

# Análise dos métodos de avaliação geométrica de via permanente para monitoramento de via férrea no Brasil

## *Analysis of track geometric evaluation methods for monitoring railway in Brazil*

Angelo Samuel Junqueira<sup>1</sup>, Rosângela dos Santos Motta<sup>1</sup>, Luciano Oliveira<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo – Brasil

<sup>2</sup>Vale S.A, Vitória, Espírito Santo – Brasil

contato: angelojunqueira@usp.br,  (ASJ); rosangela.motta@usp.br,  (RSM); oliveira.luciano@vale.com (LO)

### Recebido:

1 de agosto de 2022

### Aceito para publicação:

10 de fevereiro de 2023

### Publicado:

19 de abril de 2023

### Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

### Keywords:

Railway.

Track inspection.

Track geometry.

Track quality index.

### Palavras-chave:

Ferrovia.

Inspeção.

Geometria.

Índice de qualidade da via.

### RESUMO

As ferrovias desempenham um papel importante na logística global, sendo utilizadas como um dos meios básicos e eficientes de transporte de mercadorias nas principais economias mundiais (ANTF, 2022b). A vias precisam ser monitoradas para garantir a segurança nas operações e economia na manutenção. Atualmente as inspeções são realizadas de maneira automática, conduzidas geralmente por carro-controle, que mensuram os parâmetros geométricos, a partir dos quais utiliza-se um índice para representá-la numericamente. Diversos índices de qualidade foram propostos em diferentes agências regulamentadoras, como European Railway Agency e Federal Railway Administration (FRA). Para as ferrovias brasileiras, não existe método normatizado de índice de qualidade da via próprio. Deste modo, o trabalho buscou entender e aplicar os métodos de avaliação geométrica da via permanente a partir de dados levantados em duas ferrovias brasileiras utilizando o equipamento de inspeção carro-controle, em vista da necessidade de entender os índices aplicados em ferrovias de outros países. Foram avaliados Track Quality Index (TQI) FRA, Standard Deviation (SD), índice TQI China, Coeficiente J e Combined Standard Deviation (CoSD). Além de verificar e discutir as metodologias aplicadas pelas ferrovias, será proposta uma metodologia existente única a ser aplicada em ferrovias no Brasil mediante a realização de um estudo de caso. A utilização de índice adequado pode favorecer a definição de um planejamento efetivo pela gerência de manutenção ferroviária, viabilizando um melhor controle da vida útil dos ativos, e por conseguinte, otimização no emprego de recursos. Portanto, foram avaliados para duas ferrovias, um trecho amostral, com suas respectivas classificações e os níveis de qualidade conforme os diferentes métodos disponíveis na literatura, a fim de aferir qual metodologia representou melhor a condição real da linha férrea destas ferrovias. Com isto foi possível obter um melhor entendimento do comportamento dos parâmetros que envolvem as ferrovias, além da compreensão, comparação e aplicabilidade dos diferentes métodos utilizando um mesmo conjunto de informações proveniente das inspeções realizadas pelo carro-controle. O

DOI: 10.58922/transportes.v31i1.2824



---

trabalho sugere o emprego do método CoSD considerando os quatro parâmetros de geometria de via descritos em normativa técnica (NBR 16387, 2020) até a elaboração de um método adequado.

#### **ABSTRACT**

Railways are an essential part of global logistics, being used as a fundamental and efficient means of transporting goods in the world's major economies (ANTF, 2022b). Railways need to be monitored to ensure safe operations and economical maintenance. Currently, inspections are performed automatically, usually by control cars that measure geometric parameters, using an index to represent it numerically. Different regulatory agencies have proposed several quality indices, such as European Railway Agency and Federal Railway Administration (FRA). There is no standardized method of track quality index for the Brazilian railways. In this way, the study sought to understand and apply the methods of geometric evaluation of the railway track from data collected in two Brazilian railways using the control car inspection equipment, in view of the need to understand the indices applied in railways of other countries. Track Quality Index (TQI) FRA, Standard Deviation (SD), TQI China Index, J Coefficient and Combined Standard Deviation (CoSD) were evaluated. In addition to verifying and discussing the methodologies applied in the railroads, a unique existing methodology to be applied in railroads in Brazil will be proposed through a case study. Using an adequate index can favor the definition of effective planning by railway maintenance management, enabling better control of the service life of the assets and, consequently, optimization of the resources. Therefore, a sample section was evaluated for the two railroads, with their respective classifications and quality levels according to the different methods available in the literature, to assess which methodology best represented the real condition of the railroad line of both railroads. With this, it was possible to understand better the characteristics of the parameters that involve the railroads, in addition to the understanding, comparison, and applicability of the different methods using the same set of information from the inspections carried out by rail track inspection vehicles. We suggest using the CoSD method considering the four parameters of track geometry described in technical standards (NBR 16387, 2020) until a more appropriate method is developed.

---

## **1. INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos se tem observado um aumento do volume de transporte de cargas por ferrovia em todo o mundo, inclusive no Brasil. Enquanto no início das concessões ferroviárias brasileiras, em 1997, o transporte por esse meio chegou a aproximadamente 137 bilhões de TKU (toneladas por quilômetro útil), em 2020 atingiu cerca de 365 bilhões de TKU, representando um crescimento de 166% (ANTF, 2022a).

Dentro deste contexto, tem-se uma maior utilização das linhas férreas e, por consequência, um aumento do desgaste dos elementos da via permanente. O crescimento da deterioração promove a ocorrência de irregularidades e defeitos que levam diretamente a maiores cargas dinâmicas, podendo causar uma rápida degradação da via (Esveld, 1993). À vista disso, existe a maior necessidade de intervenções para manutenção, o que acarreta impactos na segurança e na operação da ferrovia. Portanto, sob este cenário, uma implementação mais intensiva do monitoramento das condições da via é essencial para otimizar as manutenções nas ferrovias (Farkas, 2019), de modo a se ter menos intervenções, maior segurança e, por conseguinte, menor custo neste processo.

Geralmente, a via permanente ferroviária pode ser submetida à inspeção sob dois aspectos, geométrico e estrutural, cujos parâmetros levantados podem compor índices de qualidade (Sadeghi e Askarinejad, 2010). As condições de geometria e de estrutura do pavimento ferroviário possuem grande interação, entretanto, o levantamento dos parâmetros geométricos da via é realizado com maior frequência, dada a sua maior facilidade de obtenção. Neste caso, os dados levantados nela podem ser posteriormente empregados para o cálculo de índices de qualidade, a fim de se classificar a condição da via. Com o auxílio das inspeções e do índices de qualidade, é possível se evidenciar os pontos críticos e prover mais informações para os diagnósticos e tomadas de decisão no âmbito da gestão de manutenção da ferrovia (Li et al., 2016; Farkas, 2019).

Na literatura verifica-se uma variedade considerável de métodos de classificação e avaliação da qualidade das vias férreas, como elencado pelos trabalhos de Rosyidi e Setiawan (2016), Offenbacher et al. (2020) e Yan e Corman (2020): índice SD (em inglês *Standard Deviation*) do Reino Unido, índice holandês Q, índice de qualidade da via ou TQI (em inglês *Track Quality Index*) da FRA, Australiano TGI (em inglês *Track Geometry Index*), TQI Canadense, TQI Indonésio, TQI Chines, Coeficiente J Polonês, TGI Indiano, entre outros métodos que resultam, inclusive, em valores distintos. Isto significa não haver um consenso sobre os parâmetros, equações e procedimentos de inspeção mais adequados para as ferrovias de modo geral.

No Brasil não é definida uma metodologia para inspeção e aplicação de índices de qualidade na normativa técnica vigente relacionada à geometria de via permanente (NBR 16387, 2020), sendo indicados somente limites de segurança para alguns parâmetros geométricos. Por outro lado, em vários países há uma padronização para a obtenção de um índice de qualidade, como nos Estados Unidos, Austrália e China. Neste caso, o índice é calculado a partir de uma equação e de parâmetros de geometria medidos geralmente por carro-controle, onde a forma de medição dos valores dos parâmetros e o cálculo dos índices são realizadas de forma padronizada, melhorando e facilitando a gestão e fiscalização de manutenção de linhas férreas por parte das instituições regulamentadoras e fiscalizadoras do transporte ferroviário.

A garantia de funcionamento ininterrupto das ferrovias brasileiras existentes é essencial para permitir escoamentos dos produtos e serviços que dependem diretamente deste modo de transporte. A manutenção preditiva e efetiva dos ativos ferroviários, além de proporcionar a otimização e economia de recursos a serem empregadas no planejamento e na manutenção das vias, ajudam a evitar interrupções e/ou restrições nas suas operações. De acordo com Sgavioli et al. (2015), por exemplo, o valor do trem-hora parado, em situações de manutenção da linha, representa de 70% a 90% dos custos para as atividades de: socaria com complementação de lastro novo e recalque da linha; recuperação com aumento da altura de lastro; e renovação de 100% e 50% do lastro.

Desta maneira, é importante que o Brasil tenha uma metodologia de levantamento e de cálculo de um índice de qualidade normatizado, como em outros países, mas que seja adequado à realidade das ferrovias brasileiras, a fim de evitar os custos operacionais elevados e garantir a competitividade dos produtos e serviços que dependem deste meio de transporte.

Há que se acrescentar que, com o advento de novas tecnologias de inspeção de ferrovia por métodos indiretos e/ou embarcados, ficou evidenciado que o método de cálculo do índice a ser proposto no Brasil, e os existentes nos outros países, deverão contemplar, de maneira complementar, os parâmetros mensurados por novas tecnologias (como: vagão instrumentado e equipamentos embarcados em locomotivas e vagões). Uma vez que, os parâmetros medidos nesses equipamentos não são geométricos, ou ainda podem o ser, mas não são contemplados nos métodos utilizados atualmente.

No Brasil, além da questão de deficiência normativa, observa-se ainda uma carência de pesquisas voltadas à área ferroviária, demonstrando a necessidade de desenvolvimento de estudos para implementação, análise e difusão das melhores técnicas para gestão das ferrovias brasileiras.

Com base no levantamento de metodologias de avaliação da qualidade geométrica de vias férreas em diferentes países, o presente trabalho visa verificar a aplicabilidade das mesmas às condições de vias brasileiras, a partir de um estudo de caso contemplando duas importantes ferrovias no país, propondo a metodologia de cálculo de um índice de qualidade da via (partindo-se de dados de carro-controle) que possa auxiliar um sistema de gestão ferroviária.

## 2. ESTADO DA ARTE

A medição dos parâmetros de geometria de via por veículos de inspeção tem três principais propósitos: (i) identificar os segmentos com defeitos e, se for o caso, indicar tratamento imediato; (ii) utilizar os dados obtidos e, através de análise estatística, calcular os índices de qualidade por segmento, de modo a priorizar a manutenção; e (iii) elaborar modelos de predição da deterioração da via, por meio dos índices de qualidade calculados (Bing e Gross, 1983).

Dentro deste contexto, o carro-controle é o equipamento de inspeção mais usado para mensurar as condições de uma via permanente, sendo normalmente empregado para realizar auditorias periódicas em viagens ao longo de toda a extensão da malha ferroviária, provendo uma alta taxa de aquisição de registros (Ngamkhanong, Kaewunruen e Costa, 2018). Tais dados geométricos levantados são usados para a determinação de parâmetros como alinhamento, nivelamento e bitola da via.

Para transformar a grande quantidade de dados geométricos em um parâmetro único para determinação da qualidade da via foi criado, por exemplo, o chamado, comumente utilizado no meio técnico (Yan e Corman, 2020). Na literatura encontram-se ainda outros indicadores de qualidade de uma via férrea (Esveld, 2001; Melo et al., 2020), como os índices da Federal Railroad Administration (FRA), o Coeficiente J, adotado pelas ferrovias polonesas, ou o índice SD baseado no desvio padrão, empregado em vários países da Europa, Austrália e China.

Comparativamente, é possível encontrar na literatura alguns trabalhos que evidenciam as principais diferenças entre as práticas adotadas nos diversos países, ressaltando a variedade de métodos existentes para o cálculo da qualidade de via. Yan e Corman (2020), por exemplo, realizaram um estudo que analisa diferentes características de vários índices de qualidade da via, alguns empregando parâmetros geométricos específicos

(como torção), enquanto outros consideram a inter-relação entre eles. Esses autores mostraram haver uma predominância de índices voltados à análise da geometria da via, observou-se também que a falta de informação sobre os regulamentos técnicos e as aplicações de alguns índices estruturais (como índice de contaminação do lastro) acaba prejudicando sua compreensão e, conseqüentemente, seus respectivos cálculos nesse seu estudo. Apesar disso, a pesquisa conseguiu evidenciar a variação de parâmetros, pesos e atributos nas metodologias analisadas.

Outro trabalho que abordou um estudo similar foi o de Offenbacher et al. (2020), que apresentou 14 índices de qualidade da via distintos (como Q-value, CoSD, Coeficiente J, FRA-TQI, W5, R<sup>2</sup>, entre outros), os quais são aplicados em diferentes países. No estudo, além de uma abordagem comparativa, os autores realizaram a classificação e avaliação de uma extensão de 5.000 m de uma ferrovia, sob todos os índices relacionados. Como resultado, sugeriram a criação de um novo índice de qualidade da via, com a premissa de combinar todos os parâmetros relevantes de forma normalizada e, como indicado pelo estudo, com este índice proposto seria possível descrever a qualidade da geometria da via de modo mais confiável, ou seja, que melhor represente as condições reais da via analisada.

De modo geral, em ambas as pesquisas citadas Offenbacher et al. (2020) e Yan e Corman (2020) foram identificadas diversas metodologias aplicadas com o mesmo objetivo, ou seja, classificar e quantificar a qualidade das ferrovias. Em todas as avaliações constataram-se que há variações na classificação e nos valores que representam a qualidade de um mesmo conjunto de dados brutos de um segmento ferroviário, a depender da metodologia usada pelos autores.

Como mencionado anteriormente, os métodos mais aplicados atualmente pelas ferrovias para cálculo de índice de qualidade da via são TQI e SD. Porém, de maneira específica, os órgãos fiscalizadores e as empresas ferroviárias de vários países desenvolveram equações com variações para o cálculo global do índice de qualidade da via, levando em consideração as características particulares de suas ferrovias. A empresa ferroviária francesa SNCF, por exemplo, utiliza a média móvel em um dado segmento de via (Liu et al., 2015).

O método TQI, desenvolvido pela FRA em 2004, define um índice de qualidade das vias férreas por meio da comparação entre comprimento das curvas espaciais dos parâmetros geométricos mensurados e o comprimento ideal da curva destes. Para o método leva-se em conta segmentos de via com extensão de 528 pés (160,9 m). Os parâmetros geométricos que são considerados para o cálculo do TQI pela FRA são nivelamento longitudinal, alinhamento, nivelamento transversal e bitola. Segundo FRA (2005) este método apresenta confiabilidade no cálculo do índice para todas as classes de ferrovias americanas. Ou seja, o uso destas formulações de cálculo para aplicação em bitolas diferentes da norte-americana (que é a *standard*), como verificado no Brasil, por exemplo, requereria uma adaptação.

A Equação 1 é utilizada para o cálculo do TQI, segundo o método da FRA, em que equaciona a proporção entre os comprimentos teóricos e medidos da curva espacial do segmento da via. No qual o comprimento medido da curva espacial do parâmetro geométrico pode ser obtido pela Equação 2.

$$TQI = \left( \frac{L_s}{L_o} - 1 \right) \cdot 10^6 \quad (1)$$

Onde  $TQI$  é o índice de qualidade da via [adimensional],  $L_s$  é o comprimento medido da curva espacial do parâmetro geométrico no segmento de via, e  $L_o$  é o comprimento teórico da curva espacial do parâmetro geométrico, ambos em pés.

$$L_s = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta y_i^2 + \Delta x_i^2} \quad (2)$$

Onde  $\Delta y$  é a diferença entre duas distâncias verticais consecutivas, e  $\Delta x$  é a distância horizontal entre os pontos consecutivos da amostragem, ambos em [pés].

O SD é outro método muito utilizado para o cálculo do índice de qualidade com os parâmetros geométricos da via, principalmente nas ferrovias europeias. Esta metodologia emprega conceitos de estatística para o cálculo do valor individual de cada parâmetro, em segmentos de via pré-determinados. Quanto maior o valor do SD calculado para o segmento de via, pior é a sua condição quanto ao parâmetro de geometria mensurado. A Equação 3 é usada para o cálculo do SD, segundo o método da EN 13848-5 (2008).

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

Onde  $n$  é o número de defeitos medidos no segmento de via,  $x_i$  é valor do parâmetro medido em cada ponto do segmento [mm], e  $\bar{x}$  é a média do parâmetro no segmento [mm].

A norma europeia EN 13848-6 (2014) prevê a combinação dos parâmetros de geometria da via (CoSD) em uma equação ponderada (4), com os valores de SD obtidos para alinhamento, bitola, alinhamento transversal e nivelamento longitudinal. Neste caso, os valores de ponderação ( $w_i$ ) para cada parâmetro de geometria são definidos pela gestão de engenharia da ferrovia.

$$CoSD = \sqrt{w_{AL} \cdot SD_{AL}^2 + w_G \cdot SD_G^2 + w_{CL} \cdot SD_{CL}^2 + w_{LL} \cdot SD_{LL}^2} \quad (4)$$

Onde  $w_i$  é o valor de ponderação para cada parâmetro de geometria,  $SD$  é o valor do desvio padrão calculado para cada parâmetro de geometria, no caso alinhamento (AL), bitola (G), alinhamento transversal (CL) e nivelamento longitudinal (LL).

O índice de qualidade global da via utilizado pelas ferrovias britânicas, australianas e chinesas é baseado no SD. Particularmente, estas últimas ainda usam a Equação 5 para o cálculo do índice de qualidade global da via, que considera o valor do desvio padrão de sete parâmetros de geometria de via (bitola, alinhamento, nivelamento, superelevação, torção ou empeno, superelevação, curvatura) obtido por meio da Equação 6, onde a média do parâmetro é calculada pela Equação 7. Entretanto, há que se ressaltar que em cada país o comprimento empregado como segmento de via é diferente. Na Austrália o padrão é de 500 m, por exemplo, enquanto na China é de 200 m para ferrovias em geral e de 500 m para ferrovias de alta velocidade (Liu et al., 2015).

$$TQI = \sum_{i=1}^7 \sigma_i \quad (5)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij}^2 - \bar{x}_i^2)} \quad (6)$$

$$\bar{x}_i = \sum_{j=1}^n \frac{x_{ij}}{n} \quad (7)$$

Onde  $\sigma_i$  é o valor do desvio padrão calculado para cada parâmetro de geometria  $i$ ,  $n$  é o número de defeitos medidos no segmento de via,  $x_{ij}$  é o valor do parâmetro medido em cada ponto do segmento [mm], e  $\bar{x}_i$  é a média do parâmetro no segmento [mm].

Nas ferrovias da Polônia é adotado o Coeficiente J como formulação de cálculo do índice de qualidade global da via Equação 8, empregando o SD de quatro parâmetros de geometria de via, com ponderação diferente para um deles (irregularidade vertical, irregularidade horizontal, torção e bitola, todos medidos em mm).

$$J = \frac{S_z + S_y + S_w + 0,5 \cdot S_e}{3,5} \quad (8)$$

Onde  $S_z$  é o valor do desvio padrão calculado para a irregularidade vertical,  $S_y$  é o valor do desvio padrão calculado para a irregularidade horizontal,  $S_w$  é o valor do desvio padrão calculado para a torção, e  $S_e$  é o valor do desvio padrão calculado para a bitola.

Conforme mencionado anteriormente, no Brasil não há definição de metodologia de inspeção e de cálculo para determinar o índice de qualidade em suas ferrovias. A norma NBR 16387 (2020) define somente os limites de segurança para bitola, nivelamento transversal, alinhamento e curvatura que devem ser atendidos (de acordo com a bitola e as faixas de velocidades máximas autorizadas). Está normativa vigente também apresenta outros parâmetros de controle opcionais, ficando a critério da concessionária sua mensuração e utilização (por exemplo, descasamento das pontas dos trilhos nas juntas no que tange à bitola). Ou seja, para as ferrovias brasileiras, não há regulamento que defina a metodologia padrão a ser empregada para quantificar a qualidade geométrica de suas vias e, desta forma, as agências regulamentadoras do país apenas realizam a fiscalização usando as orientações técnicas contidas quanto aos limites estabelecidos na NBR 16387 (2020).

Nos Estados Unidos, a *Code of Federal Regulations* – CFR (2021) define os limites de segurança para os parâmetros de geometria de via das ferrovias americanas, além das classes de via e dos limites dos índices de qualidade da via (método FRA). Na Austrália, a *New South Wales Government* (NSW) também apresenta limites de segurança, segundo as características de suas ferrovias.

A norma EN 13848-5 (2008) apresenta valores limites de alerta, intervenção e interdição da via para os parâmetros de geometria de via calculados através do SD. Estes limites variam de acordo com a velocidade de operação da ferrovia e com o comprimento de onda da anomalia (por exemplo, para velocidades entre 80 e 120 km/h, o comprimento de onda do defeito, entre 3 e 25 m, impõe um limite de intervenção para torção de  $\pm 5$  [mm]). No caso do Coeficiente J também há valores limites que variam conforme a com

a velocidade da ferrovia que, ao serem ultrapassados, implicam em interdição do segmento analisado para manutenção.

A Tabela 1 apresenta resumidamente algumas características das metodologias descritas, para fins de classificação das vias férreas.

**Tabela 1** – Resumo das metodologias apresentadas de classificação das vias férreas

Método	Parâmetros	Velocidade	Bitola	Limites	Classificação
NBR 16387 (2020)	Bitola e variação de bitola	0-128 km/h	Larga e métrica	Definidos em 5 faixas diferentes de intervalos de velocidades máximas permitidas	$Classe = X * Na * Nb$ sendo:
	Nivelamento transversal				Conforme velocidade autorizada
	Alinhamento			Não tem metodologia de levantamento definida. Os limites são apenas para os parâmetros individualmente	$Na = 1 a 5$ ;
	Curvatura				Conforme previsões anuais de transporte $Nb = 1 a 6$ ; $X = P$ para trens de passageiros e $C$ para de carga
Federal Railroad Administration (2005)	Bitola	$V_{máx} = 10 a 90$ mph (16 a 145 km/h)	Standard	Definidos para cada intervalo de velocidade permitida	6 classes (I a VI), sendo categorizadas de acordo com a velocidade máxima permitida
	Nivelamento				
	Superfície do Trilho Trilho + Alinhamento	Para via projetada para passageiros não há limite aplicável			
Coeficiente J	Bitola e gradiente da bitola	0 a 300 km/h	Standard	Valor sintético definido para cada velocidade máxima permitida (limites para cada parâmetro e para o índice)	5 categorias de via que indicam desde a necessidade de ação imediata a manutenções programadas
	Alinhamento				
	Nivelamento longitudinal				
	Nivelamento transversal				
	Torsão				
EN 13848-5 (2008)	Bitola	6 classes de velocidade (0-300 km/h)	Limites não depende m da bitola	Definido para as 6 classes de velocidade e para 3 indicadores	5 classes (A a E) que rotulam a qualidade da via de forma decrescente para as faixas de velocidade e comprimento de onda da anomalia
	Alinhamento				
	Nivelamento longitudinal				
	Nivelamento Transversal				
	Torsão				
CoSD (EN 13848-6, 2014)	Combinação dos parâmetros	Idem EN 13848-5 (2014)	Idem EN 13848-5 (2014)	Definido para 6 velocidades e classes da via	Idem EN 13848-5 (2014)
	Alinhamento, Bitola, Nivelamento transversal e longitudinal				

### 3. METODOLOGIA / ESTUDO DE CASO

Para o estudo de caso deste trabalho foi considerado um segmento de via de 3.000 m de extensão em duas ferrovias brasileiras com predomínio do transporte de minério de ferro: Estrada de Ferro Carajás (EFC) e a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM). Ambas são responsáveis por no mínimo 59% da produção em TKU (tonelada quilômetro útil) das ferrovias brasileiras nos últimos três anos que constam no anuário (2018 a 2020)

publicado pela Agência Nacional de Transportes Terrestres ANTT (2021), além de serem as únicas ferrovias brasileiras com transporte de passageiros além do transporte de cargas. A EFC está localizada nos estados do Maranhão e do Pará, fazendo ligação com a ferrovia FNS em Açailândia - MA, enquanto a EFVM está localizada nos estados do Espírito Santo e de Minas Gerais, faz ligação com a ferrovia VLI em Caeté - MG. As principais das características destas ferrovias estão indicadas na Tabela 2.

**Tabela 2** – Características técnicas das ferrovias do estudo de caso

	Ferrovia 1	Ferrovia 2
Carga por eixo [ton/eixo]	32,5	27,5
Bitola [mm]	1600	1000
Velocidade [km/h]	80	60
Volume anual de transporte [MTBT]	282	103
Extensão de linhas férreas [km]	1876	1504
Inspeção por carro-controle	Sim	Sim
Inspeção por vagão instrumentado	Não	Sim
Classe de via NBR 16387 (2020)	C46	C34
Classe de via FRA/CFR	Classe V	Classe IV
Classe de via SD	Classe B	Classe C

Onde: MTBT – Milhões de toneladas brutas transportadas.

Os dados brutos dos parâmetros geométricos foram obtidos pela inspeção de via com carro-controle, tomando-se o cuidado para que o segmento escolhido para análise em cada ferrovia tivesse no mínimo uma curva e uma tangente (para percepção de eventuais diferenças quanto à passagem por estes elementos). A partir deste conjunto de dados selecionados, foi necessário realizar um processo de validação destes dados, executando tratamento e consolidação do *dataset* utilizado. Nele, foi implementado uma estruturação por meio de uma formatação padrão da planilha de dados, seguida pelo descarte de dados faltantes e *outliers*, filtragem dos atributos importantes para análise (variáveis de interesse) e agrupamento dos dados em segmentos de comprimento padrão.

Como os métodos de cálculo do índice de qualidade global da via consideram extensões diferentes de segmentos de análise, no presente trabalho foram tomadas as dimensões propostas por cada método nos cálculos.

A partir dos dados brutos foram calculados os índices de qualidade, conforme métodos TQI e SD para cada um dos parâmetros de geometria de via medidos. Em seguida, foram calculados os índices de qualidade global da via, de acordo com as metodologias FRA, CoSD, Coeficiente J, australiana e chinesa, e os resultados foram comparados com os valores limites da CFR (2021), EN 13848-5 (2008) e NSW 205 (2018). De modo semelhante ao processo de validação dos dados, também é necessário realizar uma avaliação dos resultados, a fim de verificar a coerência dos valores dos parâmetros e índices obtidos. Para melhor compreensão, a Figura 1 apresenta resumidamente a metodologia desenvolvida no presente trabalho.

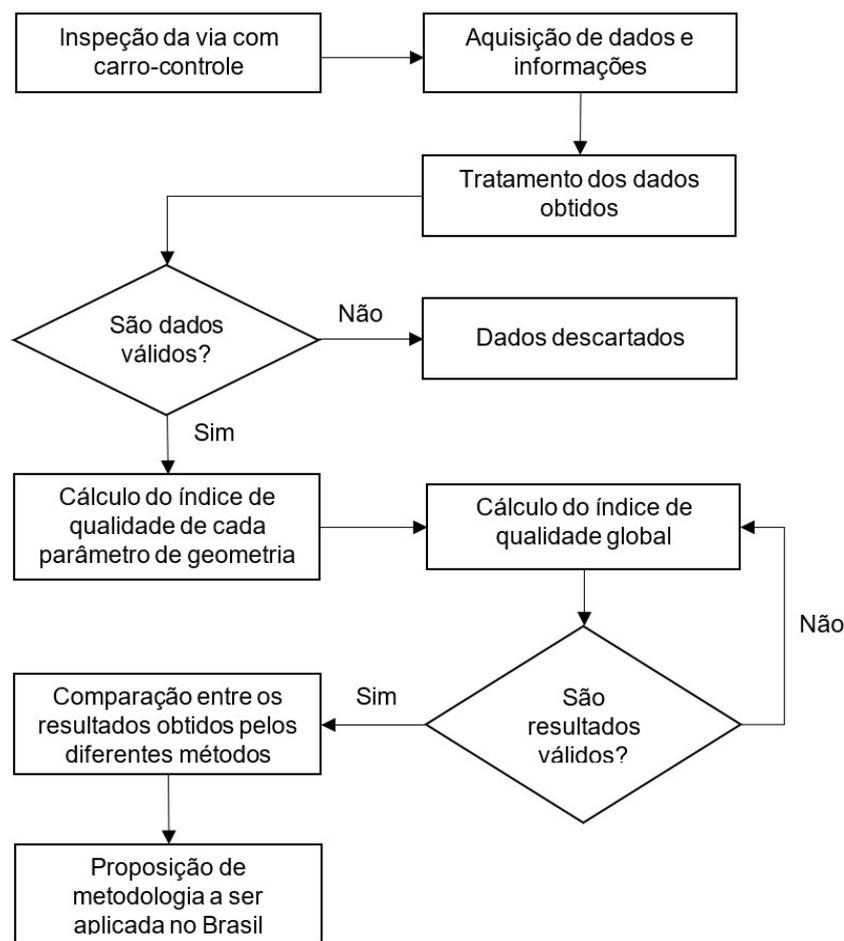


Figura 1. Representação da metodologia empregada no estudo

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para o cálculo do índice de qualidade da via pelos métodos propostos foram analisados 12.000 dados obtidos para cada um dos parâmetros de geometria de via: bitola, alinhamento, nivelamento esquerdo, nivelamento direito, superelevação, empeno (torção) e curvatura. Os resultados do índice de qualidade da via das duas ferrovias sob cada metodologia são apresentados nas tabelas a seguir. Os índices de qualidade da via obtidos pelo método FRA por segmento são apresentados na Tabela 3 e na Tabela 4 relativos à Ferrovia 1 e Ferrovia 2, respectivamente.

Tabela 3 – TQI-FRA para os parâmetros de geometria de via - Ferrovia 1

Segmento	Ferrovia 1 (TQI – FRA)							
	B	A	NE	ND	NM	S	E/T	C
391,000 - 391,161	0,441	0,430	0,412	0,412	0,412	0,415	0,415	0,410
391,161 - 391,322	0,442	0,440	0,413	0,413	0,412	0,415	0,414	0,410
391,322 - 391,483	0,456	0,422	0,417	0,417	0,416	0,417	0,415	0,410
391,483 - 391,644	0,454	0,438	0,412	0,413	0,412	0,416	0,415	0,410
391,644 - 391,805	0,460	0,436	0,415	0,415	0,414	0,415	0,413	0,410
391,805 - 391,966	0,452	0,445	0,412	0,413	0,412	0,420	0,416	0,446
391,966 - 392,127	0,435	0,430	0,412	0,413	0,412	0,418	0,415	0,676
392,127 - 392,287	0,456	0,508	0,414	0,415	0,413	0,419	0,418	0,624

**Tabela 3 – Continuação...**

Segmento	Ferrovia 1 (TQI – FRA)							
	B	A	NE	ND	NM	S	E/T	C
392,287 - 392,448	0,449	0,445	0,412	0,413	0,412	0,418	0,413	0,410
392,448 - 392,609	0,449	0,458	0,424	0,420	0,422	0,423	0,416	0,410
392,609 - 392,770	0,452	0,445	0,412	0,412	0,411	0,415	0,414	0,410
392,770 - 392,931	0,470	0,439	0,412	0,413	0,412	0,419	0,416	0,410
392,931 - 393,092	0,456	0,426	0,412	0,413	0,412	0,416	0,416	0,410
393,092 - 393,253	0,442	0,448	0,413	0,414	0,413	0,419	0,416	0,410
393,253 - 393,414	0,430	0,464	0,412	0,413	0,411	0,418	0,416	0,410
393,414 - 393,575	0,433	0,450	0,419	0,415	0,415	0,419	0,421	0,410
393,575 - 393,736	0,428	0,436	0,413	0,414	0,413	0,420	0,417	0,410
393,736 - 393,897	0,432	0,422	0,414	0,414	0,413	0,417	0,417	0,410

Onde: B (Bitola); A (Alinhamento); NE (Nivelamento esquerdo); ND (Nivelamento direito); NM (Nivelamento médio lado esquerdo e direito); S (Superelevação); E/T (Empeno/Torção); C (Curvatura).

**Tabela 4 – TQI-FRA para os parâmetros de geometria de via - Ferrovia 2**

Segmento	Ferrovia 2 (TQI – FRA)							
	B	A	NE	ND	NM	S	E/T	C
187,000 - 187,161	0,445	0,413	0,430	0,433	0,430	0,411	0,415	0,410
187,161 - 187,322	0,494	0,415	0,432	0,434	0,432	0,414	0,416	0,410
187,322 - 187,483	0,445	0,413	0,430	0,433	0,430	0,411	0,415	0,410
187,483 - 187,644	0,494	0,415	0,432	0,434	0,432	0,414	0,416	0,410
187,644 - 187,805	0,457	0,415	0,419	0,420	0,419	0,410	0,412	0,410
187,805 - 187,966	0,984	0,415	0,414	0,415	0,414	0,418	0,419	0,410
187,966 - 188,127	1,331	0,413	0,414	0,414	0,414	0,414	0,415	0,410
188,127 - 188,287	0,444	0,418	0,414	0,413	0,413	0,415	0,416	0,446
188,287 - 188,448	1,100	0,435	0,418	0,418	0,418	0,414	0,417	0,676
188,448 - 188,609	0,802	0,424	0,417	0,417	0,417	0,416	0,417	0,624
188,609 - 188,770	0,429	0,417	0,423	0,419	0,420	0,411	0,416	0,410
188,770 - 188,931	0,445	0,425	0,418	0,419	0,418	0,410	0,412	0,410
188,931 - 189,092	0,436	0,417	0,414	0,415	0,414	0,410	0,413	0,410
189,092 - 189,253	0,479	0,417	0,417	0,418	0,417	0,414	0,422	0,410
189,253 - 189,414	1,018	0,418	0,449	0,434	0,440	0,418	0,423	0,410
189,414 - 189,575	1,350	0,419	0,423	0,422	0,421	0,421	0,424	0,410
189,575 - 189,736	0,481	0,416	0,423	0,421	0,421	0,415	0,418	0,410
189,736 - 189,897	1,297	0,445	0,421	0,419	0,418	0,414	0,421	0,410

Onde: B (Bitola); A (Alinhamento); NE (Nivelamento esquerdo); ND (Nivelamento direito); NM (Nivelamento médio lado esquerdo e direito); S (Superelevação); E/T (Empeno/Torção); C (Curvatura).

Os resultados do índice de qualidade da via de cada parâmetro de geometria encontrados para os segmentos da Ferrovia 1 demonstram um coeficiente de variabilidade que pode ser considerado pequeno (cerca de 1,5% em média), com exceção do parâmetro da curvatura que apresentou dois resultados notavelmente maiores de desvio padrão e, conseqüentemente, de coeficiente de variabilidade. Tal comportamento, também é observado na ferrovia 2, e em ambos os casos o desvio representou uma possível anomalia, cujas causas encontram-se em fase de apuração.

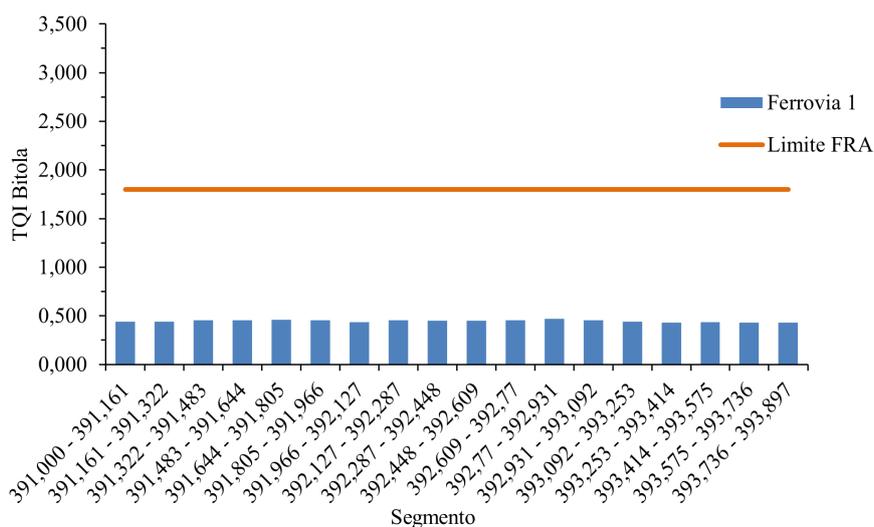
Nessas situações há um procedimento de investigação, com inspeções *in loco*, para identificar, e propor a melhor solução técnica de correção. Entretanto, esta fase da manutenção, não é parte integrante deste trabalho, contudo é importante salientar que as intervenções para sua correção já foram programadas pela equipe de gerência de manutenção das ferrovias.

Deste modo, é possível afirmar que os resultados apresentados para às duas ferrovias demonstram a assertividade do método em detectar os segmentos em que há presença de anomalias na geometria da via permanente.

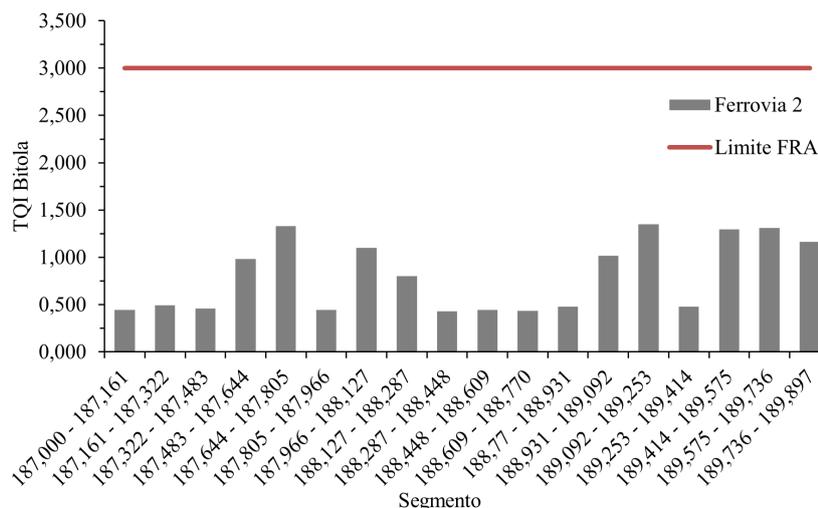
O segmento da Ferrovia 1 apresenta um comportamento similar ao longo de toda sua extensão, corroborando o fato de o trecho analisado ter sido recentemente renovado (portanto, esperava-se valores de menores magnitudes e de poucas variações quanto aos índices de qualidade).

Já em relação aos resultados do índice de qualidade da via encontrados para os segmentos da Ferrovia 2 destaca-se o observado quanto ao parâmetro bitola, que apresentou maior variabilidade em relação ao verificado na Ferrovia 1, o que era esperado para o tipo de dormente utilizado naquela ferrovia. Quanto aos demais resultados, na média estes também levaram a um coeficiente de variação de cerca de 1,5%, com baixa dispersão dos resultados.

Os dados obtidos pelos cálculos demonstram que as duas ferrovias apresentaram valores abaixo dos limites estabelecidos para cada parâmetro pela CFR (2021), conforme exemplos verificados no Gráfico 1 e no Gráfico 2. Nestes gráficos são apresentados os valores de TQI obtidos para bitola, por segmento, comparando-os com o limite da CFR (2021) para a respectiva classe de via daquelas ferrovias. Em razão das ferrovias serem de características distintas, conforme apresentado na Tabela 2, são classificadas de forma diferente dentre os métodos avaliados, e, portanto, seus limites se diferem para cada parâmetro geométrico. Pelo método FRA, os limites são estabelecidos conforme CFR (2021), onde para o parâmetro Bitola é 1,8 para a ferrovia 1, e 3,0 para a ferrovia 2. Cabe mencionar que, como comentado previamente, a diferença de valores entre os índices de qualidade da via entre ambas as ferrovias, pode ser explicada principalmente pela manutenção recente no segmento avaliado na Ferrovia 1.



**Gráfico 1.** TQI Bitola e valor limite no método FRA - Ferrovia 1



**Gráfico 2.** TQI Bitola e valor limite no método FRA - Ferrovia 2

Os cálculos também foram realizados quanto ao método do índice SD para ambas as ferrovias. Na Tabela 5 e na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos para os mesmos segmentos da Ferrovia 1 e da Ferrovia 2, respectivamente. Verifica-se que os resultados dos índices de qualidade da via de ambas as ferrovias se encontram dentro dos limites de segurança estabelecidos pela norma EN 13848-5 (2008).

**Tabela 5 – TQI-SD para os parâmetros de geometria de via em milímetros - Ferrovia 1**

Ferrovia 1 (método SD)								
Segmento	B [mm]	A [mm]	NE [mm]	ND [mm]	NM [mm]	S [mm]	E/T [mm]	C [mm]
391,000 - 391,200	1,14	1,85	0,64	0,53	0,49	0,79	0,80	0,09
391,200 - 391,400	0,93	1,34	0,48	0,55	0,44	0,70	0,65	0,12
391,400 - 391,600	1,16	1,71	0,87	0,84	0,79	0,96	0,82	0,07
391,600 - 391,800	1,14	1,85	0,71	0,78	0,70	0,78	0,66	0,06
391,800 - 392,000	0,99	2,02	0,52	0,67	0,53	1,13	0,83	0,06
392,000 - 392,200	1,00	1,32	0,59	0,70	0,60	0,84	0,68	0,11
392,200 - 392,400	1,13	3,51	0,54	0,55	0,45	1,18	0,89	0,06
392,400 - 392,600	1,09	2,18	1,19	1,04	1,08	1,17	0,83	0,12
392,600 - 392,800	1,00	2,27	0,48	0,57	0,43	0,85	0,75	0,05
392,800 - 393,000	1,55	1,84	0,53	0,61	0,46	1,07	0,89	0,06
393,000 - 393,200	1,54	1,56	0,55	0,65	0,51	0,88	0,80	0,06
393,200 - 393,400	1,23	2,52	0,54	0,62	0,46	1,05	0,91	0,07
393,400 - 393,600	0,86	2,40	0,97	0,71	0,72	1,09	1,13	0,11
393,600 - 393,800	0,89	1,48	0,55	0,70	0,53	0,99	0,86	0,11
393,800 - 394,000	0,90	1,18	0,68	0,68	0,59	0,91	0,91	0,05

Onde: B (Bitola); A (Alinhamento); NE (Nivelamento esquerdo); ND (Nivelamento direito); NM (Nivelamento médio lado esquerdo e direito); S (Superelevação); E/T (Empeno/Torção); C (Curvatura).

**Tabela 6 – TQI-SD para os parâmetros de geometria de via em milímetros - Ferrovia 2**

Ferrovia 2 (método SD)								
Segmento	B [mm]	A [mm]	NE [mm]	ND [mm]	NM [mm]	S [mm]	E/T [mm]	C [mm]
187,000 - 187,200	1,04	0,56	1,49	1,59	1,50	0,49	0,79	0,08
187,200 - 187,400	1,16	0,89	1,59	1,62	1,57	0,55	0,77	0,14
187,400 - 187,600	3,45	0,70	0,81	0,90	0,82	0,80	0,87	0,12
187,600 - 187,800	1,60	0,72	0,72	0,71	0,68	0,63	0,70	0,11

**Tabela 6** – Continuação...

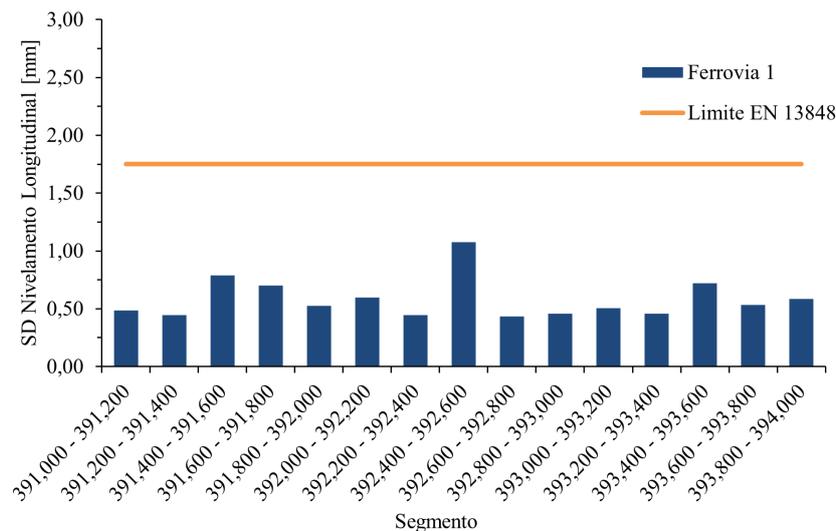
Ferrovia 2 (método SD)								
Segmento	B [mm]	A [mm]	NE [mm]	ND [mm]	NM [mm]	S [mm]	E/T [mm]	C [mm]
187,800 - 188,000	1,32	1,06	0,71	0,60	0,61	0,73	0,79	2,27
188,000 - 188,200	1,44	1,71	1,07	1,13	1,07	0,58	0,80	0,12
188,200 - 188,400	1,58	1,14	1,16	0,97	1,01	0,55	0,94	2,41
188,400 - 188,600	1,32	1,26	0,98	1,00	0,97	0,18	0,50	0,14
188,600 - 188,800	1,39	0,95	0,78	0,87	0,78	0,26	0,68	0,11
188,800 - 189,000	2,36	0,93	1,01	1,05	0,96	0,80	1,18	0,09
189,000 - 189,200	1,79	1,11	2,15	1,70	1,88	0,86	1,24	0,09
189,200 - 189,400	2,60	0,79	1,18	1,10	1,09	0,97	1,15	0,12
189,400 - 189,600	3,43	1,93	1,13	1,11	1,02	0,65	1,10	0,10
189,600 - 189,800	1,45	1,35	1,44	1,43	1,34	0,11	1,03	0,08
189,800 - 190,000	3,90	1,39	0,97	0,84	0,84	0,70	0,92	0,12

Onde: B (Bitola); A (Alinhamento); NE (Nivelamento esquerdo); ND (Nivelamento direito); NM (Nivelamento médio lado esquerdo e direito); S (Superelevação); E/T (Empeno/Torção); C (Curvatura).

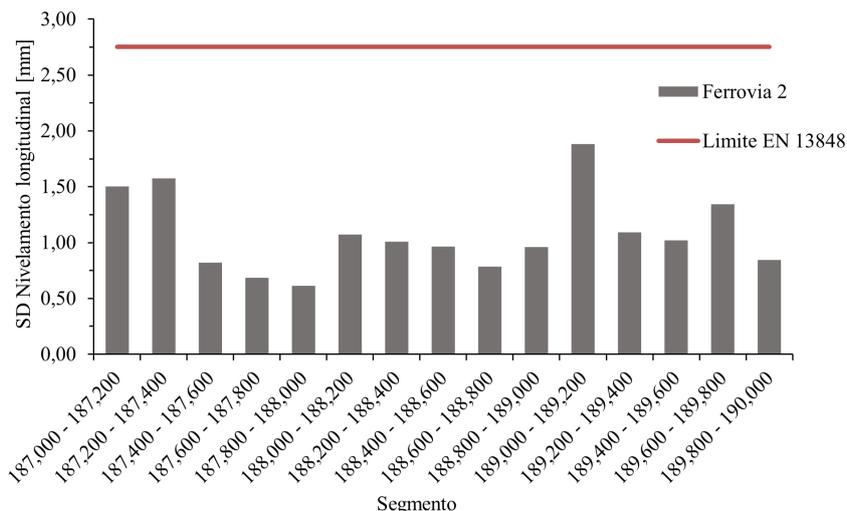
Utilizando a mesma métrica de avaliação da dispersão dos dados no método anterior (FRA), os valores para o índice SD também correspondem, para ambas as ferrovias, a um comportamento homogêneo de dados, com dispersão que pode ser considerada pequena (da mesma ordem).

Com a finalidade de também exemplificar os resultados obtidos sob a metodologia SD no Gráfico 3 e no Gráfico 4 são apresentados os resultados da média do nivelamento longitudinal no trilho esquerdo e direito para as Ferrovias 1 e 2, respectivamente. Como mencionado anteriormente, a variação dos limites entre as ferrovias é justificada pela classificação conforme o método avaliado. Para a ferrovia 1 o limite para nivelamento longitudinal é de 1,75, já com relação à ferrovia 2 o valor limite para o mesmo parâmetro é de 2,75.

Para ambas as ferrovias também foram calculados os valores de índice de qualidade global conforme método da EN (CoSD), índice TQI China e Coeficiente J, cujos resultados estão apresentados, respectivamente, na Tabela 7 e na Tabela 8, considerando classe de via compatível com as características de cada ferrovia.



**Gráfico 3.** Desvio padrão da média do nivelamento longitudinal trilho esquerdo e direito e valor limite no método SD, em milímetros (EN 13848, 2008) - Ferrovia 1



**Gráfico 4.** Desvio padrão da média do nivelamento longitudinal esquerdo e direito e valor limite no método SD, em milímetros (EN 13848, 2008) - Ferrovia 2

**Tabela 7 – Índice de qualidade global pelos métodos europeu, chinês e polonês - Ferrovia 1**

Ferrovia 1 (métodos CoSD, índice TQI China e Coeficiente J)			
Segmento	CoSD [mm]	TQI China [mm]	Coeficiente J [mm]
391,0 - 391,2	1,18	5,83	1,06
391,2 - 391,4	0,91	4,77	0,83
391,4 - 391,6	1,18	6,43	1,11
391,6 - 391,8	1,19	5,98	1,08
391,8 - 392,0	1,23	6,22	1,11
392,0 - 392,2	0,94	5,24	0,88
392,2 - 392,4	1,91	7,87	1,55
392,4 - 392,6	1,39	7,62	1,32
392,6 - 392,8	1,31	5,96	1,13
392,8 - 393,0	1,30	6,55	1,13
393,0 - 393,2	1,19	6,03	1,04
393,2 - 393,4	1,49	6,93	1,29
393,4 - 393,6	1,44	7,27	1,34
393,6 - 393,8	1,00	5,58	0,95
393,8 - 394,0	0,92	5,33	0,90

**Tabela 8 – Índice de qualidade global pelos métodos europeu, chinês e polonês - Ferrovia 2**

Ferrovia 2 (métodos CoSD, índice TQI China e Coeficiente J)			
Segmento	CoSD [mm]	TQI China [mm]	Coeficiente J [mm]
187,0 - 187,2	1,03	5,96	0,96
187,2 - 187,4	1,14	6,58	1,09
187,4 - 187,6	1,86	7,53	1,18
187,6 - 187,8	1,01	5,08	0,83
187,8 - 188,0	0,98	5,21	0,89
188,0 - 188,2	1,30	6,73	1,23
188,2 - 188,4	1,19	6,34	1,11
188,4 - 188,6	1,06	5,24	0,97
188,6 - 188,8	0,99	4,94	0,89
188,8 - 189,0	1,48	7,33	1,22
189,0 - 189,2	1,54	8,85	1,46
189,2 - 189,4	1,57	7,79	1,24
189,4 - 189,6	2,11	9,36	1,65
189,6 - 189,8	1,30	6,80	1,27
189,8 - 190,0	2,16	8,72	1,46

Nota-se que mesmo considerando o mesmo método, no caso o SD, para cálculo do índice de cada parâmetro de geometria de via e a mesma extensão para os segmentos (mesmos dados), os valores do índice de qualidade global da via obtidos em cada metodologia (europeu, chinês e polonês) apresentaram discrepância, pois suas equações consideram um conjunto diferente de parâmetros de geometria, além de pesos/coeficientes diferenciados para cada um.

Observou-se que o método de cálculo do índice de qualidade da via SD é mais prático que o método FRA, pois permite que os segmentos de via analisados tenham a extensão adequada à ferrovia, sem necessidade de adaptações no cálculo, tornando-o mais simples e mais rápido (ou seja, o método FRA é padronizado, enquanto o método SD possui flexibilidade).

A dificuldade de se encontrar informações que detalham mais sobre o método do CoSD prejudicou a realização de análises minuciosas. Neste caso, os parâmetros levam em consideração coeficientes que o avaliador define, conforme observado por Tzanakakis (2013), e não há critérios preestabelecidos para orientar valores a serem atribuídos para os coeficientes. Tal fator interfere substancialmente em avaliações comparativas de resultados, inclusive no comparativo dos segmentos deste estudo com outros trabalhos. Nos estudos de Krug e Madejski (2018) e Offenbacher et al. (2020), por exemplo, adotaram os valores 1 e 0,25 respectivamente. Entretanto, a utilização desses valores de ponderação para cada parâmetro de geometria ( $w_i$ ) pode permitir uma melhor flexibilidade ao método e, portanto, maior facilidade em adequá-lo as condições características de cada trecho da ferrovia. Para a presente pesquisa, empregou-se como estratégia a adoção dos coeficientes com peso de unitário para todos os parâmetros, verificando a variabilidade dos valores para as vias analisadas.

O método TQI China considera uma maior quantidade de parâmetros que o CoSD e o Coeficiente J e, por isso, apresentou valores que possuem maior intensidade quando comparados com os demais índices de qualidade global. De maneira geral, os índices se comportaram de modo similar: quando um segmento apresentou valores maiores, a mesma elevação foi observada nos demais índices das outras metodologias.

Para as ferrovias brasileiras recomenda-se utilizar método mais acessível e de simples aplicação, com o propósito de facilitar seu uso e ser amplamente difundido pelas concessionárias e fiscalizadoras. Além disso, o método precisa possuir certa flexibilidade para permitir uma melhor adequação as particularidades de cada ferrovia, a fim de melhor representar a realidade. Sendo assim, com base nas análises apresentadas neste estudo, sugere-se que o método CoSD, pela facilidade de compreensão, implementação do método, considerando os quatro parâmetros de geometria de via (bitola, alinhamento, nivelamento e curvatura) e as classes de via descritas na norma NBR 16387 (2020), sejam empregados como procedimento de cálculo na avaliação geométrica da via férrea.

## 5. CONCLUSÕES

O trabalho teve como objetivo realizar uma análise dos métodos de avaliação da qualidade geométrica de vias férreas usualmente empregados em diferentes países, incluindo no Brasil. Com base no estudo de caso em duas ferrovias brasileiras, buscou-se

identificar as diferenças e similaridades entre as metodologias empregadas no mundo, propondo um índice de qualidade da via mais funcional.

Nesta linha, é importante ressaltar que para se adequar às características de suas ferrovias e, por consequência, ter valores mais confiáveis e estatisticamente válidos, os países adotam um conjunto de parâmetros e pesos/coeficientes diferentes para cada parâmetro de geometria na equação do cálculo do índice de qualidade global. Isto é algo que deve ser considerado para se elaborar, ou adotar, um método brasileiro para cálculo do índice de qualidade da via.

Este método deverá contemplar toda a diversidade de características das ferrovias brasileiras, como bitola, carga por eixo, parâmetros geométricos e estruturais, volume de transporte, bem como estar alinhado aos valores de limites técnicos de segurança das normas.

No estudo conclui-se que o método CoSD é o mais prático e permite o uso de valores para ponderar cada um dos parâmetros geométricos atendendo as características e singularidades das ferrovias, que deverão ser utilizadas pela engenharia na definição de intervalos e limites adequados as suas condições com o intuito padronizá-los.

Os métodos estudados, inclusive o proposto, ainda não possuem métricas para avaliar e quantificar a qualidade da via utilizando equipamentos que realizam a inspeção de forma indireta (por exemplo, vagão instrumentado).

Sugere-se que as instituições fiscalizadoras brasileiras, com as instituições regulamentadoras e normatizadoras, além das concessionárias ferroviárias, elaborem um método de cálculo do índice de qualidade global da via para as ferrovias brasileiras de carga e de passageiros, de modo a ter melhor gestão e segurança operacional.

Logo, a realização de estudos complementares para a elaboração de um método adequado aos dois sistemas de inspeções é extremamente importante para aperfeiçoar os critérios de segurança e de conforto empregados nas ferrovias.

## REFERÊNCIAS

- ANTF (2022a) Carga Geral: Expansão Anual Média Chega a 4,2%. Disponível em: <<https://www.antf.org.br/releases/carga-geral/>> (acesso em 10/02/2023).
- ANTF (2022b) Informações Gerais. Disponível em: <<https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>> (acesso em 10/02/2023).
- ANTT (2021) Anuário do Setor Ferroviário. Disponível em: <<https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/anuario-do-setor-ferroviario/>> (acesso em 14/02/2023).
- Bing, A.J. e A. Gross (1983) Development of railroad track degradation models, *Transportation Research Record*, v. 939, p. 27-31. Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1983/939/939-005.pdf>> (acesso em 13/02/2023).
- CFR (2021) 49 CFR Ch. II (10-1-11 Edition). Disponível em: <<https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2011-title49-vol4/pdf/CFR-2011-title49-vol4-part213.pdf>> (acesso em 13/02/2023).
- EN 13848-5 (2008) *Railway Applications -Track- Track Geometry Quality - Part 5: Geometric Quality Assessment*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- EN 13848-6 (2014) *Railway Applications — Track — Track Geometry Quality Part 6 : Characterisation of Track Geometry Quality, Standard*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- Esveld, C. (1993) In track quality control and assessment of rails. In Kalker J.J., D.F. Cannon e O. Orringer (eds.) *Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation*. Dordrecht: Springer. DOI: 10.1007/978-94-015-8151-6\_12.
- Esveld, C. (2001) *Modern Railway Track* (2nd ed.). Zaltbommel: MRT-Productions.

- Farkas, A. (2019) Measurement of railway track geometry: a state-of-the-art review. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, v. 48, n. 1, p. 76-88. DOI: 10.3311/PPtr.14145.
- Federal Railroad Administration (2005) *Development of Objective Track Quality Indices*. Washington: Federal Railroad Administration. Disponível em: <<https://railroads.dot.gov/elibrary/development-objective-track-quality-indices>> (acesso em 23/03/2023).
- Krug, G. e J. Madejski (2018) Improving track condition by application of Quasi Cumulative Distribution Function (QCDF). *Road and Rail Infrastructure V*, v. 5, p. 659-66. DOI: 10.5592/CO/CETRA.2018.749.
- Li, D.; J.P. Hyslip; T.R. Sussmann et al. (2016) *Railway Geotechnics*. Boca Raton: CRC Press.
- Liu, R.K.; P. Xu; Z. Sun et al. (2015) Establishment of track quality index standard recommendations for beijing metro. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, v. 2015, p. 473830. DOI: 10.1155/2015/473830.
- Melo, A.L.O.; S. Kaewunruen; M. Papaalias et al. (2020) Methods to monitor and evaluate the deterioration of track and its components in a railway in-service: a systemic review. *Frontiers in Built Environment*, v. 6, p. 118. DOI: 10.3389/fbuil.2020.00118.
- NBR 16387 (2020) *Via férrea — Classificação de Vias*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Ngamkhanong, C.; S. Kaewunruen e B.J.A. Costa (2018) State-of-the-art review of railway track resilience monitoring. *Infrastructures*, v. 3, n. 1, p. 1-18. DOI: 10.3390/infrastructures3010003.
- NSW 205 (2018) *Technical Note – TN 025: 2018 Subject: Update to ESC 210 Track Geometry*. NSW Government: Transport Asset Standards Authority.
- Offenbacher, S.; J. Neuhold; P. Veit et al. (2020) Analyzing major track quality indices and introducing a universally applicable tqi. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 10, n. 23, p. 1-17. DOI: 10.3390/app10238490.
- Rosyidi, S.A. e D. Setiawan (2016) Track quality index as track quality. In *Proceeding of the 19th International Symposium of Indonesian Inter-University Transportation Studies Forum (FSTPT)*. Dordrecht: Atlantis Press, p. 197-207.
- Sadeghi, J. e H. Askarnejad (2010) Development of improved railway track degradation models. *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 6, n. 6, p. 675-88. DOI: 10.1080/15732470801902436.
- Sgavioli, F.; L. Bernucci; R. Motta et al. (2015) Análise do custo do ciclo de vida do lastro ferroviário na estrada de ferro Vitória Minas. *Transportes*, v. 23, n. 4, p. 5. DOI: 10.14295/transportes.v23i4.981.
- Tzanakakis, K. (2013) *The Railway Track and Its Long Term Behaviour* (1st ed.). Berlin: Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-36051-0.
- Yan, T.H. e F. Corman (2020) Assessing and extending track quality index for novel measurement techniques in railway systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2674, n. 8, p. 24-36. DOI: 10.1177/0361198120923661.