

Uma contribuição ao desenvolvimento de estratégias de manutenção mais econômicas na via ferroviária

As manutenções na via ferroviária são fundamentais para garantir um rígido controle sobre as degradações físicas e geométricas de seus componentes e assim viabilizar um tráfego seguro e eficiente. Os custos de execução desses serviços, contudo, são significativamente elevados, demandando estratégias de intervenção eficientes técnica e economicamente. Neste trabalho um novo conceito que relaciona o estado geométrico da via e o ritmo de degradação dos componentes foi estudado com o intuito de verificar sua viabilidade técnica e potencialidade para redução de custos. Para tanto, foi realizado um levantamento bibliográfico que investigou e corroborou a hipótese de que a condição geométrica da via permanente é capaz de induzir forças dinâmicas nos veículos cuja magnitude pode atingir patamares consideráveis e, a partir desse arcabouço teórico, foi desenvolvido um estudo empírico com dados de uma ferrovia nacional, por meio do qual foi analisado como essa característica pode influenciar na vida útil dos componentes da via férrea, e ainda como pode ser aproveitada no planejamento de estratégias de manutenção mais eficientes e sustentáveis a longo prazo. Os resultados obtidos foram significativamente relevantes, com economias potenciais expressivos, fruto, principalmente, de um incremento considerável da vida útil dos componentes e que indicaram, portanto, o quão promissor é o desenvolvimento deste novo campo de estudo tanto em seu aspecto econômico, quanto no que se refere à sustentabilidade ambiental fruto do uso maximizado dos itens em questão. Visando fomentar o aprimoramento da temática, ao final deste artigo são apresentadas oportunidades de pesquisas futuras.

Palavras-chave: Ferrovia; Via permanente; Manutenção; Custos; Sustentabilidade.

A contribution to planning more economical maintenances on the railway track

The maintenance of railway track is essential to control the physical and geometric degradation of its components and thus enable an efficient and safe traffic. The services' execution costs, however, are significantly high, demanding strategies technically and economically efficient. In this paper, a new concept that relates the track geometric state and the rate of the components' degradation was studied in order to verify its technical feasibility and potential for cost reduction. Therefore, a bibliographic survey was carried out that investigated and corroborated the hypothesis that the track's geometric condition is capable of inducing dynamic forces in vehicles whose magnitude can reach considerable levels and, based on this theoretical framework, was developed an empirical study from a national railway data, through which it was analyzed how this characteristic can influence the useful life of the track's components, and also how it can be used in planning more efficient and sustainable long-term maintenance strategies. The results obtained were significantly relevant, with significant potential savings, mainly due to a considerable increase in the components' useful life, which therefore indicated how promising is the development of this new field of study both in its economic aspect and in environmental sustainability achieved by the maximized use of the components. Aiming to promote the improvement of the theme, at the end of this article, opportunities for future research are presented.

Keywords: Railway; Track; Maintenance; Costs; Sustainability.

Topic: **Sustentabilidade nos Transportes**

Received: **04/08/2021**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Approved: **25/08/2021**

Isaias Pereira Seraco 
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7866080827132150>
<http://orcid.org/0000-0002-9576-8420>
isaias.seraco@pet.coppe.ufrj.br

Hostilio Xavier Ratton Neto 
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6847735001358120>
<http://orcid.org/0000-0002-4796-1808>
hostilio@pet.coppe.ufrj.br



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0027

Referencing this:

SERACO, I. P.; RATTON NETO, H. X.. Uma contribuição ao desenvolvimento de estratégias de manutenção mais econômicas na via ferroviária. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.12, n.8, p.302-319, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0027>

INTRODUÇÃO

A via ferroviária, mais comumente denominada via permanente, é uma das estruturas básicas de uma ferrovia, cujas principais funções são a sustentação e condução dos veículos (STEFFLER, 2013). Seus principais componentes são os trilhos, os acessórios metálicos de fixação dos trilhos, os dormentes, e uma camada de brita (o lastro) que sustenta e ancora os dormentes. A Figura 1 ilustra estes itens.

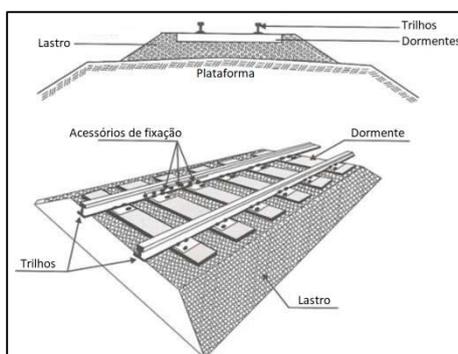


Figura 1: Componentes e disposição típica de uma via permanente ferroviária. Fonte: Steffler (2013).

A disposição tridimensional desses componentes ao longo do traçado é feita de maneira que os veículos sejam capazes de transpor o relevo com segurança e desempenho. Tal disposição é denominada geometria da via permanente, sendo que tradicionalmente as características geométricas são descritas por meio de alguns parâmetros, apresentados e ilustrados na Figura 2.

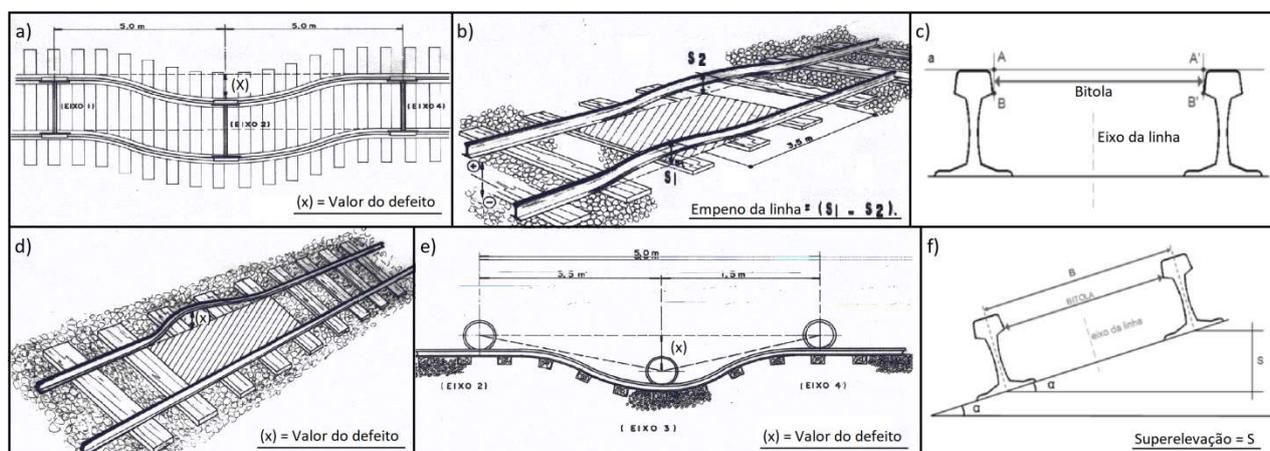


Figura 2: Parâmetros geométricos: a) alinhamento; b) empeno; c) bitola; d) nivelamento transversal; e) nivelamento longitudinal; f) superelevação. Fonte: Rodrigues (2001).

Com o tempo e o tráfego a via se degrada, sendo esse desgaste tão mais elevado quanto maiores forem as velocidades, a frequência do tráfego, o peso por eixo, e quanto mais severas forem as condições ambientais (SOLEIMANMEIGOUNI et al., 2016). Dessa forma, quanto à estrutura física dos componentes, o lastro sofrerá com a abrasão que levará à progressiva quebra do material; nos dormentes se desenvolverão trincas e fraturas que progressivamente prejudicarão o suporte e fixação dos trilhos; e nos trilhos, pela elevada solicitação mecânica, se desenvolverão tanto fadiga de suas estruturas, quanto desgaste da área de contato com as rodas (KOOHMISHI, 2019; KAEWUNRUENA et al., 2018; KOOHMISHIA et al., 2020; PANGA et al., 2020; HU et al., 2020; KANGA et al., 2020).

Concomitantemente ao desgaste físico, os componentes se desviam de suas respectivas posições ideais, caracterizando assim a degradação dos parâmetros geométricos, como ilustrado, inclusive, na Figura 2 (GHOFRANI et al., 2020). O desenvolvimento desses desvios pode ser resultado de muitos fatores, como o assentamento desigual do leito da via, a influência do ambiente (clima e temperatura) (YANG et al., 2020), a acomodação e degradação do lastro, dentre outros (NIELSEN et al., 2018; BENEDETTO et al., 2018).

Tais degradações requerem manutenções específicas, sendo que para geometria normalmente são utilizados veículos especiais de grande porte que automaticamente reposicionam os trilhos e dormentes, e rearranjam o lastro de maneira a sustentar tal posição (SASIDHARAN et al., 2020). Já as degradações físicas requerem intervenções mais incisivas, que consistem, basicamente, na renovação (substituição) dos componentes cuja degradação alcançou patamares que caracterizam o fim de suas vidas úteis ou o seu comprometimento estrutural (BURROW et al., 2009). Assim, regularmente os trechos ferroviários são inspecionados, com o levantamento do volume e severidade das degradações, dando origem a registros que quando comparados a tolerâncias referenciais, fornecem aos gestores meios de planejar as manutenções. A título de exemplo, para as ferrovias nacionais de bitola larga (1600 mm), a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estipula pela norma NBR 16387:2020 que este parâmetro não deve exceder 1632 mm para velocidades operacionais de 41 a 64 km/h; 1625 mm para 65 - 95 km/h; e 1623 mm para 96 - 128 km/h, o que indica, inclusive, que desvios além das tolerâncias, quando não corrigidos imediatamente, requerem restrições de velocidade para que o tráfego não seja interrompido.

Portanto, para cada parâmetro geométrico, e analogamente para as degradações físicas, existem tolerâncias definidas segundo as velocidades operacionais do trecho, que determinam as condições operacionais seguras. Vale frisar que dada as particularidades das degradações e das próprias manutenções, são requeridas várias correções de geometria no intervalo entre renovações consecutivas (GULER et al., 2011), e assim o comportamento da via ao longo do tempo pode ser descrito como ilustrado na Figura 3.

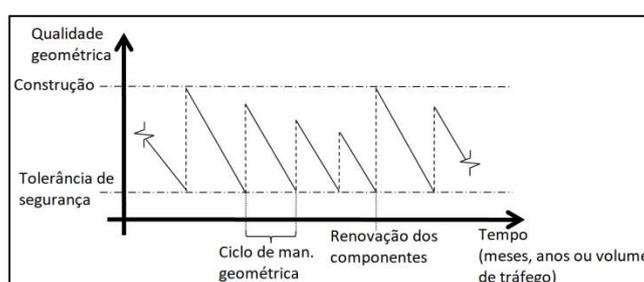


Figura 3: Comportamento típico da qualidade da via permanente ao longo do tempo.

Nesse âmbito, os gestores também têm de lidar com restrições orçamentárias expressivas (CAETANO et al., 2013), visto que os custos de ambos os tipos de intervenções são os maiores dentro do contexto administrativo da infraestrutura ferroviária (BURROW et al., 2009). Assim, em suma, o objetivo do planejamento estratégico dessas manutenções é prover máxima segurança e desempenho com o mínimo de recursos (STENSTRÖM et al., 2016). Tal característica fomentou inúmeras pesquisas destinadas ao desenvolvimento de técnicas de planejamento mais eficientes economicamente, cobrindo temáticas como a prioridade de eleição dos locais de intervenção (KHOUZANI et al., 2017; CAETANO et al., 2015); a interrupção

do tráfego (PENG et al., 2011); o roteamento das equipes de manutenção (SU et al., 2018); o melhor momento de realização dos serviços (BAKHTIARY et al., 2020; WEN et al., 2016; LEE et al., 2017; KHAJEHEI et al., 2019), dentre outras. Apesar do volume e das particularidades, em sua maioria os métodos administrativos subsidiados por esses trabalhos convergem quanto ao uso de técnicas preditivas, estabelecendo meios de intervir na via estritamente quando necessário. É o caso, por exemplo, da norma europeia (EN) 13848-5 (2008), que dirige as ações dos gestores por meio de três limites de alerta segundo a mesma lógica das tolerâncias geométricas. Pragmaticamente, esses modelos buscam executar as manutenções geométricas temporalmente o mais próximo possível do momento em que os desvios alcançariam as tolerâncias de segurança, e da mesma maneira com as renovações, realizando assim o menor número possível de serviços a longo prazo, resultando então em minoração de gastos. Trata-se de uma abordagem conceitualmente simples, de ampla utilização, muito embora sua operacionalização seja complexa, principalmente pela demanda por inspeções constantes e também por modelos matemáticos para estimar as degradações futuras.

Para além dessas questões, contudo, é importante notar que a fundamentação dessas técnicas administrativas não considera qualquer relação entre as degradações geométricas e físicas dos componentes, planejando assim intervenções praticamente independentes entre si. Faz-se menção a tal aspecto porque em contraponto, alguns autores afirmam que os desvios geométricos seriam capazes de induzir acelerações dinâmicas nos veículos durante o tráfego em proporções tais que resultariam num incremento da intensidade com que as rodas solicitariam mecanicamente os próprios componentes da via, o que influenciaria diretamente o ritmo de degradação física dos componentes (GULER, 2016; MOHAMMADIB et al., 2019; GULER et al., 2011; VARANDAS et al., 2020). Por consequência, a partir desse novo entendimento, diferentemente do previsto nos modelos atuais, a postergação das manutenções geométricas resultaria num incremento das solicitações dinâmicas que repercutiria num comprometimento da vida útil dos componentes, que, a depender da proporção, poderia inclusive resultar num aumento dos orçamentos de manutenção. Sendo as renovações o serviço de maior custo unitário, significativamente maior, inclusive, que as próprias correções geométricas, sua antecipação, mesmo em alguns anos, a longo prazo poderia resultar num comprometimento expressivo das economias obtidas pelo menor número de correções geométricas. Apesar de coerente, esse entendimento, contudo, ainda carece de aprofundamentos para sua confirmação.

Assim, a partir desse contexto, este trabalho apresenta um estudo empírico realizado em um trecho ferroviário brasileiro, cujo principal objetivo foi medir a economia de custos potencial que métodos de gestão baseados nesse novo entendimento teriam. Trata-se de uma abordagem que se destina, sobretudo, à difusão científica dos conceitos associados a este campo temático que estão em sua vanguarda de desenvolvimento, visando assim fomentar novos trabalhos por meio da indicação, inclusive, de oportunidades de pesquisas a serem exploradas.

No que tange a sustentabilidade ambiental, o tema aqui discutido é potencialmente importante na medida que ao propor meios de incrementar a vida útil dos componentes, leva à maximização do uso de

materiais cuja origem demanda expressivas intervenções ambientais, seja em jazidas minerais para o fornecimento do material rochoso do lastro ou mesmo o ferro para fabricação de trilhos e fixações, seja na exploração madeireira para fabricação de dormentes. Em outras palavras, com a postergação das renovações diminuem-se a longo prazo o número dessas intervenções o que repercute em menores demandas e pressões ambientais.

Nesse intento, na próxima Seção será apresentada a fundamentação teórica que sustenta a proposição desse novo campo de estudo, bem como indica possíveis linhas de abordagens para o seu desenvolvimento, e posteriormente é apresentado o estudo prático, realizado a partir de um banco de dados da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM). Na quarta Seção são feitas as considerações finais, com a evidência da pertinência dessa área de estudo e a indicação objetiva de alternativas de pesquisa futuras.

REVISÃO TEÓRICA

Considerações sobre os modelos atuais de planejamento de manutenções

As técnicas mais elementares atualmente utilizadas no planejamento de manutenções baseiam-se na comparação entre a severidade das degradações e as tolerâncias aos defeitos, como visto nas normas ABNT NBR 16387:2020 e EN 13848-5 (2008), bem como nos diversos índices de qualidade da via já desenvolvidos, como os exemplos apresentados em Ribeiro (2017), Rodrigues (2001), Litherland et al. (2019) e Soleimanmeigouni et al. (2016). Existem, contudo, modelos bem mais sofisticados, baseados em tratamentos estatísticos e técnicas matemáticas, simulações numéricas e computacionais, dentre inúmeras outras como pode ser consultado nos trabalhos de Soleimanmeigouni et al. (2020), Rahimikelarjani et al. (2020), Nielsen et al. (2018), Andrade et al. (2015), Sharma et al. (2018), Sua et al. (2019), Sadeghi et al. (2017), Neuhold et al. (2020), Andrews et al. (2014), Yang et al. (2020), Wen et al. (2016). Em suma, todos estes métodos e trabalhos destinam-se especificamente à modelagem do comportamento geométrico. Em contrapartida, Rodrigues (1983), Lichtberger (2005), Akeel et al. (2011), Arana et al. (2021), Zhang et al. (2000), Sadegui et al. (2010), Indraratna et al. (2006), Andrade (2008), Baria (2015), Zakeri et al. (2012), Ranjha et al. (2014), Benedetto et al. (2018), apresentam diversos métodos focados na vida útil dos componentes, prevalecendo estudos sobre as degradações em trilhos e no lastro. Dentre estes, alguns poucos, de natureza determinística, tangenciam a temática aqui abordada ao apresentarem equações que consideram as forças aplicadas sobre os componentes, sem, contudo, fazer qualquer análise quanto à geometria. Por fim, apenas Zoeteman (2001), Prescott et al. (2015), e Guler (2016) apresentam modelagens para a gestão completa das manutenções (geometria e renovação), não fazendo, entretanto, qualquer análise sobre a influência do estado de conservação geométrica na determinação do ciclo de renovação.

Em resumo, excetuando a comparação direta entre degradações e tolerâncias, os demais modelos ao estabelecerem meios de prever o comportamento futuro da via fornecem aos gestores formas de avaliar alternativas gerenciais na medida em que possibilitam estimar se com as frequências consideradas, seja de inspeção seja de manutenção, se estará realizando intervenções em volume que assegure a segurança e ao

mesmo tempo não seja demasiado elevado ao ponto de prejudicar o orçamento, seja pela constante paralização do tráfego, seja pelo custo direto dos serviços.

As forças na interface roda/trilho e sua influência na degradação da via

A força mais elementar a qual a via permanente está sujeita é a estática, advinda da força peso das rodas de um veículo estacionado sobre os trilhos. Com o deslocamento, contudo, essa força adquire maior intensidade em função das acelerações e frenagens, bem como pela interação com a via durante a transposição do relevo (SEMPREBONE, 2006). Tais forças são denominadas dinâmicas e são há muito conhecidas e estudadas dada a relevância no dimensionamento das estruturas e dos próprios componentes no projeto dos trechos (REMENNIKOV et al., 2008). Por consequência, estão disponíveis inúmeras formulações para definição de fatores de majoração a serem multiplicados pelas forças estáticas para obtenção das cargas dinâmicas, como a Equação (1) (SEMPREBONE, 2006), em que a variável básica é a velocidade (km/h), por meio da qual, inclusive, pode-se notar a magnitude do incremento dinâmico.

$$\alpha = 1 + \frac{4,5V^2}{100.000} - \frac{1,5V^3}{10.000.000} \quad (1)$$

Em condições perfeitas, essas forças poderiam ser consideradas “quase estáticas”, ou seja, variando pouco ao longo do percurso (KAEWUNRUEN et al., 2010). Essa condição, contudo, não ocorre, e o comportamento dinâmico na realidade é caracterizado por uma variação de carregamentos significativa. Os fatores para tal são variados, indo desde questões aerodinâmicas (CONSOLI, 2007) e características do veículo (KAEWUNRUEN et al., 2018; SUN et al., 2002), até aspectos relacionados à interface roda/trilho, como rodas defeituosas e problemas geométricos (KAEWUNRUEN et al., 2018; NIMBALKAR et al., 2012; CONSOLI, 2007). Em consonância, Pombo et al. (2011) afirmam que essas cargas transmitidas à via permanente dependem significativamente das condições geométricas, e o entendimento da forma como isso ocorre fica facilitado pela análise da Figura 4.

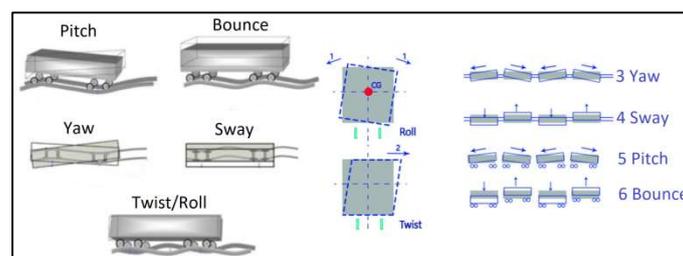


Figura 4: Movimentos dinâmicos gerados pelos desvios geométricos. Fonte: Iwnicki (2006, citado por LIMA, 2019).

Segundo Iwnicki (2006, citado por LIMA, 2019), os defeitos no nivelamento longitudinal são os responsáveis pelo movimento denominado *Pitch*, quando ocorre uma alternância entre a sobrecarga e o alívio das extremidades da caixa do veículo; também é o nivelamento longitudinal o responsável pelo *Bounce*, quando ocorre uma compressão simultânea das molas dos truques dianteiro e traseiro, ocasionando trepidação e sobrecarga; já o *Yaw* é causado por problemas no alinhamento, fazendo com que as extremidades da caixa se locomovam opostas transversalmente, causando um choque das rodas com o trilho; o *Sway* é gerado também pelo alinhamento, levando a uma movimentação lateral do veículo; por fim,

o nivelamento longitudinal leva ao *Roll*, causando um movimento perpendicular à via, sobrecarregando ora as rodas de um lado do veículo, ora as rodas do outro lado.

Segundo Weston et al. (2015), as irregularidades geométricas levam ao desenvolvimento de acelerações dinâmicas no veículo em movimento proporcionais ao quadrado da velocidade, proporcional à amplitude da irregularidade e inversamente proporcional ao quadrado do comprimento da onda do defeito. Assim, uma irregularidade vertical senoidal com amplitude de 10 mm e comprimento de 50 m resultará em uma aceleração de $0,32 \text{ m/s}^2$ a velocidade de 45 m/s, mas resultará em $0,0032 \text{ m/s}^2$ a 4,5 m/s (WESTON et al., 2015). Tais acelerações se traduzem em forças tanto na estrutura dos veículos quanto na via permanente, e quanto à via, a magnitude destas forças (ou carregamentos) pode variar consideravelmente, influenciada pelas características das irregularidades, como também pelo peso/eixo.

Nesse âmbito, You et al. (2017) fornecem um parâmetro prévio sobre a amplitude desses carregamentos. Estes autores realizaram medições de forças dinâmicas em uma linha ferroviária em North Queensland, através da qual trafegaram composições com no máximo 140 kN/roda estática. Nos resultados prevalecem carregamentos que não ultrapassaram este valor por roda, sendo que também há um montante significativo de forças até o limite máximo previsto para o trecho (forças dinâmicas de projeto), no caso 210 kN. Contudo, ocorreram picos de carregamento significativamente mais elevados, em alguns casos atingindo até 310 kN, valor cerca de 47% maior do que o que seria tolerado. Também foram inúmeras as ocorrências intermediárias entre 310 kN e 210 kN, revelando, portanto, que na melhor das hipóteses (ou seja, excluindo acidentes), a via foi solicitada agudamente por diversas vezes.

Vale ressaltar, tendo como base Gullers et al. (2008) e Ngamkhanong et al. (2018), que problemas em rodas, como partes planas, também podem induzir forças dinâmicas significativamente elevadas, contudo, no que concerne à via permanente, alguns autores indicam a quais tipos de defeitos normalmente está associada a geração dos maiores carregamentos de impacto dinâmico. Um dos mais comuns, evidenciado nos estudos de Remennikov et al. (2008), Molodova et al. (2011) e Nielsen et al. (2003), são problemas nas juntas dos trilhos, sejam soldadas ou não. Por meio da análise da Figura 5, por exemplo, é possível notar a sensibilidade desse contexto, já que um defeito da ordem de décimos de milímetros é capaz de induzir expressivas acelerações.

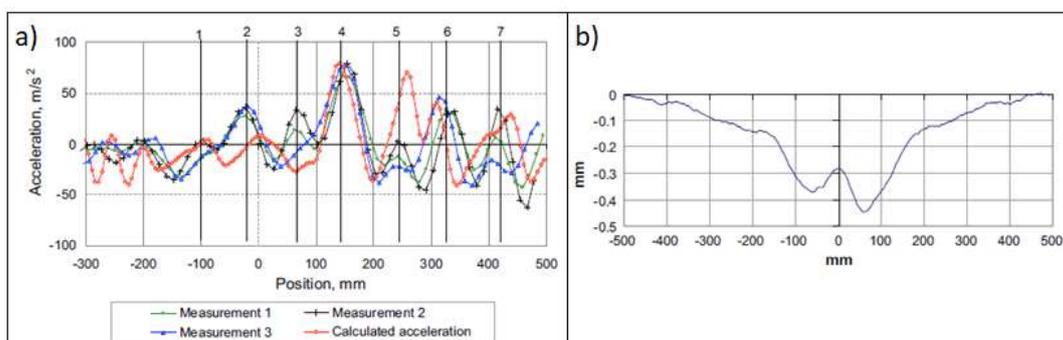


Figura 5: Acelerações (a) medidas em solda de perfil (b) desnivelado. Fonte: Molodova et al. (2011).

Em consonância, Nielsen et al. (2003) demonstra, agora sob a unidade de força, os efeitos que problemas periódicos ao longo da via causam. No caso em questão, fruto de inspeções em um trecho entre

Estocolmo e Gotemburgo, mais uma vez defeitos de pequenas proporções, como indicado na Figura 6 (a) e (b), levam ao desenvolvimento de picos de carregamentos substanciais (Figura 6 (c)).

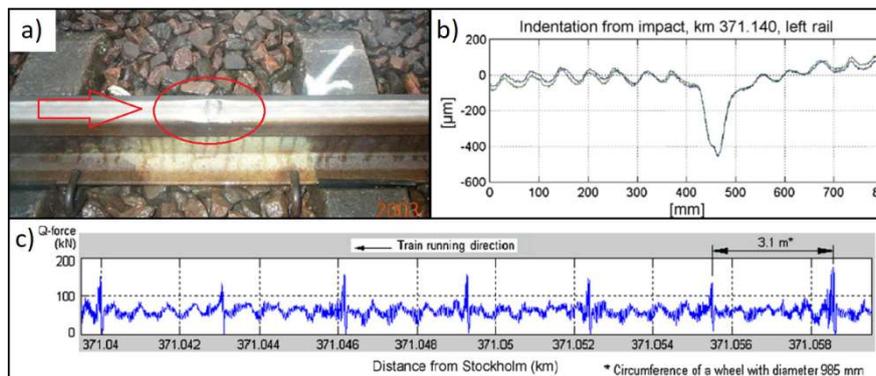


Figura 6: Impactos dinâmicos causados por “endentações” em trilhos. Fonte: Nielsen et al. (2003).

Remennikov et al. (2008) apresentam os resultados de simulações em que ondulações com padrão senoidal de 250 mm de comprimento e 0,8 mm de profundidade foram analisadas. Os resultados mostrados na Figura 7 novamente indicam a elevada magnitude das forças, além do que vale o destaque para o quão breve é a duração desses carregamentos.

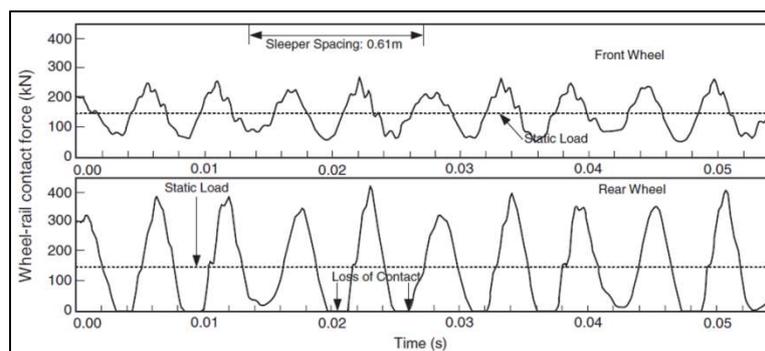


Figura 7: Cargas em um trilho ondulado à velocidade de 162 km/h. Fonte: Remennikov et al. (2008).

Apesar de serem simulações, essas características, contudo, não estão em desacordo com a realidade, visto, por exemplo, os resultados obtidos por inspeções em um trecho japonês de alta velocidade em que foi observado um pico de acelerações extremamente elevado, de cerca de 54,3 g (535kN) e com duração variando de 5 a 10 ms (REMENNIKOV et al., 2008). Além disso, tal qual mostrado na Figura 7, ocorrem momentos de acelerações negativas que coincidem com os vales das ondulações, o que é um indicativo de perda de contato da roda com o trilho, sendo que na sequência, com o restabelecimento do contato, ocorrem os referidos picos de carregamento. Nos trechos estudados por Nielsen et al. (2003) também foram observados defeitos dessa natureza, com ondulações em trilhos de comprimento variando de 3 a 8 cm e cujos efeitos dinâmicos são apresentados na Figura 8.

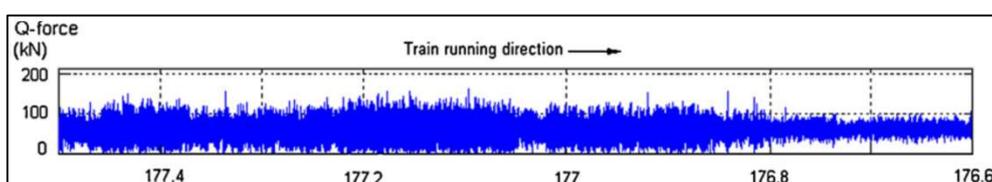


Figura 8: Forças geradas por ondulações em trilhos. Fonte: Nielsen et al. (2003).

Como critério de comparação, a Figura 9 apresenta as forças dinâmicas obtidas por Nielsen et al. (2003) de um trecho de alta qualidade, em que se evidencia uma variação dinâmica em torno da carga estática de 60 kN, com uma amplitude não superior a ± 20 kN.

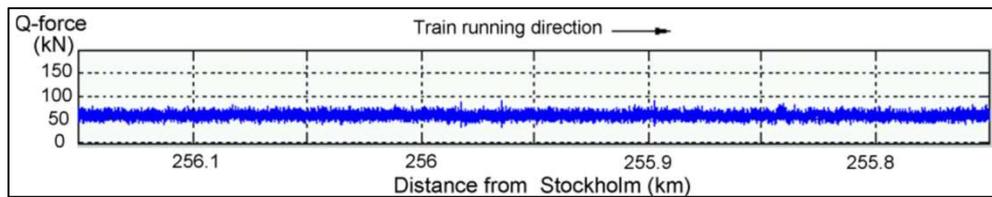


Figura 9: Forças dinâmicas de trecho com alta qualidade. Fonte: Nielsen et al. (2003).

É importante delimitar que não é adequado classificar os exemplos apresentados acima como problemas de geometria propriamente, visto serem de comprimento de onda muito curtos. Todavia, estes foram apresentados por não se ter encontrado na literatura trabalhos especificamente focados nos defeitos geométricos, evidenciando uma lacuna de pesquisa importante, portanto; e, além disso, como indicam Weston et al. (2015) e Consoli (2007), quanto maiores forem os comprimentos de onda dos defeitos, o que por consequência, compreende os desvios geométricos, maior é a energia introduzida no sistema e assim maior tendem a ser as forças de impacto. Em adição, independentemente desse aspecto, esses trabalhos demonstram quão elevadas são as cargas de impacto as quais a via comumente está exposta e que, sobretudo, não estão sendo previstas pelos modelos de majoração dinâmica e nem sendo gerenciadas pelas técnicas de manutenção atuais.

Quanto à análise da influência dessas solicitações mecânicas na diminuição da vida útil dos componentes, a literatura disponível é escassa, contudo, Zarembski et al. (2016) contribui sobremaneira. Estes autores realizaram análises estatísticas em dados históricos relativos a 37.000 km de uma rede ferroviária americana, visando medir a influência da presença de um ou mais defeitos geométricos na vida útil dos trilhos. Os resultados do estudo demonstraram uma relação estatisticamente significativa entre problemas geométricos e defeitos em trilhos, sendo que a correspondência geral dos defeitos (todos os defeitos do trilho) com os problemas geométricos no mesmo local foi de 11%. Além disso, 38% deles (4,2% de todos os defeitos) foram precedidos por dois ou mais defeitos de geometria no mesmo local. Apenas nas curvas, a correspondência geral dos defeitos em trilhos com os desvios de geometria foi de 21%, com 46% destes precedidos por dois ou mais problemas geométricos no mesmo local. A análise da vida útil mostrou que em locais com a presença de defeitos geométricos a idade do trilho no momento da falha era aproximadamente 30% menor que a de um trilho que falhou no mesmo local, porém sem a presença de defeito geométrico.

Esse resultado é extremamente importante, pois indica objetivamente que as forças da interface roda/trilho, influenciadas pelas alterações geométricas, realmente impactaram na degradação dos trilhos. Esse entendimento pode ser estendido aos demais itens, pois necessariamente as sobrecargas nos trilhos serão dissipadas pelos demais componentes, sobrecarregando-os em alguma proporção. Além disso, outros autores fazem afirmações convergentes nesse sentido, como Sol-Sánchez et al. (2015), Varandas et al. (2020),

Kaewunruen et al. (2010), e Herwig et al. (2011). Firma-se assim, a plausibilidade da hipótese de que os defeitos geométricos podem ser gerenciados por técnicas de manutenção apropriadas visando obter benefícios com o incremento da vida útil dos componentes.

METODOLOGIA

Análise do potencial da abordagem

Tendo em vista o conteúdo do referencial teórico, pôde-se concluir que o desenvolvimento de estudos destinados ao amadurecimento técnico da hipótese levantada são justificáveis. Desse modo, com o intuito de sustentar pesquisas futuras também pela relevância econômica do assunto, é apresentado neste capítulo um estudo expedito, de caráter empírico, realizado a partir de dados históricos de um trecho da Estrada de Ferro Vitória a Minas, disponíveis para consulta em Rodrigues (2001). O foco do estudo foi determinar a frequência de manutenções geométricas e renovações que resultariam no menor custo a longo prazo, sendo que para tanto foram seguidas as etapas descritas na Figura 10.

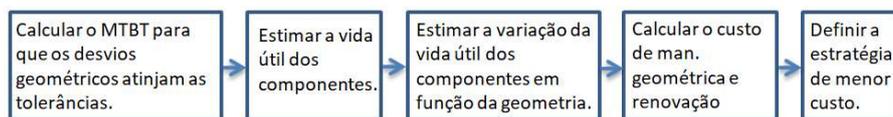


Figura 10: Etapas de desenvolvimento do estudo empírico.

Primeiramente, portanto, será delimitado o tempo para que os desvios geométricos atinjam as tolerâncias geométricas do trecho, e como unidade temporal foi escolhido o MTBT (milhões de toneladas brutas trafegadas), porque expressa a intensidade de uso da via. O que está sendo definido nesse primeiro momento é o máximo intervalo possível entre manutenções geométricas sem a admissão de desvios além das tolerâncias. Para tanto, dos oito relatórios provenientes de inspeções geométricas realizadas ao longo de três anos na EFVM, foram escolhidos trechos que não sofreram quaisquer manutenções entre a primeira e a última inspeção da série disponível, resultando na identificação de 13 trechos na via 1, que juntos totalizaram 4.945 metros de extensão, e 20 trechos na via 2, que totalizaram 5.616 metros. Posteriormente, foram calculados índices de qualidade geométrica para a primeira e a última inspeção da série disponível e para esses trechos das vias 1 e 2. Fundamentando-se em Andrade et al. (2015), os índices escolhidos para tal foram a média da amostra e os valores extremos do intervalo da distribuição normal da média da amostra de todos os parâmetros geométricos, sendo que o índice e o parâmetro geométrico que apresentou o maior ritmo de degradação foi escolhido como indicador padrão da qualidade da via de modo a assim resguardar a segurança com a adoção do cenário de degradação mais intenso. Em resumo, a partir das possíveis combinações entre vias e índices, foram obtidas 6 tabelas como a ilustrada na Tabela 1.

Tabela 1: Média superior da distribuição normal para a geometria da via 1.

Inspeção	Parâmetro - desvio em mm						
	Bitola	Empeno	Super.	Alinha. dir.	Alinha. esq.	Niv. dir.	Niv. esq.
1ª	6,652	1,741	1,464	1,328	1,22	1,049	0,909
8ª	6,128	2,143	1,735	1,572	1,515	1,11	0,796

Fez-se necessário ainda, definir a qualidade geométrica logo pós a execução das manutenções, já que a partir desse estado os desvios evoluíram até alcançar as tolerâncias. Para essa tarefa, no banco de dados disponível foram identificados trechos que sofreram manutenções geométricas entre duas inspeções consecutivas e então os desvios de cada parâmetro geométrico antes das manutenções (D_a), e os desvios medidos depois (D_p), foram aplicados na Equação (2), para a obtenção da proporção de correção ($PC = \%$) dos defeitos.

$$PC = \frac{D_a - D_p}{D_p} \cdot 100 \quad (2)$$

Tendo como base Guler et al. (2011) que esclarecem que na maior parte da vida útil de um trecho ferroviário as degradações evoluem linearmente, o cálculo do momento em que os defeitos atingiram as tolerâncias foi realizado pela Equação (3).

$$MTBT_{man} = \frac{MTBT_T \cdot (G_{lim} - G_F)}{\Delta G} \quad (3)$$

Onde $MTBT_{man}$ é o MTBT para que o desvio alcance a tolerância de manutenção, $MTBT_T$ é a carga (MTBT) transportada no período (disponível no banco de dados), G_{lim} é a tolerância (mm) para o parâmetro analisado, G_F é o valor do desvio (mm) após os serviços de manutenção, calculado pela multiplicação de PC pela tolerância geométrica, e ΔG é a diferença entre o desvio da última e da primeira inspeções (mm). A Tabela 2 resume os principais parâmetros utilizados nesses cálculos, e a Tabela 3 apresenta os resultados finais, com a indicação do parâmetro geométrico com a degradação mais rápida, sendo, portanto, o referencial para o planejamento. A frequência (ciclo) de manutenções estabelecida nessa Tabela 3 foi definida pela divisão entre o $MTBT_{man}$ e a média de transporte mensal (MTBT/mês) que circulou pelo trecho.

Tabela 2: Parâmetros de referencial para cálculo do $MTBT_{man}$.

Parâmetros	Tolerâncias (mm)	PC (%)	Desvios remanescentes após manutenções (mm)	MTBT/mês
Bitola	+20/-5	8,97%	+18,2 -4,6	Via 1: 5,555
Empeno	+/- 9,1	5,78%	+/- 8,6	
Superelevação	+/- 12	4,38%	+/- 11,5	
Alinha. Dir.	+/- 10	6,55%	+/- 9,4	Via 2: 4,853
Alinha. Esq.	+/- 10	8,10%	+/- 9,2	
Niv. Dir.	+/- 4,5	13,93%	+/- 3,9	
Niv. Esq.	+/- 4,5	7,91%	+/- 4,1	

Tabela 3: Ciclos de manutenção geométrica máximos.

Trecho	Índice	Parâmetro	Medida do desvio na inspeção		Degradação (mm/MTBT)	Ciclo máximo (meses)
			1ª	8ª		
Via 1	Média inferior	Empeno	-1,74	-2,148	-4,8E-06	19,93
Via 2	Média inferior	Empeno	-1,911	-2,401	-5,7E-06	16,60

Definidas essas referências sobre a geometria, o segundo passo foi definir a vida útil dos componentes e, nesse caso, foram adotados os valores definidos pela própria EFVM, sendo eles: vida útil dos trilhos de aproximadamente 12 anos; 14 anos para dormentes; 15 anos para as fixações; e o lastro é renovado após a quinta manutenção geométrica consecutiva.

A terceira etapa do processo é a mais relevante, lidando diretamente com a premissa de sustentação desse trabalho, sobre a qual encontram-se as principais limitações teóricas e práticas. Como visto no

referencial bibliográfico, questões sobre qual a amplitude da força gerada por um determinado desvio geométrico, e como essas forças implicam na alteração da degradação dos componentes, até o momento não foram suficientemente definidas. Portanto, as análises dessa etapa se fundam nos seguintes pressupostos: (1) as forças dinâmicas são menores em vias com melhores condições geométricas; (2) ao diminuir os desvios geométricos, a qualidade da via melhora na mesma proporção; relacionando (1) e (2) foi assumido que (3) a vida útil dos materiais aumenta proporcionalmente ao aumento da qualidade da via. A medida dessa proporcionalidade, entretanto, não é conhecida, por isso esse trabalho assumiu que (4) a vida útil dos componentes aumenta linearmente com a diminuição dos desvios.

Para estimar o aumento da qualidade geométrica em função da diminuição do ciclo de manutenção foram identificados no banco de dados trechos que sofreram intervenções geométricas em intervalos inferiores ao ciclo padrão que era adotado pela EFVM (16 meses), e neles, utilizando a mesma abordagem da primeira etapa, foi definida a condição geométrica na inspeção anterior ao serviço. Posteriormente, foram utilizadas as Equações (4) e (5).

$$RC_i = \frac{C_{pi} - C_{ri}}{C_{pi}} \cdot 100 \quad (4)$$

$$RT_i = \frac{T_{pi} - T_{ri}}{T_{pi}} \cdot 100 \quad (5)$$

Onde RC_i é a proporção (%) de redução do ciclo de manutenção geométrica em relação ao ciclo padrão, C_{pi} é o ciclo padrão da empresa (16 meses), e C_{ri} é o ciclo com intervalo reduzido (meses). Na equação 5, RT_i é a proporção (%) de redução da tolerância geométrica, T_{pi} é a tolerância geométrica no ciclo padrão, e T_{ri} é o desvio geométrico na inspeção anterior à manutenção com intervalo reduzido. RT_i expressa o aumento da qualidade geométrica para a redução do ciclo RC_i verificada, e, pela proposição apresentada, o incremento da vida útil ocorrerá nessa mesma proporção. Desse modo, a partir dessa proporção pode ser calculada a proporção ($IV = \%$) de incremento da vida útil dos componentes para qualquer ciclo de manutenção geométrica (NC) que se deseje avaliar, por meio da Equação (6).

$$IV = \frac{RT_i \cdot NC}{RC_i} \quad (6)$$

Foram identificados três trechos com manutenções geométricas em intervalo de 14, 6, e 4 meses, sendo que a partir deles foram calculados RT e RC , sendo então escolhidos os valores (Tabela 4) que expressam a menor proporção de aumento da vida útil dos componentes, mantendo assim uma abordagem conservadora.

Tabela 4: Resultado final para definição de RT e RC .

Trecho	Parâmetro	Proporção de redução	
		RT	RC
Via 1	Empeno	72%	70%

Os custos dos serviços, na quarta etapa, foram determinados tendo como base composições de custo unitários estipulados pela ANTT por meio do relatório SICRO 3 (BRASIL, 2008). Para as manutenções geométricas foram contabilizados o custo direto de realização do serviço e o custo de descarga de lastro

complementar, e nas renovações foram utilizadas composições que compreendessem componentes com as mesmas características daqueles utilizados na ferrovia em questão. Dessa forma, o valor calculado para execução de um serviço de manutenção geométrica foi de R\$ 19.078,59 na via 1, e R\$ 19.776,92 na via 2. Para as renovações, visando tornar as análises mais simplificadas, foi desconsiderada a diferença entre a vida útil dos componentes, assumindo assim que nas intervenções seriam substituídos todos os itens ao mesmo tempo tomando como referência a vida útil dos trilhos (12 anos = 144 meses). Fica como recomendação para trabalhos futuros estudos mais aprofundados sobre a sensibilidade dos custos quanto à substituição individual dos componentes em datas distintas. Assim, para a via 1, o custo de uma renovação foi de R\$ 1.572.983,68, e para a via 2 o valor calculado foi de R\$ 1.633.278,41. Todos esses valores foram definidos para a extensão total dos trechos analisados.

Alcançando agora a quinta e última etapa, a partir da Equação (6) foi analisada como várias frequências de correções geométricas impactariam nos ciclos de renovação. Assim, tomando RT_i/RC_i como 72%/70%, os ciclos de manutenção definidos na primeira etapa foram reduzidos de 0 a 100% em intervalos de 5%, sendo que cada redução foi utilizada no parâmetro NC da Equação resultando nas correspondentes frequências de renovação. Foram gerados, portanto, 20 possíveis estratégias de manutenção em cada via. Como horizonte administrativo para a análise dos custos de longo prazo foi adotado o período de 30 anos, mesmo período das concessões ferroviárias brasileiras. Posteriormente, pela divisão do período de 30 anos pelos correspondentes ciclos de manutenção de cada estratégia, foi definido o montante de manutenções geométricas e renovações que seriam necessárias por alternativa gerencial. Então, os respectivos montantes foram multiplicados pelos correspondentes custos unitários, que após serem somados estabeleceram o custo total de cada estratégia de intervenção. Ao término desse processo, foi possível identificar a alternativa de menor custo.

A Tabela 5 apresenta os resultados finais, com a definição para as vias 1 e 2 das estratégias de intervenção mais econômicas, e na Tabela 6 são apresentados os resultados detalhados obtidos para as simulações de cada alternativa considerada para a via 1, ilustrando assim o processo realizado na análise.

Tabela 5: Resumo dos resultados para os ciclos mais econômicos nas vias 1 e 2.

Via	Ciclo man. geométrica (meses)	Redução do ciclo em relação ao máximo possível (%)	Custo total R\$ (30 anos)
1	14,94	25	2.327.237,40
2	12,45	25	2.571.051,31

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em ambas as vias a estratégia de menor custo a longo prazo foi obtida com uma redução de 25% na frequência de manutenções geométricas. Isso ocorreu, pois é nessa proporção que o número de renovações diminui em uma unidade, principalmente pelo aumento da vida útil dos trilhos. Como mostrado na Tabela 6 e obtido analogamente para a via 2, essas frequências de correção geométrica teoricamente estenderiam a vida útil dos componentes para 181 meses em ambas as vias. Concluindo, a estratégia de manutenção mais econômica seria obtida com manutenções geométricas em frequência de 14,94 e 12,45 meses nas vias 1 e 2

respectivamente, e com renovações a cada 181 meses em ambas as vias. Comparando esse resultado, cujo custo total para vias 1 e 2 totalizou R\$ 4.898.288,70, com o custo da política de manutenção adotada pela EFVM, R\$ 7.870.928,28, obtido a partir das frequências apresentadas anteriormente e por meio das mesmas composições de custo, a economia potencial foi de cerca de 38%.

Além do benefício econômico, também se destaca a relevância ambiental destes resultados visto que no âmbito das técnicas de avaliação do ciclo de vida, estes expressam uma alternativa de uso mais racional dos componentes, com exploração ao máximo da potencialidade, disponibilidade e serventia dos materiais.

Tabela 6: Resultados detalhados obtidos pela análise da variação dos ciclos de manutenção geométrica para a via 1.

Ciclo (meses)	Redução do ciclo (%)	Incremento da vida útil (IV - Equação 6)	Vida útil dos componentes (meses)	Nº de manutenções geométricas	Nº de renovações de lastro	Nº de renovações	Custo total de renovação (R\$)	Custo total de man. geométricas (R\$)	Custo total com manutenções em 30 anos (R\$)
19.93	0%	0.00%	144	18	3	2	3.425.478,82	286.178,83	3.711.657,66
18.93	5%	5.14%	151	19	3	2	3.425.478,82	305.257,42	3.730.736,24
17.93	10%	10.29%	159	20	4	2	3.518.649,30	305.257,42	3.823.906,73
16.94	15%	15.43%	166	21	4	2	3.518.649,30	324.336,01	3.842.985,32
15.94	20%	20.57%	174	22	4	2	3.518.649,30	343.414,60	3.862.063,91
14.94	25%	25.71%	181	24	4	1	1.945.665,62	381.571,78	2.327.237,40
13.95	30%	30.86%	188	25	5	1	2.038.836,10	381.571,78	2.420.407,88
12.95	35%	36.00%	196	27	5	1	2.038.836,10	419.728,96	2.458.565,06
11.96	40%	41.14%	203	30	6	1	2.132.006,58	457.886,14	2.589.892,72
10.96	45%	46.29%	211	32	6	1	2.132.006,58	496.043,31	2.628.049,90
9.96	50%	51.43%	218	36	7	1	2.225.177,07	553.279,08	2.778.456,15
8.97	55%	56.57%	225	40	8	1	2.318.347,55	610.514,85	2.928.862,39
7.97	60%	61.71%	233	45	9	1	2.411.518,03	686.829,20	3.098.347,23
6.97	65%	66.86%	240	51	10	1	2.504.688,51	782.222,15	3.286.910,66
5.98	70%	72.00%	248	60	12	1	2.691.029,48	915.772,27	3.606.801,75
4.98	75%	77.14%	255	72	14	1	2.877.370,44	1.106.558,16	3.983.928,60
3.99	80%	82.29%	262	90	18	1	3.250.052,37	1.373.658,41	4.623.710,78
2.99	85%	87.43%	270	120	24	1	3.809.075,27	1.831.544,54	5.640.619,81
1.99	90%	92.57%	277	180	36	1	4.927.121,06	2.747.316,81	7.674.437,87
1.00	95%	97.71%	285	361	72	1	8.281.258,44	5.513.712,21	13.794.970,65
0	100%	102.86%	-	-	-	-	-	-	-

Assim, com o incremento da vida útil dos ativos, a longo prazo é possível diminuir o número total de renovações e, como cada um desses serviços demanda a utilização de um volume de materiais significativamente elevado, essa diminuição repercute diretamente em uma redução no volume de matérias-primas que seriam retiradas do meio ambiente. No caso em questão, com o resultado obtido o número total de manutenções geométricas no período de 30 anos aumentou em 6 unidades, o que permitiu que o número total de renovações passasse de dois para apenas um serviço. Essa redução significa que para o trecho de aproximadamente 10,5 km estudado, deixariam de ser consumidos, aproximadamente, 1.428 toneladas de trilhos, 19.400 dormentes de madeira, e 10.650 m³ de brita para o lastro.

CONCLUSÕES

A via permanente degrada-se geométrica e fisicamente, requerendo, portanto, manutenções específicas. Tradicionalmente, o planejamento das correções geométricas e das renovações é feito de maneira independente, com a racionalização dos orçamentos por meio da execução da menor quantidade possível de intervenções segundo as premissas operacionais e de segurança. Um novo entendimento, contudo, indica que o estado de conservação geométrica, por meio da indução de forças dinâmicas, pode

influenciar significativamente o ritmo de degradação dos componentes. Este trabalho objetivou verificar qual o potencial econômico que estratégias de manutenção fundamentadas nesse entendimento teriam. O referencial teórico corroborou os conceitos elementares do tema, e a partir de um estudo empírico verificou-se que a longo prazo, a postergação das renovações viabilizada pela diminuição dos ciclos de manutenção geométrica é capaz de gerar expressivos benefícios econômicos e ambientais. Em função das limitações teóricas, a ordem de grandeza da economia de custos obtida deve ser vista com cautela, contudo, a partir dela indica-se a viabilidade desse campo de estudo e o quão promissor é o seu desenvolvimento, já que por se tratarem de orçamentos de valores expressivos, mesmo pequenas economias podem implicar em balanços favoráveis para as companhias ferroviárias.

Por fim, lista-se a seguir as principais oportunidades de pesquisas identificadas durante o desenvolvimento deste trabalho e que podem contribuir ao aprimoramento desse campo de estudo: Desenvolver pesquisa detalhada para o estabelecimento de valores confiáveis sobre qual é a magnitude que as forças de carregamento dinâmico geradas durante o tráfego ferroviário alcançam em função da severidade dos desvios geométricos; Medir como o aumento das forças de carregamento impactam no ritmo de degradação de todos os componentes da via permanente. Alternativas para o desenvolvimento desse tópico são ensaios de laboratório, simulações computacionais, e estudos empíricos baseados no acompanhamento das degradações de componentes expostos a diversas condições geométricas; A partir do item anterior, desenvolver um método para estimar como as vidas úteis dos componentes se alteram em função da alteração das forças dinâmicas; Tendo definido os três tópicos precedentes, desenvolver um método para estimar qual a vida útil dos componentes em função da frequência de manutenção geométrica adotada, permitindo assim analisar diferentes padrões administrativos em busca daqueles de menor custo; Verificar qual o impacto do aumento da frequência de correções geométricas na degradação do lastro; Verificar os benefícios ambientais indiretos obtidos pela postergação das renovações, tais como reduções de emissões e degradações na cadeia produtiva dos componentes; Medir os benefícios ambientais diretamente relacionados à execução dos serviços como, por exemplo, fruto da redução de consumo de combustíveis nos equipamentos de manutenção; Verificar se a sustentabilidade atrelada à imagem da companhia fruto do uso mais eficiente dos componentes pode se reverter num diferencial competitivo frente à concorrência, e ainda como o mercado em geral pode recompensar tal iniciativa.

REFERÊNCIAS

AKEEL, N. A.; SAJURI, Z.; ARIFFIN, A. K.. Analysis of Rolling Contact Fatigue Damage Initiation at the Wheel-Rail Interface. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, v.5, n.12, p.937-945, 2011.

ANDRADE, A. R.. **Renewal decisions from a Life-cycle Cost (LCC) Perspective in Railway Infrastructure: An integrative approach using separate LCC models for rail and ballast components.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

ANDRADE, A. R.; TEIXEIRA, P. F.. Statistical modelling of railway track geometry degradation using Hierarchical

Bayesian models. *Reliability Engineering and System Safety*, v.142, p.169-183, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ress.2015.05.009>

ANDREWS, J.; PRESCOTT, D.; ROZIÈRES, F. D.. A stochastic model for railway track asset management. *Reliability Engineering & System Safety*, v.130, p.76-84, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ress.2014.04.021>

ARANA, B. R.; EMETERIO, S.; ALVARADO, U.; ESNAOLA, J. M. M.; NIETO, J.. Prediction of Rolling Contact Fatigue Behavior in Rails Using Crack Initiation and Growth Models along with Multibody Simulations. *Applied Sciences*, v.11, n.3 p.1026,

2021. DOI: <http://doi.org/10.3390/app11031026>

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16387**: Via férrea — Classificação de vias. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

BAKHTIARY, A.; ZAKERI, J. A.; MOHAMMADZADEH, S.. An opportunistic preventive maintenance policy for tamping scheduling of railway tracks. **International Journal of Rail Transportation**, v.9, n.1, p.1-22, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1080/23248378.2020.1737256>

BARIA, I.. **Sistema de gerência de pavimentos aplicado a via permanente metroferroviária auxiliado por um sistema de informações geográficas**. Tese (Doutorado em engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

BENEDETTO, A.; CIAMPOLI, L. B.. A Computer-Aided Model for the Simulation of Railway Ballast by Random Sequential Adsorption Process. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v.33, p.243-257, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1111/mice.12342>

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de custos de infraestrutura de transportes SICRO 3**: Composições de Custos Unitários Tomo 4/6. Rio de Janeiro: DNIT, 2008.

BURROW, M. P. N.; NAITO, S.; EVDORIDES, H. T. Network-level railway track maintenance Management model. **Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board**, v.2117, n.1, p.66-76, 2009. DOI: <http://doi.org/10.3141/2117-09>

CAETANO, L. F.; TEIXEIRA, P. F.. Availability Approach to Optimizing Railway Track Renewal Operations. **Journal of Transportation Engineering**, v.139, n.9, p.941-948, 2013. DOI: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000575](http://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000575)

CAETANO, L. F.; TEIXEIRA, P. F.. Optimisation model to schedule railway track renewal operations: a life-cycle cost approach. **Structure and Infrastructure Engineering**, v.11, n.11, p.1524-1536, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1080/15732479.2014.982133>

CONSOLI, L. R. P.. **Análise do comportamento dinâmico lateral de um veículo ferroviário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

EN. European Standard. **EN 13848-5**. Railway applications - track - track geometry quality - Part 5: Geometric quality levels. Brussels, Belgium: CEN (European Committee for Standardization). EN, 2008

GHOFRANI, F.; PATHAK, A.; MOHAMMADI, R.; AREF, A.; HE, Q.. Predicting rail defect frequency: An integrated approach using fatigue modeling and data analytics. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v.35, p.101-115, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1111/mice.12453>

GULER, H.. Optimisation of railway track maintenance and renewal works by genetic algorithms. **Grđevinar**, v.68, n.12, p.979-993, 2016. DOI: <http://doi.org/10.14256/JCE.1458.2015>

GULER, H.; JOVANOVIĆ, S.; EVREN, G.. Modelling railway track geometry deterioration. **Transport**, v.164, n.2, p.65-75, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1680/tran.2011.164.2.65>

GULLERS, P.; ANDERSSON, L.; LUNDÉN, R.. High-frequency vertical wheel-rail contact forces: Field measurements and influence of track irregularities. **Wear**, v.265, p.1472-1478, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2008.02.035>

HERWIG, A.; BRÜHWILER, E.. **In-situ dynamic behavior of a railway bridge girder under fatigue causing traffic loading**. Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering. 5 ed. London: CRC Press, 2011.

HU, Y.; ZHOU, L.; DING, H. H.; TAN, G. X.; LEWIS, R.; LIU, Q. Y.; GUO, J.; WANG, W. J.. Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness ratio and creepage conditions. **Tribology International**, v.143, 106091, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106091>

INDRARATNA, B.; KHABBAZ, H.; SALIM, W.; CHRISTIE, D.. Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilisation. **Ground Improvement**, v.10, n.3, p.91-101, 2006. DOI: <http://doi.org/10.1680/grim.2006.10.3.91>

KAEWUNRUEN, S.; REMENNIKOV, A. M.. Dynamic Crack Propagations in Prestressed Concrete Sleepers in Railway Track Systems Subjected to Severe Impact Loads. **Journal of Structural Engineering**, v.136, n.6, p.749-754, 2010. DOI: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000152](http://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000152)

KAEWUNRUENA, S.; NGAMKHANDONGA, C.; LIMA, C. H.. Damage and failure modes of railway prestressed concrete sleepers with holes/web openings subject to impact loading conditions. **Engineering Structures**, v.176, p.840-848, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.057>

KANGA, C.; SCHNEIDER, S.; WENNER, M.; MARX, S.. Experimental investigation on rail fatigue resistance of track/bridge interaction. **Engineering Structures**, v.216, n.110747, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110747>

KHAJEHEI, H.; AHMADI, A.; SOLEIMANMEIGOUNI, I.; NISSEN, A.. Allocation of effective maintenance limit for railway track geometry. **Structure and Infrastructure Engineering**, v.15, n.12, p.1597-1612, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1080/15732479.2019.1629464>

KHOUZANI, A. H. E.; GOLROO, A.; BAGHERI, M.. Railway Maintenance Management Using a Stochastic Geometrical Degradation Model. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, v.143, n.1, p.04016002, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000002>

KOOHMISHI, M.. Drainage potential of degraded railway ballast considering initial gradation and intrusion of external fine materials. **Soils and Foundations**, v.59, n.6, p.2265-2278, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.12.011>

KOOHMISHIA, M.; PALASSIB, M.. Degradation of railway ballast under impact loading considering the morphological properties of aggregate. **Transportation Geotechnics**, v.25, 100398, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100398>

LEE, J. S.; CHOI, I. Y.; KIM, K.; HWANG, S. H.. Tamping and renewal optimization of ballasted track using track measurement data and genetic algorithm. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, v.144, n.3, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000120>

LICHTBERGER, B.. **Track Compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics**. Hamburg: Eurailpress, 2005.

LIMA, J. B.. **Utilização de sistemas de medição com base na vibração dinâmica para análise e prevenção de descarrilamentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2019.

LITHERLAND, J.; ANDREWS J.. A Petri Net Methodology for Modelling the Maintenance of Railway Route Sections. **Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference**. 2019. DOI: http://doi.org/10.3850/978-981-11-2724-3_0137-cd

MOHAMMADI, R.; HE, Q.; GHOFRANI, F.; PATHAK, A.; AREF, A.. Exploring the impact of foot-by-foot track geometry on the occurrence of rail defects. **Transportation Research Part C**, v.102, p.153-172, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.trc.2019.03.004>

MOLODOVA, M.; DOLLEVOET, R.. Axle box acceleration: Measurement and simulation for detection of short track defects. **Wear**, v.271, n.1-2, p.349-356, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.003>

NEUHOLD, J.; VIDOVIC, I.; MARSCHNIG, S.. Preparing Track Geometry Data for Automated Maintenance Planning. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, v.146, n.5, p.04020032, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000349>

NGAMKHANDONG, C.; GOTO, K.; KAEWUNRUEN, S.. Dynamic responses of railway ballasted track considering rail pad deterioration. **Journal of Physics: Conference Series**, v.1106, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1106/1/012006>

NIELSEN, J. C. O.. Numerical prediction of rail roughness growth on tangent railway tracks. **Journal of Sound and Vibration**, v.267, n.3, p.537-548, 2003. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00713-2](http://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00713-2)

NIELSEN, J. C. O.; LI, X.. Railway track geometry degradation due to differential settlement of ballast/subgrade e Numerical prediction by an iterative procedure. **Journal of Sound and Vibration**, v.412, p.441-456, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.10.005>

NIMBALKAR, S.; INDRARATNA, B.; DASH, S. K.; CHRISTIE, D.. Improved Performance of Railway Ballast under Impact Loads Using Shock Mats. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.138, n.3, p.281-294, 2012. DOI: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000598](http://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000598)

PANGA, Y.; LINGAMANAIB, S. N.; CHENA, B. K.; YU, S. F.. Measurement of deformation of the concrete sleepers under different support conditions using non-contact laser speckle imaging sensor. **Engineering Structures**, v.205, 2020.

DOI: <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110054>

PENG, F.; KANG, S.; LI, X.; OUYANG, Y.; SOMANI, K.; ACHARYA, D.. A Heuristic Approach to the Railroad Track Maintenance Scheduling Problem. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v.26, p.129-145, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2010.00670.x>

POMBO, J.; AMBRÓSIO, J.; PEREIRA, P.; VERARDI, R.; ARIAUDO, C.; KUKA, N.. Influence of track conditions and wheel wear state on the loads imposed on the infrastructure by railway vehicles. **Computers and Structures**, v.89, n.21-22, p.1882-1894, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.05.009>

PRESCOTT, D.; ANDREWS, J.. Investigating railway track asset management using a Markov analysis. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v.229, n.4, p.402-416, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1177/0954409713511965>

RAHIMIKELARIJANI, B.; MOHASSEL, A.; HAMIDI, M.. Railroad Track Geometric Degradation Analysis: A BNSF Case Study. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, v.146, n.2, 04019068, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000303>

RANJHA, S. A.; MUTTON, P.; KAPOOR, A.. Fatigue analysis of the rail underhead radius under high axle load conditions. **Advanced Materials Research**, v.891-892, p.1181-1187, 2014. DOI: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.891-892.1181>

REMENNIKOV, A. M.; KAEWUNRUEN, S.. A review of loading conditions for railway track structures due to train and track vertical interaction. **Structural Control Health Monitoring**, v.15, n.2, p.207-234, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1002/stc.227>

RIBEIRO, F. S.. **Contribuição para análise do custo do ciclo de vida de um sistema de gerência de pavimento ferroviário**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

RODRIGUES, C. A.. **Avaliação da carga por eixo dos veículos ferroviários**. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1983.

RODRIGUES, C. A.. **Contribuição ao planejamento da manutenção preditiva da superestrutura ferroviária**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

SADEGHI, J.; HEYDARI, H.; DOLOEI, E. A.. Improvement of Railway Maintenance Approach by Developing a New Railway Condition Index. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, v.143, n.8, p.04017037, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000063>

SADEGUI, J.; ASKARINEJAD, H.. Development of improved railway track degradation models. **Structure and Infrastructure Engineering**, v.6, n.6, p.675-688, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1080/15732470801902436>

SASIDHARAN, M.; BURROW, M. P. N.; GHATAORA, G. S.. A

whole life cycle approach under uncertainty for economically justifiable ballasted railway track maintenance. **Research in Transportation Economics**, v.80, 100815, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100815>

SEMPREBONE, P. S.. **Desgastes em trilhos ferroviários: Um estudo teórico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SHARMA, S.; CUI, Y.; HE, Q.; MOHAMMADI, R.; LI, Z.. Data-driven optimization of railway maintenance for track geometry. **Transportation Research Part C**, v.90, p.34-58, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.trc.2018.02.019>

SOLEIMANMEIGOUNI, I.; AHMADI, A.; KHAJEHEI, H.; NISSEN, A.. Investigation of the effect of the inspection intervals on the track geometry condition. **Structure and Infrastructure Engineering**, v.169, n.8, p.1138-1146, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1080/15732479.2019.1687528>

SOLEIMANMEIGOUNI, I.; AHMADI, A.; KUMAR, U.; NISSEN, A.. Track geometry degradation and maintenance modelling: A review. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v.232, n.1, p.73-102, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1177/0954409716657849>

SOL-SÁNCHEZ, M.; NAVARRO, F. M.; GÁMEZ, C. R.. The use of elastic elements in railway tracks: A state of the art review. **Construction and Building Materials**, v.75, p.293-305, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.027>

STEFFLER, F.. **Via permanente aplicada: guia teórico e prático**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

STENSTRÖM, C.; NORRIN, P.; PARIDA, A.; KUMAR, U.. Preventive and corrective maintenance: cost comparison and cost-benefit analysis. **Structure and Infrastructure Engineering**, v.12, n.5, p.603-617, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1080/15732479.2015.1032983>

SU, Z.; SCHUTTER, B.. Optimal scheduling of track maintenance activities for railway networks. **IFAC-Papers OnLine**, v.51, n.9, p.386-391, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.063>

SUA, Z.; JAMSHIDIB, A.; NÚÑEZ, A.; BALDI, S.; DE SCHUTTER, B.. Integrated condition-based track maintenance planning and crew scheduling of railway networks. **Transportation Research Part C**, v.105, p.359-384, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.trc.2019.05.045>

SUN, Y. Q.; DHANASEKAR, M.. A dynamic model for the vertical interaction of the rail track and wagon system.

International Journal of Solids and Structures, v.39, p.1337-1359, 2002. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0020-7683\(01\)00224-4](http://doi.org/10.1016/S0020-7683(01)00224-4)

VARANDAS, J. N.; PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E.; COELHO, B. Z.; HÖLSCHER, P.. Long-term deformation of railway tracks considering train-track interaction and non-linear resilient behaviour of aggregates: a 3D FEM implementation. **Computers and Geotechnics**, v.126, 103712, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103712>

WEN, M.; LI, R.; SALLING, K. B.. Optimization of preventive condition-based tamping for railway tracks. **European Journal of Operational Research**, v.252, p.455-465, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.01.024>

WESTON, P.; ROBERTS, C.; YEO, G.; STEWART, E.. Perspectives on railway track geometry condition monitoring from in-service railway vehicles. **Vehicle System Dynamics**, v.53, n.7, p.1063 - 1091, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1080/00423114.2015.1034730>

YANG, Y.; LIU, G.; WANG, X.. Time-frequency characteristic analysis method for track geometry irregularities based on multivariate empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis. **Vehicle System Dynamics**, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1080/00423114.2019.1711137>

YOU, R.; LI, D.; NGAMKHANDONG, C.; JANELIUKSTIS, R.; KAEWUNRUEN, S.. Fatigue Life Assessment Method for Prestressed Concrete Sleepers. **Frontiers in Built Environment Transportation and Transit Systems**, v.3, n.68, 2017. DOI: <http://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00068>

ZAKERI, J. A.; SHAHRIARI, S.. Developing a deterioration probabilistic model for rail wear. **International Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v.1, n.2, p.13-18, 2012. DOI: <http://doi.org/10.5923/j.ijtte.20120102.02>

ZAREMBSKI, A. M.; EINBINDER, D.; OKINE, N. A.. Using multiple adaptive regression to address the impact of track geometry on development of rail defects. **Construction and Building Materials**, v.127, p.546-555, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.012>

ZHANG, Y. J.; MURRAY, M.; FERREIRA, L.. Modelling rail track performance: an integrated approach. **Transport**, v.141, n.4, p.187-194, 2000. DOI: <http://doi.org/10.1680/tran.2000.141.4.187>

ZOETEMAN, A.. Life cycle cost analysis for managing rail infrastructure: Concept of a decision support system for railway design and maintenance. **European Journal of Transport and Infrastructure Research**, v.1, n.4, p.391-413, 2001. DOI: <http://doi.org/10.18757/ejitr.2001.1.4.3506>

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da Sustenere Publishing, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.