

Monitoramento da influência da velocidade de circulação dos trens na força de impacto por meio de sensores de fibra óptica

Danilo Martelli* e Luiz Antônio Silveira Lopes
 Instituto Militar de Engenharia (IME)
 Praça General Tibúrcio, 80, CEP:22290-270,
 Praia Vermelha, Rio de Janeiro/RJ, Brasil,
 *danmec04@yahoo.com.br

RESUMO: Este artigo consiste em uma demonstração do funcionamento de um equipamento novo no Brasil, que faz uso de sensores de fibra óptica para a medição de força de impacto que as rodas de veículos ferroviários causam nos trilhos da via permanente. Ademais, abrange a análise da relação existente entre a velocidade do trem e a força de impacto. De posse dos dados, conclui-se que não foi possível estabelecer uma equação que correlacione satisfatoriamente força de impacto e velocidade, segundo a análise de Regressão Linear Simples, dada a variabilidade dos veículos ferroviários. Entretanto, é possível a construção de envoltórias de segurança com vistas a diminuir o impacto na operação ferroviária e os riscos de acidentes e ocorrências com trilhos quebrados e rolamentos travados.

PALAVRAS-CHAVE: Envoltória de segurança. Força de Impacto. Roda. Trem. Trilho.

ABSTRACT: This article is a demonstration of the operation of a new equipment in Brazil, which uses fiber optic sensors to measure the impact force that rail vehicles wheels cause on permanent track rails. In addition, it covers the analysis of the relationship between train speed and impact force. With the data, it was concluded that it was not possible to establish a single equation that satisfactorily correlates impact force and speed, according to the analysis of Simple Linear Regression, given the variability of railway vehicles. However, it is possible to construct safety curves to reduce the impact on the railway operation and the risks of accidents and occurrences with broken rails.

KEYWORDS: Impact Force. Safety curve. Trail. Train. Wheel.

1. Introdução

Nos Estados Unidos, entre 2001 e 2010, os descarrilamentos que ocorreram com maior frequência foram ocasionados por quebras de trilhos ou soldas [1], como demonstra a **figura 1**. No Brasil, os dados oficiais da ANTT (de 2006 a 2013) mostram apenas o percentual de acidentes por circunstâncias macro, sendo a via permanente a maior causa (aproximadamente 40% dos acidentes) [2].

Uma empresa do setor logístico brasileiro ligada ao transporte ferroviário, tendo em vista todo o impacto financeiro gerado¹, decidiu monitorar a força de impacto pela qual a via permanente (mais

especificamente o trilho) é solicitada na passagem do trem. Com isso, fez a aquisição de um equipamento de detecção de impacto de rodas.

Durante a realização da revisão bibliográfica para implantação do equipamento, verificou-se a possibilidade de haver relação entre a força de impacto e a velocidade. A **figura 2** mostra todas as possibilidades de relações existentes:

- inversamente proporcional: defeitos em fase inicial (pequenos), que causam forças de impacto altas quanto menor for a velocidade;
- constante: defeitos em fase intermediária (médios), que causam sempre a mesma de força de impacto, independentemente da velocidade;

¹ Interdição de tráfego, danos a veículos ferroviários e via permanente, por causa de falhas e acidentes causa trilho, tala ou solda quebrados, ocorridos na malha sobre sua concessão.

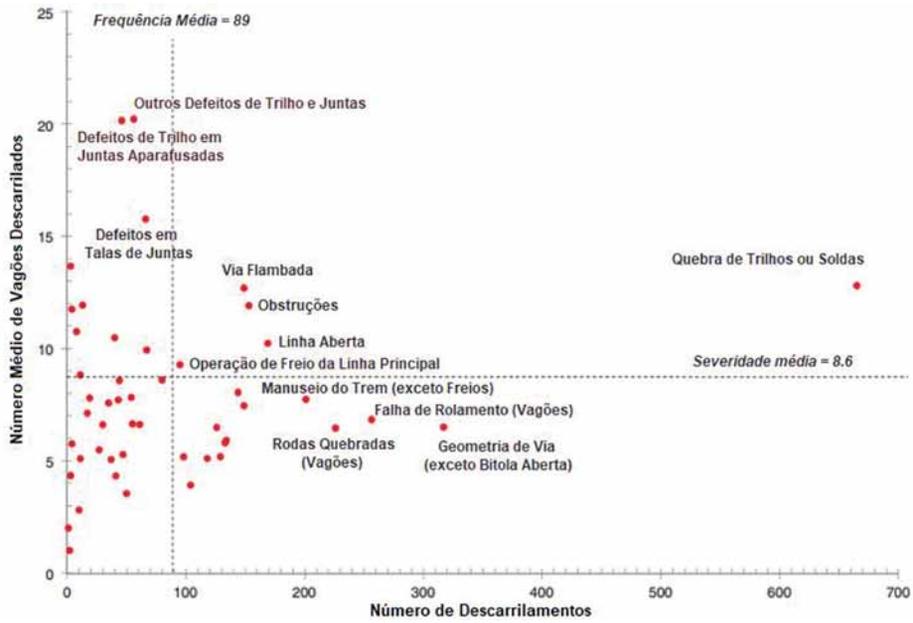


Fig. 1 - Gráfico de frequência e severidade de descarrilamentos na linha principal das ferrovias de carga Class I dos EUA. Fonte: [1], traduzido pelo autor.

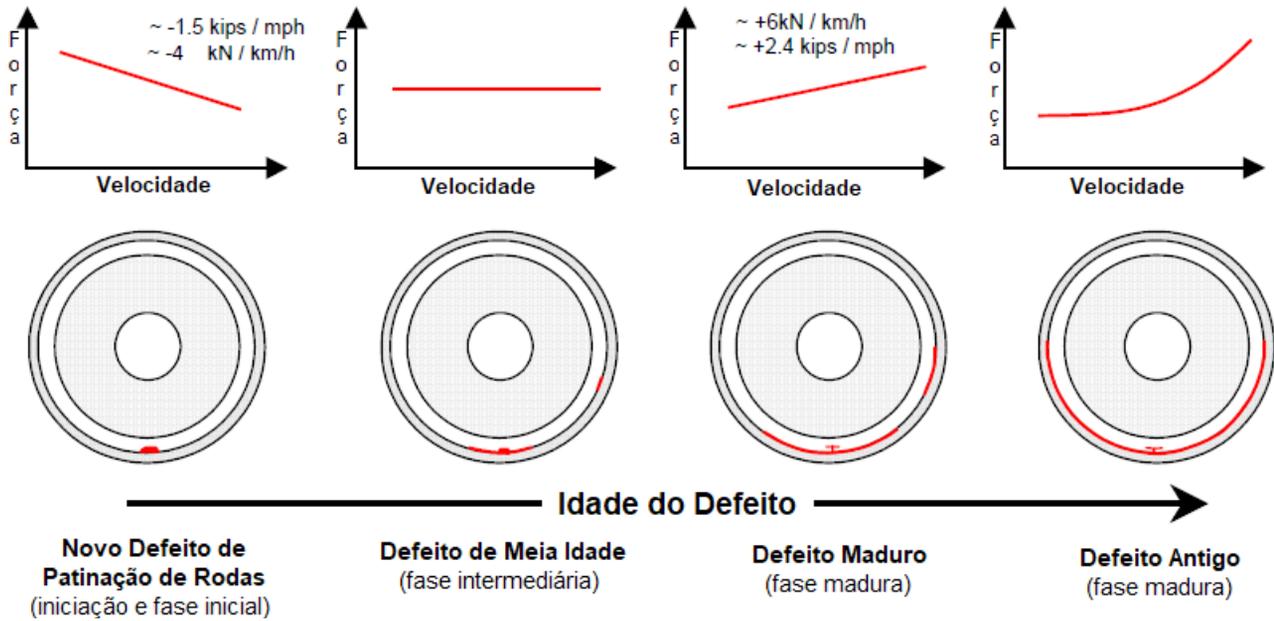


Fig. 2 - Prováveis curvas de velocidade *versus* força de impacto, dependendo da maturidade do defeito. Fonte: [3], traduzido pelo autor.

- diretamente proporcional: defeitos em fase avançada (grandes), que causam forças de impacto altas quanto maior for a velocidade;
- exponencial: defeitos em fase muito avançada (ainda maiores), que causam forças de impacto ainda mais altas quanto maior for a velocidade;

Dessa forma, o objetivo desse estudo foi relacionar a força exercida nos trilhos (que pode ser acrescida de forças dinâmicas decorrentes de defeitos de rodas) com a velocidade de circulação dos comboios. O detector de impacto adquirido faz uso de sensores de fibra óptica instalados sob o trilho para realizar a medição da força exercida pelos veículos na via.

O equipamento foi instalado na região de Itu/SP, como mostra a **figura 3**, onde a via permanente é de bitola mista, ou seja, possui três trilhos para a passagem de trens de bitola larga (1,6 metro) e bitola métrica (1,0 metro). Faz a medição de trens de três empresas ferroviárias diferentes, as quais passam pelo local (a detentora da concessão e duas que pagam direito de passagem, uma com trens de bitola larga e outra com trens de bitola métrica).

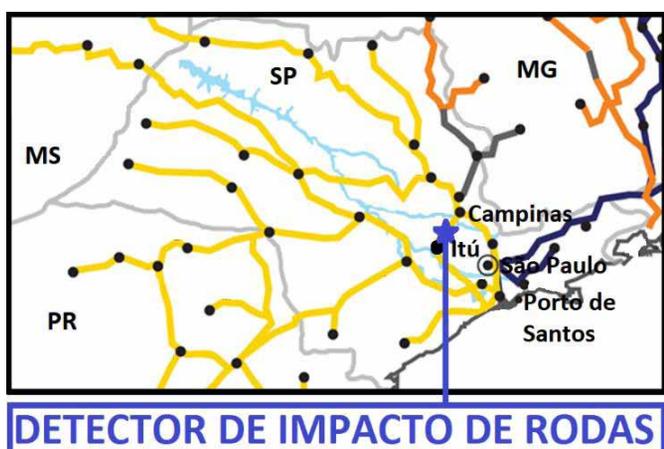


Fig. 3 - Diagrama esquemático da malha ferroviária do estado de São Paulo, focando local de instalação do detector de impacto. Fonte: [4], modificado pelo autor.

2. Teoria contato roda-trilho

Em 1881, o físico alemão Heinrich Hertz apresentou sua teoria sobre contato, publicando em

1882 um artigo intitulado “On the Contact of elastic solids” [5]. No estudo, Hertz afirma que a região de contato teórica entre dois corpos sobrepostos é um ponto, e que, ao aplicar uma carga conhecida, normal a região de contato, forma-se uma área finita, a qual varia de acordo com a forma geométrica dos corpos que estão em contato. Como exemplo, dois corpos sobrepostos que possuam curvaturas distintas e eixos principais perpendiculares entre si, possuem área de contato elíptica, como é o caso do contato entre a roda e trilho ferroviários [5].

A teoria de Hertz ganhou destaque apenas em meados do século XX, sendo a ferrovia a principal beneficiária de seus estudos, notadamente no que tange ao entendimento da interação entre roda e trilho [5]. A **figura 4** exemplifica a área de contato entre roda e trilho, a chamada elipse de Hertz.

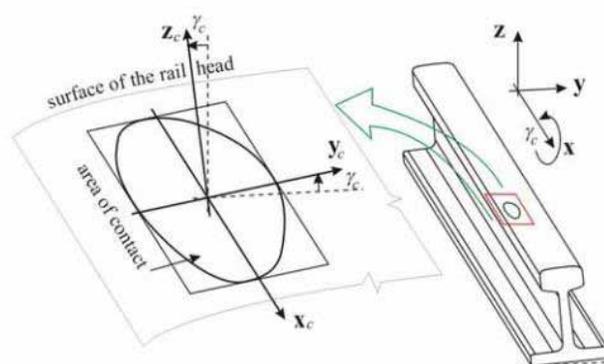


Fig. 4 - Exemplo de área de contato elíptica entre roda e trilho. Fonte: [6].

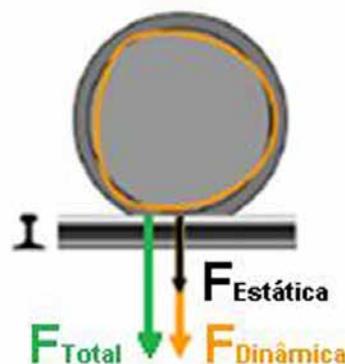


Fig. 5 - Esquema das forças existentes entre roda e trilho. Fonte: [6], modificado pelo autor.

A chamada força de impacto ocorre quando existe um defeito na roda, ou no trilho, fazendo com que a área de contato, vista na **figura 4**, não aconteça.

A Força Total de Impacto é composta por duas forças: a Força Estática, que representa a força peso do veículo, dividida pela quantidade de rodas que nele existem, e a Força Dinâmica, que representa a magnitude da força ocasionada por um defeito existente na roda, conforme exemplificado na **figura 5**.

O manual americano de normas e práticas recomendadas da Association of American Railroads (AAR) [8], que para a ferrovia brasileira é somente uma referência, considera impacto de rodas prejudicial à via permanente quando a Força Total for maior ou igual a 90 kips (400 kN). Além disso, o manual de campo da AAR [9] também faz referência à 65 kips (289 kN), a partir da qual é preciso realizar tratamento por oportunidade. A Federal Railroad Administration (FRA) [10] também faz uso dos limites referenciados no Manual de Campo da AAR.

3. Detector de impacto de rodas

Segundo Weed e Lonsdale [11], existem, potencialmente, diversas variáveis que podem influenciar na diferença de leitura dos detectores de impacto durante a passagem do trem. Dentre essas variáveis, pode-se citar: tipo de sensor utilizado, velocidade do trem, tipo de dormente usado e rigidez e estabilidade do subleito. Os autores ainda afirmam que conforme aumenta a velocidade, a carga registrada também aumenta.

O sistema de detecção de impacto utilizado para realizar as medições apresentadas nesse estudo consiste de: um computador servidor (localizado na sede da empresa), no qual está instalado o programa gerenciador do equipamento (supervisório); um interrogador ótico, que faz o envio e a interpretação dos sinais, localizado ao lado da via permanente; e 12 sensores de Bragg em fibra ótica (6 em cada trilho da bitola larga), como pode ser visto na **figura 6**.



Fig. 6 - Foto dos sensores instalados na via permanente. Fonte: [12], modificado pelo autor.

As redes de Bragg em fibra ótica (**figura 7**) são microestruturas inscritas de forma permanente no núcleo de uma fibra ótica monomodo (transmissão de apenas um sinal de luz). Elas refletem um espectro estreito de luz, centrado no comprimento de onda de Bragg, no momento em que iluminadas por uma fonte de espectro largo [13].

A cada passagem de uma roda sobre os sensores, o equipamento mede toda a circunferência dela pelo menos uma vez (podendo chegar a medir até 2 ou 3 vezes, dependendo do diâmetro da roda) [7].

Os sensores medem cargas de impacto que não são exercidas diretamente sobre cada um deles. A faixa de medição está limitada no software de análise a 3,5m em cada direção, ou seja, a faixa de medição de cada sensor cobre no máximo 7m [14].

Cada sensor recebe do interrogador ótico um feixe de luz, que é conduzido por um fio de fibra ótica. Este feixe, ao chegar no sensor, encontra uma combinação de lentes otimizadas que o dividem em vários feixes, os quais incidem em um refletor ótico, que, quando em repouso, fica posicionado paralelamente ao último espelho, fazendo com que os raios de luz incidentes sejam refletidos na mesma direção em que incidiram, como demonstrado na **figura 8**.

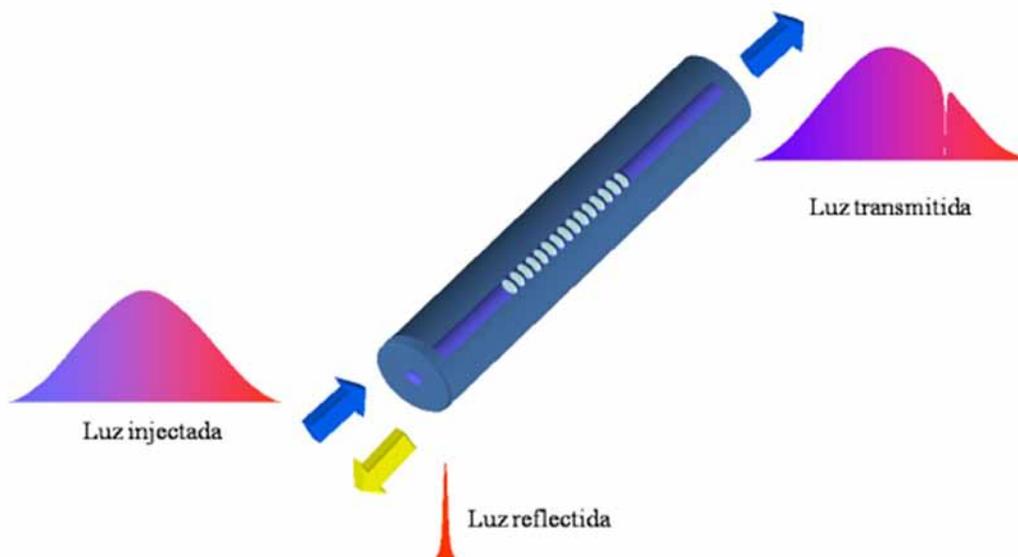


Fig. 7 – Esquema de operação das redes de Bragg. Fonte: [13].

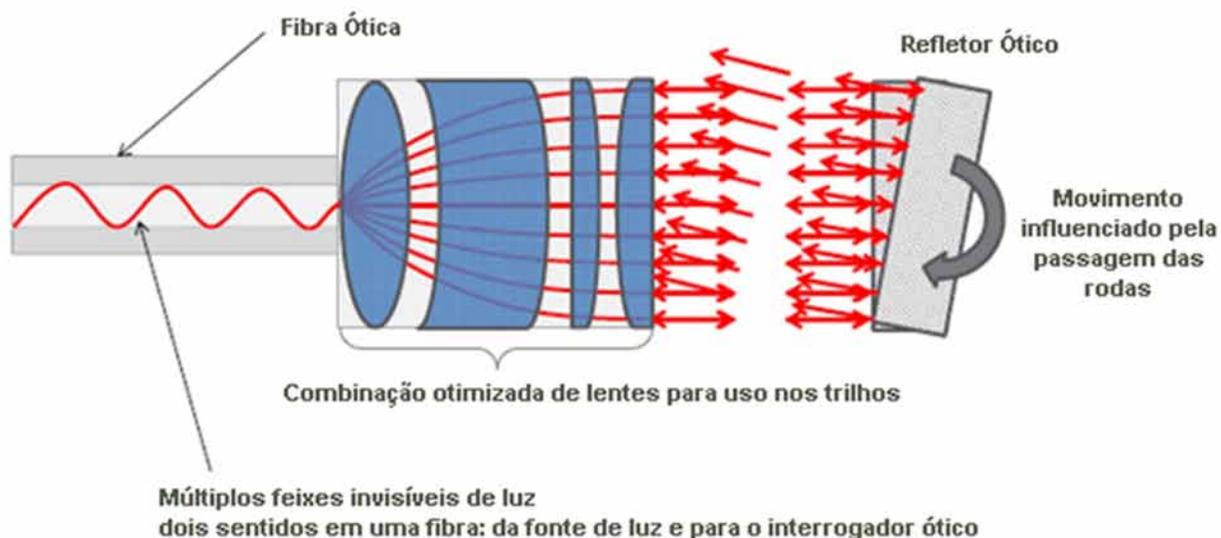


Fig. 8 -Esquema de funcionamento de cada sensor de fibra óptica. Fonte: [12].

Quando o trem passa por um sensor, o refletor ótico oscila e os feixes de luz são reenviados para os espelhos em uma direção diversa da anterior. Assim, os feixes são convertidos novamente em um único, chegando ao interrogador ótico no formato de um sinal, correspondente à deflexão do trilho [14]. Caso haja um impacto, a oscilação do refletor fará com que

o sinal tenha uma forma distinta, que neste caso será como um “pulso”, conforme a região “D” da **figura 9**.

A **figura 9** mostra o sinal padrão de medição (deflexão do trilho) na passagem de uma roda com defeito em apenas um dos sensores do detector do impacto de rodas. A posição A representa REPOUSO, ou seja, não existe carga sobre o sensor. A posição B

representa a APROXIMAÇÃO DA RODA, ou seja, o sensor está detectando a roda passando pelo dormente logo antes do mesmo. A posição C representa a FLEXÃO MÁXIMA, ou seja, a roda está em cima do sensor. A posição D representa o DEFEITO. Nesse caso, a roda estava se afastando do sensor, passando sobre o outro dormente, mas havia um defeito que gerou o impacto detectado como um “pulso”.

O equipamento, através de um algoritmo, faz o tratamento do sinal e registra a Força Estática. Na sequência, verifica a amplitude do impacto, caso exista, e soma o valor à Força Estática, chegando ao valor da Força de Total ou Força de Pico.

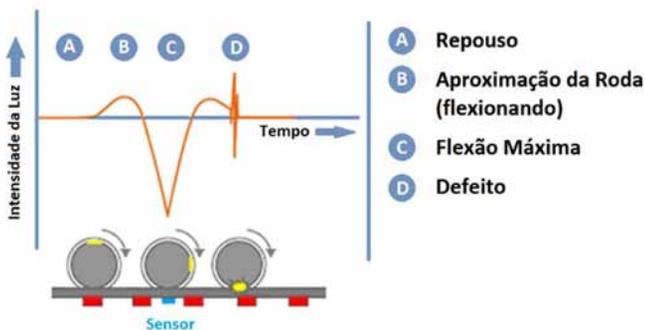


Fig. 9 - Leitura do sinal característico da passagem da roda com defeito sobre um sensor. Fonte: [12], modificado pelo autor.

O registro da velocidade é feito em dois momentos distintos: na entrada e na saída da composição no equipamento. Para isso, existem dois transdutores de distância (contadores de eixo), posicionados de forma a calcular o tempo consumido para percorrer a distância, pelo primeiro e pelo último eixo.

Uma das vantagens da utilização do sensor de fibra ótica é a não interferência eletromagnética, que pode existir nos outros tipos de sensores. A sua precisão é de mais ou menos 3% de erro na medição de massa, conforme informações do fabricante [12].

Os sensores são calibrados durante sua confecção. A verificação da calibração, após a instalação do equipamento, pode ser feita de duas formas distintas:

- Manual - utilizando vagões aferidores (composição formada por vagões carregados

aferidos em balança – massas conhecidas), os quais são movimentados sobre o equipamento esporadicamente para comparação manual e posterior correção da medição da massa com o valor conhecido;

- Automática – utilizando um veículo padrão, pré-cadastrado, com massa conhecida, para que a cada passada desse veículo, o equipamento se autocalibre.

4. Metodologia

A metodologia do trabalho consistiu, em seu primeiro passo, na aquisição do aparelho de detecção de impacto de roda, na análise do melhor local para instalação (linha tangente que não necessita de aplicação de freio do trem) e posterior instalação.

O equipamento foi instalado em dezembro de 2014 no local citado na **figura 3**. Inicialmente a instalação consistiu na confecção de um alicerce de alvenaria e uma gaiola de trilhos (antivandalismo) para alojamento do armário que abrigaria o interrogador óptico. Na sequência, foram instalados os sensores na via de acordo com o esquema apresentado na **figura 10**.

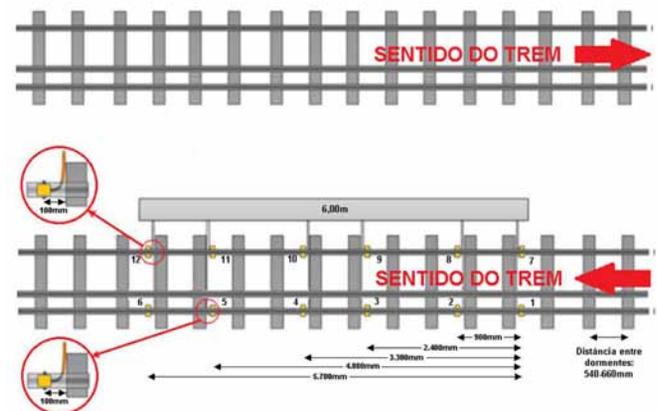


Fig. 10 - Esquema de instalação dos sensores na via permanente. Fonte: [15], modificado pelo autor.

Para a instalação dos sensores, fez-se necessária a preparação da via permanente. Retirou-se o lastro da posição onde os 12 sensores seriam instalados, para eliminar a oxidação da parte inferior do patim. A seguir, buscou-se garantir um bom contato entre

sensor e trilho, e evitar o contato entre os sensores e o lastro na passagem do trem sobre o equipamento.

A interrupção do tráfego na linha, durante a instalação, demandou curto intervalo de tempo, sendo necessários, aproximadamente, 4 minutos para a instalação de cada sensor (entre limpeza de lastro e oxidação, fixação e torqueamento dos parafusos). A **figura 11** apresenta um dos sensores instalado no patim de um dos trilhos.

O próximo passo foi o envio dos dados coletados, através de modem 3G, para uma equipe que passou a tabulá-los em planilhas de Excel. A partir daí, foram feitas verificações acerca da necessidade de calibração do equipamento.

Posteriormente, foi realizado o cadastro da locomotiva da General Eletric (GE) AC 44i como

massa padrão, a qual realiza a autoverificação da calibração a cada passagem. Devido à grande variação de “peso por eixo” dos veículos, já que a frota que passa pelo equipamento é bem diversificada (vagões de 4 eixos, com capacidades de carga diferentes – 80, 100 e 130 toneladas de carga bruta total - e locomotivas de 4, 6 ou 8 eixos, com massas diferentes), os dados considerados nas análises foram os de Força Dinâmica, desconsiderando assim a Força Estática.

Finalmente, foram realizadas regressões lineares, usando o software Minitab, na tentativa de correlacionar as grandezas em análise (Força e Velocidade). A técnica de regressão linear adotada no estudo foi o Método dos Mínimos Quadrados. A **figura 12** mostra um resumo da metodologia utilizada:



Fig. 11 – Sensor de fibra ótica instalado sob o trilho. Fonte: [15].

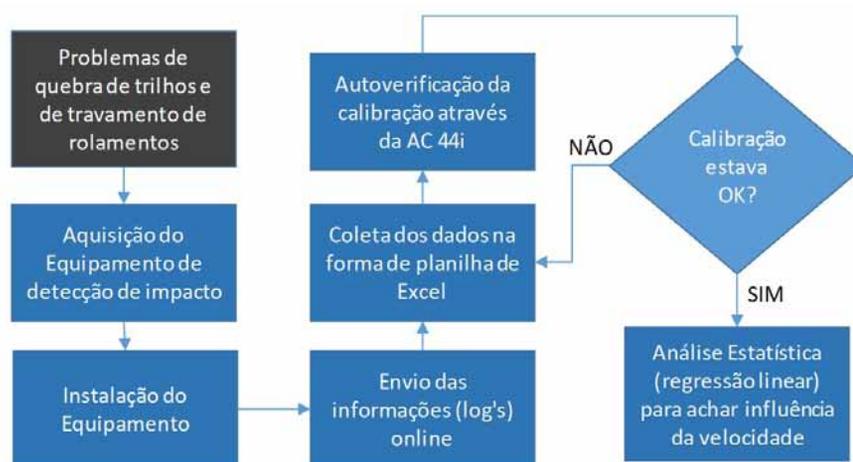


Fig. 12 – Fluxograma das etapas desenvolvidas no estudo. Fonte: O autor.

5. Análise dos resultados

A primeira coleta de dados foi realizada de dezembro de 2014 até junho de 2015, com o intuito de verificar a calibração dos sensores. A análise desses dados mostrou a necessidade de realização de uma calibração manual, a qual foi feita em junho de 2015. Além disso, foi realizada também a configuração da locomotiva AC 44i para fazer a autoverificação da calibração. Em vista disso, a primeira coleta de dados foi descartada para análise, e os dados que foram utilizados nesse estudo foram coletados entre os dias 25/06/2015 e 05/05/2016, durante uma segunda coleta.

De posse dos dados de força de impacto e velocidade, foi possível plotar no Minitab um gráfico de dispersão, que pode ser visto na **figura 13**. E, utilizando o recurso de regressão linear, obter a **tabela 1** de análise de variância.

Tab 1 – Análise de variância de todos os dados.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Regressão	1	5445549	5445549	571,50	0,000
Erro	4325	41210687	9528		
Total	4326	46656236			

Fonte: O autor.

GL – Graus de Liberdade

SQ – Soma de Quadrados

QM – Quadrado Médio

F – Teste F

P – P-valor

Analisando o gráfico e a **tabela 1**, verifica-se uma grande dispersão entre os dados de força de impacto e velocidade, o que significa que não existe uma boa correlação linear ou não linear entre os dois parâmetros. O desvio padrão e o coeficiente de

determinação (R^2) encontrados na regressão linear não são representativos: o valor do desvio padrão é muito alto e o valor do R^2 , muito baixo (11,7%).

Como os dados acima referem-se a vários veículos diferentes (1638), decidiu-se analisar como foi a evolução do impacto em relação à velocidade para cada veículo separadamente. Dessa forma, foram eliminados os dados de força de impactos de veículos que registraram menos de 4 impactos na passagem pelo equipamento.

Por conseguinte, a análise restringiu-se a 231 veículos que apresentaram mais de 5 impactos cada, totalizando 41% dos dados da população (1644 impactos). O resultado das análises de cada veículo foi a existência de correlação diretamente proporcional, inversamente proporcional e inexistência de correlação entre força de impacto e velocidade, como pode ser visto com mais detalhes nas próximas seções (5.1 e 5.2):

5.1 Regressão linear (relação diretamente proporcional)

Dos 231 veículos, 12 (5,2% dos veículos da amostra), que representam 232 impactos (7,2% dos impactos da amostra), apresentaram correlação forte entre força de impacto e velocidade, tendo coeficiente angular variando de 4,503 a 13,33 e R^2 de 71,2% a 90,2%.

Para melhor análise, plotou-se dois gráficos. O primeiro com 8 veículos que apresentaram coeficientes angulares mais baixos, conforme **figura 14**. O outro com os 4 veículos, que apresentaram coeficientes angulares mais altos, conforme **figura 15**.

A **tabela 2** apresenta os dados obtidos através da regressão linear de cada veículo. Para esses casos, é possível afirmar que existe correlação forte entre força de impacto e velocidade, sendo possível escrever uma equação para cada veículo.

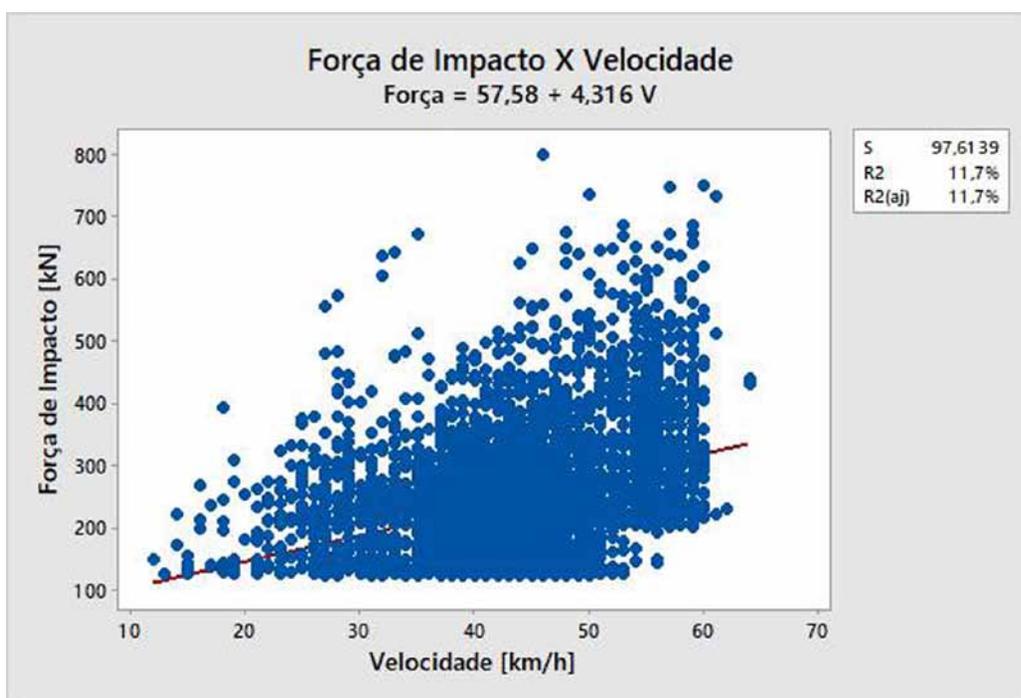


Fig. 13 – Gráfico de dispersão de força de impacto por velocidade. Fonte: O autor.

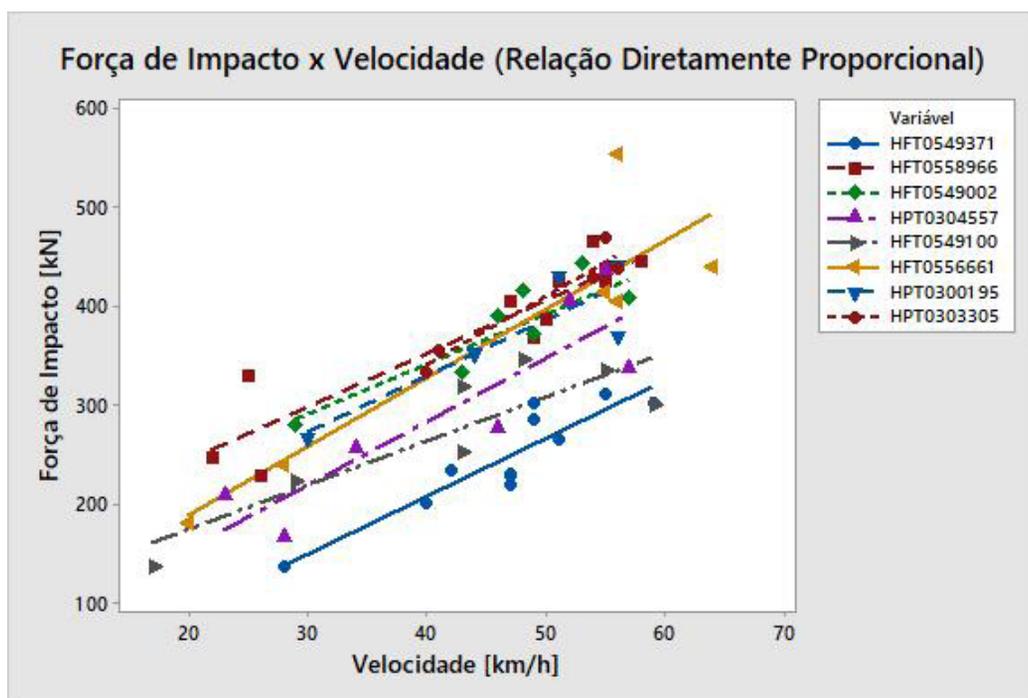


Fig. 14 – Gráfico de dispersão sobreposto dos 8 veículos. Fonte: O autor.

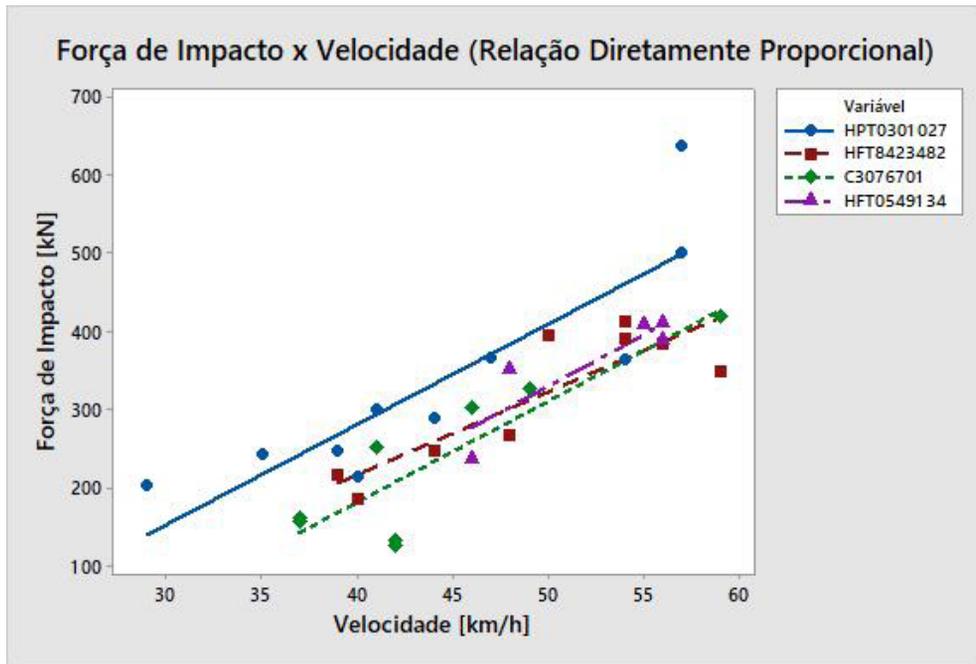


Fig. 15 – Gráfico de dispersão sobreposto dos 4 veículos. Fonte: O autor.

Tab. 2 - Resumo das análises de variância dos 8 veículos.

Veículo	Coef. Angular	Coef. Linear	S	R ²	R ² (aj.)
HFT 0549371	5,898	-29,30	22,9248	83,0%	81,2%
HFT 0558966	5,425	135,3	31,9989	85,3%	83,7%
HFT 0549002	5,074	138,7	26,5906	77,8%	74,1%
HPT 0304557	6,419	26,34	51,2744	78,0%	73,6%
HFT 0549100	4,503	83,30	39,0108	77,5%	73,0%
HFT 0556661	6,946	48,52	67,0434	81,1%	76,4%
HPT 0300195	5,672	102,4	33,7634	77,4%	71,7%
HPT 0303305	6,966	61,26	18,0823	92,7%	90,2%
HPT0301027	12,87	-234,1	70,8414	76,8%	73,9%
HFT8423482	10,60	-207,0	46,8023	74,8%	71,2%
C3076701	13,03	-341,3	56,1452	76,8%	72,9%
HFT0549134	13,33	-337,4	38,8829	78,4%	71,3%

Fonte: O autor.

S – Erro Padrão

R² – Coeficiente de Determinação

R²(aj.) – Coeficiente de Determinação Ajustado

5.2 Regressão linear (relação inversamente proporcional)

Nesse caso, dos 231 veículos, 4 (1,7% dos veículos da amostra), que representam 52 impactos (1,6% dos impactos da amostra), apresentaram correlação forte entre força de impacto e velocidade, tendo coeficiente

angular variando de -4,210 a -1,307 e R² de 84,0% a 95,1%. A **figura 16** apresenta um gráfico com os dados dos 4 veículos.

A **tabela 3** é o resultado da regressão linear de cada veículo, a qual apresenta coeficientes angulares negativos, ou seja, relação inversamente proporcional.

Tab. 3 – Resumo das análises de variância dos 4 veículos.

Veículo	Coef. Angular	Coef. Linear	S	R ²	R ² (aj.)
HFS0527629	-2,814	261,3	8,93389	88,0%	85,0%
HPT0304417	-1,307	274,0	2,29105	96,4%	95,1%
HFS0525219	-3,934	449,5	12,9864	89,7%	86,3%
FTT0323209	-4,210	412,2	8,98870	88,0%	84,0%

Fonte: O autor.

S – Erro Padrão

R² – Coeficiente de Determinação

R²(aj.) – Coeficiente de Determinação Ajustado

Nesses casos, a força de impacto diminuiu com o aumento da velocidade, ou vice-versa, representando um possível defeito na fase inicial.

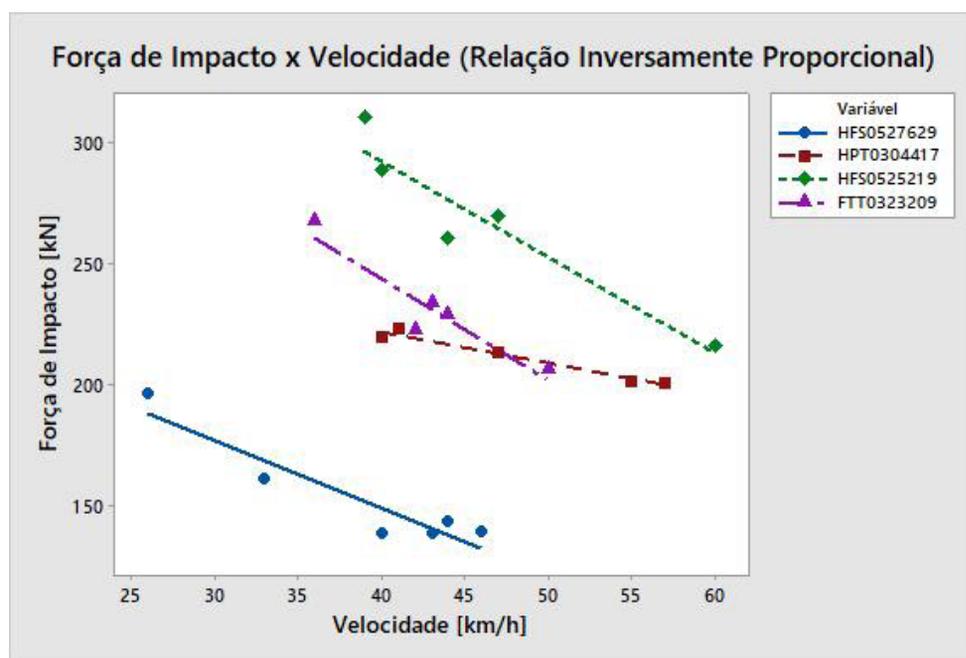


Fig. 16 – Gráfico de dispersão sobreposto dos 4 veículos. Fonte: O autor.

5.3 Correlação entre força de impacto e velocidade

Perante as análises feitas anteriormente, foi possível escrever 16 equações diferentes, uma para cada veículo. Foram correlacionadas força de impacto e velocidade, mas essas representam apenas 6,9% dos veículos e 8,8% dos impactos da amostra.

Sendo assim, 93,1% dos veículos (215) e 91,2% dos impactos (1361) da amostra não apresentaram correlação significativa entre força de impacto e velocidade, ou seja, a correlação entre os dois parâmetros não é significativa para toda a população. Assim, foi desnecessário criar uma equação que normalize os valores de força medida com a velocidade.

Voltando à **figura 13**, é possível traçar curvas envoltórias (não lineares), as quais funcionam como “Linhas Limite de Assertividade” dos dados. A **figura 17** apresenta o gráfico de dispersão de todos os dados, com três curvas envoltórias: uma que compreende 99,9% (curva preta) dos dados; outra que compreende 95,2% (curva vermelho claro); e a última que compreende 90,1% (curva vermelho escuro).

Como exemplo, a **tabela 4** mostra que, ao se adotar como referência a velocidade de 40 km/h, 99,9% dos

dados de força de impacto estão abaixo de 744 kN; 95,2% dos dados de força de impacto estão abaixo de 421 kN e 90,1% dos dados de força de impacto estão abaixo de 369 kN.

Tab. 4 - Análise de variância de todos os dados.

Velocidade [km/h]	99,9%	95,2%	90,1%
12	146	146	146
20	400	263	241
30	601	355	316
40	744	421	369
50	855	472	410
60	946	514	444

Fonte: O autor.

Sendo assim, essas curvas podem ser usadas como envoltórias de segurança. Para o caso de um veículo, que ao passar pelo detector de impacto com uma velocidade de 40 km/h, registra uma força de impacto de 400 kN, pode-se tomar a decisão de reduzir a velocidade do trem para, por exemplo, 20 km/h, tendo a certeza de que a força de impacto será reduzida para aproximadamente 260 kN (com 95,2% de certeza), tornando-se menos prejudicial aos trilhos e rolamentos. Dessa forma, é possível efetuar a redução de velocidade do trem, ao invés de pará-lo para manobra do vagão com defeito.

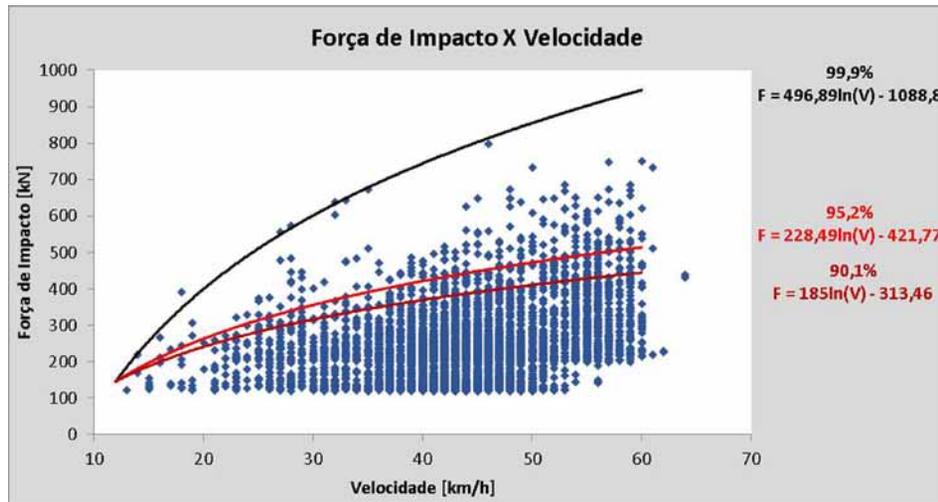


Fig. 17 – Gráfico de dispersão com curvas envoltórias. Fonte: O autor.

6. Considerações finais

Perante todos os dados apresentados, pode-se concluir que a obtenção de uma equação empírica que correlacione, por meio dos dados experimentais, as grandezas força e velocidade, não se verifica satisfatória para todos os veículos ferroviários utilizados nas medições de campo desse estudo. Apenas 16 veículos em 231 apresentaram correlação forte entre os parâmetros, variando o coeficiente angular de -4,21 a 13,33, ou seja, de correlação inversamente proporcional a diretamente proporcional.

Neste estudo, não foi aplicada a análise de regressão não linear entre força de impacto e velocidade para cada veículo, pois a amostra não sugeriu esta possibilidade, como pode ser visto na **figura 13**.

Todavia, foi possível traçar envoltórias de segurança utilizadas para decisões operacionais quanto ao tráfego dos trens.

Também foi possível concluir a efetividade da nova tecnologia inserida no Brasil através do equipamento de detecção de impacto com sensores de fibra ótica. Além de necessitar de pouca manutenção (autoverificação da calibração feita automaticamente), não apresentar interferência eletromagnética.

Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se inserir o tipo de defeito da roda como um parâmetro de análise. Assim poderão realizar um estudo de força de impacto versus velocidade para cada tipo de defeito de roda (shelling, spalling, calo), de acordo com o tamanho de cada defeito.

Referências Bibliográficas

- [1] Liu, X., Saat, M. R., & Barkan, C. P. L., Analysis of Major Derailment Causes on Heavy Haul Railways in the United States, International Heavy Haul Association Conference, New Delhi, India. 2013. Disponível em: <http://railtec.illinois.edu/wp/wp-content/uploads/2019/01/Liu%20et%20al%202013.pdf>
- [2] Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT. Relatório 01/2014/GEROF/SUFER/ANTT, 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/anttp/pt-br>. Acessado em: 26 set. 2020.
- [3] Trackside Intelligence PTY LTDA. WMS Data System WMS Web User Guide. Austrália: TRACK IQ, 2012. 73 p.
- [4] Associação Nacional dos Transportes Ferroviários. Histórico. ANTF, 2016. Disponível em: <http://www.antf.org.br/historico/>. Acesso em: 10 dez. 2016.
- [5] Santos, Francisco de Carvalho. Análise do Contato Roda-Trilho e sua Influência na Vida em Serviço de Rodas Ferroviárias. 2000. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Projeto Mecânico, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
- [6] Rovira, A. et al. Experimental and numerical modelling of wheel-rail contact and wear. Wear, [s.l.], v. 271, n. 5-6, p.911-924, jun. 2011. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2011.03.024>. Acesso em: 10 dez. 2016.
- [7] Voestalpine Company. ATLAS FO – Wheel Defect Detection. Alemanha: VAE, 2014. 10 p. Folheto elaborado para divulgação do produto aos consumidores.
- [8] Association of American Railroads. Manual of standards and recommended practices: section G-II: Wheel and Axle Manual. Washington, D.C: AAR, 2012.
- [9] Association of American Railroads. 2015 Field Manual of the AAR Interchange Rules. Rule 41. Washington, D.C: AAR, 2015
- [10] U.S. Department of Transportation Federal Railroad Administration. An Implementation Guide for Wayside Detector Systems. Washington, D.C: FRA, 2019
- [11] Weed, Dennis; Lonsdale, Cameron. Review and Analysis of Wheel Impact Load Detector (WILD) and Wheel Removal Data. Mechanical Association Railcar Technical Services (MARTS). 2004. Disponível em: [http://marts-rail.org/2009 Presentations/2004 Presentations/MARTS Weed-Lonsdale 2004.pdf](http://marts-rail.org/2009%20Presentations/2004%20Presentations/MARTS%20Weed-Lonsdale%202004.pdf). Acesso em: 03 nov. 2015.
- [12] Voestalpine Company. Detecção de impacto de Roda e Pesagem Dinâmica, Brasil: VAE, 2016. 12 slides, color.
- [13] Barbosa, Maria Cristina Beirão. Caracterização e Avaliação dos Efeitos do Estado de Conservação de Rodas de Composições Ferroviárias na Infra-Estrutura. 2009. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Especialização em Estruturas, Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2009. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58853/1/000136926.pdf>. Acesso em: 27 set. 2020.
- [14] Voestalpine Company. ATLAS FO – System Description: Alemanha: VAE, 2013. 21 p. Folheto elaborado para divulgação do produto aos consumidores.
- [15] Voestalpine Company. Training ATLAS FO – Sensor Installation: Alemanha: VAE, 2014. 21 slides, color.