

INSPEÇÕES DINÂMICAS NA GARANTIA DA SEGURANÇA OPERACIONAL FERROVIÁRIA: UMA ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

DYNAMIC INSPECTIONS IN THE GUARANTEE OF RAILWAY OPERATIONAL SAFETY: A BIBLIOGRAPHIC ANALYSIS

Isaias Pereira Seraco^{1*}

Hostilio Xavier Ratton Neto²

^{1,2} Programa de Engenharia de Transportes - Universidade Federal do Rio de Janeiro

* isaias.seraco@pet.coppe.ufrj.br

Resumo: Esse trabalho apresenta um estudo bibliográfico que analisou se as alterações geométricas na via permanente ferroviária podem induzir acelerações elevadas no material rodante e se estas possuem algum tipo de influência sobre a vida útil dos componentes da superestrutura. O objetivo do trabalho foi identificar lacunas de conhecimento relevantes passíveis de serem exploradas em pesquisas futuras. As técnicas atuais de manutenção geométrica se baseiam na postergação das intervenções ao limite das tolerâncias de segurança visando reduções orçamentárias. Autores demonstraram que em decorrência de determinadas alterações na via, durante o tráfego são geradas acelerações e, conseqüentemente, forças de impacto dinâmico, significativamente elevadas, acima, inclusive, daquelas previstas no projeto da ferrovia. Também foi visto que em trechos com a presença de defeitos geométricos, trilhos falharam em frequência mais elevada do que em locais sem problemas dessa natureza. A partir desses trabalhos foram identificadas inúmeras oportunidades de pesquisa tanto no que se refere ao aprofundamento da temática, com a descrição detalhada da relação entre a amplitude da geometria e a geração das acelerações, quanto em novas abordagens, no desenvolvimento de métodos de apoio a decisão visando a segurança operacional e reduções orçamentárias.

Palavras-chave: Ferrovia. Via permanente. Segurança. Forças dinâmicas.

Abstract: This paper presents a bibliographic survey that analyzed if the track geometric changes can induce high accelerations in the rolling stock and if these influence the useful life of the railway's superstructure components. The objective of the work was to identify relevant knowledge gaps that can be explored in future research. Current geometric maintenance techniques are based on the postponement of interventions until the safety limit aiming at budget reductions. Authors have shown that due to certain track changes, accelerations are generated during traffic and, consequently, significantly high dynamic impact forces, even above those predicted in the railway project. It was also verified that in stretches with the presence of geometric defects, the rails failed more frequently than in places without problems of this nature. Based on these works, numerous research opportunities were identified, both in terms of deepening the theme, with a detailed description of the relationship between the amplitude of the geometry and the accelerations generation, and in new approaches, in the development of decision support methods aimed at operational safety and budget reductions.

Keywords: Railroad. Track. Safety. Dynamic forces.

1. INTRODUÇÃO

A degradação física dos componentes da superestrutura (lastro, dormentes, fixações e trilhos) e a alteração geométrica do seu conjunto, são os dois tipos básicos de degradação que se desenvolvem na via permanente ferroviária (Guo et al., 2018). Por degradações físicas se designa todo tipo de desgaste, quebra e dano na estrutura dos componentes que leva à perda imediata ou progressiva de sua capacidade funcional; e degradações geométricas são desvios na posição de projeto dos itens ao longo do traçado. Essas degradações requerem manutenções específicas, sendo elas a renovação (substituição) dos componentes e a correção geométrica, respectivamente. O elevado ritmo de degradação geométrica faz com que no intervalo entre duas renovações consecutivas sejam necessárias várias manutenções geométricas. As degradações são influenciadas por diversos fatores, como frequência, peso/eixo e velocidade do tráfego, e aspectos ambientais (Zi et al., 2012; Soleimanmeigouni et al., 2016).

Dois aspectos são preponderantes para a gestão das manutenções: a segurança e o desempenho do tráfego. É diretriz mundialmente consolidada e normatizada a adoção de limites de degradação em função das velocidades máximas autorizadas para o trecho, sobretudo quanto aos desvios geométricos. A ABNT NBR 16387:2020 e a EN 13848-5 (2008) são exemplos de normas que estabelecem tais tolerâncias, sendo que quanto maiores forem as velocidades operacionais, mais restritos são os limites (Guler et al., 2011; Roghani e Hendry, 2017). Essas tolerâncias são referência para as manutenções, pois uma vez extrapoladas requererão uma intervenção corretiva, ou então uma restrição de velocidade visando diminuir o risco de acidentes. Tais restrições têm consequências sobre o desempenho do tráfego, já que implicam numa capacidade de transporte menor.

Tradicionalmente a frequência das intervenções geométricas era ditada de modo a se evitar ao máximo desvios além das tolerâncias. Apesar do objetivo final (a segurança) ser absolutamente válido e importante, essa prática resultava em serviços em frequências elevadas, gerando custos elevados (Higgins e Liu, 2017; Pen et al., 2019). Contudo, o desenvolvimento do transporte ferroviário, com peso/eixo, velocidades e intensidade de tráfego cada vez maiores, janelas operacionais limitadas para manutenções (Praticò e Giunta, 2018; Chen et al., 2020) e orçamentos restritos (Caetano e Teixeira, 2013), levou ao desenvolvimento de políticas de manutenção cada vez mais preditivas, visando reduções orçamentárias.

Em sua maioria, essas estratégias administrativas são subsidiadas por métodos de apoio à decisão baseados no uso de modelos estatísticos, simulações numéricas e computacionais, dentre outras ferramentas (que podem ser consultadas em Soleimanmeigouni et al., 2020; Rahimikelarijani et al., 2020; Nielsen et al., 2018; Andrade e Teixeira, 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). Tais métodos se destinam a tornar previsível o comportamento futuro da via de modo que o momento das intervenções seja estrategicamente definido, de modo que não sejam tolerados desvios além do permitido, nem antecipações desnecessárias. Em resumo, busca-se realizar as manutenções no limiar de atingimento dos limites geométricos, e, como consequência, em um horizonte de longo prazo o montante das intervenções será o menor possível. Quanto às renovações, a estratégia é semelhante, com o acompanhamento da evolução das degradações e substituição dos itens estritamente quando necessário. Portanto, são obtidas economias de escala, com reduções de custos diretos, fruto do menor número de intervenções, e custos indiretos pela redução de atrasos na circulação dos trens, por exemplo.

Alguns autores, contudo, têm demonstrado que a avaliação da segurança do tráfego não deve se limitar em fazer uma comparação entre os valores dos parâmetros geométricos e suas tolerâncias, mas devem incluir uma análise da resposta dinâmica do veículo durante o tráfego. Essa afirmação fundamenta-se no fato que as acelerações que o material rodante adquire em relação à via permanente durante o deslocamento possuem singular impacto sobre o equilíbrio e segurança operacional. Estudos apresentam evidências que as forças dos veículos sobre os trilhos em trechos com alterações geométricas podem alcançar patamares significativamente

elevados, capazes de levar a acidentes mesmo em trechos com desvios dentro das tolerâncias (Higgins e Liu, 2017; Lima, 2019; Pen et al., 2019). Lima et al. (2021), por exemplo, realizaram inspeções por meio das quais constatou-se condições dinâmicas inseguras mesmo em seções de via permanente cuja geometria atendia às normas de segurança.

Tal característica também poderia influenciar na forma como a via se degrada, uma vez que tais acelerações poderiam gerar sobrecargas das forças de solicitação mecânica dos componentes, resultando em um incremento da degradação física (Guler et al., 2011; Guler, 2016; Mohammadib et al., 2019; Varandas et al., 2020). Portanto, além das implicações sobre a segurança, os métodos preditivos de planejamento atuais podem permitir desvios geométricos em amplitude tal que prejudiquem a vida útil dos componentes, o que em um horizonte de longo prazo, resultaria na antecipação das renovações e, conseqüentemente, em sobrecustos.

Portanto, esse contexto motivou o desenvolvimento deste trabalho que apresenta um estudo bibliográfico realizado em base de periódicos que investigou se a geometria de fato influencia o desenvolvimento de forças dinâmicas elevadas, capazes de prejudicar a segurança operacional mesmo quando atendidas as normas geométricas vigentes, bem como buscou trabalhos que avaliaram se a amplitude dessas forças toleradas pelas técnicas de manutenção atuais realmente pode influenciar a degradação dos componentes da via permanente. O objetivo deste estudo foi identificar oportunidades de pesquisas futuras, sobretudo no que se refere ao desenvolvimento de temáticas úteis no estabelecimento de políticas de manutenção mais seguras e econômicas. Assim, na próxima seção, é delimitada a estratégia utilizada para realização do levantamento bibliográfico. Na Seção 3 é apresentado o conteúdo bibliográfico que sustentou a identificação de diversas oportunidades de pesquisas, apresentadas na seção seguinte. Na Seção 5 este trabalho foi finalizado com a indicação das principais conclusões obtidas.

2. ESTRATÉGIA DE LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

A bibliografia analisada é fruto de captações de trabalhos realizadas durante o amadurecimento da proposta, mas, sobretudo, de um levantamento feito na base de periódicos Scopus. Preferiu-se essa base pois ela publica apenas a versão final dos trabalhos. Este levantamento utilizou 8 grupos de palavras-chave definidas em função do tipo de informação almejada, e em cada conjunto de trabalhos obtidos, foram escolhidos apenas os artigos de periódicos e de congressos, sendo selecionados para análise os 15 mais citados, as 15 referências mais utilizadas pelos mesmos trabalhos, e os 15 trabalhos mais relevantes definidos pela própria Scopus. Como resultado, foram definidos 360 trabalhos. A Tabela 1 resume os resultados.

Tabela 1 – Balanço do levantamento bibliográfico – base Scopus

Palavras-chave	Objetivo	Nº de trabalhos
“railway” AND “track” AND “degradation”	Como analisar a degradação da via	640
“railway” AND “track” AND “maintenance”	Como analisar e gerir a manutenção	2.865
“railway” AND “track” AND “dynamic”	Generalidades sobre forças dinâmicas	4.264
“railway” AND “track” AND “dynamic” AND “interaction”	Especificidades sobre forças dinâmicas na interface roda/trilho	1.328
“railway” AND “track” AND “dynamic” AND “degradation”	Relação entre as forças dinâmicas e a degradação da via	201
“railway” AND “track” AND “dynamic” AND “deterioration”	Relação entre as forças dinâmicas e a degradação da via	166
“railway” AND “track” AND “dynamic” AND “wear”	Relação entre as forças dinâmicas e a degradação da via	308
“railway” AND “track” AND “dynamic” AND “fatigue”	Relação entre as forças dinâmicas e a degradação da via	270

variação de carregamentos devido a fatores de excitação externos, tais como questões aerodinâmicas (Consoli, 2007), características do veículo, velocidade operacional (Kaewunruen et al., 2018), mas, sobretudo, aspectos diretamente relacionados à interface roda/trilho (Nimbalkar et al., 2012; Kaewunruen et al., 2018). Nesse sentido, Pombo et al. (2011) afirmam que o movimento dinâmico dos veículos é significativamente afetado pelas condições geométricas, como ilustrado na Figura 2 e Tabela 1.

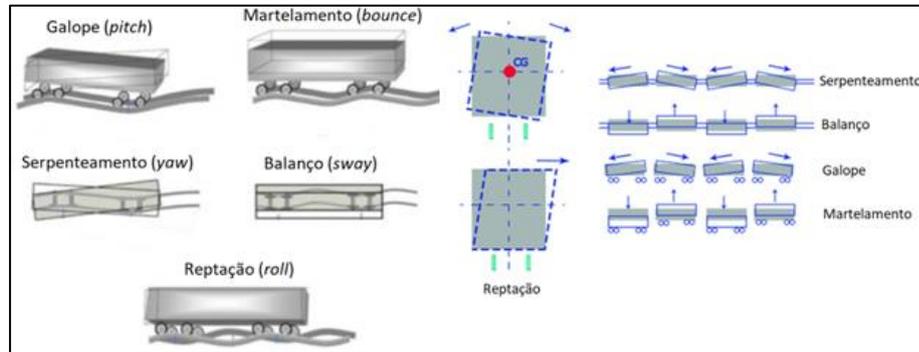


Figura 2 – Movimentos dinâmicos ferroviários decorrentes de alterações geométricas
Fonte: Iwnicki (2006) apud Lima (2019)

Tabela 1 – Influência da geometria da via nos movimentos dinâmicos

Movimento	Descrição	Parâmetro geométrico condicionante
<i>Pitch</i>	Alternância entre a sobrecarga e o alívio das extremidades da caixa do veículo.	Nivelamento Longitudinal
<i>Bounce</i>	As molas dos truques dianteiro e traseiro são comprimidas ao mesmo tempo ocasionando trepidação e sobrecarga em todos os eixos.	Nivelamento Longitudinal
<i>Yaw</i>	As extremidades da caixa se locomovem opostas transversalmente e causam um desgaste maior das rodas, pois há um choque no contato destas com o trilho.	Alinhamento
<i>Sway</i>	Gera-se um desconforto causado por uma movimentação lateral do veículo.	Alinhamento
<i>Roll</i>	Movimento no sentido perpendicular à via, sobrecarregando ora as rodas de um lado do veículo, ora as rodas do outro lado.	Nivelamento Longitudinal

Fonte: Iwnicki (2006) apud Lima (2019)

Tais movimentos geram uma sobrecarga das forças dinâmicas, gerando efeitos negativos no veículo e na via, e graves implicações na segurança operacional, visto que alterações severas e abruptas na interação roda/trilho podem gerar sobrecargas ou alívios nas rodas capazes de levar ao descarrilamento (Spiroiu, 2016). Tais efeitos são estudados desde o Século XIX, sendo que um dos modelos de análise de risco mais consolidado nesse âmbito é o chamado critério de Nadal. Seu desenvolvimento baseia-se na avaliação do equilíbrio das forças laterais (L) e cargas dinâmicas verticais (V) de uma roda em determinado instante, com a proposição de um valor limite de descarrilhamento, chamado L/V crítico, determinado pela Equação 1 (Lima, 2019).

$$\frac{L}{V} = \frac{\tan\theta - \mu}{1 + \mu \tan\theta} \quad (1)$$

Onde L é a força na direção horizontal no friso da roda; V é a carga vertical atuante na roda; θ é o ângulo da face de contato entre a roda e o trilho; e μ é o coeficiente de atrito entre o lado do trilho e o friso da roda. A Figura 3 apresenta valores referenciais de L/V crítico.

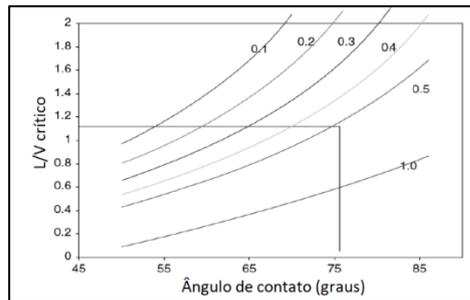


Figura 3 – Variação do L/V crítico em função do ângulo e coeficiente de atrito entre roda – trilho
 Fonte: Lima (2019)

Apesar do conhecimento consolidado a respeito da influência da geometria na geração de acelerações e movimentos dinâmicos inseguros, existem aspectos que ainda motivam aprofundamentos. Essa observação pode ser sublinhada a partir do trabalho de Lima et al. (2021), que realizaram inspeções em trechos ferroviários de diferentes perfis, que transportavam exclusivamente passageiros e exclusivamente cargas. Os autores identificaram segmentos em que existiam desvios geométricos além das tolerâncias, onde, por outro lado, não existiam problemas dinâmicos, enquanto em outros trechos, existiam problemas dinâmicos sem qualquer defeito geométrico. Segundo o autor essa característica demonstra que os efeitos dinâmicos não são consequência de defeitos geométricos isolados, mas da associação de alterações, mesmo quando estas estão em magnitude inferior à máxima tolerada. Não foram feitas, entretanto, considerações a respeito da forma como se dá essa associação.

Segundo Weston et al. (2015) as acelerações na estrutura do veículo em relação à via são proporcionais ao quadrado da velocidade longitudinal, proporcional à amplitude da irregularidade geométrica e inversamente proporcional ao quadrado do comprimento da onda formada pelo defeito. Salvador et al. (2016) destacam que alterações discretas nos componentes da via, como anomalias nas juntas entre trilhos, nos aparelhos de mudança de via, desgastes em trilhos e pequenos defeitos superficiais, podem ser fonte de vibrações. Essas acelerações e vibrações se traduzem em forças que se dispersam no veículo e na própria via e, quanto à sua magnitude, as contribuições mais relevantes foram feitas pelos trabalhos apresentados a seguir.

Em uma prospecção de campo realizada na linha ferroviária em *North Queensland* na Austrália, Ruilin et al. (2017) mediram todos os carregamentos dinâmicos exercidos por trens carregados (peso/eixo máximo de 140 kN/roda estática) e trens sem carga. Nos registros prevaleceram carregamentos que não ultrapassaram cerca de 140 kN por roda, provavelmente originados de veículos mais leves e vazios. O montante de forças até o limite de projeto (força dinâmica de 210 kN), também foi elevado. Destaca-se, contudo, o fato de que ocorreram picos significativamente mais elevados, em alguns casos atingindo até 310 kN, valor cerca de 47% maior do que o tolerado. A frequência desses picos, por outro lado, foi muito menor, cerca de 5% de todos os carregamentos acima do limite. Contudo, ocorreram vários carregamentos intermediários entre esse pico e a força dinâmica máxima tolerada, indicando, portanto, que na melhor das hipóteses (ou seja, excluindo acidentes), a via foi solicitada agudamente por diversas vezes. O trabalho, contudo, não investigou as circunstâncias geradoras dessas cargas.

Cai et al. (2015) indicam que os picos de carregamento na circulação ferroviária ocorrem, sobretudo, no sentido vertical, indicando, portanto, a quais desvios essas acelerações podem estar associadas. Impactos verticais podem ser fruto de anormalidades tanto nas rodas quanto nos trilhos. No que concerne à via permanente, Remennikov e Kaewunruen (2008) analisaram os efeitos dinâmicos decorrentes de uma junta entre trilhos (com talas) desnivelada. Os resultados demonstraram que uma carga estática de 80 kN gerou, em velocidade de 250

km/h, um pico de carga dinâmica da ordem de 400 kN, sendo seguido por uma oscilação de forças que levou a um segundo carregamento de pouco menos de 300 kN, porém de maior duração.

Molodova e Dollevoet (2011) monitoraram uma região de solda entre trilhos defeituosa, com características semelhantes ao problema investigado pelos autores supracitados. O problema em questão caracterizava-se por um desnivelamento que se estendia por cerca de um metro, e com profundidade máxima da ordem de 0,45 mm. Apesar de discreto, esse problema gerou um pico de acelerações no local de cerca de 70 m/s².

Gullers et al. (2008), que realizaram uma série de inspeções em trechos ferroviários entre Estocolmo e Gotemburgo, contribuem para o entendimento do que ocorre durante a geração das cargas de impacto. Em um monitoramento de uma depressão na região de junta entre trilhos foi identificado que a força de carregamento dos veículos ao cruzar o local caía para zero sobre o desnível, o que indicou para os autores a perda de contato entre a roda e o trilho. Em seguida, ocorreu um impacto cujo pico de força atingiu cerca de 350 kN (a carga estática era de aproximadamente 80 kN). Posteriormente, ocorreu um segundo “salto” da roda em relação ao trilho, o que foi seguido por um segundo impacto. Finalmente, ocorreu uma oscilação decrescente das forças à medida que o sistema roda/trilho se estabilizava. Embora a frequência desse tipo de defeito seja pequena, a magnitude das forças tem potencial para danificar as rodas dos veículos, que, por sua vez, podem danificar a superfície do boleto dos trilhos (Gullers et al., 2008). Essa situação foi analisada pelos mesmos autores no trecho em questão, e foram identificados locais em que a superfície dos trilhos apresentava irregularidades periódicas (pequenas áreas de depressão com profundidade de 0,4 mm), em frequência similar à circunferência das rodas. Esses defeitos levaram a picos de força da ordem de 200 kN.

Ondulações (ou corrugações) nos trilhos, seja de comprimento de onda curto ou longo, são defeitos que também são relatados como fonte de cargas de alto impacto dinâmico (Remennikov e Kaewunruen, 2008). Citando Cai (1992) e Murray e Cai (1998), Remennikov e Kaewunruen (2008) simularam os efeitos de uma corrugação com padrão senoidal, de dimensões 250 mm de comprimento e 0,8 mm de profundidade. Como resultado, foram vistos picos de mais de 400 kN (carga estática de 150 kN). Um aspecto que merece destaque nesse trabalho é a pequena duração dos carregamentos, da ordem de centésimos de segundo. Embora se trate de uma simulação, essa característica não está em desacordo com a realidade, visto, por exemplo, os resultados obtidos por meio de medições em um trecho da ferrovia Shinkansen (japonesa), em que foram medidas forças geradas em decorrência de ondulações em um túnel. Novamente, observou-se acelerações negativas sobre os vales das ondulações e, subsequentemente, quando a roda atinge o trilho ocorre um pico de aceleração de cerca de 54,3g (535kN) e duração de 5 ms (Remennikov e Kaewunruen, 2008). Embora os carregamentos vistos nestes trabalhos sejam de duração pequena, por se tratarem de velocidades operacionais elevadas (250 km/h, por exemplo), o comprimento do trecho que sofreu a ação da sobrecarga não pode ser desconsiderado.

Gullers et al. (2008) indicam que as corrugações podem ser geradas pelo desgaste irregular causado por flutuações nas forças e deformações no contato roda/trilho, mas o mecanismo exato para o seu desenvolvimento é difícil de precisar. Na linha ferroviária estudada pelos autores, um determinado trecho possuía ondas de comprimento variando entre 3 e 8 cm, o que gerou forças dinâmicas da ordem de 150 kN (carga estática de 80 kN).

Por fim, como critério de comparação, Gullers et al. (2008) monitoraram as forças geradas em uma seção de via de alta qualidade e os valores medidos variaram em torno da carga estática de 60 kN por roda, com uma amplitude não superior a ± 20 kN.

Em resumo, esses estudos demonstram o quão comum podem ser as cargas de impacto dinâmico, além de evidenciarem suas magnitudes significativamente elevadas, principalmente quando comparadas à severidade dos defeitos que as geraram. É importante frisar que os defeitos vistos nesses trabalhos, em que predominam ondulações de comprimento de onda pequeno, sem contar aqueles relativos a problemas na superfície dos trilhos, não podem ser

considerados degradações geométricas, propriamente. Na realidade, são defeitos na estrutura física dos trilhos gerados por deformações plásticas ou desgastes diferenciais, durante impactos ou patinagens de roda, por exemplo.

Em todo o levantamento bibliográfico realizado, estas foram as únicas pesquisas que contribuíram com informações objetivas quanto à magnitude das cargas de impacto dinâmico e os respectivos problemas geradores. Para além dessa questão, contudo, esse conteúdo permite firmar o entendimento de que existem forças dinâmicas na via que excedem aquelas previstas em projeto. Ademais, conjugando o fato desses defeitos, em sua maioria, se caracterizarem por desvios discretos, com o entendimento descrito por Nielsen et al. (2003) e Consoli (2007), que indicam que sobre alterações mais severas as forças dinâmicas podem ser ainda maiores, acredita-se que este referencial, mesmo indiretamente, ratifica o fato de que defeitos na via, inclusive os geométricos, podem induzir cargas de impacto elevadas. Além disso, por não terem sido encontrados trabalhos que explorassem essa questão com o nível de detalhes almejado, e considerando as afirmativas de diversos autores (Consoli, 2007; Pombo et al., 2011; Zarembski et al., 2016; Kaewunruen et al., 2018) sobre a veracidade da relação, identifica-se a necessidade de pesquisas direcionadas especificamente à mensuração das consequências dinâmicas dos defeitos geométricos.

Em complemento, os resultados do trabalho de Zarembski et al. (2016) em que foi analisada a relação entre a presença de um ou mais defeitos de geometria e o desenvolvimento de defeitos em trilhos no mesmo local, mostram que a relação entre a geometria da via e a geração de forças de impacto dinâmico é baseada na teoria básica da engenharia de vias. Num primeiro momento, os autores fundamentam seu trabalho em uma análise teórica cujo resultado indica que a presença de defeitos geométricos gera aumentos nas cargas dinâmicas roda/trilho, o que, por sua vez, pode resultar no desenvolvimento precoce de defeitos de fadiga, o que se explica pelo aumento do nível de tensão e flexão dos trilhos nessas circunstâncias.

A partir desse entendimento, Zarembski et al. (2016) examinaram um banco de dados composto por inspeções geométricas de vários anos e relatórios de defeitos ferroviários de trechos que totalizavam mais 37.000 km de uma ferrovia americana de elevada produtividade.

Foram feitas análises estatísticas, com regressões, a partir de todos os defeitos nos trilhos combinados com um ou mais defeitos geométricos, e a partir dessas formulações foi feita uma projeção do volume de tráfego (em MTBT – milhões de toneladas brutas trafegadas) para a vida útil do trilho em diversas circunstâncias.

Os resultados do estudo demonstraram uma relação estatisticamente significativa entre problemas geométricos e defeitos em trilhos. Cerca de 11% dos defeitos verificados nos trilhos (todos os tipos de defeitos) ocorreram em locais que possuíam defeitos de geometria. Destes, 38% (4,2% de todos os defeitos nos trilhos) foram precedidos por dois ou mais defeitos geométricos. Nas curvas, 21% dos defeitos em trilhos ocorreram em locais que também possuíam defeitos de geometria, sendo que 46% deles foram precedidos por dois ou mais problemas geométricos. A análise da vida útil (em MTBT cumulativo) de trilhos que falharam em locais com a presença de defeitos geométricos, mostrou que 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.

Os principais parâmetros geométricos cujos defeitos influenciaram tal comportamento, conforme definido por análises de regressão, foram:

- Para tangente: Superelevação, empeno 62', nivelamento transversal e bitola;
- Para curva: empeno 31', superelevação, alinhamento e nivelamento transversal.

Esses resultados indicam que as forças na interface roda/trilho, influenciadas pelas alterações geométricas, podem realmente impactar na degradação dos trilhos. É possível estender esse entendimento para os demais componentes, pois as sobrecargas nos trilhos necessariamente serão dissipadas pelos demais itens, ou seja, também sobrecarregando-os em alguma proporção. Outros autores fazem afirmações convergentes nesse sentido, como Kaewunruen e Remennikov (2010), Herwig e Brühwiler (2011) e Pombo e Ambrósio (2012).

4. OPORTUNIDADES DE PESQUISA

A análise do referencial bibliográfico permitiu identificar importantes lacunas no conhecimento, configurando-se como oportunidades de pesquisa relevantes a serem exploradas em trabalhos futuros. São elas:

- Apesar de diversos autores ratificarem a relação, na bibliografia pesquisada não foram vistos trabalhos que demonstrassem como a amplitude dos desvios geométricos influencia na geração das acelerações do material rodante. Por isso, trabalhos que explorem essa lacuna são pertinentes, e, para tanto, abordagens práticas, baseadas no tratamento de dados de inspeções dinâmicas correlacionados a inspeções geométricas, são uma possibilidade viável.
- Autores demonstraram que a segurança operacional não depende somente da geometria, mas das forças dinâmicas geradas durante o tráfego. Portanto, identifica-se a necessidade de modelos capazes de prever as acelerações futuras, para que em conjunto com os métodos atuais de previsão da degradação geométrica, seja possível definir padrões de intervenção que assegurem de forma mais completa a segurança. Portanto, seriam válidas pesquisas destinadas ao desenvolvimento de modelos de correspondência entre a geometria e as acelerações de forma que uma vez prevista a amplitude da degradação geométrica futura esta pudesse subsidiar a estimativa das prováveis acelerações do material rodante;
- Autores demonstraram que em alguns trechos com defeitos em parâmetros geométricos não foram identificadas acelerações inseguras. Portanto, são pertinentes pesquisas que investiguem se existem parâmetros geométricos preponderantes para a geração das forças dinâmicas;
- Em complemento ao item anterior, também existe a possibilidade de que as forças dinâmicas não sejam consequência de alterações em parâmetros geométricos específicos e isolados, mas sejam fruto da associação entre os desvios dos diversos parâmetros que caracterizam a geometria. Por isso, um estudo visando descrever como a associação entre os parâmetros pode gerar acelerações inseguras seriam úteis, podendo elucidar, inclusive, as razões pelas quais existem locais onde se desenvolvem forças dinâmicas acentuadas sem a existência de qualquer defeito geométrico;
- As características plani-altimétricas da via e as velocidades operacionais são variáveis que também influenciam no comportamento dinâmico dos veículos, portanto, seriam aspectos relevantes a serem acrescentados às pesquisas e modelos sugeridos anteriormente;
- Autores demonstraram que de fato as forças causadas pelas alterações geométricas são capazes de influenciar na degradação dos componentes. Portanto, seriam relevantes pesquisas que desenvolvessem modelos capazes de estimar como o ritmo de degradação física dos componentes se altera em função das forças sobre eles aplicada.
- Desenvolvimento de um procedimento destinado ao planejamento de políticas de manutenção que, conjugando os modelos anteriormente sugeridos (de previsão das acelerações futuras e de previsão do ritmo de degradação), determine a frequência de manutenção geométrica capaz de assegurar a segurança a partir de critérios geométricos e dinâmicos e ainda seja capaz de reduzir custos pelo prolongamento da vida útil dos componentes mediante reduções da amplitude das forças dinâmicas e, conseqüentemente, minoração do desgaste físico e da necessidade de renovação dos componentes.

5. CONCLUSÃO

A partir de um levantamento bibliográfico, este artigo buscou na literatura trabalhos que investigaram se a geometria da via permanente é capaz de induzir acelerações elevadas nos veículos ferroviários, bem como se essas acelerações podem induzir forças dinâmicas em

patamares capazes de prejudicar a vida útil dos componentes da própria via. O principal objetivo desse estudo foi identificar lacunas nesse campo temático a serem exploradas em pesquisas futuras.

Foi visto que os sistemas de suporte a decisão destinados ao planejamento de longo prazo das intervenções de manutenção visam assegurar a segurança operacional ao menor custo possível. Essa meta é alcançada por meio da postergação dos serviços de manutenção geométrica para o limiar de atingimento das tolerâncias de segurança. Apesar de amplamente utilizada, autores indicam que essa técnica pode tolerar condições dinâmicas inseguras, fruto da maior amplitude dos desvios geométricos. Autores que realizaram prospecções em campo, ratificaram essa ideia ao demonstrar que mesmo em locais onde todos os parâmetros geométricos atendiam às normas de segurança, foram medidas acelerações de magnitude superior à tolerável sob o ponto de vista da segurança operacional.

Pesquisas indicaram que os veículos ferroviários adquirem acelerações e, conseqüentemente, forças de impacto dinâmico sobre a via significativamente elevadas, acima, inclusive, daquelas previstas em projeto. Os trabalhos vistos indicam que tais condições podem ser comuns, já que podem ser fruto tanto de defeitos, como de características dos componentes da própria via permanente. Ademais, todos os defeitos geradores de sobrecargas dinâmicas investigados pelos trabalhos apresentavam amplitude discreta, revelando o quão sensível pode ser o contexto que envolve a geração dessas forças. Vale destacar que em todo o referencial estudado, não foram vistos trabalhos que investigaram especificamente os efeitos dinâmicos de defeitos geométricos, o que se tem são afirmações que ratificam a relação, mas que não a exploram a fundo. Tal característica sustentou a identificação e proposição de inúmeras oportunidades de pesquisa.

Foi visto que as cargas dinâmicas agudas podem resultar em um incremento da degradação física dos componentes, conclusão tomada a partir de uma pesquisa que constatou em campo um maior número de falhas em trilhos em trechos com presença de um ou mais defeitos geométricos. Esse foi o único trabalho que contribuiu de forma objetiva sobre esse aspecto, o que também motivou a proposição de oportunidades de pesquisa nesse âmbito. Explorando o entendimento de que a vida útil dos componentes é influenciada pelas condições dinâmicas, e, conseqüentemente, pela geometria, foi identificada uma relevante oportunidade para o desenvolvimento de um método de planejamento de políticas de manutenção capaz de conjugar os conceitos elencados nesse trabalho em vistas a definir padrões de manutenção mais seguros e de menor custo.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

Referências

- 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.
- 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.
- CAETANO, L. F.; TEIXEIRA, P. F. Availability Approach to Optimizing Railway Track Renewal Operations. **J. Transp. Eng.** v. 139, n. 9, p. 941-948, 2013.
- CAI, X. et al. Analysis of vehicle dynamic behavior under ballasted track irregularities in high-speed railway. **Noise & Vibration Worldwide**. V. 46, p. 10, 2015.
- 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 13848–5. Railway applications – track – track geometry quality – Part 5: Geometric quality levels. Brussels, Belgium: CEN (European Committee for Standardization), 2008.
- GULER, H. Optimisation of railway track maintenance and renewal works by genetic algorithms. **GRAĐEVINAR**. V. 68, n. 12, p. 979-993, 2016.
- GULER, H.; JOVANOVIĆ, S.; EVREN, G. Modelling railway track geometry deterioration. **Transport**. V. 164, n. 2, p. 65-75, 2011.
- 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.
- GUO, Y.; MARKINE, V.; SONG, J. et al. Ballast degradation: Effect of particle size and shape using Los Angeles Abrasion test and image analysis. **Construction and Building Materials**. V. 169, p. 414-424, 2018.
- 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. First edition. CRC Press, 2011. ISBN: 9780429217319.
- HIGGINS, C.; LIU, X. Modeling of track geometry degradation and decisions on safety and maintenance: A literature review and possible future research directions. **Proc Inst Mech Eng F Rail Rapid Transi**. V. 232, n. 5, p. 1385-1397, 2017.
- KAEWUNRUEN, S.; REMENNIKOV, A. M. Dynamic Crack Propagations in Prestressed Concrete Sleepers in Railway Track Systems Subjected to Severe Impact Loads. **J. Struct. Eng.** v. 136, n. 6, p. 749-754, 2010.
- 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.
- 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.
- LIMA, J. B.; LOPES, L. A. S.; ARAGÃO FILHO, L. A. C. M. Contribuição à manutenção da via permanente com acelerômetros em pacotes inerciais portáteis. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 6, e3910615369, 2021.
- MOHAMMADIB, R.; HEA, Q.; GHOFRANIC, F. et al. 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.
- 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.
- NEUHOLD, J.; VIDOVIĆ, I.; MARSCHNIG, S. Preparing Track Geometry Data for Automated Maintenance Planning. **J. Transp. Eng., Part A: Systems**. v. 146, n. 5: 04020032, 2020.
- 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.
- 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.
- NIMBALKAR, S. et al. Improved Performance of Railway Ballast under Impact Loads Using Shock Mats. **J. Geotech. Geoenviron. Eng.** v. 138, n. 3, p. 281-294, 2012.
- PEN, L. L. et al. A model for the stochastic prediction of track support stiffness. **Proc Inst Mech Eng F Rail Rapid Transi**. 2019. DOI: 10.1177/0954409719841800.
- POMBO, J. et al. 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.
- POMBO, J.; AMBRÓSIO, J. An alternative method to include track irregularities in railway vehicle dynamic analyses. **Nonlinear Dyn**. n. 68, p. 161–176, 2012.

- PRATICÒ, F. G.; GIUNTA, M. Proposal of a Key Performance Indicator for Railway Track Based on LCC and RAMS Analyses. **J. Constr. Eng. Manage.** v. 144, n. 2: 04017104, 2018.
- RAHIMIKELARIJANI, B.; MOHASSEL, A.; HAMIDI, M. Railroad Track Geometric Degradation Analysis: A BNSF Case Study. **J. Transp. Eng., Part A: Systems.** v. 146, n. 2: 04019068, 2020.
- REMENNIKOV, A. M.; KAEWUNRUEN, S. A review of loading conditions for railway track structures due to train and track vertical interaction. **Struct. Control Health Monit.** v. 15, p. 207–234, 2008.
- ROGHANI, A.; HENDRY, M. T. Quantifying the Impact of Subgrade Stiffness on Track Quality and the Development of Geometry Defects. **J. Transp. Eng., Part A: Systems.** v. 143, n.7: 04017029, 2017.
- RUILIN, Y. et al. Fatigue Life Assessment Method for Prestressed Concrete Sleepers. **Front. Built Environ.** 2017. DOI: 10.3389/fbuil.2017.00068.
- SADEGHI, J.; HEYDARI, H.; DOLOEI, E. A. Improvement of Railway Maintenance Approach by Developing a New Railway Condition Index. **J. Transp. Eng., Part A: Systems.** v. 143, n. 8: 04017037, 2017.
- SALVADOR, P. et al. Axlebox accelerations: Their acquisition and time–frequency characterisation for railway track monitoring purposes. **Measurement.** v. 82, p. 301–312, 2016.
- SEMPREBONE, P. S. Desgastes em trilhos ferroviários – Um estudo teórico. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2006.
- SHARMA, S. et al. Data-driven optimization of railway maintenance for track geometry. **Transportation Research Part C.** v. 90, p. 34–58, 2018.
- SOLEIMANMEIGOUNI, I. et al. 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.
- SOLEIMANMEIGOUNI, I.; AHMADI, A.; KUMAR, U. Track geometry degradation and maintenance modelling: A review. **Proc Inst Mech Eng F Rail Rapid Transi.** v. 232, n. 1, p. 73-102, 2016.
- SPIROIU, M. A. Wheel-rail dynamic forces induced by random vertical track irregularities. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.** v. 147, 2016.
- SUA, Z. et al. Integrated condition-based track maintenance planning and crew scheduling of railway networks. **Transportation Research Part C.** v. 105, p. 359–384, 2019.
- VARANDAS, J. N. et al. 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.
- 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.
- WESTON, P. et al. Perspectives on railway track geometry condition monitoring from in-service railway vehicles. **Vehicle System Dynamics.** v. 53, n. 7, p. 1063 – 1091, 2015.
- 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: 10.1080/00423114.2019.1711137.
- 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.
- ZI, G.; MOONB, D. Y.; LEE, S. J. et al. Investigation of a concrete railway sleeper failed by ice expansion. **Engineering Failure Analysis.** v. 26, p. 151–163, 2012.