m), que permitam velocidades de até 80 km/h. Caso essa meta seja alcançada o país reduzirá as emissões de dióxido de carbono em 14% e o custo de transporte em 31% [1].

Contudo, a austeridade econômica que desafia os países em conjunto com as restrições legais demande um discernimento maior das tomadas de decisão quanto ao investir em construção, manutenção e reabilitação das infraestruturas de transporte. Para estas decisões é fundamental o desenvolvimento de uma gestão mais eficiente, em que os recursos alocados sejam aplicados sob preceitos técnicos, baseados em modelos de desempenho com foco no ciclo de vida da estrutura [2].

Mesmo com essa necessidade de desenvolvimento, o Brasil ainda mantém metodologias antigas na área ferroviária. Essa carência técnica ocorreu em razão da perda de interesse em pesquisa na área, originado pela falta de investimentos no setor. A falta de novas técnicas pode ser observada nos resultados apresentados no anuário do setor ferroviário em que a velocidade média, um dos principais indicadores de produtividade, é próxima de 15 km/h, a menor desde a concessão das ferrovias em 2000 [3]. Assim, o conhecimento para otimizar o dimensionamento do pavimento ferroviário teve pouca atualização, mas nas duas últimas décadas este cenário vem mudando, haja visto o número crescente de pesquisas sobre o pavimento ferroviário.

A baixa velocidade deve-se a problemas na geometria da via, ocasionados, em grande parte, devido a excesso de afundamentos por deformação permanente e altas deflexões. Estes problemas nos segmentos em uso podem ser resolvidos com manutenção e reabilitação adequadas, baseadas em projetos elaborados segundo uma abordagem mecânica do comportamento do pavimento ferroviário, e principalmente, nos trechos novos [4]. Assim, ter conhecimento dos materiais empregados permite ampliar a acurácia no dimensionamento da estrutura e prever a sua vida útil, um fator importante ao planejar a construção e posteriores manutenções dos pavimentos em geral.

Manter a via com níveis aceitáveis de deformação elástica e plástica é um dos pontos mais importantes no sistema ferroviário, visto que sua deterioração pode causar em último estágio o descarrilamento dos trens.

Neste cenário, esta pesquisa projeta, por meio do uso de um modelo físico de verdadeira grandeza, avaliar o comportamento mecânico da camada do lastro, a fim de fornecer dados sobre eventuais degradações do material do lastro sob carga repetida, que auxiliem em modelos de previsão de desempenho.

1.1 Comportamento do lastro em modelos físicos de verdadeira grandeza

Muitos trabalhos foram realizados para avaliar a distribuição das tensões verticais e deformação elástica do lastro sob efeito da solicitação do material rodante. No Brasil, destacam-se os trabalhos experimentais de campo que abordaram este tema [5–7]. Contudo, avaliar tensões horizontais e deformação permanente em campo, ao longo do tempo, necessita de parceria com a empresa operadora da via com a garantia de acesso ao local instrumentado ou analisado, o que nem sempre é possível para a universidade conseguir.

Os princípios da construção de modelos físicos, para esta finalidade, datam de 1983 quando Norman e Selig, mostraram resultados que foram obtidos na visão de aprofundar os conhecimentos obtidos no campo de teste da FAST (atual *Transportation Technology Center, Inc.* - TTCI) [8]. Para o trabalho foi construído uma caixa de teste para avaliar o comportamento do lastro e a variação da tensão confinante ao longo de 10.000 ciclos de carga. Na Figura 1 observa-se junto a célula de pressão mais próxima do dormente uma tensão confinante média de 30 kPa, sendo que na célula no sentido perpendicular, que se encontrava 20 cm longe, na mesma profundidade foi de 10 kPa [8]. Os autores concluíram que compreender o estado global de tensões do lastro é importante para prever a colaboração do lastro no desempenho à deformação do pavimento, e para isto se faz necessário estudar as variações das tensões horizontais.

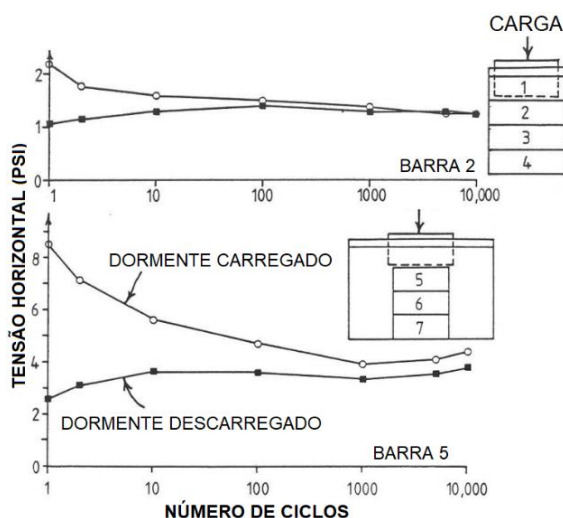


Fig.1. Tensão horizontal nos painéis [8]

Assim, a avaliação destas respostas em ensaios habituais de laboratório como o ensaio triaxial dinâmico não expressam completamente o comportamento que se verifica em campo, principalmente em relação à análise da deformação [9]. A desconformidade de resultados ocorre pela variação de tensão entre os planos σ_2 e σ_3 , função da distribuição de tensão entre dormentes em campo, distinto do que ocorre no ensaio triaxial ($\sigma_2 \equiv \sigma_3$). Também, o material usado como lastro, cujos diâmetros das partículas podem chegar a 63 mm, limita o uso de equipamentos triaxiais tradicionais.

Modelar o pavimento, uma estrutura considerada linear de espessura reduzida, que possui uma região de solicitação e influência de carregamento reduzida, torna-se atrativo para reproduzir em um modelo físico. No entanto, ainda é necessário recorrer a abstrações, ao aplicar hipóteses simplificadoras para viabilidade do projeto. Nas ferrovias o movimento lateral do lastro não é restringido, principalmente na direção perpendicular aos trilhos [10]. Nos

modelos físicos esta particularidade pode gerar falhas, caso o modelo não apresente grandes dimensões ou suas paredes sejam engastadas.

Outro ponto a ser observado é a profundidade do pavimento. Em [11] mostra a influência de uma fronteira rígida abaixo da camada do lastro, que favorece a concentração de tensões, que podem superar a tensão admissível no lastro. Um material que se encontra em tal situação sofre uma intensa degradação que modifica seu esqueleto pétreo e conseqüentemente sua resposta à deformação permanente e elástica.

1.2 Modelos de previsão de deformação permanente

O ciclo de deformação permanente da camada do lastro pode ser descrito em duas fases distintas. A primeira vem após a construção ou recomposição da camada, atribuída a reorganização das partículas e densificação do lastro. Nesta fase, ocorrem grandes deformações plásticas, na ordem de milímetros em poucos ciclos. Depois de atingir sua densidade máxima outras forças começam a dominar o comportamento do lastro. Na segunda fase, a camada passa a sofrer grande influência dos danos causados por tensões, vibrações, degradação e incompatibilidade da rigidez entre camadas considerando que o módulo de elasticidade do lastro muda com o número de ciclos de carga que provoca a variação da composição granulométrica, o que motiva o aparecimento de tensões radiais nos pontos acima e abaixo da interface das camadas. Estes esforços resultam em fratura das partículas e após certo grau de quebra o comportamento da camada é alterado, ao gerar um desequilíbrio no esqueleto pétreo, especificamente das partículas graúdas [4].

Na busca por converter estes fenômenos físicos em modelos de previsão, muitos pesquisadores iniciaram a partir da metade do século XX trabalhos na área, no princípio com emprego de dados obtidos de ensaios triaxiais de carga cíclica do lastro. Destacam-se os estudos no Japão [12], e do comitê D-71 do extinto ORE (*Office for Research and Experiments of the International Union of Railways*, UIC), na Europa [13]. Estes estudos já identificavam que a relação da deformação permanente é proporcional ao logaritmo do número de passagens do eixo e também com o nível de carga aplicado por estes [12–13].

Existem vários modelos de previsão do comportamento do lastro quanto à deformação permanente do ponto de vista fenomenológico, mas, em geral, com poucas variáveis, visto a complexidade em se criar métodos que comportem a grande quantidade de parâmetros que influenciam o desempenho desta camada. Normalmente as formulações são divididas em duas fases, visando compreender os diferentes fenômenos que atuam em cada período da deformação. Entretanto, análises que consideram somente o número de eixos, variabilidade na carga e diferentes velocidades podem gerar modelos subestimados. Por exemplo, a variação da carga pode levar a estimular distintos mecanismos de degradação da partícula do lastro, que tem efeitos maiores ou menores em função das características tecnológicas do material constituinte do lastro [15].

No Quadro 1 são apresentados alguns modelos de previsão de deformação permanente do lastro que foram elaborados com uso de regressão linear baseada em dados históricos, sendo importante ponderar que os materiais utilizados bem como a geometria do sistema de carregamento são diversos.

Quadro 1. Modelos de deformação permanente de lastro

Modelo	Parâmetros de regressão	Referência
$S_N = S_1(1 + \alpha \log N)$	α	Raymond (1975) [16]
$S_N = S_1 + \frac{\gamma \log N}{1 + \alpha \log N}$	α, γ	Neidhart (2001) [17]
$S_N = S_1(N^\gamma)$	γ	Indraratna (2007) [18]
$S_N = \gamma + \alpha(\ln N)$	α, γ	Indraratna (2011) [4]
$S_N = (\log N - 2,4)^2 * \left(\frac{p}{160}\right) * \left(\frac{47}{k}\right)$	*	Thom e Oakley (2006) [19]
$S_N = S_1(1 + \alpha \ln N + 0,5\beta \ln N^2)$	α, β	Indraratna (2013) [13]

*Nota: O modelo [19] tem como parâmetros a tensão abaixo do dormente em kPa (p) e a rigidez do subleito MPa (k), N: número de ciclos e S₁: deformação inicial.

Vale salientar que esses modelos foram desenvolvidos em países diferentes, com materiais e soluções distintas. No entanto, pode-se perceber que todos levam em consideração o número de ciclos de aplicação de cargas, fator importante quanto à quebra e seu impacto na vida útil.

Em [15] relata-se que a maioria das equações descrevem as fases de deformação do lastro de forma isoladas, ao ignorar que as forças que atuam na camada se mantêm constantes só mudando sua influência ao longo do tempo. Também relata a necessidade de distinguir os ciclos de carregamento de diferentes magnitudes nas equações de previsão, visto que existe uma relação não linear entre a carga e a deterioração da via.

Para [19] um indicador claro de que todos esses modelos são aproximados é a falta de parâmetros dependentes do material, nem qualquer discriminação entre os tipos de trens, a velocidade, carga transportada, etc. Na verdade, eles representam, de fato, uma aproximação mais bem ajustada aos dados para um tipo particular de pavimento ferroviário em um país específico e com subleito e tipos de lastro típicos desse país.

Modelos mais novos, como [13], diminuem este empirismo ao implementar em seus modelos matemáticos características de deformação permanente como a teoria de acomodamento do material. Destas, a teoria mais difundida é a teoria do *shakedown*, que pode ser interpretada como teoria do acomodamento das deformações permanentes que um material desenvolve quando submetido a carregamentos cíclicos.

Conforme [20], um corpo sujeito à cargas repetidas gera após um ciclo de carregamento tensões residuais que são acumuladas, sendo conservadas mesmo ao cessar o carregamento. Durante as consecutivas aplicações de carga, estas tensões residuais interagem com as tensões induzidas pelo posterior carregamento, o que eleva a parcela da tensão residual, diminuindo a taxa de deformação permanente. O acúmulo destas tensões residuais, a certo momento, equilibra-se com as tensões induzidas pelo carregamento, que faz o material apresentar somente deslocamentos elásticos, surgindo a condição de *shakedown*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foram discutidos os critérios para definir a escolha dos materiais para a construção das camadas da estrutura de ferrovia desta pesquisa no tanque-teste. Os critérios foram de: dar preferência por materiais já utilizados pelas empresas de transporte ferroviário do estado do Rio de Janeiro, e fazer com que as tensões impostas pelo sistema do modelo físico fossem condizentes com solicitações próximas ao material rodante de uma ferrovia que estivesse usando o material selecionado.

O material britado utilizado para compor a camada do lastro e os ensaios dinâmicos de escala reduzida é proveniente da pedreira J. Serrão, da cidade de Japeri-RJ, coordenadas 22°38'24"S 43°38'30"W. A pedreira foi escolhida por fornecer agregado para uso em lastro da SuperVia Concessionária de Transporte Ferroviário S.A. (trens metropolitanos) e da MRS Logística S.A em seu trecho no Rio de Janeiro. A classificação geológica da frente da pedreira indica um maciço composto de gnaisses migmatítico.

A Figura 2 apresenta a granulometria do material usado como camada do lastro, acompanhado da curva média e desvio padrão dos laudos das três últimas medições realizadas na pedreira, e a faixa granulométrica especificada (AREMA 24) para aprovação do material junto às empresas. Pode-se notar que o material passante na peneira de 25 mm está fora da faixa granulométrica em todas as medições e o material na peneira 37,5 mm se encontra próximo ao limite inferior da faixa estipulada. Para uso no tanque-teste foram retiradas as partículas passantes na peneira 25 mm, ou seja, trabalhou-se somente com o material acima disso, visto que representavam pequena fração de material em peso e também com o intuito de reduzir qualquer material fino oriundo dos processos anteriores ao armazenamento.

O tanque-teste, usado na presente pesquisa, foi concebido em [21] para comportar o segmento de um pavimento rodoviário em verdadeira grandeza, com as características dos materiais, os métodos construtivos e profundidade das camadas próximas ao construído em campo.

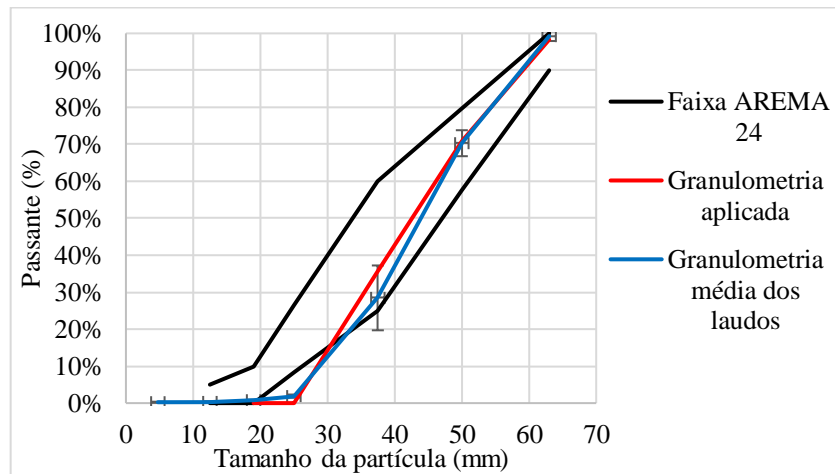


Fig.2. Granulometria do lastro estudado

Em todos os cenários os materiais que compõem as camadas e suas respectivas espessuras foram mantidas. Para a superestrutura foi utilizado somente um bloco de um dormente bibloco anteriormente usado pela empresa MetrôRio, obtido junto a Prefeitura Universitária da UFRJ. Não foi possível acrescentar o trilho visto que a capacidade do atuador de carga é reduzida para uma configuração completa da grade. A camada do lastro é constituída de uma camada de 30 cm, enquanto o subleito e o colchão de brita possuem 70 e 10 cm de espessura, respectivamente, Figura 3. As camadas de subleito e colchão de brita foram reaproveitadas de [22] com intuito de reduzir o tempo de construção do pavimento. A camada de brita do fundo é utilizada para permitir a criação de um lençol freático que possa, por capilaridade, saturar o subleito.

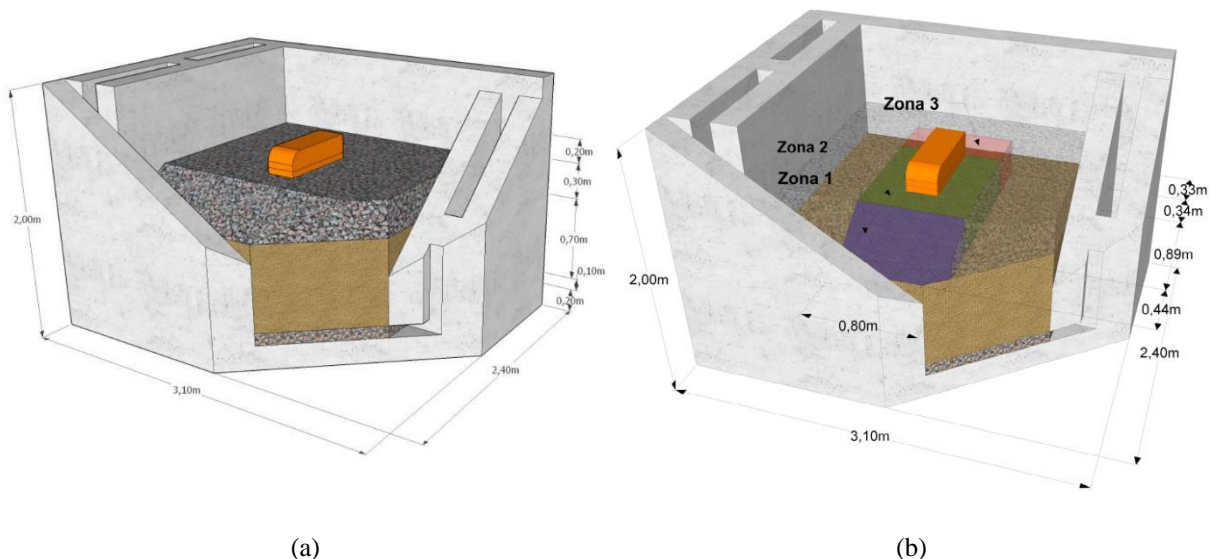


Fig.3. O tanque teste na configuração desta pesquisa: (a) cenário 1 e (b) cenário 2

Na avaliação das proporções do tanque-teste, em relação a uma via férrea de bitola larga, este consegue simular a metade de uma seção transversal, baseada nas “dimensões tipo” empregada pela VALEC, com a declividade do talude de uma das faces de 3:2 (H: V). Assim, optou-se por utilizar a espessura típica do lastro de 30 cm sem realizar nenhum projeto de dimensionamento do pavimento com estudo das solicitações do material rodante,

materiais, etc. Posteriormente, ao definir a tensão aplicada pelo sistema de carregamento realizou-se a retroanálise para definir o valor de carga por eixo representada pela configuração usada nesta pesquisa.

O método de construção da camada de lastro se deu da seguinte forma: no primeiro cenário a camada do lastro foi completamente construída, o material foi posto em duas camadas de 15 cm e a cada estágio realizou-se a compactação com placa vibratória, com quatro passagens por camada, para simular o efeito de compactação inicial em campo; e nos seguintes somente a faixa central do lastro foi reconstruída. Esta opção foi feita em função do longo tempo gasto para execução da camada completa, visto que, a construção da camada de 30 cm numa área de 4 m² consome cerca de 2000 kg, com um volume aproximado de 1,07 m³. Também, admitiu-se que o peneiramento completo da camada poderia mascarar a real quebra das partículas que se concentra abaixo do dormente. Após o primeiro cenário, também foi incluído um geossintético de separação, sem função de reforço, para poder coletar os finos oriundos da abrasão do agregado e evitar a remoção de material do subleito quando da retirada do lastro.

Após o nivelamento da camada final do lastro foi colocado um bloco de um dormente bibloco e posicionado 4 *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) em sua superfície. Dos 4 LVDTs colocados sobre o dormente, dois foram instalados nas extremidades, com cursor total de 5 mm, e os outros dois foram postos na parte central, com 1 mm de curso.

A frequência de carregamento dos ensaios foi de 2 Hz, sendo o ciclo de carga compreendido de 0,1 s de ação e 0,4 s de repouso. Como as pesquisas anteriores neste Tanque-Teste usaram sempre o sistema na frequência de 1 Hz (0,1 s de aplicação de carga e 0,9 de repouso) foi necessária nova calibração do atuador.

A carga aplicada pelo atuador sobre o dormente é de 23 kN (~2,3 t), definido com base no limite superior do sistema pneumático, e considerando-se a área de contato dormente/lastro de 0,125 m², resulta numa pressão teórica de 186 kPa. Assim, a carga de 23 kN com os fatores de 40 % de distribuição da carga e 35% da área do dormente representa um eixo de 16 t. Também foi realizada validação com uso do software SysTrain, desenvolvido pelo IME, que demonstrou boa aproximação do modelo com um vagão de 70 t composto por 4 eixos de 17,5 t.

O projeto de pesquisa contemplou dois cenários desenvolvidos no Tanque-Teste, sendo que:

- (i) O primeiro corresponde a uma estrutura de um pavimento recém-construído, ao contemplar a opção de uma camada de lastro sobre o subleito existente, com a utilização de um método de construção próximo ao verificado em campo, sem o efeito do lençol freático;
- (ii) No segundo, a camada do lastro foi reconstruída parcialmente, no qual foi estabelecido um prisma retangular com o comprimento limitado a 40 cm a partir do ponto central de aplicação da carga, no sentido paralelo à posição do dormente; e largura com início junto a parede no modelo físico, do lado desconfinado, e término a 33 cm da outra face, (0,8 x 1,67 x 0,3 m). Após a remoção do material foi recolocado um lastro com as mesmas características iniciais do primeiro (granulometria, densidade, etc) e executado o mesmo processo de compactação do primeiro cenário. Este cenário condiz com o processo de manutenção da via observado em [23], em que é executada geralmente em trens urbanos a manutenção em pequenas faixas sob alguns dormentes da via.

3 RESULTADOS E ANÁLISE

O ensaio conduzido com a construção inicial da camada do lastro serviu para compreender melhor o sistema do Tanque-Teste ao ser solicitado por um estado de tensão superior ao utilizado nas pesquisas anteriores. Neste cenário ocorreram 5 paradas porque os cursos dos LVDTs iniciais eram pequenos, além de problemas de queda de energia. Na Figura 4 é possível observar que as deformações permanentes foram acumuladas rapidamente nos primeiros 100.000 ciclos, com posterior uniformidade da taxa de crescimento. Durante o ensaio o LVDT1, mais próximo ao lado não confinado do lastro, após os 500.000 ciclos, teve maior deformação permanente, sendo 0,86 mm maior que o LVDT2, colocado na parte interna. O efeito do não confinamento permitiu que depois da acomodação da camada o movimento das partículas fosse maior naquela região. Também é possível observar, após um período longo de parada do ensaio, que a camada voltou a se reacomodar, influenciando as medidas na retomada do ensaio, apresentando uma mudança brusca da inclinação da reta de deformação permanente. Para chegar a esse estado de acomodamento, talvez fosse necessária maior quantidade de ciclos de carregamento. Aqui, também, é possível observar um pouco mais sobre o efeito das paradas dos ensaios, visto que, a taxa muda abruptamente próximo aos limites das linhas verticais que denotam as interrupções do carregamento.

Na Figura 5 são apresentadas a curva média obtida pelas leituras dos LVDTs e as curvas de previsão dos modelos estudados, com base nos parâmetros obtidos por meio de regressão não-linear aplicada de forma iterativa do software LAB Fit 7.2.50. No processo iterativo foi utilizado o algoritmo de Levenberg-Marquardt para a convergência de parâmetros dos modelos multivariáveis, porém no modelo de Thom [17] a pressão do topo do lastro foi obtida no ensaio do cenário 1, sendo 240 kPa. No Quadro 2 estão os parâmetros de regressão dos modelos aplicados aos dados do cenário 1 e seus coeficientes de determinação (R^2).

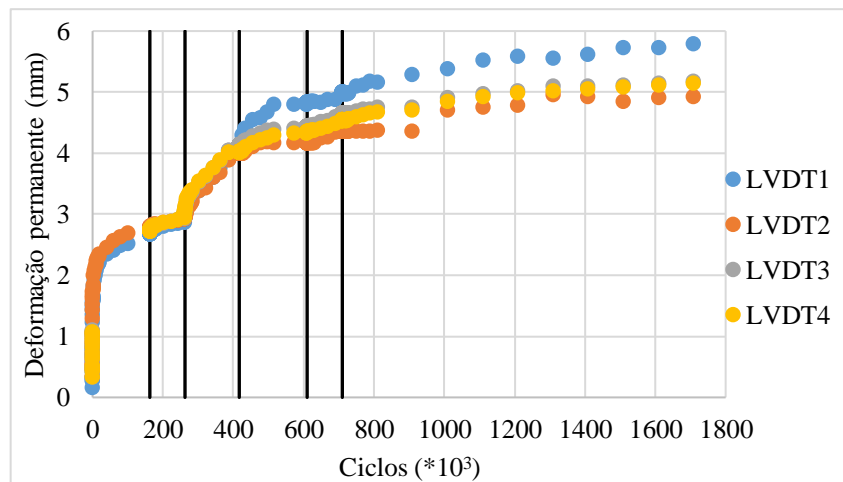


Fig.4. Deformação permanente acumulada ao longo de 1.710.000 ciclos no cenário 1

Quadro 2. Valores dos parâmetros dos modelos testados com os dados do cenário 1

Referência	Parâmetros	R^2
Raymond (1975) [14]	$\alpha= 0,931$	0,80
Neidhart (2001) [15]	$\alpha= -0,132; \gamma= 0,164$	0,95
Indraratna (2007) [16]	$\gamma= 0,200$	0,92
Indraratna (2011) [4]	$\alpha= 0,381; \gamma= -1,083$	0,80
Thom e Oakley (2006) [17]	$p= 240 \text{ kPa}; k= 189 \text{ MPa}$	0,89
Indraratna (2013) [12]	$\alpha= -0,394; \beta= 0,208$	0,89

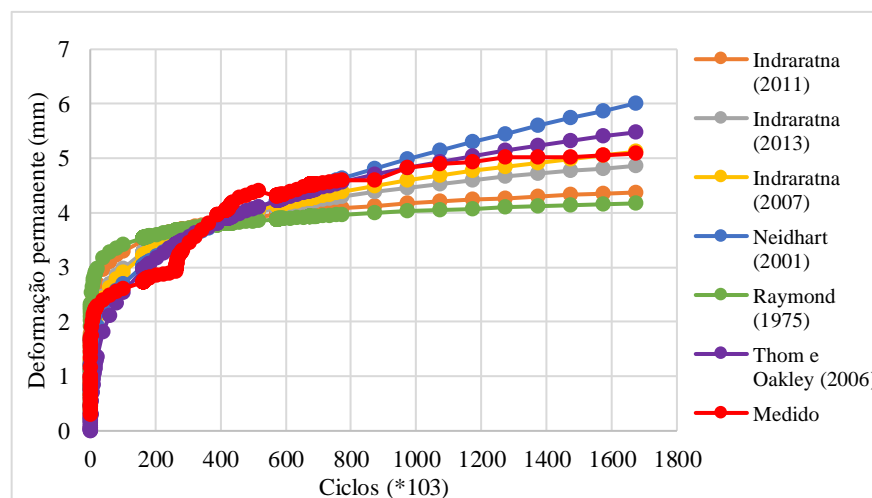


Fig.5. Deformação permanente medido no cenário 1 e o comportamento dos modelos testados

Os modelos aplicados aos dados experimentais apresentaram R^2 alto, indicando boa descrição dos valores medidos, sendo o modelo de Neidhart [15] com o melhor ajuste à amostra. O modelo de Neidhart [16], com maior R^2 , e o de Raymond [15], com o menor R^2 , apresentaram as maiores diferenças na deformação permanente final do ensaio, com 20% de diferença entre eles e o valor medido. Os modelos de Indraratna [16] [12] foram os mais coerentes com o valor final do ensaio. O modelo de Thom [17] apresenta um comportamento semelhante ao observado no cenário 1, além de chegar a um valor próximo da rigidez do topo do subleito (187,25 MPa) medido antes do início dos ensaios com o uso de um Geogauge H-4140.

No segundo cenário somente o centro da camada de lastro foi refeito, mantendo-se as faixas laterais iniciais do cenário 1. O ensaio teve cinco paradas sendo a inicial por falta de luz durante a noite e os outros, concentrados em um pequeno número de ciclos, por falhas na inicialização do computador. Na Figura 6, observa-se a deformação permanente do pavimento após 3.950.000 ciclos. Durante os primeiros 100.000 ciclos o pavimento já apresentou o mesmo nível de deformação permanente que o cenário 1 e posteriormente entrou em processo de acomodamento. Este comportamento ocorreu em função da restrição de movimento desta nova camada de lastro colocada só no centro e a diferença de acomodamento das faixas laterais, visto que, este confinamento eleva a resistência à deformação permanente deste núcleo. A diferença entre os extremos do dormente foi de 0,74 mm o que demonstra a variação de confinamento no sentido transversal do dormente.

Neste cenário pode se observar melhor um efeito de recuperação elástica da camada do lastro, que ao cessar a aplicação da carga cíclica por um período, esta recupera uma parcela da deformação elástica residual do pavimento. O fenômeno é percebido devido aos LVDTs não serem programados para manter a anotação da deformação do pavimento após o fim da aplicação de carga. Assim, ao iniciar o ensaio novamente, os valores atuais são definidos como referência. No começo desta nova sessão de aplicação da carga a taxa de acréscimo da deformação permanente e o deslocamento elástico aumentam nos ciclos iniciais, com a posterior redução ao mesmo patamar observado ao final da sessão anterior.

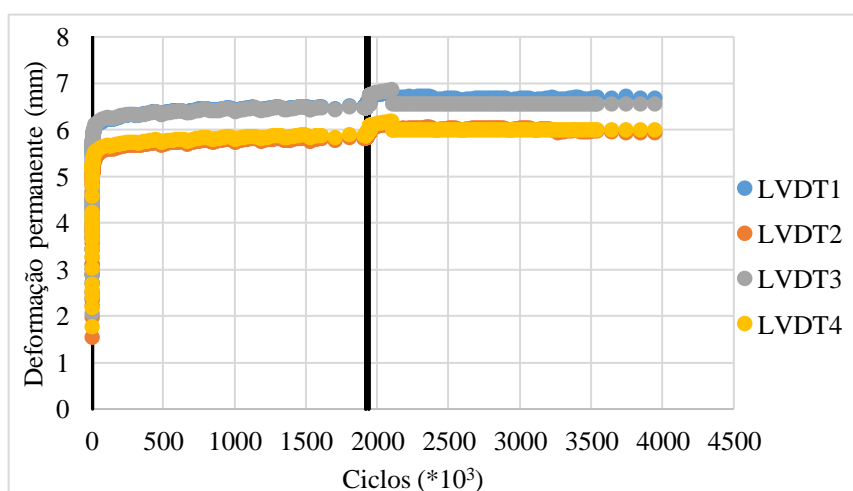


Fig.6. Deformação permanente acumulada ao longo de 3.950.000 ciclos no cenário 2

Com a curva média da deformação permanente do cenário 2, foram obtidas as curvas de tendência dos modelos de previsão estudados nesta pesquisa. A Figura 7 expõe os resultados obtidos para os modelos com os parâmetros baseados na Quadro 3. Observa-se que o modelo de Thom [17], para a mesma pressão do ensaio anterior, teve o comportamento mais divergente em relação ao medido no pavimento, e o valor obtido para a rigidez do subleito foi menor que o encontrado em ensaio. Já os modelos de Neidhart [15] e Indraratna [12] apresentam os maiores R^2 e, também os valores mais coerentes com o valor final do ensaio do cenário 2.

Quadro 3. Valores dos parâmetros dos modelos testados com os dados do cenário 2

Referência	Parâmetros	R ²
Raymond (1975) [14]	$\alpha= 0,159$	0,84
Neidhart (2001) [15]	$\alpha= 0,274; \gamma= 1,878$	0,96
Indraratna (2007) [16]	$\gamma= 0,083$	0,75
Indraratna (2011) [4]	$\alpha= 0,192; \gamma= 3,525$	0,84
Thom e Oakley (2006) [17]	$p= 240 \text{ kPa}; k= 165,0 \text{ MPa}$	0,85
Indraratna (2013) [12]	$\alpha= 0,299; \beta= -0,020$	0,97

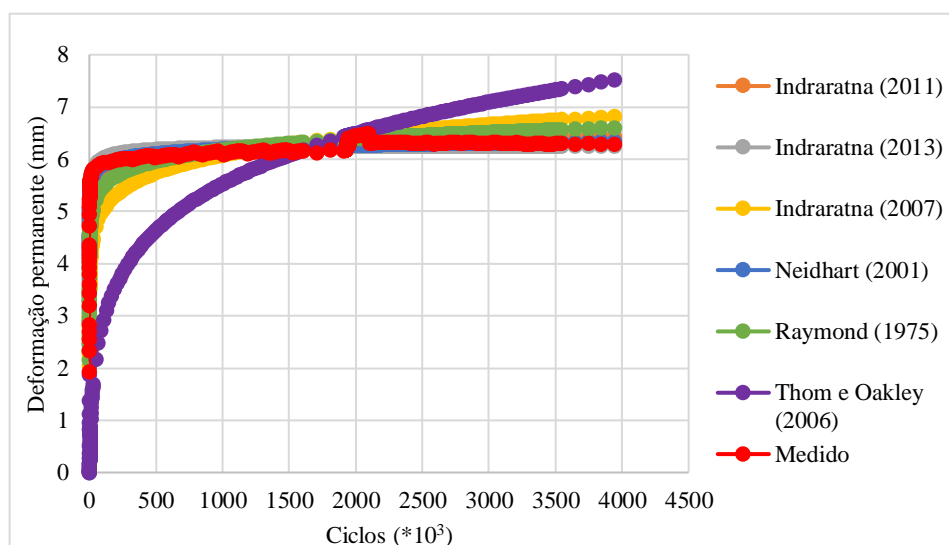


Fig.7. Deformação permanente medido no cenário 2 e o comportamento dos modelos testados

4 CONCLUSÕES

O modelo físico aqui chamado de Tanque-Teste apresentou boa equivalência para simular o comportamento da camada de lastro sujeita a solicitações dinâmicas externas. No entanto, mesmo sendo melhor do que um ensaio convencional em corpos de prova, há necessidade de ressaltar que o comportamento em campo ainda é mais complexo do que o simulado e os resultados obtidos são afetados por isto: pela aceleração do processo de solicitação do pavimento e pelos elementos de contorno inseridos. É possível melhorar as condições de atuação da carga e das medidas, o que já vem sendo feito em novas pesquisas no mesmo modelo físico.

Observou-se que o acréscimo da taxa de deformação permanente no cenário 1 foi mais branda que do cenário 2, sendo que, ao final os dois cenários apresentaram a mesma deformação. Muito deste resultado provém ao limitar o movimento das partículas, mesmo ao usar um geossintético sem função de reforço, o comportamento da camada de material de lastro modifica-se independente da tensão confinante global. Ao longo do tempo a camada do lastro sofre vários processos a fim de elevar a área de contato entre partículas, tanto por acomodamento do material quanto por quebra. Com o processo de movimentação impedido, a camada procura outras formas de dissipar a energia aplicada, sendo a quebra de partículas uma das formas mais rápidas de dissipação.

Os modelos de previsão descreveram com boa correlação o comportamento do material desta pesquisa. Contudo, os modelos apresentam um comportamento diferente ao medido, devido ao fato de terem sido gerados com número reduzido de ciclos e baseado em dados de corpos de prova de menores dimensões. Estes atributos fazem com que estes modelos precisem ser cuidadosamente avaliados para cada caso de utilização, pois resultam em tempos de manutenção diferentes, o que pode gerar oneração do custo de manutenção das ferrovias.

5 REFERÊNCIAS

- [1] E. D. P. E. L. S. A. EPL, “Plano nacional de logística integrada (2015 – 2035),” [Online]. Available: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-setoriaisematicas/documentos/camaras-tematicas/infraestrutura-e-logistica/anos-anteriores/planonacional-de-logistica-integrada-pnli-51.pdf>, 2016.
- [2] S. Lingegård, “Integrated Product Service Offerings for Rail and Road Infrastructure : Reviewing Applicability in Sweden,” Linköping University Electronic Press, 2014.
- [3] A. N. D. T. T.- ANTT, “Anuário do setor ferroviário.,” [Online]. Available: <http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/Ferrovuario/PDF-Relatorio-Executivo-Setor-Ferrovuario-2017-ANTT.pdf>, 2018.
- [4] B. Indraratna, W. Salim, and C. Rujikiatkamjorn, *Advanced rail geotechnology – ballasted track*. London: CRC Press, 2011.
- [5] L. F. Muniz da Silva, “Fundamentos teórico-experimentais da mecânica dos pavimentos ferroviários e esboço de um sistema de gerência aplicado à manutenção da via permanente,” Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.
- [6] A. H. M. Merheb, “Análise mecânica do lastro ferroviário por meio de ensaios triaxiais cíclicos.,” Universidade de São Paulo, 2014.
- [7] R. C. da Costa, “Proposição de dispositivo de medidas ‘in situ’ para avaliação do comportamento mecânico de lastro ferroviário: estudo de caso na Estrada de Ferro Carajás,” Universidade de São Paulo, 2016.
- [8] G. M. Norman and E. T. Selig, “Ballast performance evaluation with box tests,” in *American Railway Engineering Association Bulletin*, vol. 84, no. 692, pp. 207–239, 1983.
- [9] B. Indraratna, D. Ionescu, and H. D. Christie, “Shear Behavior of Railway Ballast Based on Large-Scale Triaxial Tests,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 124, no. 5, pp. 439–449, 1998.
- [10] B. Indraratna, W. Salim, D. Ionescu, and D. Christie, “Stress-strain and degradation behaviour of railway ballast under static and dynamic loading, based on large-scale triaxial testing,” in *15th International conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, pp. 2093–2096, 2001.
- [11] J. L. G. Spada, “Uma abordagem de mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento do mecanismo de comportamento tensão- deformação da via férrea,” Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.
- [12] Y. Sato, “Japanese Studies on Deterioration of Ballasted Track,” *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 24, no. sup1, pp. 197–208, Jan. 1995.
- [13] B. Indraratna and S. Nimbalkar, “Stress-Strain Degradation Response of Railway Ballast Stabilized with Geosynthetics,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 139, no. 5, pp. 684–700, May 2013.
- [14] T. Abadi, L. Le Pen, A. Zervos, and W. Powrie, “A Review and Evaluation of Ballast Settlement Models using Results from the Southampton Railway Testing Facility (SRTF),” *Procedia Eng.*, vol. 143, no. Ictg, pp. 999–1006, 2016.
- [15] T. Dahlberg, “Some railroad settlement models—A critical review,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 215, no. 4, pp. 289–300, Jul. 2001.
- [16] G. P. Raymond, P. N. Gaskin, and O. Svec, “Selection and performance of railroad ballast,” in *Railroad Track Mechanics and Technology*, Elsevier, pp. 369–386, 1978.
- [17] T. Neidhart, “True-to-scale in situ tests determining dynamic performance of earthworks under high speed train loading,” in *Proceedings of Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures*, pp. 213–223, 2001.
- [18] B. Indraratna, M. A. Shahin, and W. Salim, “Stabilisation of granular media and formation soil using geosynthetics with special reference to railway engineering,” *Proc. Inst. Civ. Eng. - Gr. Improv.*, vol. 11, no. 1, pp. 27–43, Jan. 2007.
- [19] N. Thom and J. Oakley, “Predicting differential settlement in a railway trackbed,” in *1st international conference on railway foundations*, pp. 190–200, 2006.
- [20] A. C. R. Guimarães, “Um método mecanístico empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos,” Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [21] B.-H. de A. e Silva, “Análise mecânica de um pavimento rodoviário submetido à oscilação do lençol freático simulada em modelo físico de verdadeira grandeza”. UFRJ, 2009.
- [22] C. F. S. C. e Silva, “Análise de tensões em pavimentos a partir de modelo físico instrumentado,” Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- [23] F. H. Paim da Silva, “Estudo do melhoramento do lastro ferroviário com uso de geogrelha,” Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2014.