

DEFEITO TRANSVERSAL NO PATIM DO TRILHO, CAUSAS, DETECÇÃO E CORRELAÇÃO COM TEMPERATURA NEUTRA E GEOMETRIA DE VIA

Wilian Mendes Ferreira, Esp., Instituto Militar de Engenharia, Brasil.

Domingos José Minicucci, M.e D.r, Instituto Militar de Engenharia, Brasil

RESUMO

Neste artigo são elencados alguns módulos de falha que podem dar origem às trincas transversais nos patins dos trilhos, possíveis metodologias para detecção deste tipo de descontinuidade e as respectivas limitações de cada técnica. A pesquisa também aborda sobre a contribuição do defeito transversal no patim do trilho na redução da resistência mecânica aos esforços verticais aos quais os trilhos estão submetidos devido ao carregamento imposto pela passagem das rodas dos trens, assim como, a análise de dados de medição da temperatura neutra dos trilhos executados com o sistema VERSE (*Vertical Rail Stiffness Equipment*), na busca por um limiar térmico onde a influência da variação da temperatura do trilho exerce papel fundamental no desenvolvimento das trincas no patim dos trilhos e por último, a existência ou não de correlação entre os locais onde ocorreram fraturas com esse tipo de modo de falha e os desnivelamentos longitudinais da via medidos pelos equipamentos de inspeção de geometria via ATGMS (*Autonomous Track Geometry Measurement System*) e VTI (*Vehicle Track Interaction*).

Palavras-chaves: Temperatura; Geometria, Patim.

1. INTRODUÇÃO

Defeitos transversais originados no patim do trilho têm sido um problema na MRS Logística desde 2007. Na época, o problema ocorria em trilhos 136 RE, HE 400 fabricados pela NSC e suspeitou-se de um problema de fabricação. A NSC conduziu uma investigação sobre as falhas que lhes foram atribuídas e identificou algumas características importantes como alta tensão residual no patim do trilho, mas não conseguiu encontrar nenhuma causa que remetesse ao seu processo de fabricação (Griffiths D., 2011).

A propagação de defeitos internos nos trilhos pode ocorrer devido ao acúmulo de MTBT (milhões de toneladas brutas transportadas), condições impróprias de trabalho do trilho como regiões com bolsões, que são pontos da via com bombeamento de finos e água para a superfície, que podem causar ainda a corrosão do material e redução da resistência ao esforço vertical dos trilhos.

Outros fatores como defeitos superficiais nos trilhos, rodas com calos, velocidade dos trens, composição química e qualidade metalúrgica do trilho, existência ou não de lubrificação, geometria da via e variações térmicas, também exercem efeito sobre a propagação das trincas.

A trinca no patim do trilho se desenvolve no plano transversal, apresentando uma pequena mancha escura no local da origem da descontinuidade com dimensões próximas de 10 milímetros de largura por 5 milímetros de altura conforme se observa na Figura 1, a propagação da trinca ocorre de forma praticamente instantânea até o rompimento da seção do trilho por fratura frágil.



Figura 1 – Exemplo de ponto de inicialização de defeito transversal no patim do trilho causado por formação de martensita.

As falhas nos patins dos trilhos têm sido um grande problema para as ferrovias de *Heavy Haul* brasileiras, como a MRS Logística e VALE Carajás. O número de fraturas com origem no patim dos trilhos tem sido bem representativo em relação ao total das fraturas, esse fato se dá principalmente devido à dificuldade de detecção deste tipo de anomalia.

Podemos ver na Tabela 1, os dados históricos sobre o número de fraturas referentes aos anos de 2021, 2022 e 2023 nas principais ferrovias brasileiras.

Fica evidente na Tabela 1, que embora o número total de fraturas no patim dos trilhos da MRS Logística seja mais que o dobro do número de fraturas com origem no patim dos trilhos da Vale Carajás, por outro lado, a porcentagem desses modos de falha na Vale Carajás também é quase o dobro em relação à MRS Logística. As outras ferrovias brasileiras como RUMO e VM não controlam esse módulo de falha em suas análises.

Tabela 1 - Comparativo de fraturas em ferrovias brasileiras

Ferrovia	Extensão em quilômetros	Total de fraturas em 2021	Fraturas no patim 2021	% Fraturas no patim 2021	Total de fraturas 2022	Fraturas no patim 2022	% Fraturas no patim 2022	Total de fraturas 2023 *	Fraturas no patim 2023 *	% Fraturas no patim 2023 *	Total de fraturas acumulado
MRS	1643	222	70	32%	277	127	46%	192	78	41%	469
VALE CARAJÁS	976	62	48	77%	120	97	81%	55	37	67%	175
VALE VM	905	14		0%	13		0%	24		0%	37
RUMO NORTE	4548	747		0%	866		0%	647		0%	1513
RUMO SUL	7223	687		0%	456		0%	491		0%	947
RUMO CENTRAL	1537	41		0%	52		0%	55		0%	107

* O período de 2023 está considerado até o mês de agosto

Os sistemas de inspeção de trilhos atuais possuem capacidade para detecção desse tipo de descontinuidade, no entanto, na maioria das vezes, estas descontinuidades não são detectadas devido a orientação e localização da falha próximo às abas do patim dos trilhos, ficando claro a necessidade de estudos para o aprimoramento da detectabilidade e controle desse modo de falha.

O objetivo do trabalho é demonstrar com base nos dados das fraturas na MRS Logística, a influência que as condições do entorno exercem sobre o desenvolvimento das trincas no patim dos trilhos. Estas condições serão divididas em duas linhas de raciocínio distintas, sendo uma voltada para as condições de geometria da via, no que tange aos desnivelamentos longitudinais, e outra relativa às condições de tração e compressão às quais o trilho está submetido, resultado da variação da temperatura do trilho e temperatura livre de tensão medida pelo equipamento *VERSE*, a diferença de temperatura entre essas duas grandezas será utilizada como balizador para a indicação da temperatura onde se inicia a probabilidade de ocorrência da fratura.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Causas do surgimento dos defeitos transversais no patim dos trilhos.

Uma das causas do defeito transversal no patim do trilho é o arraste da barra de trilho sobre os rolos quebrados e travados das estruturas dos suportes dos trilhos do equipamento de transporte e descarga de trilhos conhecido como “Frota Robel”. Este material resultante do atrito do trilho e dos rolos escoa devido à alta temperatura gerada pelo atrito e é ocasionalmente caldeado à base do trilho, onde esfria rapidamente até formar uma estrutura martensítica extremamente frágil (Griffiths D., 2011).

Outra causa do defeito transversal no patim é a formação de White Etching Crack (WEC) que também é uma alteração da estrutura do aço com formação de martensita que pode ocorrer devido ao forte atrito entre o patim do trilho e a placa de apoio, resultante da movimentação longitudinal do trilho sobre a placa de apoio. Essa movimentação pode ser causada pelos esforços resultantes da passagem dos trens (frenagem e tração), além da dilatação e compressão do material do trilho em função da variação de temperatura, principalmente quando os elementos de fixação como os grampos e retensores estão frouxos, permitindo maior movimentação dos trilhos.

Esse atrito excessivo provoca o encruamento do material do trilho, formando ressaltos no patim dos trilhos, que provoca o aumento da tensão residual naquele ponto, levando a falha por fratura frágil. Essa falha pode ocorrer sobre a borda da placa de apoio ou também sobre a região central da placa de apoio, esta última, pode tornar a fratura imperceptível ao circuito de via, aumentando o risco de descarrilamento dos trens.

O arraste da barra de trilho sobre a via, os impactos que a barra de trilho pode sofrer durante o transporte e descarga e a corrosão do patim do trilho, conhecido como corrosão por pitting, também são causas para as falhas no patim dos trilhos.

2.2. Equipamentos para Detecção de Trincas em Trilhos Ferroviários.

Existem algumas metodologias para inspeção nos trilhos, tais como:

- Sistema de inspeção por indução magnética
- Sistema de inspeção por laser
- Sistema de inspeção por ultrassom
- Sistema de inspeção por termografia

Os sistemas de inspeção por indução magnética como o EMAT - Eletromagnetic Acoustic Transducers, MFL - Magnetic Flux Leakage ou ECT - Eddy Currents Testing, exploram as perturbações no campo magnético induzidas pela presença de descontinuidades geométricas, como fissuras. Uma das metodologias utiliza escovas de berílio e cobre para aplicar uma tensão em corrente contínua que flui através do trilho, gerando um campo magnético ao redor do trilho. Sensores indutivos passam pelo fluxo do campo magnético conforme o equipamento se move ao longo dos trilhos.

Quando um defeito subsuperficial ou superficial passa abaixo dos sensores indutivos, as correntes parasitas são perturbadas, causando flutuações no campo magnético secundário, dando origem a alterações de impedância. As características dimensionais dos defeitos podem ser quantificadas conforme as características das mudanças das correntes parasitas. Esses sinais são enviados a processadores que convertem esses dados em informação visual apresentadas em um monitor.

O sistema de inspeção a laser, utiliza pulsos de laser para gerar sinais ultrassônicos com transdutores que utilizam o ar como acoplante para monitorar as ondas que se propagam através do trilho. Um pulso de laser com alta densidade de potência é direcionado à superfície do trilho produzindo ondas ultrassônicas longitudinais, transversais e superficiais que se propagam através do material do trilho. Este sistema tem uma área de cobertura maior da seção do trilho a ser inspecionada em relação aos demais processos, pois as ondas ultrassônicas podem ser geradas no trilho em qualquer local acessível ao feixe de laser (D. Cerniglia¹, TTCI 2009).

O sistema de inspeção por ultrassom convencional, utiliza rodas-sondas com monoetilenoglicol e sensores piezoelétricos montados dentro da roda, ou guias deslizantes com os transdutores apoiados sobre as guias conhecido como skateboard, ambos os métodos utilizam água pulverizada para o acoplamento entre o trilho e os transdutores.

Os sensores são normalmente direcionados para o topo do boleto do trilho e trabalham em modo pulso-eco com orientações que variam conforme o fabricante do equipamento, sendo os mais comumente utilizados, os transdutores de 0°, 70° e 45°, outros dois sensores são montados de forma especial para a detecção de defeitos no plano vertical, esses transdutores são conhecidos como side-lookers.

A termografia por indução utiliza pulsos eletromagnéticos para excitar correntes nos trilhos, as correntes parasitas geram calor por perdas resistivas (Joule) e a mudança de temperatura na superfície pode ser detectada por uma câmera infravermelha. As trincas superficiais ou subsuperficiais perturbam a distribuição das correntes parasitas e a difusão do calor, que se tornam visíveis como contrastes térmicos nas imagens termográficas (IR).

Todos os processos de inspeção possuem suas vantagens, desvantagens e limitações técnicas, em geral as desvantagens são referentes ao tipo de acoplamento, velocidade de inspeção e área de varredura. O sistema de inspeção por ultrassom pulso-eco é o mais comumente utilizado, sendo os processos de inspeção por laser e termografia ainda experimentais, já os sistemas de inspeção por indução magnética (Eddy Current) são mais utilizados para inspeção de defeitos superficiais como head-checks e rolling contact fatigue (RCF).

Embora a inspeção por ultrassom pulso-eco seja a mais utilizada, ainda não é completamente eficiente para a detecção dos defeitos transversais no patim dos trilhos, boa parte desses defeitos tem seu ponto de inicialização fora do eixo central da alma do trilho, o que impossibilita a detecção desse tipo de descontinuidade.

2.3. Análise da Redução da Resistência Vertical do Trilho por Meio de Prensa Hidráulica.

Foram executados testes por líquido penetrante, ilustrado pela Figura 2, e partícula magnética para evidenciar visualmente a localização e extensão do defeito transversal no patim de trilho que estava em serviço, o defeito transversal no patim do trilho foi detectado por sistema de inspeção por ultrassom convencional com rodas sondas.



Figura 2 - Revelação do defeito no patim do trilho por líquido penetrante (Griffiths D., 2011)

Na sequência dos ensaios, o corpo de prova do trilho foi levado à prensa hidráulica, apoiada sobre suportes distantes um metro entre si e com o boleto do trilho voltado para cima. A carga foi aplicada gradualmente no sentido vertical, acima do ponto

onde o defeito foi localizado, até que a ruptura do trilho ocorresse. No momento da falha, a carga aplicada foi de cinquenta toneladas e a flecha formada pela flexão do trilho foi de aproximadamente vinte e dois milímetros (Griffiths D., 2011).

Esse ensaio em prensa hidráulica é feito normalmente para avaliar a resistência à deflexão das emendas de trilhos executadas por meio de solda elétrica, obtidas a partir da união dos topos de trilhos curtos pelo processo Flash-butt, neste caso, a solda é considerada boa se resistir à uma carga de duzentas toneladas.

Podemos inferir em termos práticos, que o defeito transversal no patim do trilho reduziu a resistência vertical do trilho a um quarto de sua capacidade normal, já que o trilho se rompeu sob carga de 50 toneladas ao invés das 200 toneladas necessárias para a quebra da solda (Griffiths D., 2011).

2.4. Sistema para Obtenção dos Dados de Temperatura Neutra dos Trilhos.

Flutuações de temperatura podem afetar os trilhos longos soldados (T.L.S.) resultando em altas tensões de tração e compressão. A temperatura livre de tensão determina a distribuição e o nível desta tensão nos trilhos e é, portanto, decisivo em relação à segurança e resistência da via quanto às fraturas e flambagens.

A temperatura neutra dos trilhos é obtida com a utilização do equipamento de ensaio não destrutivo chamado Verse que é ilustrado pela Figura 3. O sistema baseia-se no princípio de que a força vertical necessária para levantar um trilho varia com a força axial contida dentro do trilho devido à tensão.

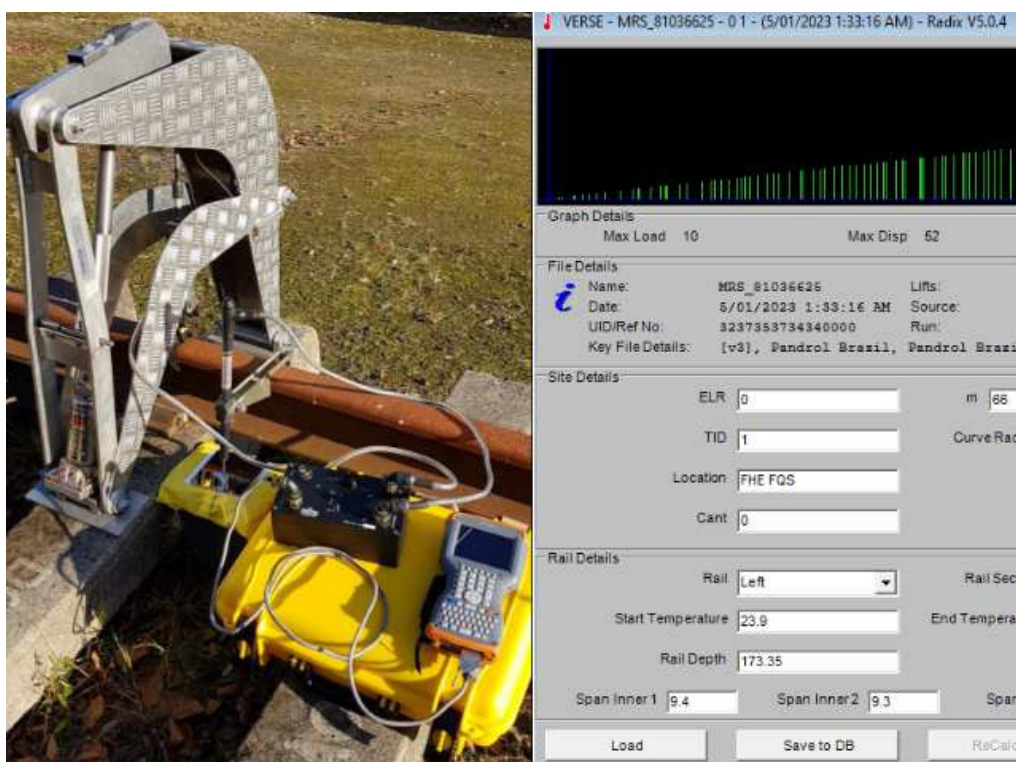


Figura 3 - Equipamento Verse e interface de resultado

O equipamento consiste em uma estrutura de içamento portátil que é posicionada sobre o trilho a ser medido, uma força vertical ascendente conhecida é aplicada ao trilho através do sistema hidráulico, transdutores são usados para medir a força aplicada em relação ao deslocamento vertical de içamento do trilho. Esses dados são enviados a um computador portátil, que os registra juntamente com os valores da altura do trilho e da

temperatura que o trilho se encontra no momento do ensaio, além do vão do trilho sem a fixação. O algoritmo do sistema executa cálculos com todos esses parâmetros e traz como resultado a temperatura em que o trilho estaria livre de tensão.

2.5. Dados das temperaturas ambientes máximas e mínimas.

Os valores de temperaturas ambientes diárias máximas e mínimas para cada região utilizados nesse trabalho foram obtidos com base nos dados coletados, armazenados e disponibilizados no site da empresa Climatempo (Climatempoconsultoria, 2023). A MRS Logística é atendida por cerca de 90 estações de monitoramento ao longo de sua malha, que medem e armazenam as variações de temperatura conforme sua ocorrência diversas vezes ao dia (12 vezes por hora).

Não foram utilizados nesse estudo valores estimados ou de previsão, os dados são os reais obtidos ao longo das medições. A Tabela 2 exemplifica somente a título de ilustração, as temperaturas mínimas obtidas em algumas regiões da malha da MRS Logística no período de 01/01/2022 a 04/01/2022.

Tabela 2 - Amostra das tabelas de temperaturas mínimas registradas por região em graus centígrados pelo sistema Climatempo.

Localidade	01/01/2022	02/01/2022	03/01/2022	04/01/2022
<i>Belo Vale - MG</i>	18,7°C	19,2°C	19,7°C	19,8°C
<i>Bom Jardim de Minas - MG</i>	15,8°C	16,8°C	17,4°C	17,5°C
<i>Passa Vinte - MG</i>	17,4°C	18,4°C	19,0°C	19,1°C
<i>Santos Dumont - MG</i>	17,7°C	18,4°C	18,8°C	18,9°C
<i>Ibirité - MG</i>	17,0°C	17,0°C	17,2°C	18,1°C
<i>Belo Horizonte - MG</i>	18,7°C	18,6°C	19,0°C	19,6°C
<i>Itatiaia - RJ</i>	19,7°C	21,0°C	21,6°C	21,4°C
<i>Japeri - RJ</i>	21,9°C	22,8°C	23,3°C	23,4°C
<i>Mangaratiba - RJ</i>	20,4°C	21,5°C	22,1°C	22,2°C
<i>Mendes - RJ</i>	21,0°C	22,0°C	22,5°C	22,6°C
<i>Mesquita - RJ</i>	23,2°C	24,1°C	24,5°C	24,6°C
<i>Paracambi - RJ</i>	21,0°C	22,0°C	22,5°C	22,6°C
<i>Paraíba do Sul - RJ</i>	21,8°C	22,5°C	22,9°C	23,0°C
MÉDIA	17,6 °C	18,4°C	18,9°C	19,0°C
DESVIO PADRÃO	1,10°C	0,95°C	0,99°C	0,88°C

2.6. Faixa de temperatura neutra dos trilhos.

Termômetros especiais foram afixados aos trilhos para monitorarem constantemente a temperatura, suas medições foram enviadas via internet para um banco de dados computadorizado. Existem 15 pontos de medição de temperatura dos trilhos na MRS Logística, que cobrem as regiões da Ferrovia do Aço, Área Rio, Linha do Centro e Ramal do Paraopeba, a região de São Paulo não é coberta por esse serviço.

Conforme pode ser observado na Tabela 3, os dados são colhidos de hora em hora e os valores das temperaturas máximas, mínimas e médias são calculadas conforme o período de amostragem.

Tabela 3 - Exemplo de dados dos termômetros instalados na malha da MRS Logística

TEMPERATURA DOS TERMÔMETROS DE TRILHOS				
CONFIGURAÇÕES	Data de Início da Pesquisa		4/07/2023	
	Data de Fim da Pesquisa		15/10/2023	
	Intervalo de amostragem		60 minutos	
PÁTIO	FPL - Pinheiral	FME - Mendes	FBC - Barbacena	FGG - Eng. Gurgel
TEMPERATURA MÁXIMA	50°C	44°C	53°C	57°C
TEMPERATURA MÍNIMA	19°C	14°C	11°C	19°C
TEMPERATURA MÉDIA	30.28°C	25.47°C	25.53°C	33.56°C
DATA E HORA DA MEDIÇÃO				
31-JUL-23 13:00:00	42°C	35°C	45°C	44°C
31-JUL-23 14:00:00	42°C	33°C	47°C	48°C
31-JUL-23 15:00:00	42°C	32°C	45°C	48°C
31-JUL-23 16:00:00	42°C	30°C	41°C	44°C
31-JUL-23 17:00:00	41°C	29°C	34°C	37°C
31-JUL-23 18:00:00	36°C	27°C	30°C	36°C
31-JUL-23 19:00:00	32°C	25°C	27°C	34°C
31-JUL-23 20:00:00	29°C	24°C	25°C	29°C

A temperatura neutra de referência (TNR) da via é obtida pela média entre as temperaturas mínimas e máximas históricas dos trilhos instalados em uma determinada região acrescido de 5°C. A TNR é calculada com 5°C a mais sobre a média das temperaturas, por serem as falhas de flambagem dos trilhos mais críticas que as fraturas, uma vez que não existem equipamentos para alertar sobre as flambagens nos trilhos, já as fraturas podem, de certa forma, serem detectadas pelos circuitos de via.

A faixa de temperatura neutra (FTN) compreende a faixa de variação de temperatura, onde se espera que os trilhos estejam sem esforços consideráveis de tração ou compressão térmica. A FTN é igual à TNR mais ou menos 5°C conforme demonstra a Tabela 4.

Tabela 4 - Exemplo das faixas de temperaturas neutras praticadas pela MRS Logística

GERÊNCIA	TRECHO	TEMPERATURA NEUTRA DE REFERÊNCIA	FAIXA DE TEMPERATURA
GVP.RJ	BRISAMAR	42°C	37°C < FTN < 47°C
	BARRA DO PIRAI	39°C	34°C < FTN < 44°C
GVP.MG	FRANCISCO BERNARDINO	38°C	33°C < FTN < 43°C
	CONSELHEIRO LAFAIETE	38°C	33°C < FTN < 43°C
	BRUMADINHO	41°C	36°C < FTN < 46°C
GVP.FA	JECEABA	35°C	30°C < FTN < 40°C
	SÃO JOÃO DEL REI	40°C	35°C < FTN < 45°C
	BOM JARDIM	36°C	31°C < FTN < 41°C

2.7. Dados de nivelamento longitudinal.

A geometria de via, do ponto de vista da dinâmica, é dividida em parâmetros de projeto e irregularidades. As irregularidades podem ser provocadas por imperfeições nos trilhos, irregularidades na infraestrutura de via, deficiência na fixação e impactos provocados pelos vagões e locomotivas.

O nível da tensão vertical nos trilhos ocasionado pela passagem das rodas pode ser aumentado conforme a amplitude das irregularidades no nivelamento longitudinal da via e os parâmetros geométricos utilizados como entrada nas análises de dinâmica são:

- Curvatura
- Variação de bitola
- Desalinhamento
- Desnivelamento transversal
- Desnivelamento longitudinal.

A rigidez da via também é outro fator de relevância para o comportamento dinâmico. Alguns fatores como tipo de dormente, espaçamento, presença de bolsão e rigidez do sublastro definem a rigidez da via (Felipe M., IME 2023).

O crescimento das fraturas progressivas é governado por tensões com direções perpendiculares a superfície da trinca e paralelos à superfície de rodagem (componente longitudinal). Além disso, a tensão longitudinal no trilho é assumida como constituída de efeitos de flexão (passagem do trem), tensões residuais e térmicas (Orringer, 1988).

Os dados analisados foram obtidos pelo sistema ATGMS, que é composto por acelerômetros e giroscópios que geram um plano sobre a via, enquanto os lasers e câmeras geram a imagem do trilho que é processada pelos computadores do sistema, conforme ilustra a Figura 4. Conforme a imagem dos trilhos geradas pelo laser se movem em frente às câmeras do sistema, um algoritmo executa diversos cálculos considerando os dados de imagem em relação aos dados do plano, tendo como saída os valores de geometria e bitola da via.



Figura 4 - Locomotiva com sistema ATGMS e interface de usuário VisioStack

Considerando as afirmações da dinâmica de trens pautadas na geometria da via e o postulado sobre o crescimento das fraturas quanto às tensões, torna-se importante a análise das fraturas considerando os dados de nivelamento longitudinal.

Durante as análises, percebeu-se que o sistema ATGMS detectou oscilações de nivelamento longitudinal nos mesmos pontos onde foram registradas oscilações pelo sistema VTI, sendo as amplitudes registradas com valores em torno de 38 milímetros de flecha em corda de 20 metros.

Esse valor de flecha não registraria sequer um defeito de nível preventivo para ferrovias com velocidade máxima de 64 km/h, classificadas como ferrovias de classe 3 conforme a norma ABNT-NBR-16387, cujo limite para defeitos corretivos de nivelamento longitudinal é de 57 milímetros e o limite para defeitos preventivos é de 51 milímetros.

O sistema VTI é composto apenas por acelerômetros, sendo dois acelerômetros montados sobre o segundo eixo da locomotiva, sendo um sobre cada extremidade do eixo, que mede os impactos verticais das rodas em quilonewtons (kN), outro montado sobre o truck dianteiro que também mede as acelerações laterais do truck em quilonewtons (kN) e por fim outro acelerômetro montado sobre o chassi da locomotiva que mede as acelerações laterais e verticais relativas à gravidade (g) e o cálculo de desnivelamento longitudinal medido pelo método M.C.O. (*Mid Chord Offset*) em corda de três metros. Esse último parâmetro foi utilizado como referência nesses estudos e a Tabela 5 exemplifica algumas exceções detectadas por esse sistema.

Tabela 5 – Amostra das exceções de desnivelamento longitudinal apontadas pelo sistema VTI com valores do desvio em milímetros apontados na coluna “Value”.

TRACK NO.	KP MAJOR	KP MINOR	LAT	LONG	DATE TIME	SYS	TYPE	VALUE
L1	528	746	-20.4211	-44.025	21/11/2023 7:56	VTI	MCO2-SCAN	17.27
L1	532	693	-20.4013	-44.0206	21/11/2023 7:48	VTI	MCO2-SCAN	21.84
L1	587	684	-20.088	-44.2107	21/11/2023 4:23	VTI	MCO2-SCAN	-18.54
L1	587	676	-20.088	-44.211	19/11/2023 8:22	VTI	MCO2-SCAN	-18.54
L3	553	18	-20.2703	-44.0845	19/11/2023 7:08	VTI	MCO2-SCAN	-17.02
L1	576	575	-20.1526	-44.1767	26/10/2023 21:25	VTI	MCO2-SCAN	-17.27
L1	278	218	-21.7431	-43.3702	17/10/2023 19:46	VTI	MCO1-SCAN	-19.81

Os pontos avaliados possuíam defeitos de nivelamento longitudinal de criticidade baixa registrados pelo sistema VTI, cujos valores giravam em torno de 10 milímetros de flecha em uma corda de 3 metros, no entanto, pela teoria da fadiga, há de se considerar o efeito dessa ciclagem causada pela passagem das rodas das composições sobre os trilhos no desenvolvimento da trinca.

As oscilações de comprimento de onda menores medidas pelo sistema VTI, atingiram os valores mínimos para serem registradas como exceções, porém, pelo procedimento atual da MRS Logística, esse nível de defeito não gera nenhuma necessidade de intervenção pela manutenção, assim como as medições do sistema ATGMS também não demandariam ações de manutenção.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram usadas como entrada de dados os registros coletados sobre 469 fraturas ocorridas na MRS Logística no período de janeiro de 2022 a setembro de 2023. Dessas fraturas, foram filtradas para análise conforme proposta desse artigo, apenas as fraturas que foram avaliadas pela área de confiabilidade da empresa como tendo a origem da trinca no patim dos trilhos. A Tabela 6 demonstra, sem expor dados sensíveis, alguns dos principais dados utilizados na análise proposta para este estudo.

Tabela 6 – Amostra de dados referentes às fraturas com origem no patim dos trilhos

Tempo de vida útil do trilho em dias	Temperatura VERSE em °C	Houve afastamento das faces da fratura?	Temperatura ambiente mínima em °C	Temperatura ambiente máxima em °C	Amplitude térmica em °C	Diferença entre VERSE e temperatura ambiente mínima em °C	Houve registro de defeito de M.C.O pelo VTI	Amplitude do desnivelamento medido pelo ATGMS em mm
2097	28,2°C	Sim	13,3°C	15,8°C	2,5°C	14,9°C	Sim	8 mm
2115	19,3°C	-	12,3°C	24,4°C	12,1°C	7,0°C	Não	9 mm
5080	31,3°C	Sim	16,1°C	27,2°C	11,1°C	15,2°C	Não	14 mm
2536	37,4°C	Sim	7,5°C	15,5°C	8,0°C	29,9°C	Não	6 mm
2179	28,6°C	Sim	7,3°C	19,8°C	12,5°C	21,3°C	Não	7 mm
2530	27,9°C	Sim	13,9°C	26,4°C	12,5°C	14,0°C	Não	4 mm
2525	43,3°C	Sim	10,8°C	21,0°C	10,2°C	32,5°C	Não	2 mm
2558	35,4°C	Sim	9,5°C	25,5°C	16,0°C	25,9°C	Não	12 mm
2546	35,7°C	-	9,8°C	17,8°C	8,0°C	25,9°C	Não	6 mm
2533	29,9°C	-	14,6°C	19,6°C	5,0°C	15,3°C	Não	6 mm
2451	32,0°C	-	6,4°C	14,0°C	7,6°C	25,6°C	Não	6 mm
2558	32,3°C	Sim	9,6°C	25,5°C	15,9°C	22,7°C	Não	9 mm
2036	35,3°C	Sim	9,4°C	17,4°C	8,0°C	25,9°C	Não	5 mm
2555	27,2°C	-	12,5°C	17,9°C	5,4°C	14,7°C	Não	7 mm
2574	27,2°C	Sim	9,1°C	21,8°C	12,7°C	18,1°C	Não	10 mm
2564	32,0°C	Sim	9,7°C	28,0°C	18,3°C	22,3°C	Não	5 mm
4004	29,2°C	-	16,8°C	27,7°C	10,9°C	12,4°C	Sim	20 mm
-	28,3°C	Não	20,8°C	29,7°C	8,9°C	7,5°C	Sim	38 mm
2341	29,3°C	Sim	17,2°C	19,8°C	2,6°C	12,1°C	Não	4 mm
952	24,5°C	Não	18,5°C	20,0°C	1,5°C	6,0°C	Sim	33 mm

3.1. Resultados das Análises Referentes à Amplitude Térmica e Diferença de Temperatura.

Como um dos pontos a ser analisado pela proposta do artigo visa a influência da temperatura no desenvolvimento das trincas, foram acrescentados aos dados, os valores de temperatura livre de tensão dos trilhos calculados pelo sistema VERSE, com

abrangência sobre o local da fratura, assim como os valores referentes às temperaturas ambientes mínimas e máximas diárias.

As aplicações de trilhos longos soldados feitas em temperaturas abaixo dos limites da faixa de temperatura neutra, acarretam a compressão do trilho quando a temperatura ambiente se aproxima da temperatura média, provocando tendência a flambagem da linha, já quando o trilho é instalado na via com temperatura acima da faixa de temperatura neutra, provoca tensão de tração no trilho quando sua temperatura diminui, propiciando maior facilidade na propagação de trincas já existentes ou nucleação de novas trincas.

Para todas as fraturas que apresentaram afastamento entre as faces, o que evidencia a tensão de tração no trilho, percebeu-se que a amplitude térmica ambiente pode ser fator importante para a ocorrência de fratura, mas sozinha, não é fator determinante para a ocorrência de fratura, pois houveram eventos onde a amplitude térmica ambiente foi em torno de 2,5° C, o que não afetaria as condições de trabalho do trilho de forma considerável, porém a diferença de temperatura entre a temperatura ambiente mínima e a temperatura livre de tensão calculada pelo sistema VERSE neste mesmo evento foi de 14,9° C, sendo esse o episódio, o de menor diferença de temperatura analisado neste contexto. A Figura 5 exemplifica uma fratura que apresentou afastamento entre as faces.



Figura 5 - Fratura com afastamento entre as faces

Para o evento supracitado, a variação do comprimento da barra de trilho pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

em que

ΔL :	Variação de comprimento do material;
L_0 :	Comprimento inicial da barra do trilho;
α :	Coefficiente de dilatação linear;
ΔT :	Variação de temperatura;

Nesse caso, considerando L_0 como sendo o comprimento de 200 metros, que é a distância máxima de abrangência para cada lado do ponto de medição da temperatura neutra do trilho, conforme procedimento adotado pela MRS Logística e o coeficiente de dilatação linear igual a $11,7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, temos que para a variação de temperatura de $-14,9^\circ\text{C}$ o trilho contraiu aproximadamente 35 milímetros.

Por outro lado, um local onde o sistema VERSE apontou a tendência de fratura, registrou uma diferença de temperatura de $-32,5^\circ\text{C}$, o que corresponderia à uma contração da barra de aproximadamente 76 milímetros, considerando o mesmo comprimento da barra e mesmo coeficiente de dilatação linear.

Os pontos verificados na condição de afastamento entre as faces da fratura possuíam amplitude térmica ambiente média em torno de $10,9^\circ\text{C}$ e diferença média entre a temperatura neutra do trilho dada pelo sistema VERSE em relação à temperatura ambiente mínima, próxima à $21,2^\circ\text{C}$.

Das fraturas analisadas onde houve o afastamento das faces, 58% delas ocorreram em momentos onde as temperaturas ambiente eram menores que 10°C , o que é coerente com as informações dos históricos da MRS Logística, que mostram invariavelmente maior número de fraturas durante o período de inverno, porém isso também não é fator determinante para a ocorrência de fraturas, já que os demais 42% de fraturas com afastamento das faces ocorreram em condições de temperaturas ambientes mínimas maiores que 15°C .

3.2. Resultados das Análises Referentes aos Desnivelamentos Longitudinais.

Nesta análise, assume-se que o trilho se comporte como uma viga biapoiada em alicerce linear elástico, representando o lastro de suporte (Hetenyi, 1983). A teoria da viga para crescimento de defeitos em trilhos é descrita em detalhes nas referências (Orringer, 1986, 1988).

Nessa condição de viga biapoiada, surgem componentes fletoras verticais devido ao carregamento imposto ao trilho pela passagem das rodas, onde são geradas tensões de compressão no boleto e de tração no patim. Para o trilho modelado como uma viga em fundação elástica, a máxima tensão de compressão no boleto ocorre diretamente abaixo do carregamento da roda e esse fenômeno é referido como flexão reversa.

Para a análise do efeito do desnivelamento longitudinal no crescimento das trincas, foram usados dados apenas das fraturas que ocorreram sem o afastamento entre suas faces, conforme ilustrado pela Figura 6. Dessa forma, a componente térmica pode ser considerada praticamente nula.

A temperatura ambiente mínima nas amostras ficou acima dos 15°C e a diferença entre a temperatura neutra calculada pelo sistema VERSE e a temperatura ambiente mínima, assim como a amplitude térmica, não passaram de 10°C .

Por outro lado, nessas fraturas sem separação das faces, foram observadas oscilações no nivelamento longitudinal, que não foram verificadas nas fraturas com separação das faces.



Figura 6 -Fratura sem a separação das faces

Essas oscilações foram apontadas pelo sistema VTI, pelo método M.C.O. em corda de 3 metros e apresentaram amplitudes em torno de 10 milímetros que se repetiram durante um determinado tempo antes da fratura. Os mesmos pontos também possuem indicações de oscilações longitudinais no sistema ATGMS que também utiliza o método de cálculo por M.C.O., porém a referência é em corda de 20 metros, onde foram observadas amplitudes maiores que 38 milímetros.

Segundo Talbot (*American Railway Engineering Association*, 1918), mesmo que uma via esteja bem conservada, haverá pequenas deflexões entre o trilho e a placa de apoio, entre esta e o dormente, e entre esse último e o lastro, cujos valores variam de 0,254 milímetros a 25,4 milímetros ou até mais. Para uma linha principal, em condições normais, o valor médio de deflexão é de 1,63 mm.

4. CONCLUSÕES

Com base na análise dos dados, destacou-se que a diferença entre a temperatura neutra do trilho e a temperatura ambiente mínima é mais relevante para a ocorrência de fratura por tração, que a amplitude térmica ambiente, pois em todos os casos, a amplitude térmica ambiente era menor que a diferença da temperatura e a diferença de temperatura crítica avaliada para a ocorrência de fraturas por tração térmica começa aos 14,9° C.

Ocorreram fraturas em pontos onde os trilhos estavam instalados dentro da faixa de temperatura neutra conforme relatório do sistema VERSE, no entanto, a diferença de temperatura em todos os casos estava acima de 20° C, ou seja, maior que a temperatura crítica indicada neste estudo, isso indica a necessidade de reavaliação da faixa de temperatura neutra de referência da região de Bom Jardim de Minas.

Os resultados apontam que se faz necessário um maior rigor na observância da faixa de temperatura neutra para a instalação dos trilhos longos soldados, pois mais de

60% dos casos das fraturas avaliadas estavam com os trilhos instalados fora da faixa de temperatura neutra determinada pela empresa.

Os dados também mostram que as fraturas onde não houve o afastamento das faces tinham tanto a amplitude térmica quanto a diferença de temperatura menores que 12,5° C, ou seja, menores que a diferença de temperatura crítica apontada neste estudo. Em todos esses casos haviam oscilações no nivelamento longitudinal apontadas pelos sistemas VTI e ATGMS, demonstrando que o efeito do esforço vertical causado pela deflexão dos trilhos foi o fator determinante para a ocorrência da fratura, principalmente ao se considerar que os defeitos no patim do trilho podem reduzir a resistência mecânica aos esforços verticais dos trilhos em até 75%, reduzindo também o tempo entre o surgimento da trinca até a fratura, dificultando ainda mais a detecção pelos sistemas de inspeção.

A detecção de oscilações no nivelamento longitudinal pelos dois sistemas, VTI e ATGMS em um mesmo ponto da via, deve ser utilizada nas análises de degradação da via para indicar pontos com probabilidade de ocorrência de fraturas devido ao esforço vertical excessivo nos trilhos, auxiliando no direcionamento estratégico de manutenção da via e consequentemente, redução do número de fraturas.

5. AGRADECIMENTOS

O autor agradece a MRS Logística, ao Instituto Militar de Engenharia e ao Professor Dr. Domingos José Minicucci por todo apoio prestado durante a execução deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

BILILAWAL, R. A.; MALIK, M. S.; MILENA, M. B.; ALI, H. T.; VUSUF, M. D.; AHMAD, S.M. **Pixel frequency-based railroad surface flaw detection using active infrared thermography for structural health monitoring**. Elsevier, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/journal/case-studies-in-thermal-engineering>>.

Acesso em 27 de set. de 2023.

CERNIGLIA, D.; GARCIA G.; GIRARDI, G.; KALAY, S. **The development and commissioning of a laser-based ultrasonic rail inspection system**. TTCI, 2009. Disponível

em: <https://www.researchgate.net/publication/290569906_The_development_and_commissioning_of_a_laser-based_ultrasonic_rail_inspection_system>. Acesso em 04 de jun. 2009.

CHRISTOPH, T. C.; OSWALD-TRANT, B.; ECK, S. **Inductive thermography as non-destructive testing for railway rails**. MDPI, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/3/1003#:~:text=Inductive%20thermography%20has%20great%20potential,tool%20for%20characterizing%20head%20checks.>>. Acesso em 27 de set. de 2023.

GRIFFITHS, D. **Technote investigation of rail defect**. MRS Logística, Juiz de Fora, 2011.

NABAIS, R.J.S. **Manual básico de engenharia ferroviária**. Oficina de Textos: São Paulo, 2015.

NUNES, L. F.; REIS, R. H. M.; SERPA, J. C.; BRANDÃO, L. P. M. **Recuperação das camadas de deformação superficial formadas no trilho durante o contato roda-trilho.** Congresso Rodoferroviário Português, 2022. Disponível em: <https://10crp.crp.pt/wp-content/uploads/2022/07/paper_159.pdf>. Acesso em 23 de nov. de 2023.

PAIVA, C.E.L. **Super e infraestruturas de ferrovias: Critérios para projeto.** Editora Elsevier: São Paulo, 2016.

QUINN, G. R. **Detecting and sizing defects in railroad track using the ultrasonic and induction test methods.** Wheel Rail Interaction, 2012.

SCALEA, F. L.; BARTOLI I.; RIZZO P.; McNAMARA J. **On-line high-speed rail defect detection.** Federal Railroad Administration, 2004. Disponível em: <https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/fra_net/1285/ord0416.pdf>. Acesso em: 04 de nov. 2015.

SCHNEIDER, E. L.; REGULY, A. **Análise da vida útil de trilhos com defeitos transversais desgastados em serviço.** Feevale, 2014. Disponível em: <<https://periodicos.feevale.br/seer/index.php/revistatecnologiaetendencias/article/view/1336/2070>>. Acesso em 01 de out. de 2023.

VAHID, H.; SEDIGHE M. **Detection of laser generated ultrasonic waves in ablation regime by plane and confocal fabry-perot interferometers.** IRNDT, 2016. Disponível em: <<https://www.ndt.net/article/IranNDT2016/papers/T13102.pdf>>. Acesso em: 26 de set. de 2023.

TRANSVERSE DEFECT IN THE RAIL FOOT, CAUSES, DETECTION AND CORRELATION WITH NEUTRAL TEMPERATURE AND TRACK GEOMETRY

Abstract

This article shows some failure modules that can give rise to transverse cracks in the rail foot and possible methodologies for detecting this type of discontinuity and respective limitations. The research addressed the contribution of transverse defect in the rail foot on reduction of mechanical resistance to vertical forces on the rails, the influence of temperature on the growth of this type of defect and correlation with longitudinal unevenness of the track.

Keywords: Temperature; Geometry; Rail foot.