



24ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA



5º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

APLICAÇÃO DE SENSORES DE VIBRAÇÃO E RUÍDO NOS TRILHOS PARA DETECÇÃO DE DANOS EM RODAS FERROVIÁRIAS

INTRODUÇÃO

Para atender as crescentes demandas de carga e de passageiros as ferrovias estão sendo cada vez mais exigidas, atingindo valores de carregamento por eixo na ordem de 37,5 ton/eixo nas ferrovias de carga, com vagões com peso bruto de 150 toneladas (NABAIS, 2014), já nas ferrovias de passageiros, metrô e trens metropolitanos, esses valores chegam à ordem de 21 ton/eixo, para carros com peso bruto de 84 toneladas.

Esse cenário é ainda mais agravado nas ferrovias de passageiros, quando se leva em conta a necessidade da expansão dos horários de pico e a redução do tempo de intervalo entre trens, que acarreta no aumento da frequência de tráfego, aumentando as exigências do contato roda/trilho, acelerando o processo de fadiga das rodas. Outro fator importante na análise do contato roda/trilho é a variação brusca de temperatura que ocorre na roda, devido ao aquecimento pela atuação da sapata de freio contra a superfície de rolamento durante a frenagem e o seu rápido resfriamento no contato com o trilho. As variações da temperatura somada aos esforços exercidos em uma pequena área de contato entre a roda e o trilho provocam a alteração da estrutura cristalina dos metais que compõem tanto as rodas, quanto os trilhos, causando o endurecimento de suas camadas superficiais, deixando-as frágeis.

A detecção de danos em rodas ferroviárias, quando depende da aplicação de métodos convencionais de inspeção visual, torna-se muito difícil e trabalhosa, pois os rodeiros, devem ser inspecionados em vala de oficina, onde é necessário o levantamento do rodeiro através de macacos hidráulicos, apoiados nas caixas de rolamentos das extremidades do eixo, para possibilitar o giro manual de cada rodeiro em 360°, de forma a se visualizar todo o perímetro da superfície de rolamento de cada roda. No caso da CBTU-STU/BH que possui trens unidades compostos de quatro carros de passageiros, essa inspeção implica em repetir esse procedimento em dezesseis rodeiros.

Outra forma convencional de detecção de danos em rodas é através da identificação de ruídos anormais durante a operação dos trens, sejam de carga ou de passageiros, onde o próprio maquinista ou um inspetor de via percebe a anomalia, quando da passagem do trem em linha operacional. Portanto, essa forma não é confiável, pois depende da atenção e da experiência operacional dos envolvidos e, na maioria das vezes, não se consegue identificar de qual rodeiro o ruído está sendo emitido, o que obriga uma inspeção geral em todos os rodeiros até que se encontre a causa.

A detecção precoce de danos nas rodas e nos trilhos através de sistemas automatizados desperta grande interesse no meio ferroviário, pois não depende de pessoas com experiência operacional para identifica-los e podem ser percebidos logo no início do dano, enquanto suas dimensões são ainda pequenas, permite sua correção com um menor grau de interferência, ou seja, o processo de reperfilamento das rodas e dos trilhos, para eliminar os danos ainda superficiais, impede que pequenas trincas e danos se propaguem e com isso haverá o consequente prolongamento da vida útil desses componentes, redução de custos de

manutenção e, principalmente, a diminuição da probabilidade de ocorrência de acidentes devido a essas causas.

Com visão nesse cenário surgiu o interesse e a motivação de se desenvolver um equipamento para a detecção automática de danos das rodas dos trens da CBTU-STU/BH, baseado na instalação de instrumentação nos trilhos.

A proposta inovadora foi de verificar a funcionalidade e a viabilidade técnica da aplicação de acelerômetros MEMS capacitivos e de microfones de eletreto, para detecção de danos da superfície de rolamento das rodas ferroviárias. Sendo os mesmos acoplados ao trilho, os sinais gerados processados e armazenados em um equipamento eletrônico, de forma a possibilitar a detecção não só os calos de rodas, como os atuais equipamentos existentes no mercado, mas que também detectasse os demais danos da superfície de rolamento, que induzam ruídos nos trilhos. Pois esses danos são igualmente importantes sob os aspectos da segurança e dos custos de manutenção.

O projeto baseou-se em tecnologia totalmente nacional, confiável, simples e de baixo custo. Para o seu desenvolvimento foram estudados os processos de fabricação e tratamentos térmicos de rodas, os princípios de fadiga mecânica, térmica e termomecânica, os principais tipos de danos e falhas das rodas ferroviárias e as atuais tecnologias de detecção automática.

DIAGNÓSTICO

Os danos em rodas ferroviárias se apresentam com maior frequência na pista de rolamento, normalmente com origem em processo de fadiga. A fadiga pode ser térmica devido à frenagem, mecânica devido à carga, ou devido a ambas. (MINICUCCI, 2011).

O termo fadiga pode ser definido como sendo um processo progressivo de alteração estrutural, permanente e localizado, que ocorre em um material sujeito a condições que

produzem tensões e deformações cíclicas em um ponto ou em vários pontos, e que pode culminar em trincas ou fratura completa do material após um número suficiente de ciclos. (ASTM E-1823, 2013).

As trincas de fadiga nos materiais metálicos frequentemente se iniciam na região superficial do material, podendo em alguns casos ter seu início no interior do componente devido a inclusões, interfaces e distribuição de tensões residuais. O processo de aparecimento destas trincas superficiais ocorre em bandas de deslizamento normais a superfície do material, que são formadas através do agrupamento de linhas de escorregamento devido a deformações microscópicas, levando a formação de ressaltos e reentrâncias, denominadas intrusões e extrusões, ilustrados na Figura 1, e que conseqüentemente são locais propícios para nucleação de trincas por serem concentradores de tensões e acumularem grande deformação plástica localizada. (OLIVEIRA, 2013).

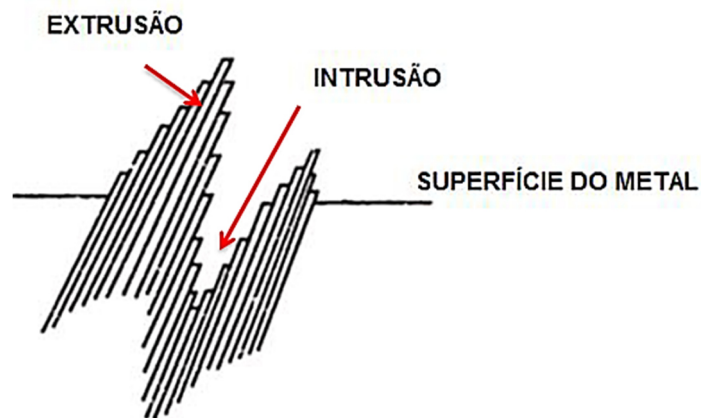


Figura 1 – Representação esquemática do mecanismo de formação das bandas de deslizamento sob carregamento cíclico (OLIVEIRA, 2013)

Uma vez que a trinca nucleia e o carregamento persiste, a mesma tende a crescer ao longo do plano máximo de cisalhamento e através dos contornos de grãos. (SILVA, 2014).

O processo de fadiga de um material pode ser dividido em três estágios conforme a Figura 2, que vai da nucleação de micro trincas até a ruptura final do componente (OLIVEIRA, 2013):

- Estágio I, corresponde à nucleação da trinca por deformação plástica localizada, bandas de deslizamento, e a sua propagação inicial. Este estágio pode corresponder de 0 a 90% do número total de ciclos que o componente suporta antes de falhar, dependendo do material;
- Estágio II, caracterizado pelo crescimento estável da trinca num plano perpendicular à direção da tensão principal de tração. Pode corresponder a maior área da superfície de fratura, porém, não necessariamente corresponde a maior parte do número total de ciclos necessários para a falha do material;
- Estágio III, corresponde à ruptura final do material, que ocorre quando a trinca atinge o tamanho crítico necessário para sua propagação instável, uma vez que a seção transversal resistente do componente não mais suporta a carga aplicada.

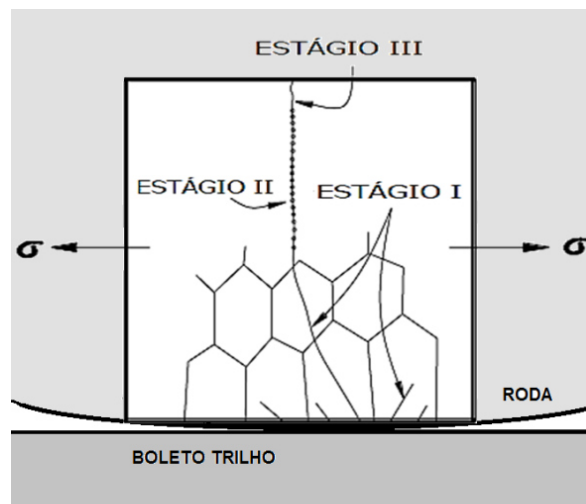


Figura 2 - Estágios de propagação de trinca por fadiga (Elaborado pelo autor com dados extraídos de OLIVEIRA, 2013).

Dependendo da profundidade com que o processo de fadiga se desenvolve é possível determinar o tipo de dano. Os danos que se iniciam em profundidades maiores geralmente

estão relacionados com inclusões, porosidades ou vazios internos no aço, relacionados ao processo de fabricação. (VILLAS BÔAS, 2010).

O estudo do comportamento de propagação de trinca por fadiga em corpos de prova retirados de rodas ferroviárias forjadas e fundidas concluiu que o material forjado apresenta uma melhor resistência ao crescimento de trinca por fadiga quando comparado ao fundido. (OLIVEIRA, 2013).

As tensões presentes em uma roda ferroviária podem ser causadas pelo carregamento cíclico entre roda e trilho, advindo da carga e do peso próprio do veículo aplicados em uma área elíptica muito pequena, chamada tensão de contato, e pela variação cíclica da temperatura na roda, quando o sistema de freio de atrito é aplicado diretamente entre a sapata de freio contra a superfície de rolamento do aro da roda, como mostrado na Figura 3. (MINICUCCI, 2011).

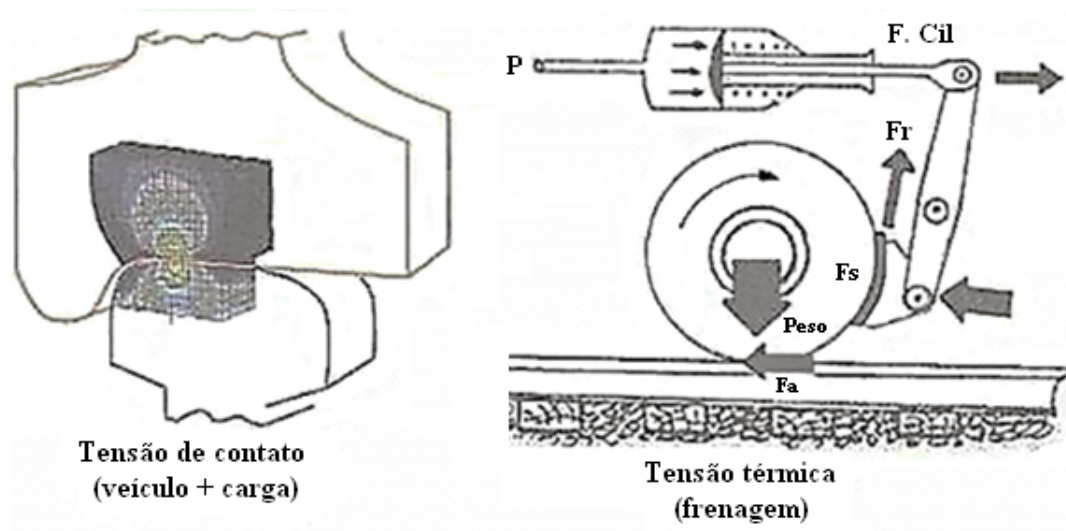


Figura 3 – Tensões atuantes na roda ferroviária (MINICUCCI, 2011)

As trincas térmicas são superficiais, apresentando-se com pequenas trincas paralelas ao eixo da roda, conforme a Figura 4, e se localizam em uma camada fina da pista de rolamento, que

é mais sensível à ação do calor, sendo acentuada pela quantidade de carbono no aço. (MINICUCCI, 2011).



Figura 4 – Trincas térmicas (MINICUCCI, 2011)

As tensões de contato decorrentes dos esforços mecânicos da roda contra o trilho provocam o encruamento do metal na superfície da roda, o que pode ser definido como sendo o seu endurecimento por deformação plástica. Que ocorre basicamente porque os metais se deformam plasticamente por movimentação de discordâncias (irregularidades que se estendem através de uma única fileira de átomos dos cristais), as quais interagem diretamente (entre si ou com outras imperfeições) ou indiretamente, com o campo de tensões internas de várias imperfeições e obstáculos. Essas interações levam a uma redução na mobilidade das discordâncias, e à necessidade de uma tensão maior para provocar maior deformação plástica. (CALLISTER; RETHWISCH, 2002).

O encruamento dá origem a um aumento de dureza, o que por si só resulta num incremento da resistência ao desgaste. Todavia, quando o contato ocorre com baixo deslizamento e são preponderantes as condições de fadiga de contato, a redução da tenacidade aumenta a incidência das fissuras subsuperficiais. (SOARES, 2014).

1 TIPOS DE DANOS E FALHAS DE RODAS FERROVIÁRIAS

Apresentam-se a seguir os danos e falha típicos que ocorrem em uma roda ferroviária, causados pelos esforços no contato roda/trilho e pelos efeitos da frenagem.

1.1 CALO NA RODA

O Calo pode ser caracterizado por uma planicidade na superfície de rolamento da roda, Figura 5-a, causado pelo travamento indevido da roda no momento da frenagem, em função do esforço de frenagem ser superior ao limite de aderência entre a roda e trilho, com consequente deslizamento. Portanto, esse tipo de dano é comum em veículos que não possuem freios ABS (Sistema de Freio Anti-bloqueio), como é o caso dos vagões de carga e TUEs (Trens Unidades Elétricos) e locomotivas mais antigas. (BIAN; GU; MURRAY, 2016).

As consequências podem ser maiores, ainda, quando ocorrem pequenos deslocamentos de giro da roda durante o travamento, causando diversos calos consecutivos, como mostrado na Figura 5-b. (DUKKIPATI; RENGUANG, 1999).

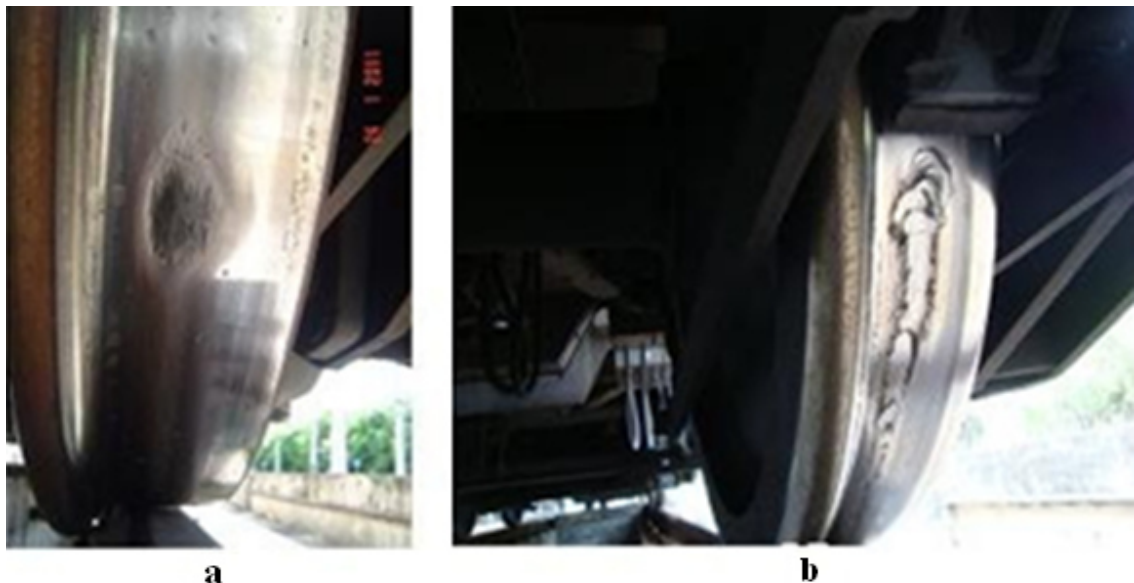
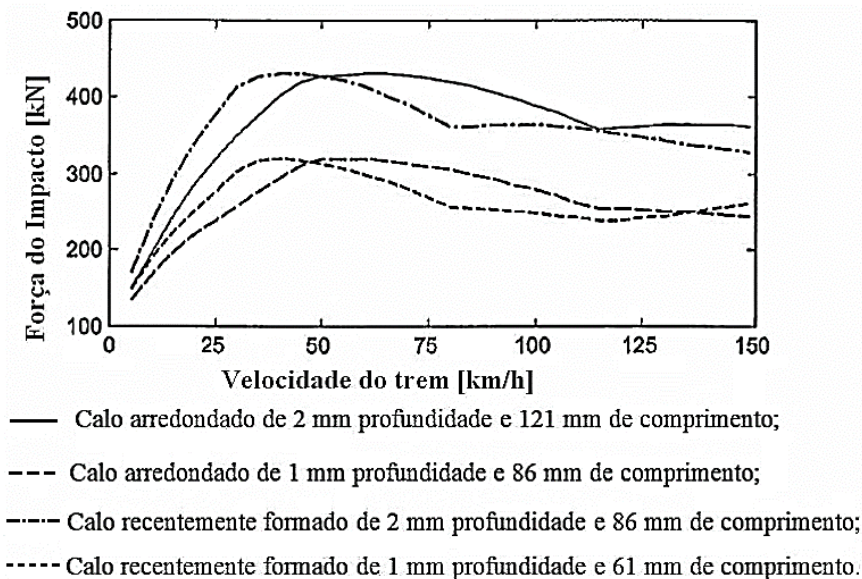


Figura 5 – a – Calo na roda ferroviária, b – Calos múltiplos e consecutivos (Fotos do autor)

O Gráfico 1 apresenta a força de impacto de diferentes calos de rodas em função da velocidade, considerando calos recentemente formados e calos arredondados, sendo a força normal da roda sobre o trilho na ordem de 100 kN.

Gráfico 1 – Força de impacto de diversos calos em função da velocidade (THOMPSON, 2009)



1.2 SPALLING - TRINCAS E ESCAMAÇÃO LOCALIZADA DEVIDAS À FADIGA TERMOMECÂNICA

O *Spalling* (escamação ou lascamento em inglês), termo comumente utilizado no meio ferroviário, pode ser caracterizado por uma fadiga superficial devida às variações bruscas de temperatura, que ocorrem devido às mudanças estruturais do material da superfície de rolamento da roda. Essas mudanças são consequências de frenagens com travamento e pequenos deslizamentos da roda, que têm como consequência a geração de grandes quantidades de calor na interface roda-trilho. Quando o travamento cessa, a região do contato, que está a uma temperatura elevada, tende a rápida troca de calor com o trilho e o resto da roda, que estão a uma temperatura mais baixa. Isso provoca um resfriamento brusco e localizado na região afetada. (SANTOS, 2000).

Nesta região pode ser encontrada uma fina camada de martensita não revenida, que é extremamente mais dura e frágil do que a perlita, com uma camada que varia de 0,1 a 0,5 mm de profundidade, porém em alguns casos pode chegar a 1,2 mm. Na interface de ligação entre estas novas estruturas e a estrutura original mais interna, podem surgir trincas que se

propagam até unirem-se umas às outras, de forma que esta nova estrutura seja expulsa da roda pelo giro normal, causando uma cavidade, conforme apresentado na Figura 6. (MINICUCCI, 2011).

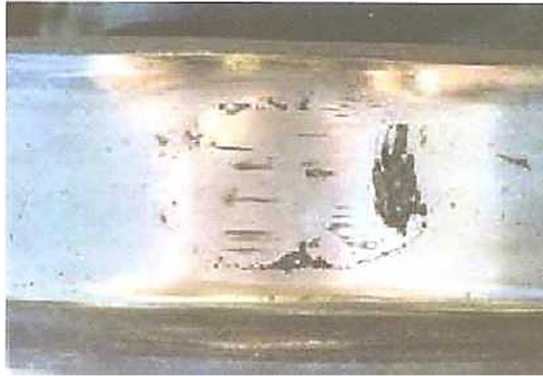


Figura 6 – Spalling na superfície de rolamento (MINICUCCI, 2011)

O *Spalling* também pode ocorrer quando há frenagens excessivas, com o freio de atrito direto da sapata contra a superfície de rolamento do aro da roda, ou quando há força inadequada de frenagem ultrapassando o limite de aderência da roda com o trilho, que provocam o aumento da temperatura na superfície de rolamento. Esse fato provoca a cavitação, ou arrancamento, de material em toda a superfície do aro e não mais somente em pontos localizados como nos travamentos da roda, Figura 7. (MINICUCCI, 2011).



Figura 7 – Spalling em todo o perímetro da superfície de rolamento (Fotos do autor)

A outra origem do *Spalling* é devida à fadiga mecânica, decorrente das altas cargas suportadas pelas rodas em ferrovias de alta capacidade de carga (*Heavy haul*). Uma roda típica de carga

pesada gira, aproximadamente, 55 milhões de vezes a cada 160.000 km, circulando nas mais diversas condições de trabalho. Estas rodas sofrem impactos diversos ao longo da Via Permanente, que esmagam algumas partes da pista de rolamento com vários choques de diferentes intensidades, os quais são caracterizados pela carga, posição e forma da tensão de contato e de tração. Enquanto muitos destes contatos são suportados pelas rodas sem danificá-las, alguns destes impactos excedem o limite de escoamento do material da roda, acelerando a fadiga superficial. (MINICUCCI, 2011).

1.3 SHELLING - TRINCAS E ESCAMAÇÃO DEVIDAS À FADIGA MECÂNICA

O *Shelling* (descascamento em inglês), termo também comumente utilizado no meio ferroviário, pode ser caracterizado por uma fadiga superficial devido ao alto carregamento mecânico suportado pelas rodas, sendo identificado pelo arrancamento de uma pequena parte de material da superfície de rolamento, Figura 8. Esta fadiga gera trincas, que se originam à profundidade de 1 a 3 mm da superfície de rolamento da roda, ocorrem à baixa temperatura e que se propagam de forma circunferencial paralela à pista de rolamento da roda. (MINICUCCI, 2011).

Quando uma roda está sob carregamento muito elevado, pode ocorrer escoamento à compressão do material da região de contato. Caso o limite de escoamento seja excedido, haverá tração nessa região quando a roda deixar o contato. Esta é uma das condições para a propagação de pequenas trincas. As trincas inicialmente se propagam por fadiga na direção máxima da tensão de cisalhamento. Quando essas trincas se encontram ou encontram trincas superficiais, que surgem devido ao fato da tensão de cisalhamento máxima estar abaixo da superfície de contato, podem causar desprendimento de pequenas lâminas do material. Nos casos de frenagens excessivas esse fenômeno se agrava, considerando que o

sobreaquecimento da roda causa uma sensível redução nas suas propriedades de resistência mecânica, podendo o limite de resistência ser reduzido em até 50%. Isso facilita ainda mais a propagação de trincas. Esse fenômeno é chamado de *Thermal Shelling* (*descascamento térmico*) considerando à influência do sobreaquecimento. (SANTOS, 2000).

Devido à dificuldade de detectar trincas subsuperficiais no aro da roda, estas trincas são consideradas perigosas porque podem provocar falhas graves nas rodas, possibilitando a ocorrência de descarrilamentos. (MINICUCCI, 2011).



Figura 8 – *Shelling* – Escamação da superfície de rolamento (Fotos do autor)

1.4 SHATTERED RIM - TRINCAS NO INTERIOR DO ARO

O *Shattered Rim* ou despedaçamento do aro, Figura 9, é uma falha que tem origem na nucleação de trinca no interior do aro da roda devido a porosidades, vazios, inclusões de óxido de alumínio ou material não metálico, que se propaga rapidamente para a superfície em condições normais de carga. Para iniciar o *shattered rim* são necessários alta carga e impacto. A profundidade típica de início deste dano é de 4 a 8 mm da superfície de rolamento, propagando-se rapidamente para a superfície em direção paralela à pista de rolamento. Este dano é geralmente detectado quando existe uma trinca na face do aro, a qual pode levar o material à ruptura completa. (MINICUCCI, 2011).



Figura 9 – *Shattered rim* – aro da roda despedaçado (MINICUCCI, 2011)

A composição das inclusões se torna importante em dois diferentes fatores, na diferença do coeficiente de expansão térmica e nas propriedades mecânicas entre a inclusão e a matriz do material, o que gera concentração de tensões nestas interfaces e conseqüentemente iniciação de trincas de fadiga. (OLIVEIRA, 2013).

Pesquisas recentes mostram que danos ou inclusões com 1 mm de diâmetro podem ser suficientes para iniciar o *shattered rim*. (MINICUCCI, 2011).

1.5 TRINCAS POR CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES

É um tipo de falha cujo o desenvolvimento de trincas também pode ter origem em entalhes produzido na roda que geram concentração de tensões. Alguns entalhes podem ser introduzidos na roda durante uma queda no manuseio, ou em casos mais comuns, em rodas fabricadas antes de 1980, com marcação a quente no aro. Este tipo de identificação foi proibido pela AAR em 1980, por provocar concentração de tensões devido a sua profundidade e cantos vivos gerados durante a marcação a quente na linha de forjamento, nestes casos, a roda deve ser retirada de circulação. A Figura 10 mostra uma roda trincada pela marcação a quente. (MINICUCCI, 2011).

A concentração de tensões em um ponto da roda provoca a redução do limite de fadiga. Tanto maior será a redução da resistência à fadiga, quanto mais sensível à concentração de tensão

(frágil) for o material, isto é, quanto menor for sua capacidade de uniformizar as distribuições de tensões. (MINICUCCI, 2011).



Figura 10 – Roda fraturada com a origem da trinca na marcação a quente na lateral do aro (GARRIDO, 2004 e MINICUCCI, 2011)

1.6 FRATURA DA RODA

A fratura da roda, Figura 11, é um tipo de falha que pode ser ocasionada por impacto, relacionada à tenacidade, por fluência, relacionada à ductilidade e por fadiga, em relação à repetição de carga. (COLIM, 2006).

Considerando as tensões residuais de uma roda fria, onde no aro e na superfície de rolamento essas tensões são de compressão, devido ao processo de tratamento térmico. Com o aquecimento da roda na frenagem, dentro da faixa normal de temperatura, a tensão de compressão diminui, ficando ainda dentro da região de compressão, porém quando a roda é submetida a um superaquecimento pode ocorrer a inversão do estado de tensão de compressão para tração, possibilitando a nucleação de trincas e a evolução para a fratura completa da roda. (MINICUCCI, 2011).

Temperaturas normais de aquecimento na frenagem estão na faixa de 300 °C podendo chegar ao máximo de 400 °C. Nesta faixa de temperatura, a roda resiste à fadiga durante todo ciclo de vida. Algumas vezes por motivo de falha operacional, problemas no sistema de freio ou qualidade das sapatas de freio (coeficiente de atrito alto), as rodas podem ter superaquecimento durante a frenagem com temperaturas superiores a 700 °C. Neste caso a

dilatação do material é excessiva, ultrapassando o limite de escoamento, invertendo as tensões e acarretando em uma trinca profunda como rompimento da roda. (MINICUCCI, 2011).



Figura 11 – Fratura radial da roda (Fotos do autor)

2 DETECTORES DE DANOS EM RODAS FERROVIÁRIAS

A seguir serão apresentadas as atuais tecnologias desenvolvidas, ou em desenvolvimento, para a detecção dos danos em rodas ferroviárias:

Os detectores de carga de impacto de roda (WILD- WHEEL IMPACT LOAD DETECTORS) são usados para detectar a presença de danos de roda, como calos ou danos que provoquem impacto na via. (MOYNIHAN; ENGLISH, 2007).

A confiabilidade desses equipamentos já foi comprovada no campo, mas ainda são muito caros. A seguir são apresentados os principais tipos de detectores de impacto:

2.1 DETECTORES DE CARGA DE IMPACTO DE RODAS UTILIZANDO EXTENSÔMETRO (STRAIN GAUGE)

Os detectores de carga de impacto de roda (WILD) são sistemas que funcionam detectando as altas cargas de impacto que ocorrem quando a área defeituosa de uma roda entra em contato com o trilho. Os sistemas convencionais utilizam tipicamente extensômetro (*strain gauges*), Figura 12, para medir a magnitude das cargas de rolamento transitórias, com a

passagem do trem em serviço e são configurados para sinalizar cargas que excedem um valor de limiar predeterminado. (MOYNIHAN; ENGLISH, 2007).

São montados na alma dos trilhos através de processo de colagem.



Figura 12 – Detector de carga de impacto de rodas utilizando extensômetros (Strain gauges- LBFOSTER, Salient Systems, 2017)

2.2 DETECTORES DE CARGA DE IMPACTO DE RODAS UTILIZANDO CÉLULAS DE CARGA

As células de carga consistem de um elemento de medição onde os extensômetros (*strain gages*) são fixados. Este elemento é geralmente feito de aço ou alumínio. Isso significa que é muito resistente, mas também possui uma elasticidade mínima. Estas mudanças extremamente pequenas (micro deformações) podem ser medidas pelos extensômetros e tratadas eletronicamente.

As células de carga são montadas entre os trilhos e os dormentes, conforme Figura 13.



Figura 13 – Detector de carga de impacto de rodas utilizando células de carga (ASPLUND, 2014)

2.3 DETECTORES DE CARGA DE IMPACTO DE RODAS UTILIZANDO SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

O sistema ATLAS FO, da Voestalpine, utiliza os sensores de fibra óptica de alta precisão, instalados entre os dormentes, na base inferior do patim, Figura 14. Pode monitorar rodas de locomotivas e vagões até uma velocidade de 500 km / h. Doze sensores conectados ao trilho, sem perfuração, medem a deflexão dos trilhos, as forças de impacto causadas pelos danos de roda e o peso durante a passagem dos trens. (VOESTALPINE, 2017).

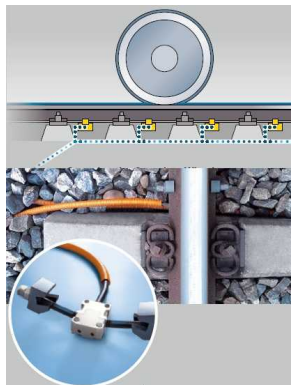


Figura 14 – Detector de carga de impacto de rodas utilizando sensores ópticos (VOESTALPINE, 2017)

2.4 DETECTORES DE CARGA DE IMPACTO DE RODAS UTILIZANDO SENSORES LASER

O sistema LASCA® é um sistema que foi desenvolvido pela Deutsche Bahn Netz para a monitorização automática da qualidade dos veículos circulantes nas vias ferroviárias. Consiste na utilização de 6 sensores laser por trilho que determinam a flexão criada entre dormentes pela passagem de uma roda, Figura 15. (BARBOSA, 2009).

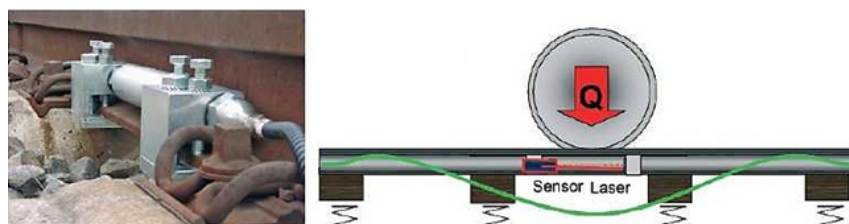


Figura 15 – Detector de carga de impacto de rodas utilizando sensor laser (VOESTALPINE, 2017)

2.5 DETECTORES DE CARGA DE IMPACTO DE RODAS UTILIZANDO SENSORES DE BRAGG

As Redes de Bragg utilizam o princípio do espelho dielétrico, são fibras ópticas com regiões de variação periódicas do índice de refração. Esta tecnologia tem a característica de ser imune às interferências eletromagnéticas e de radiofrequência, sendo esta uma desvantagem atribuída aos extensômetros convencionais. É referenciada como excelente para aplicações em trilhos na medição de deformações, Figura 16.



Figura 16 – Detector de carga de impacto de rodas utilizando sensor de Bragg (BARBOSA, 2009)

2.6 DETECTORES DE CARGA DE IMPACTO DE RODAS UTILIZANDO SENSORES DE EMISSÃO ACÚSTICA

Esse sistema baseia-se no princípio de que ondas elásticas transitórias serão emitidas a partir do ponto do impacto da roda com calo e se propagarão dentro do trilho.

Emissão Acústica de alta frequência no monitoramento da integridade estrutural é definida como a geração de ondas elásticas feita por uma súbita redistribuição de moléculas dentro ou na superfície de um material. Quando um estímulo externo como temperatura ou carga está presente, a energia liberada será na forma de ondas de estresse e pode ser registrada por sensores, Figura 17. (AMINI 2016).

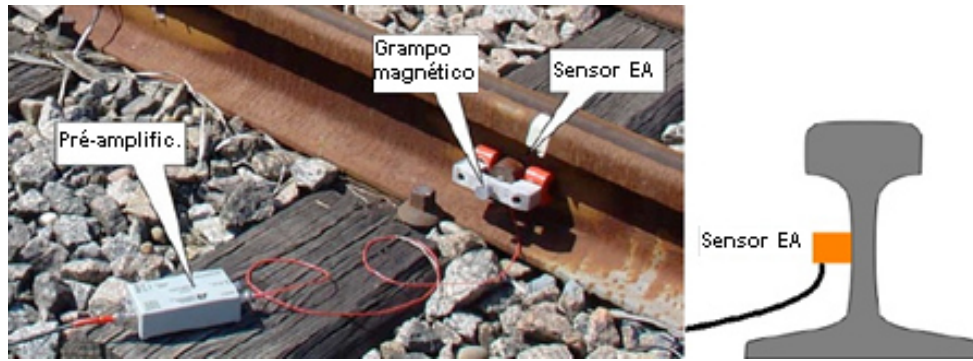


Figura 17 - Detector de carga de impacto de rodas utilizando sensor de Emissão Acústica (BOLLAS et al. 2010)

2.7 DETECTORES DE TRINCAS DE RODAS UTILIZANDO ONDAS ULTRASSÔNICAS

Técnicas de detecção automática de falhas baseadas em ultrassom, usam ondas de Rayleigh (ondas de superfície), enviadas sobre a superfície de rolamento para detectar trincas e outros tipos de danos. Um transdutor instalado no trilho é ativado quando a roda passa e os ecos são gravados, Figura 18: se uma trinca estiver presente, um sinal de eco é produzido e pode ser detectado.

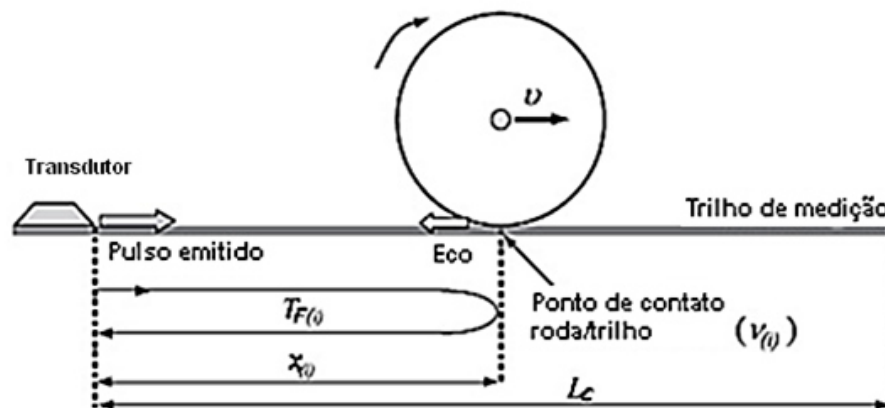


Figura 18 – Detector ultrassônico aplicado no trilho e refletido na roda (BRIZUELA; IBAÑEZ; FRITSCH, 2010)

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foi desenvolvido um equipamento eletrônico, com a aplicação de um micro controlador, de forma a possibilitar o armazenamento dos dados gerados pelo acelerômetro, em uma

memória eletrônica. Ao término de cada registro da passagem de um trem esses dados são disponibilizados. Posteriormente os dados são convertidos em uma planilha e o gráfico do registro é gerado. Para os dados de ruído, para simplificação dos testes de aplicação do microfone, foi utilizado um osciloscópio com memória digital, onde os registros de ruídos dos diversos veículos foram armazenados. Estes arquivos de imagens foram transferidos para um computador, posteriormente, foram analisados e comparados com os gráficos de aceleração. Para identificação dos danos foram realizados vários registros gráficos, com a aplicação dos sensores de vibração e ruído nos trilhos, de forma a se caracterizar as vibrações e ruídos causadas por rodas sem nenhum dano e comparados com os registros gráficos de rodas que apresentaram danos. Para isso, após os registros coletados nos trilhos, com a passagem dos trens ou veículos ferroviários, e analisados os gráficos gerados, foram realizadas inspeções nas rodas desses veículos, em vala de manutenção, para se relacionar os registros gráficos obtidos com a situação da superfície de rolamento das rodas.

A análise dos registros de vibração e ruído e a comparação com os danos constatados nas inspeções em vala, possibilitaram a formação de uma biblioteca (banco de dados) de correlação entre os formatos dos gráficos obtidos com os tipos de danos encontrados. A partir da montagem definitiva do equipamento na linha, possibilitará a identificação do tipo de dano e a determinação dos limites que serão aceitáveis, estabelecendo valores de alarmes, somente pela avaliação da forma e da amplitude dos gráficos obtidos nos registros.

LOCAL DA MONTAGEM DOS SENSORES NOS TRILHOS E VELOCIDADE DE TRÁFEGO

Os testes funcionais foram executados em linhas comerciais gerando diversos registros com TUEs (Trens Unidades Elétricos), em uma linha do Pátio de São Gabriel e também na linha de testes do Pátio de Eldorado, Figura 19, utilizando-se dois veículos ferroviários, sendo que o

VF001 - Auto de Linha sabidamente possuía calos em suas rodas, motivo da escolha, e o VF002
- Caminhão de Linha, com rodas sem danos.



Figura 19 – Instrumentação em linha do Pátio de Eldorado (Foto do autor)

A partir da análise do Gráfico 1, de intensidade de impacto elaborado por THOMPSON, 2009, ficou claro que a faixa de velocidade onde os impactos dos calos em rodas têm sua maior intensidade está entre 30 e 40 km/h. Como a velocidade nas linhas dos pátios da CBTU-STU/BH estão limitadas à 25km/h, no máximo, ficou definido que a instrumentação definitiva deverá ser instalada na linha comercial, onde a velocidade máxima permitida é de até 80 km/h, ou nas linhas de testes dos Pátios de Eldorado ou de São Gabriel, onde a velocidade máxima permitida é de até 60 km/h, de forma a permitir a execução das medições com a velocidade dos trens dentro da faixa de 30 a 40 km/h.

Outra condicionante técnica a ser observada é que em regiões de curvas os frisos das rodas em contato com a lateral do boleto do trilho externo geram ruído devido ao atrito, portanto, os sensores deverão ser instalados nos trilhos de linha em tangente, ou seja, em uma reta, de forma a se captar apenas os ruídos do contato entre a superfície de rolamento da roda e a parte superior do boleto do trilho.

Deve-se considerar também que o local da instalação dos sensores esteja distante de talas de junção e de soldas de emenda dos trilhos, pois a passagem das rodas sobre essas irregularidades geram vibrações e ruídos que poderiam ser confundidos com danos nas rodas. Com a possibilidade de que os danos das rodas podem não ser simétricos nas duas rodas do mesmo rodeiro, como é o caso das escamações e arrancamento de material da superfície de rolamento, diferentemente dos calos que normalmente geram-se as planicidades em ambas as rodas pelo travamento do rodeiro em frenagem, o ideal é que sejam instalados acelerômetros e microfones nos dois trilhos da linha, de forma a se obter os registros de ambas as rodas. Para os testes realizados somente foram utilizados sensores em um único trilho.

Como as vibrações nos trilhos estão diretamente relacionadas com as condições de compactação e estabilização do lastro da via, deve-se considerar que podem ocorrer variações nos registros com o passar do tempo devido à degradação natural do lastro submetido a esforços, o que exigirá um acompanhamento constante da geometria e compactação da linha nesse trecho.

Para realizar as medições foram desenvolvidos dois circuitos independentes, um para a medição dos ruídos nos trilhos e outro somente para medição e armazenamento de dados das vibrações. Os quais são apresentados a seguir:

CIRCUITO ELETRÔNICO DO MICROFONE

O microfone adotado neste projeto foi o de eletreto, pelas suas características técnicas, principalmente pela sua directividade, resistência às vibrações externas e por ser bastante comum e barato no mercado nacional.

Os microfones são transdutores eletroacústicos que transformam energia acústica em energia elétrica através do deslocamento do seu diafragma proporcionalmente às ondas de som que o atingem. (COSTA, 2002).

A faixa de frequência de operação dos microfones de eletreto são de 100 Hz à 20 kHz. (DATASHEET CUI INC, 2008).

A incerteza expandida do microfone de eletreto, que é a incerteza que compreende uma parte da distribuição dos valores que são atribuídos ao mensurando, calculada com o processamento de dados no programa Matlab, algoritmo escrito seguindo a metodologia do GUM, INMETRO 2008, obteve valores da ordem de 0,004 dB à 0,25 dB, sendo utilizada uma faixa de frequência de 100 Hz à 4000 Hz. (NETO, 2015).

O microfone de eletreto foi instalado diretamente na alma do trilho, apoiado em um suporte adaptado para o teste, preso no patim, conforme a Figura 20. Para se atenuar o ruído externo o microfone foi coberto com panos, porém para uma instalação definitiva o microfone deverá ser embutido no suporte de fixação de forma a se garantir o seu isolamento acústico.



Figura 20 - Instrumentação do microfone no trilho (Foto do autor)

Os registros de ruído foram armazenados diretamente na memória do osciloscópio utilizado, o Tektronix TPS 2024B, 200 MHz de quatro canais, Figura 21, e posteriormente convertido em um arquivo de imagem para possibilitar a análise e comparação entre registros.

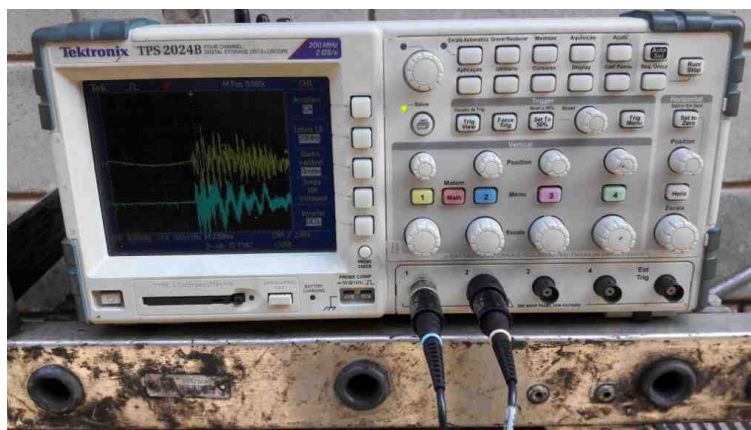


Figura 21– Osciloscópio Tektronix TPS 2024B, 200 MHz e quatro canais (Foto do autor)

A exatidão das medidas realizadas pelo osciloscópio pode ser dividida em exatidão do sistema vertical, normalmente expressa em termos percentuais, definindo uma incerteza relativa típica de 1% a 3% sobre o valor medido e a exatidão do sistema horizontal, que é expressa como uma incerteza relativa, em porcentagem, este valor é muito dependente da largura de banda (e da frequência de amostragem) do osciloscópio, pelo que osciloscópios de alta largura de banda poderão ter incertezas na ordem de 10 ppm (partes por milhão – 0,001%), como o modelo utilizado nos testes na via, ou osciloscópios de baixa largura de banda que terão incertezas na ordem dos 2% a 3%. (ALVES, 2007).

CIRCUITO ELETRÔNICO DO ACELERÔMETRO

Os acelerômetros são sensores ou transdutores que medem acelerações. A aceleração é a medida de quão rapidamente a velocidade varia em relação ao tempo e pode ser obtida segundo uma, duas ou três direções, utilizando acelerômetros uni, bi ou tri axiais, respectivamente. Tipicamente, os acelerômetros são constituídos por uma massa de reação suspensa por uma estrutura estacionária. Este dispositivo pode ser visto como um transdutor massa-mola, que se encontra no interior de um sensor, que por sua vez está unido à estrutura de sustentação. Sempre que este acelera, a inércia faz com que a massa resista. A força exercida pela massa é equilibrada pela mola e, como o deslocamento permitido pela mola é

proporcional à força aplicada, a aceleração do corpo é proporcional ao deslocamento da massa. (FIGUEIREDO et al. 2007).

Foram realizados testes de campo com dois modelos de acelerômetros neste projeto, ambos os modelos do tipo MEMS (Sistema Micro eletromecânico - *Micro-Electro-Mechanical System*, em inglês) capacitivo, possuem elevada sensibilidade (0,003 pF/g) e faixas de frequência de até 11 kHz. Este tipo de acelerômetro é baseado no princípio da mudança de capacitância proporcional a uma aceleração aplicada e são recomendados para medições em baixas frequências, que é o caso em análise.

O sensor é tridimensional, ou seja, mede a aceleração nas três direções ortogonais, no entanto, para este projeto foi aplicada somente uma dimensão, para a medição do deslocamento vertical do trilho, excitado pela passagem das rodas.

A incerteza expandida das medidas de aceleração obtidas através de acelerômetros possui valores máximos da ordem de 1% a 3%. (PEREIRA, 2013).

Foram feitos testes de campo com dois tipos de acelerômetros neste projeto. Ambos os modelos são do tipo MEMS (Sistema Micro eletromecânico - *Micro-Electro-Mechanical System*, em inglês) capacitivo, um modelo o MM7361, fabricado pela empresa Freescale, e o outro MPU-6050, da InvenSense Inc..

O acelerômetro de 3 eixos do MPU-6050 usa massas de prova separadas para cada eixo. A aceleração ao longo de um eixo particular induz o deslocamento na massa de prova correspondente, e os sensores capacitivos detectam o deslocamento diferencialmente. A arquitetura da MPU-60X0 reduz a susceptibilidade dos acelerômetros às variações de fabricação, bem como à deriva térmica. Quando o dispositivo é colocado sobre uma superfície plana, ele medirá 0 g nos eixos X e Y e + 1 g no eixo Z. O fator de escala dos acelerômetros é

calibrado na fábrica e é nominalmente independente da tensão de alimentação. Cada sensor possui um ADC sigma-delta dedicado para fornecer saídas digitais. O alcance da escala total da saída digital pode ser ajustado para ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g ou ± 16 g. (DATASHEET INVENSEN, 2013).

O circuito de medição e armazenamento de dados de vibrações, com os acelerômetros, foi calibrado no laboratório de vibrações mecânicas da PUCMG e instalados nos trilhos, conforme apresentado nas Figuras 20 e 22.



Figura 22 – Circuito de aquisição e armazenamento de dados do acelerômetro (Fotos do autor)

O circuito de medição e armazenamento de dados de vibrações, foi configurado para captar vibrações com uma amostragem de 1 ms (1 kHz), como essa amostragem geraria um volume muito grande de dados e a memória eletrônica se encheria rapidamente, foi criado um artifício em que a cada 100 ms segundos registrados, somente o maior valor de pico de aceleração foi memorizado.

CRITÉRIOS DE ANÁLISE

Inicialmente executaram-se os registros de vibração e ruído com a passagem de trens cujas rodas estavam em perfeitas condições operacionais, sem a presença de danos ou desgastes, confirmados através de inspeção visual em vala de manutenção. Estes registros foram a base

de referência das amplitudes a serem obtidas para rodas sem danos. Em seguida executou-se o registro dos demais trens da frota e de alguns veículos ferroviários da CBTU-STU/BH. Este procedimento possibilitou o estabelecimento dos perfis de vibrações e ruídos aceitáveis e os perfis que indicam a necessidade de retirada do trem de operação.

A análise dos resultados foi executada pela comparação do formato dos gráficos obtidos a partir dos registros realizados, sendo que para os acelerômetros foram analisadas as variações da amplitude da aceleração [g] em função do tempo [ms] e, para o microfone foram analisadas as variações da amplitude do ruído [mV] em função do tempo [ms].

Analisando a forma gráfica dos registros obtidos, comparando-as com as amplitudes dos registros de referência (de trens sem danos nas rodas), foram identificados os rodeiros dos trens que possuem registros de amplitudes de vibração e ruído maiores que o registro padrão e, a partir daí esses rodeiros foram inspecionados na oficina do Material Rodante, em vala de manutenção. Identificados e fotografados os danos, determinou-se se esses rodeiros deveriam ser usinados no torno rodeiro, para eliminação dos danos, ou se poderiam continuar circulando.

Quanto aos valores das grandezas medidos, aceleração e ruído, não houve preocupação com a exatidão e nem com a incerteza desses valores nesta etapa, uma vez que, o objetivo do projeto era de verificar a aplicação de acelerômetros e microfone na detecção de danos nas rodas.

RESULTADOS

Para verificar a possibilidade de aplicação dos acelerômetros MEMS capacitivos e do microfone de eletreto na detecção de danos de rodas ferroviárias, foram realizados testes

independentes. Inicialmente foram realizados os testes com os dois tipos de acelerômetros, e posteriormente, foram realizados os testes com o microfone.

RESULTADOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DOS ACELERÔMETROS CAPACITIVOS – MM7361 E MPU 6050

Os gráficos apresentados a seguir foram gerados através dos dados obtidos com a aplicação de um acelerômetro MM7361. Os testes foram realizados na linha comercial e com os TUEs em velocidade normal. No local do teste a velocidade autorizada é de 60 km/h. Devido ao sistema automático de controle de velocidade, embarcado, a velocidade efetivamente praticada é próxima de 57 km/h.

Cabe lembrar que os TUEs da CBTU-STU/BH, são formados por quatro carros, cada carro com dois truques e cada truque com dois rodeiros, portanto, os registros de vibração referem-se à passagem de dezesseis rodeiros.

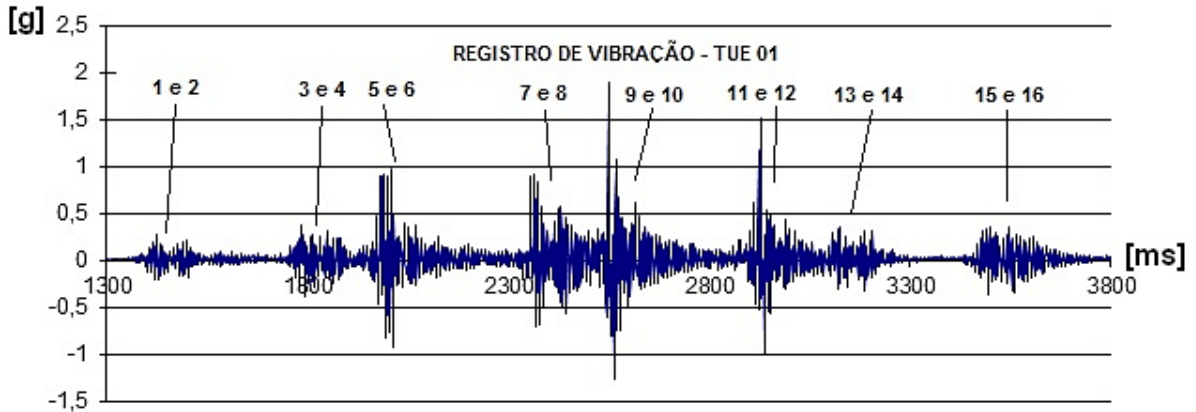
Os gráficos representam a aceleração no eixo vertical com escala em [g], aceleração da gravidade, e o tempo em milissegundos [ms] no eixo horizontal. A numeração aponta para a sequência dos rodeiros por truque, começando pelos rodeiros 1 e 2 e terminando nos 15 e 16, respectivamente.

Ficou caracterizado que mesmo as rodas sem nenhum dano, provocam vibrações e ruído quando da passagem sobre o trilho instrumentado, com isso, pode-se caracterizar as vibrações e ruídos de rodas com e sem danos e comparando-se os resultados gráficos desses dados fica evidente a diferença entre os registros, principalmente em amplitude.

As rodas sem defeitos provocam vibrações e ruído nos trilhos devido à elasticidade da via permanente, tanto pelos trilhos de aço, como pelo efeito elástico o lastro, que tem como uma de suas funções, o amortecimento das vibrações provocadas pela passagem da roda sobre o trilho.

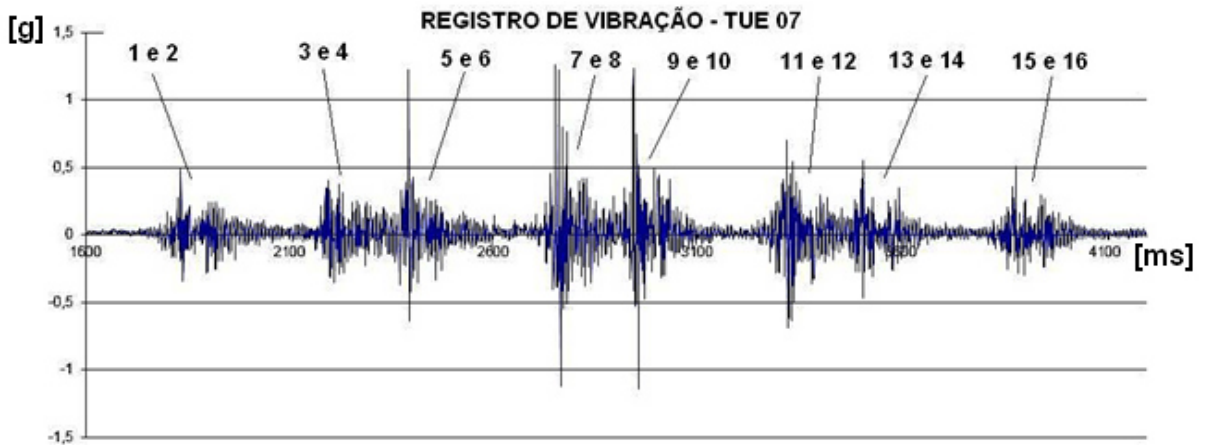
No Gráfico 2 ficaram evidenciados impactos com maior intensidade nos rodeiros 5, 7, 9 e 11, com valor máximo próximo a 1,8 g.

Gráfico 2 – Registro com acelerômetro das rodas do TUE 01 (Elaborado pelo autor)



No Gráfico 3 ficaram evidenciados impactos com maior intensidade nos rodeiros 5, 7 e 9, porém com valor máximo próximo a 1,3 g.

Gráfico 3 - Registro com acelerômetro das rodas do TUE 07 (Elaborado pelo autor)



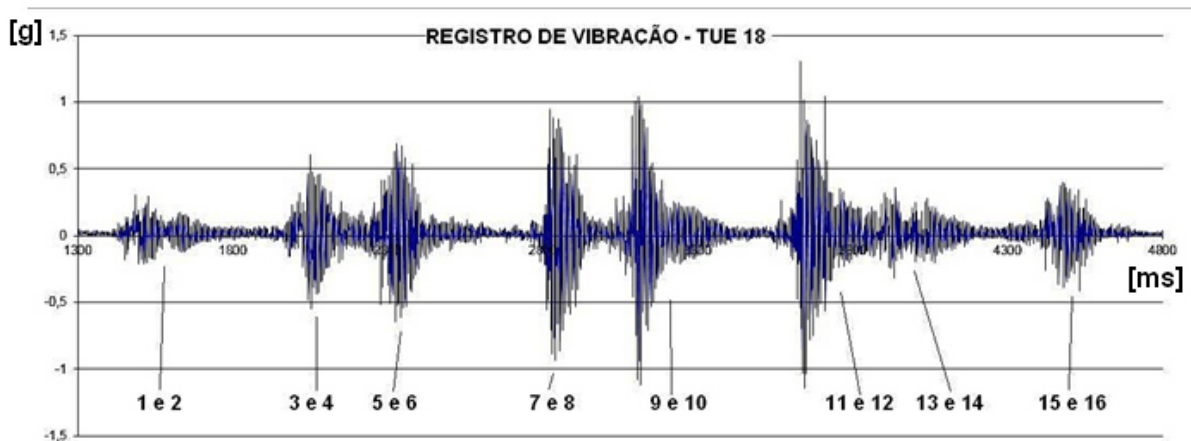
No Gráfico 4 ficaram evidenciados poucos impactos, que se apresentaram nos rodeiros 2, 9 e 13, porém com valores máximos próximos de 1,0 g. Este registro apresenta características de vibrações de média intensidade nos perímetros da maioria das rodas, o que caracteriza danos de escamação superficial.

Gráfico 4 - Registro com acelerômetro das rodas do TUE 20 (Elaborado pelo autor)



No Gráfico 5 ficaram evidenciados impactos com maior intensidade nos rodos 5, 7, 9 e 11, com valor máximo que ultrapassou 1,0 g.

Gráfico 5 - Registro com acelerômetro das rodas do TUE 18 (Elaborado pelo autor)

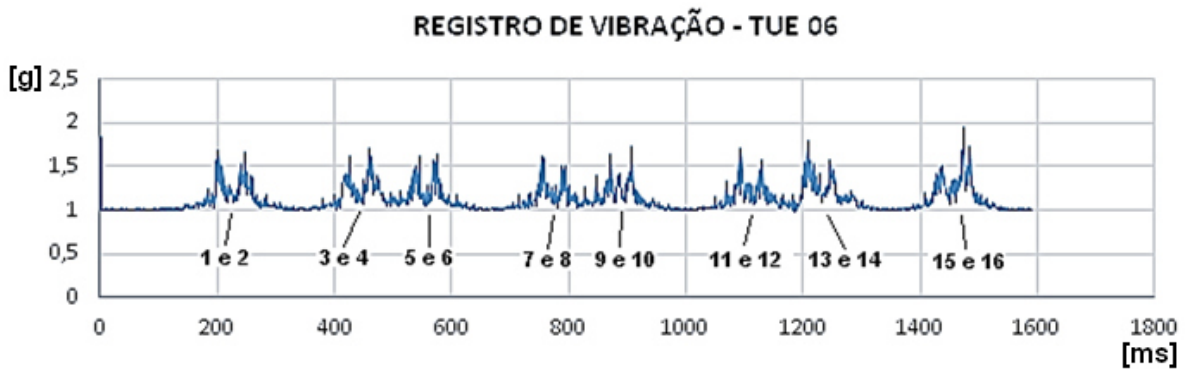


Os gráficos apresentados a seguir foram gerados através dos dados obtidos com a aplicação de um acelerômetro MPU6050, esses gráficos foram gerados considerando-se a referência em 1 g e não em zero, como nos gráficos anteriores.

O Gráfico 6 foi gerado a partir de dados obtidos em uma linha não comercial, do Pátio São Gabriel, com velocidade em torno de 20 km/h. Ficou evidenciado que os impactos registrados são bastante homogêneos, com valores de vibração em torno de 0,5 g. Em uma inspeção feita

em vala, logo em seguida as medições de vibração, não foram constatados danos nas rodas desse TUE 06.

Gráfico 6 - Registro com acelerômetro (MPU6050) das rodas do TUE 06 (Elaborado pelo autor)



O Gráfico 7 foi gerado a partir de dados registrados na linha de testes do Pátio de Eldorado, com o VF 001, Veículo Ferroviário com dois eixos, com velocidade em torno de 15 km/h. Ficou evidenciado que os impactos registrados são bastante salientes com valores próximos a 2 g, chegando em um caso a atingir 3 g. Após esse registro foi feita inspeção das rodas do VF 001 em vala e constataram-se vários calos nas rodas com dimensões diversas. Os danos constatados nas rodas do VF 001 são apresentados na Figura 23.

Gráfico 7- Registro com acelerômetro (MPU6050) das rodas, com danos, do VF 001 (Elaborado pelo autor)

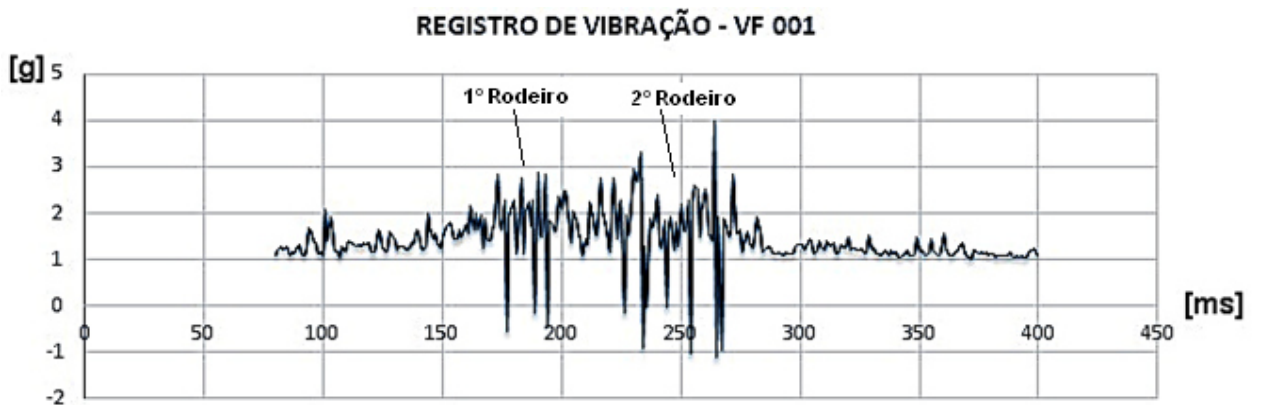
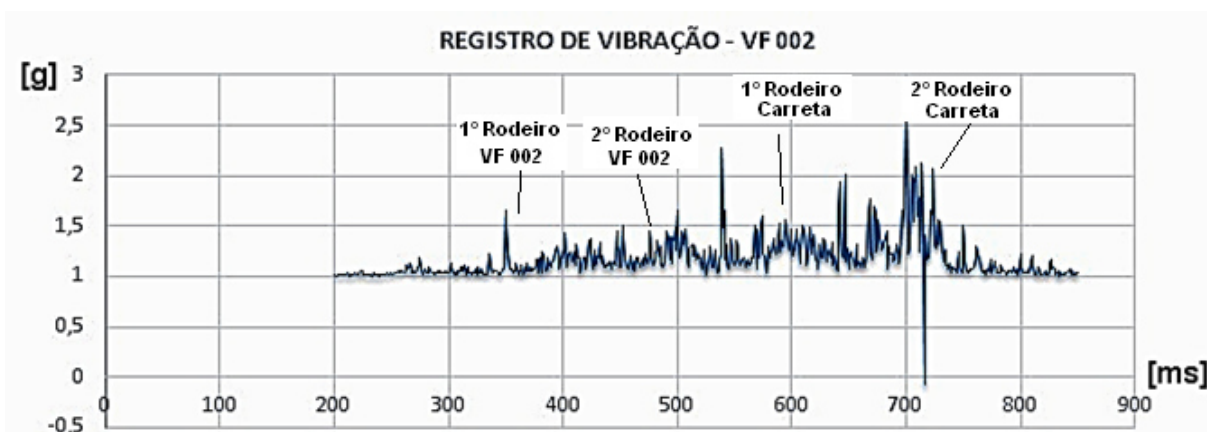




Figura 23 - Danos constatados nas rodas do VF 001 (Fotos do autor)

O Gráfico 8 foi gerado a partir de dados registrados na linha de testes do Pátio de Eldorado, com o VF 002, Veículo Ferroviário com dois eixos, com carreta acoplada, também de dois eixos, a uma velocidade em torno de 15 km/h. Os maiores impactos registrados são referentes as rodas da carreta, sendo que as rodas do VF 002 não apresentaram valores de aceleração significativos. Após esse registro foi feita inspeção das rodas do VF 002 e da carreta em vala e constatou-se um calo nas rodas do último rodeiro da carreta, o que confirmou o gráfico levantado. O calo constatado nas rodas do último rodeiro da carreta do VF 002 é apresentado na Figura 24.

Gráfico 8- Registro com acelerômetro (MPU6050) das rodas do VF 002 com carreta acoplada (Elaborado pelo autor)





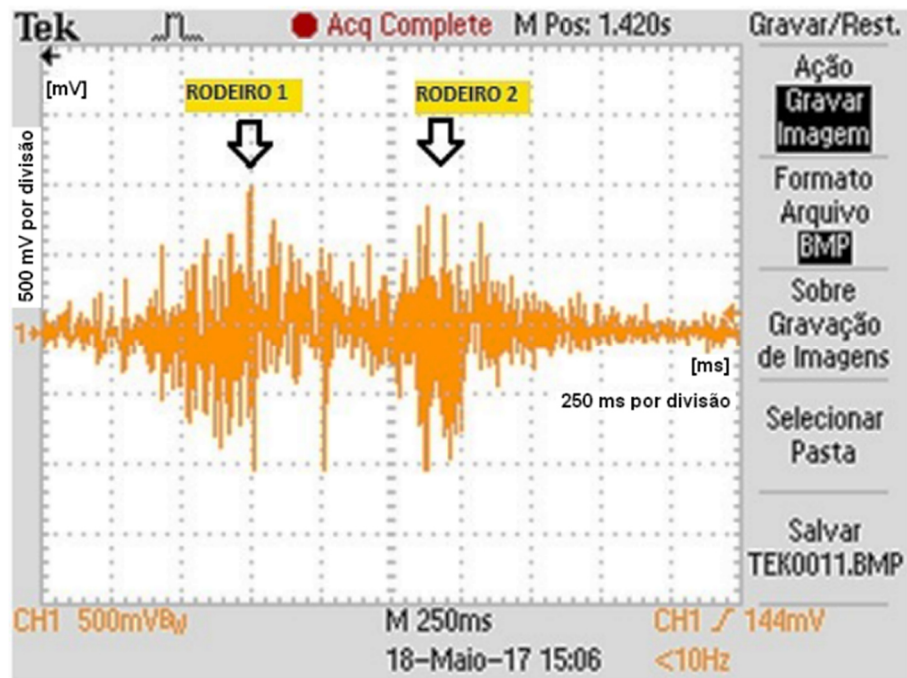
**Figura 24 - Calos constatados nas rodas do último rodeiro da carreta acoplada ao VF 002
(Fotos do autor)**

RESULTADOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DO MICROFONE DE ELETRETO

Os primeiros testes com a aplicação de microfone de eletreto foram realizados na linha de testes do Pátio de Eldorado da CBTU-STU/BH. Foram escolhidos dois VF (Veículos Ferroviários), para os registros, um Auto de Linha – VF 001, com dois eixos, que sabidamente possui danos em suas rodas e o outro, um Caminhão ferroviário – VF 002, com dois eixos, o qual não possui danos nas rodas. O objetivo foi de comparar os registros de ruídos das rodas sem danos com as rodas com danos.

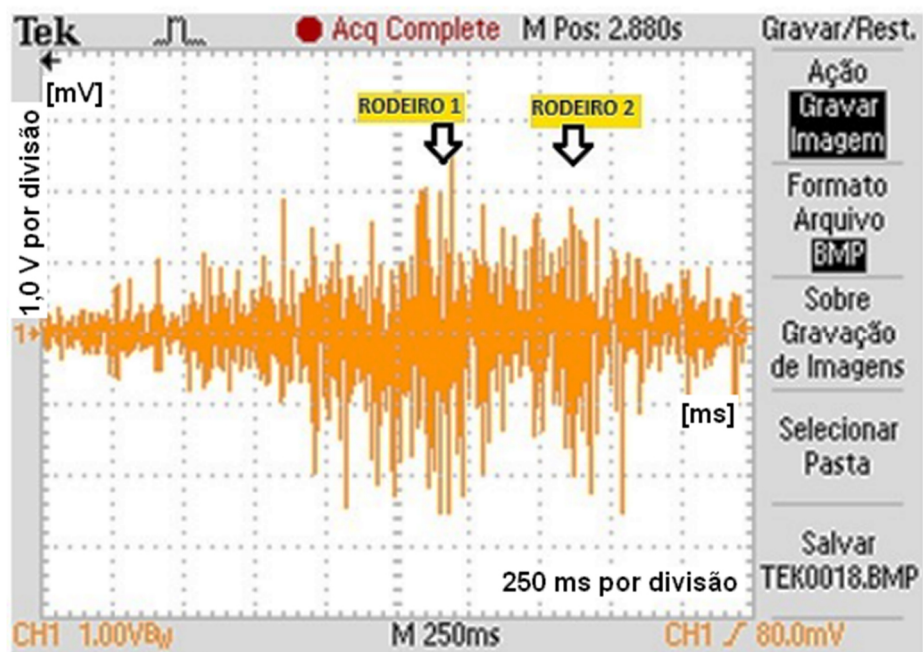
Dos diversos registros realizados para medição de ruído no trilho, são apresentados, a seguir, os dois que mais caracterizaram o propósito desses testes, o Gráfico 9 refere-se ao Caminhão ferroviário VF 002, que não possuía danos nas rodas. Neste registro o osciloscópio estava com escalas de 500 mV por divisão no eixo vertical e de 250 ms por divisão no eixo horizontal.

Gráfico 9 – Registro com microfone das rodas, sem danos, do VF 002 (Elaborado pelo autor)



O segundo registro, Gráfico 10, apresenta o ruído captado no trilho pela passagem do veículo ferroviário VF 001 que possui danos nas rodas. Neste registro o osciloscópio estava com escalas de 1,0 V por divisão no eixo vertical e de 250 ms por divisão no eixo horizontal.

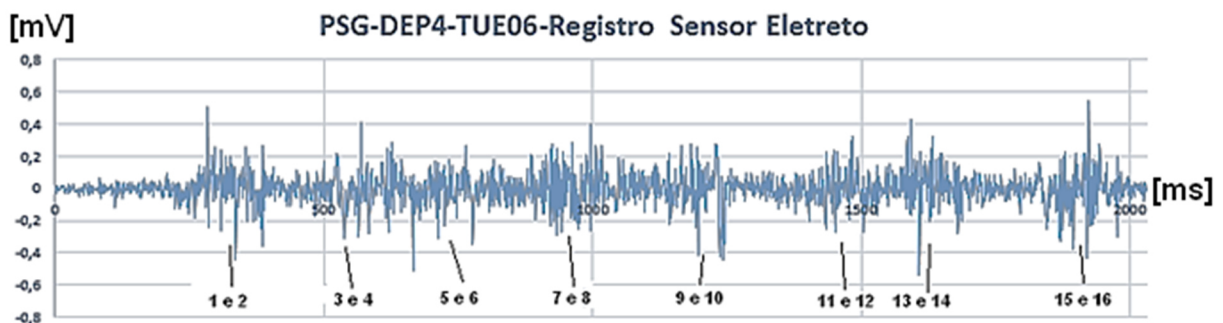
Gráfico 10 - Registro com microfone das rodas, com danos, do VF 001 (Elaborado pelo autor)



Cabe salientar que a distância entre eixos do VF 002-Caminhão ferroviário é maior que a do VF 001-Auto de linha e a velocidade de deslocamento, para os registros, ficaram entre 15 e 20 km/h. Lembrando ainda que a escala de deflexão vertical do Gráfico 09 (500 mV por divisão) é a metade do Gráfico 10 (1 V por divisão), por tanto os danos das rodas do VF 001 causaram ruídos com praticamente o dobro da intensidade das rodas do VF 002, que não possuía danos em suas rodas.

Posteriormente foram realizados outros registros com a aplicação de microfone de eletreto. O Gráfico 11 apresenta o registro referente às rodas do TUE 06, com 16 eixos, realizado em uma linha do Pátio de São Gabriel. Em uma inspeção feita em vala, logo em seguida as medições de vibração, não foram constatados danos nas rodas desse TUE 06.

Gráfico 11 - Registro com microfone das rodas do TUE 06 (Elaborado pelo autor)



Para os acelerômetros MEMS capacitivos utilizados ficou comprovado que, independente do modelo, essa tecnologia pode ser utilizada na aplicação de detecção de danos grandes e médios, nas rodas ferroviárias, que provoquem vibrações nos trilhos, como é o caso dos calos e grandes escamações (*Spalling*).

Nos registros com acelerômetro ficou evidenciado que o valor de pico do dano pode sofrer alterações, uma vez que, o primeiro rodeiro de cada truque sempre terá a sua frente uma porção de comprimento de trilhos sempre maior que o segundo rodeiro desse mesmo truque,

portanto, os níveis de vibração nos primeiros rodeiros sempre serão um pouco maiores que os dos segundos rodeiros. No entanto, a aparência gráfica dos resultados mostra claramente quando existem rodas com danos, principalmente se forem danos relacionados aos calos, que era o que se esperava para esse tipo de sensor.

Para o microfone de eletreto, ficou comprovado que o princípio de captação de ruído nos trilhos é viável para a detecção de pequenos danos nas rodas, como é caso de escamações (*Shelling*). No entanto, devido às interferências detectadas nos registros, que apontam a influências do próprio ruído natural do deslocamento dos veículos sobre o trilho, entendemos que se deve aprofundar esse estudo, para se tentar melhor isolamento acústico na montagem do microfone em relação ao trilho.

A análise dos dados obtidos, tanto dos acelerômetros MEMS capacitivos, quanto do microfone de eletreto, comprovam a viabilidade técnica da aplicação desses tipos de sensores para a detecção de danos de rodas ferroviárias.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando a pesquisa realizada, ficou evidente a necessidade do desenvolvimento de estudos mais detalhados e aprofundados relacionados à aplicação de sensores na detecção de danos e falhas em rodas ferroviárias e na análise da evolução dos danos da superfície de rolamento das rodas ferroviárias. Também ficou evidenciada a necessidade de maior interação e participação das operadoras ferroviárias com o meio acadêmico e vice-versa, para se obter maiores e melhores resultados na análise das causas de problemas relacionados à ferrovia e na aplicação e geração de novas tecnologias.

Foi comprovada a viabilidade técnica da utilização dos sensores de vibração e de ruído para a detecção de danos na superfície de rolamento das rodas ferroviárias e da implantação

definitiva na linha da CBTU-STU/BH de um equipamento de detecção de danos de rodas ferroviárias, com a aplicação dos acelerômetros MEMS capacitivos e do microfone de eletreto, considerando-se a análise em amplitude dos sinais gerados.

Foi desenvolvido um equipamento eletrônico que memorizou os dados captados pelos sensores, a partir desses dados foram gerados os gráficos relativos às vibrações e ruídos provocados pelos danos nas rodas e também de rodas sem nenhum dano, o que possibilitou a análise da amplitude e da forma. Porém, como a amplitude dos sinais registrados varia com a velocidade do trem, com a distância do contato do dano com o trilho em relação ao posicionamento do sensor e com a elasticidade da via, sem o devido tratamento desses dados não se pode determinar a exata dimensão do dano captado, mas é possível identificar e descrever os padrões de resposta de vibração e ruído, que representam um dano da superfície de rolamento das rodas.

Pela análise dos gráficos de vibração e ruído é possível afirmar que existe o dano e em qual roda está. Com a confirmação da existência do dano através de inspeção visual em vala, o processo de reparo ou substituição dessa roda pode ser agilizado, minimizando os efeitos desse dano tanto para o material rodante, quanto para a via permanente, com a consequente redução de custos de manutenção.

Foi confirmado que é plenamente possível o desenvolvimento de um sistema de detecção de danos de rodas ferroviárias, com tecnologia simples e de custo reduzido.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a continuidade desse projeto, com recursos mais elaborados de tratamento de dados, considerando o estabelecimento alarmes automáticos de níveis dos sinais captados em amplitude, quando valores limites predeterminados forem ultrapassados, a comunicação digital da base de medição na via até

o escritório de controle da manutenção possibilitando o monitoramento em tempo real das rodas, a melhoria do suporte dos sensores considerando principalmente o isolamento acústico do microfone e, finalmente, a identificação automática dos trens, que permitirá a associação automática dos registros de vibração e ruído com a identificação do trem que os gerou.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, Mario Ferreira. **ABC do Osciloscópio principio de funcionamento e estado da tecnologia**, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-**ASTM E-1823, 2013. Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing**. Philadelphia,USA, 2013.
- AMINI, Arash. **Online condition monitoring of Railway Wheesets**, Tese de Doutorado, University of Birmingham, Birmingham, Inglaterra, 2016.
- ASPLUND, Matthias. **Wayside Condition Monitoring Technologies for Railway Systems**, Division of Operation, Maintenance and Acoustics, Lulea University of Technology, Tese de licenciamento, ISBN: 978-91-7439-846-5 Lulea, Suécia, 2014.
- BARBOSA, Maria Cristina Beirão. **Caracterização e avaliação dos efeitos do estado de conservação de rodas de composições ferroviárias na infra-estrutura**, Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.
- BIAN, J., GU, Y.T., MURRAY, M.. **Numerical Study of Impact Forces on Railway Sleepers under Wheel Flat**, SAGE Journals, Advances in Structural Engineering, Brisbane, Australia, 7 nov. 2016.

- BOLLAS, Konstantionos et al. **Acoustic emission inspection of rail wheels**. Journal Acoust Emission - 28:215–28. 2010.
- BRIZUELA, José David; IBÁÑEZ, Alberto; FRITSCH, Carlos. **NDE system for railway wheel inspection in a standard FPGA**. ELSEVIER - Journal of Systems Architecture 56 (2010) 616–622. 2010.
- CALLISTER, Willian D.; RETHWISCH, David G.. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**, Rio de Janeiro: LTC, Brasil, 2002.
- COLIM, Glenda Maria. **Fadiga dos materiais, PCC 5726- Princípios da ciência dos materiais aplicados aos materiais de construção civil**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2006.
- COSTA, Denio G.. **Microfones características e aplicações**, I Seminário Engenharia de Áudio, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 2002.
- DUKKIPATI, Rao V.; DONG, Renguang. **Impact Loads due to Wheel Flats and Shells**, University of Illinois at Urbana-Champaign, Vehicle System Dynamics- 31:1, 1-22, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Illinois, USA, 1999.
- FIGUEIREDO, Lígia J. et al. **Aplicações de acelerômetros**, Monografia, Lisboa, Portugal, 2007.
- LBFOSTER, Salient Systems. **Detector de Impacto de Roda, Catálogo**, L. B. Foster Rail Technologies, Reino Unido, 2017.
- MINICUCCI, Domingos José. **Rodas e eixos ferroviários conceitos básicos**. MWL Brasil Rodas e Eixos Ltda., Caçapava, Brasil, 2011.
- MOYNIHAN, Thomas W.; ENGLISH, G. W.. **Railway safety technologies**, Research and Traffic Group, submitted to Railway Safety Act Review Secretariat, Canadá, 2007.

- NABAIS, Rui José da Silva (Org.). **Manual básico de Engenharia Ferroviária**. São Paulo: Oficina de Textos, Brasil, 2014.
- NETO, Vanderlino C. Barreto. **Caracterização metrológica de microfone de eletreto**, Projeto de graduação 2, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, 2015.
- OLIVEIRA, Luiz Gustavo de. **Influência do processo de fabricação no comportamento mecânico de rodas ferroviárias**, Tese de doutorado, UNESP, Guaratinguetá, Brasil, 2013.
- PEREIRA, Carla Silva, **Otimização do Sistema Experimental para a Calibração de Acelerómetros-Padrão em Regime de Alta-Frequência**. Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- SANTOS, Francisco de Carvalho. **Análise do Contato Roda-Trilho e sua Influência na Vida em Serviço de Rodas Ferroviárias**, Dissertação de mestrado, UNICAMP, Campinas, Brasil, 2000.
- SILVA, Braitner Lobato da. **Uma metodologia de análise de confiabilidade à fadiga utilizando a Teoria da Distância Crítica**, Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, Brasil, 2014.
- SOARES, André Roberto. **Desenvolvimento de modelo para previsão de desgaste em contactos roda/carril de veículos ferroviários**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2014.
- THOMPSON, David. **Railway Noise and Vibration: Mechanisms, modelling and Means of Control**, Institute of Sound and Vibration Research, Amsterdam: Elsevier, 2009.
- VOESTALPINE. **ATLAS Precise Diagnosis of Wheel Defects and Vehicle Weights**, Voestalpine Signaling Siershahn, Alemanha, 2017.