

# **ANALISE DE FALHAS VIA TEORIA DE HERTZ: UM ESTUDO DE CASO APLICADO AOS TRILHOS DA ESTRADA DE FERRO PARANÁ OESTE**

Discente: Lucas de Paula

Email: lpaula@minha.fag.edu.br

Orientador: Bruno dos Santos

## **RESUMO**

As ferrovias são essenciais para o setor de logística do país, entretanto, o modal ferroviário sofre com a falta de investimento e manutenções periódicas. Isso reflete diretamente no alto custo de reparos nos trilhos, levando em algumas situações a inatividade da via férrea. A manutenção periódica prolonga a vida útil da via uma vez que, o contato roda trilho provoca defeitos superficiais, e, a manutenção deve ser feita ainda no início das fissuras formadas pela fadiga por contato. O presente trabalho tem como objetivo analisar as falhas via teoria de hertz no contato pontual, aplicado a um caso real, sendo o objeto de estudo o trilho TR-45 utilizado pela Estrada de Ferro Paraná Oeste. Assim, a modelagem do problema de Hertz será realizada por meio das especificações dos materiais e as geometrias do sistema trilho-roda. Baseado nisso, utiliza-se o ambiente do software GNU *Octave* para determinar as tensões de Hertz do contato pontual. Foi constatado que as tensões obtidas no contato pontual não são suficientes para gerar deformações plásticas no material, já a amplitude da variação de tensão de corte ortogonal vai desencadear falhas relacionadas a fadiga no trilho depois de um número de ciclos.

**Palavras-chave:** Fadiga por contato. Mecânica de Hertz. Trilho TR-45. Contato Pontual. Ferroeste.

## **1. INTRODUÇÃO**

É grande o volume de commodities recebidos nos portos nacionais por meio das ferrovias brasileiras. E, segundo a Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF, 2022), esses grandes volumes recebidos permitem a elevação contínua das exportações, ampliando o superávit do comércio exterior brasileiro. Atualmente, 40% das commodities agrícolas chegam aos portos por ferrovia, e esse número é ainda mais acentuado quando se trata de açúcar e minérios, representando respectivamente 60% e 90% (ANTF, 2022).

O que denota a importância do funcionamento da malha ferroviária brasileira é a necessidade de evitar sua inoperância.

Um dos principais problemas enfrentados em virtude da extensão da malha ferroviária é a demora em perceber as falhas nos trilhos, que quando não descobertas no estágio inicial acarretam danos irreversíveis, necessitando da substituição do trilho elevando o custo na manutenção da via.

Partindo do fato cria-se a necessidade da análise de falhas via teoria de Hertz, onde será elaborado um estudo de caso aplicado ao trilho TR-45 utilizado pela Ferroeste, quantificando a fadiga de contato, no sistema roda-trilho.

No desenvolvimento do trabalho, serão abordadas propriedades, e as geometrias dos sólidos, a fim de evidenciar as tensões nos trilhos através de modelos matemáticos e implementação no ambiente do software *Octave*.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 PRODUÇÃO E TRANSPORTE**

O sistema ferroviário tem como característica a capacidade de transporte de grandes volumes com um uso racional de energia, especificamente em casos onde as distâncias entre dois pontos são de médias a grandes. Além de que, apresenta um menor índice de acidentes, furtos e roubos, sendo considerado mais seguro (ANTT, 2022).

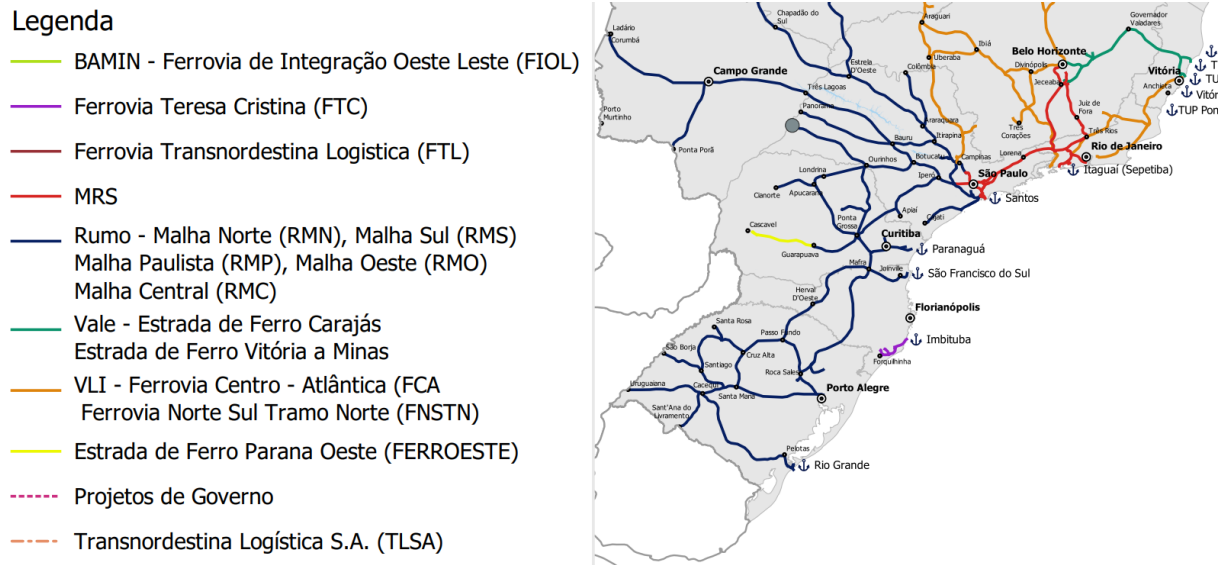
O transporte ferroviário consiste em um transporte rápido, econômico e que polui menos, e embora as ferrovias tenham grande relevância para o transporte de commodities (MEDEIROS, 2017), este modal não é priorizado no Brasil.

### **2.2 A VIA FÉRREA**

Apesar deste modal não ser o priorizado, a malha ferroviária brasileira em operação possui uma extensão de 29.320Km (ANTF, 2021), com uma extensão total de 34.207Km sendo que uma parte dessas ferrovias estão fora de operação devido à falta de investimentos governamentais.

Atualmente o Brasil possui 11 concessionárias associadas a ANTF que possuem malhas ferroviárias em operação conforme Figura 1, sendo que uma destas malhas está situada no estado do Paraná (ANTF, 2022).

**Figura 1: Concessionárias Associadas à ANTF**



Fonte: ANTF (2022)

A malha ferroviária do Estado do Paraná (Ferroeste), é composta por 2.400 km de ferrovias distribuídas em 2.039 km concessionados pelo Governo Federal à Rumo, e 248,5 km concessionados ao Governo do Estado do Paraná, cuja administração e operação é executada pela Ferroeste. Ambas as concessões têm como órgão regulador a Agência Nacional de Transporte Terrestre (FERROESTE, 2022).

A Ferroeste, deu início a sua construção no ano de 1991 e teve sua obra concluída no ano de 1994, contudo só iniciou suas operações de transporte em 1995 (FERROESTE, 2022). A malha ferroviária da Ferroeste é constituída pelo trilho Vignoli TR-45, e suas respectivas propriedades são demonstradas na tabela 1.

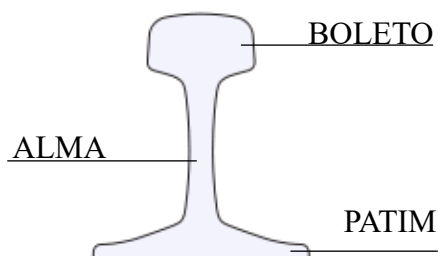
**Tabela 1 – Propriedades do Trilho TR-45**

| Propriedades                      | Valor numérico | Unidade         |
|-----------------------------------|----------------|-----------------|
| Peso Teórico                      | 44.64          | kg/m            |
| Área (A)                          | 56.90          | cm <sup>2</sup> |
| Momento de Inercia (Ix)           | 1610.81        | cm <sup>4</sup> |
| Módulo de Resistência (W): Boleto | 205.82         | cm <sup>3</sup> |
| Módulo de Resistência (W): Patim  | 249.58         | cm <sup>3</sup> |
| Carga de suporte                  | 20             | T/eixo          |

Fonte: Brasil Trilhos (2022)

A estrutura do trilho TR-45 é classificada em três áreas, a saber; Alma, Boleto e Patim, definido pela NBR 7590 (ABNT,2012), conforme Figura 2.

**Figura 2:** Partes de um trilho Vignole



Fonte: Brasil Ferroviário (2022)

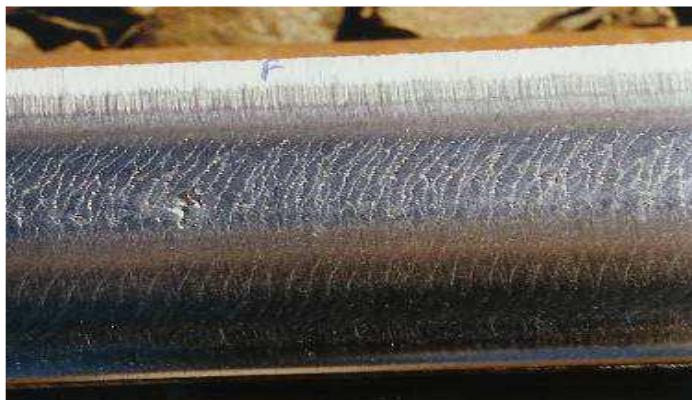
O boleto representa a região do contato roda trilho, a alma é o elemento vertical que transmite os esforços do boleto para o patim e faz a ligação dos mesmos, e o patim é a estrutura inferior alargada, que serve de base e equilíbrio dos trilhos conforme NBR 7590 (ABNT, 2012).

A ausência de manutenção de forma correta nos trilhos acarreta inúmeros problemas originados pela fadiga de contato.

### 2.3 DEFEITOS ORIGINADOS PELA FADIGA DE CONTATO

Os defeitos originados pela fadiga de contato podem evoluir para problemas maiores, inicialmente a anomalia encontrada é o Cracking, evidenciado por pequenas fissuras e rachaduras na superfície do boleto devido ao contato roda trilho (MRS LOGISTICA,2008), podendo ser observado na figura 3.

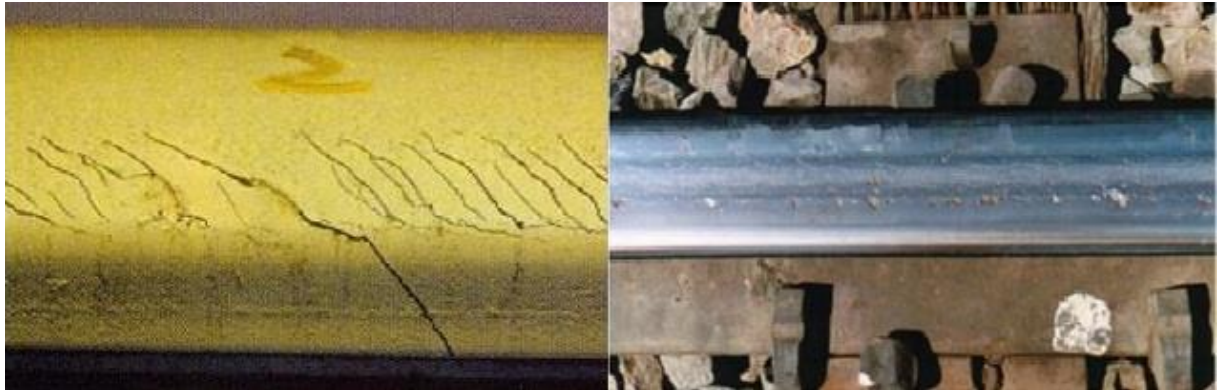
**Figura 3:** Pequenas fissuras na superfície do boleto



Fonte: Guedes (2008)

Para Coimbra (2008) o trilho sofre trincas capilares de pequenas extensões formadas no canto da bitola chamadas de Head Checks, evoluindo para o Flacking que é a escamação do boleto, quando ocorre a separação de pequenas lâminas finas de aço, interpostas sobre as trincas, mostrado na figura 4.

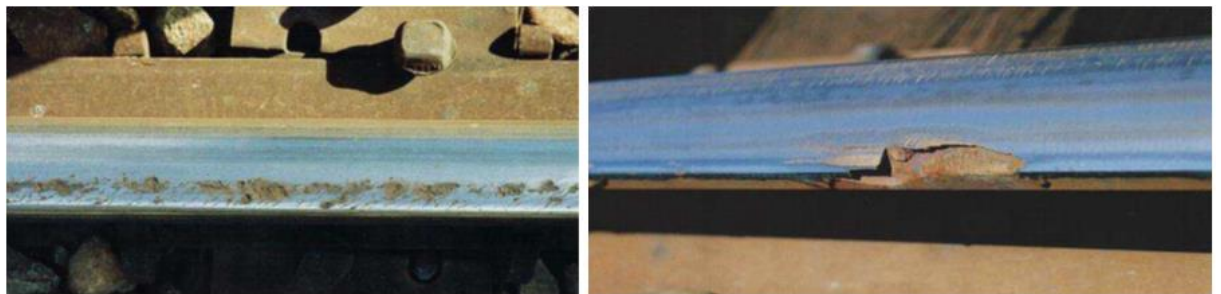
**Figura 4:** Fissuração no Canto da Bitola



Fonte: Adaptado Coimbra (2008) e Guedes (2008)

Ainda Coimbra (2008), expõe que outro defeito causado devido o contato é o Spalling, esse defeito é associado ao Flaking, e, é causado pelas altas cargas aplicadas ao aço já fragilizado pelas trincas superficiais, a partir daí o boleto começa a desprender estilhaços, podendo evoluir para Shelling, devido ao aumento na frequência em que ocorre contato, onde ocorre despedaçamento do canto do boleto conforme apresentado na figura 5.

**Figura 5:** Spalling e Shelling



Fonte: Guedes (2008)

As tensões responsáveis pelo surgimento de falhas devido a fadiga contato, são analisadas através das geometrias e propriedades dos materiais do sistema roda trilho, via Teoria de Hertz.

## 2.3 TEORIA DE HERTZ APLICADA A UM CONTATO PONTUAL

Para solucionar o problema do contato entre dois sólidos elásticos, Hertz elaborou 5 hipóteses principais (SEABRA, 2003):

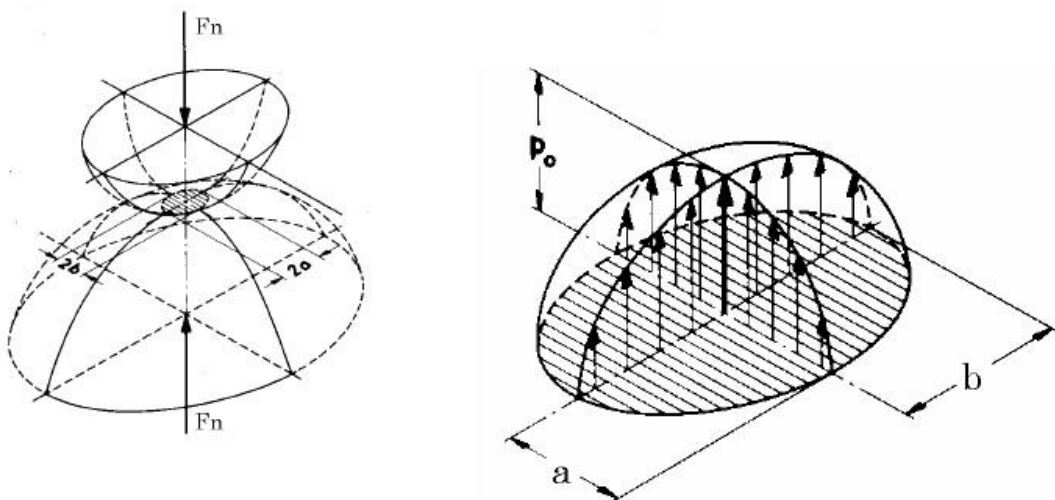
- i. Os materiais devem se comportar de acordo com a lei de Hooke, tendo um comportamento isotrópico e linear elástico;
- ii. As geometrias dos sólidos nos pontos iniciais contato são conhecidas e contínuas, e, os seus raios de curvatura ao redor do ponto inicial de contato;
- iii. As solicitações aplicadas normal, e as superfícies não transmite trações tangenciais;
- iv. As dimensões da área de contato devem ser pequenas, quando comparadas as dimensões dos sólidos em contato;
- v. As dimensões da área de contato devem ser pequenas em relação as dimensões dos raios de curvatura.

A Teoria de Hertz aplicada ao contato Roda-Trilho, é representado pelo contato pontual.

### 2.3.1 Solução do problema de Hertz para contato Pontual

A principal característica de um contato pontual é a área de contato, onde a carga é aplicada em um único ponto entre dois corpos esféricos criando uma região de contato elíptica conforme Figura 6.

**Figura 6** – Contato pontual entre sólidos



(Fonte: Seabra, 2003)

Desta forma, a geometria de contato entre os sólidos é definida pelas equações abaixo, sendo que A, B são as curvaturas equivalentes, e  $R_x$  e  $R_y$  são os raios de curvatura equivalentes, nas direções x e y, onde a razão entre as curvaturas segundo x e y é A/B.

$$A = \frac{1}{R_x} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{x_1}} + \frac{1}{R_{x_2}} \right) \quad [1]$$

$$B = \frac{1}{R_y} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{y_1}} + \frac{1}{R_{y_2}} \right) \quad [2]$$

$$\frac{A}{B} = \frac{R_y}{R_x}, \quad \frac{A}{B} \geq 1 \quad [3]$$

A semi largura do contato Hertziano “a” é definida pela equação [4].

$$a = C_a \sqrt[3]{\frac{F_n}{(A + B)E^*}} \quad [4]$$

Sendo “ $E^*$ ” o Módulo de Young Equivalente apresentado em [5], “ $F_n$ ” a solicitação atuante, “ $C_a$ ” uma constante solução do problema de Hertz.

$$\frac{1}{E^*} = \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \quad [5]$$

Sendo “ $E_1$ ” o Modulo Young do trilho e “ $E_2$ ” o Modulo de Young da roda, “ $\nu_1^2$ ” e “ $\nu_2^2$ ” relação de Poisson, ambos típicos de cada material. Para determinação da elipsidade “k”, tem-se:

$$b = \frac{a}{k} \quad [6]$$

A penetração  $\delta$  é definida pela equação a seguir, sendo constante de penetração “ $C_\delta$ ” encontrado via ábacos em função de “A/B”:

$$\delta = C_\delta \frac{F_n}{\pi a E^*} \quad [7]$$

Para a pressão média no interior do contato “ $p_m$ ” entre os sólidos e a pressão máxima de Hertz “ $p_0$ ”, temos:

$$p_m = \frac{F_n}{\pi ab} \quad [8]$$

$$p_0 = \frac{3}{2} \frac{F_n}{\pi ab} \quad [9]$$

### 2.3.2 Tensões no contato pontual

No contato pontual, os sólidos estão submetidos a uma sollicitação aplicada sobre uma pequena área elíptica com uma relação entre  $2a$  e  $2b$  conforme figura 9, e atinge seu valor máximo à superfície, contudo diminuem progressivamente à medida em que a profundidade em  $z$  aumenta. As tensões são definidas através das seguintes equações. Para encontrar a tensão de referência “ $\sigma_{ref}$ ”, utiliza-se a equação [10].

$$\sigma_{ref} = a(A + B)E^* \quad [10]$$

A tensão principal máxima “ $\sigma_{máx}$ ” é definida por [11], sendo,  $\sigma_{máx} = p_0 = \sigma_{zz}^{máx} = C_\sigma \sigma_{ref}$ , logo:

$$\sigma_{máx} = C_\sigma a(A + B)E^* \quad [11]$$

Onde “ $C_\sigma$ ”, definido através de [12].

$$C_\sigma = \frac{3k}{2\pi} \frac{1}{c_a^3} \leq 1 \quad [12]$$

As tensões de corte máxima  $\sigma_{xx}$  e  $\sigma_{yy}$ , diminuem mais depressa que  $\sigma_{zz}$  com a profundidade. Logo a tensão de corte máxima é definida de acordo com o Critério de Tresca (SEABRA, 2003).

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2}(\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}) \quad [13]$$

Tensão de corte máxima é dada por “ $\tau_{m\acute{a}x}$ ”, sendo que os valores de “ $C_\tau$ ” e “ $C_{Z_s}$ ”, são obtidos a partir de ábacos, uma vez determinado o valor de A/B.

$$\tau_{m\acute{a}x} = C_\tau \sigma_{ref} = C_\tau a(A + B)E^* \quad [14]$$

A profundidade à qual ocorre essa tensão de corte máxima “ $Z_s$ ”, é definida por:

$$Z_s = C_{Z_s} a \quad [15]$$

Considera-se o critério de von-Mises, como alternativa ao Critério de Tresca, onde obtém-se o valor máximo da tensão de corte octaédrica “ $\tau_{m\acute{a}x}^{oct}$ ”, que ocorre a mesma profundidade “ $Z_s$ ” que a tensão de corte máxima, sendo definido por [16], onde “ $C_G$ ” é definido através de ábacos:

$$\tau_{m\acute{a}x}^{oct} = C_G a(A + B)E^* \quad [16]$$

Tensões de corte ortogonal, durante o movimento de rolamento, a tensão  $\tau_{XZ}$  no ponto P vai aumentando até atingir um valor máximo positivo (para  $x/a = 1$ ) [17]. Começa a decrescer tendo valor nulo no centro do contato, continua a decrescer atingindo um valor máximo negativo (para  $x/a = -1$ ) [18]. Valores extremos de  $\tau_{XZ}$ :

$$\tau_{XZ}^{m\acute{a}x} = \tau_0, \quad \text{para } \frac{x}{a} = 1 \quad [17]$$

$$\tau_{XZ}^{m\acute{i}n} = -\tau_0, \quad \text{para } \frac{x}{a} = -1 \quad [18]$$

A profundidade em  $\tau_{XZ}$  é máximo é chamado  $Z_0$ , e a tensão de corte ortogonal máxima é sempre inferior a tensão de corte máxima (Tresca)

$$\tau_{XZ}^{m\acute{a}x} = \tau_0 < \tau_{m\acute{a}x} \quad [19]$$

Durante um ciclo de carregamento a variação de tensão de corte ortogonal é superior à variação da tensão de corte máxima.

$$\Delta\tau_{XZ}^{m\acute{a}x} = 2\tau_0; \quad \Delta\tau_{m\acute{a}x} = \tau_{m\acute{a}x}; \quad 2\tau_0 > \tau_{m\acute{a}x} \quad [20]$$

Durante um ciclo de carregamento:

$$\tau_{XZ}^{m\acute{a}x} = \tau_0 < \tau_{XZ}^{m\acute{a}x} \quad \text{mas} \quad \Delta\tau_{XZ}^{m\acute{a}x} = 2\tau_0 > \Delta\tau_{YZ}^{m\acute{a}x} \quad [21]$$

Variação máxima de tensão de corte ortogonal.

$$\text{Zona A: } e = \frac{a}{b} \leq 1 \quad \Delta\tau_{XZ}^{m\acute{a}x} = 2\tau_0 = C_{\tau_0} a(A+B)E^* \quad [22]$$

$$\text{Zona B: } e = \frac{b}{a} > 1 \quad \Delta\tau_{XZ}^{m\acute{a}x} = 2\tau_0 = C_{\tau_0} b(A+B)E^* \quad [23]$$

Profundidade máxima da tensão de corte ortogonal.

$$\text{Zona A: } e = \frac{a}{b} \leq 1 \quad Z_0 = C_{z_0} a \quad [24]$$

$$\text{Zona B: } e = \frac{b}{a} > 1 \quad Z_0 = C_{z_0} b \quad [25]$$

### 3. METODOLOGIA CIENTÍFICA

Serão expostas inicialmente as dimensões geométricas e as propriedades dos materiais e posteriormente será definido os parâmetros necessários para teorias de Hertz, no caso do contato pontual.

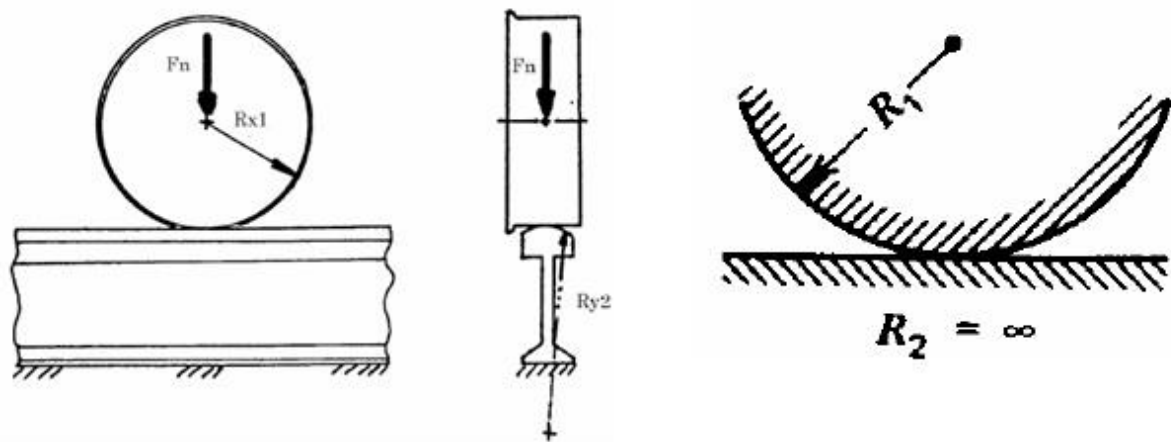
Subsequentemente, será empregado o software *Octave* como método computacional. Fase na qual, será desenvolvido o algoritmo, para simulação e aplicação dos dados nos modelos matemáticos apresentados.

A partir da simulação os resultados obtidos serão expostos via tabela e gráfico, com a finalidade de analisar falhas devido a fadiga de contato, e o comportamento do trilho aplicado um contato pontual.

### 3.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE HERTZ

Para formulação do problema de Hertz, é necessário definir os parâmetros geométricos de cada sólido no contato roda trilho,  $R_{x_1}$ ,  $R_{x_2}$ ,  $R_{y_1}$  e  $R_{y_2}$ , e a solicitação atuante  $F_n$  conforme figura 7.

**Figura 7** – Contato pontual Roda-Trilho



Fonte: Seabra (2003)

Para definir os parâmetros geométricos do trilho TR-45, utiliza-se um catálogo disponibilizado no site do fabricante Brasil Trilhos, para os parâmetros geométricos da roda CJ 33” utiliza-se as dimensões padronizadas de rodas ferroviárias conforme norma AAR M-107, com seus respectivos valores apresentados na tabela 2.

**Tabela 2:** Dados para formulação do problema de Hertz

| Parâmetro           | Símbolo   | Valor    | Und |
|---------------------|-----------|----------|-----|
| Raio da roda em x   | $R_{x_1}$ | 419,1    | mm  |
| Raio da roda em y   | $R_{y_1}$ | $\infty$ | adm |
| Raio do trilho em x | $R_{x_2}$ | $\infty$ | adm |
| Raio do trilho em y | $R_{y_2}$ | 355,6    | mm  |
| Solicitação atuante | $F_n$     | 196.13   | kN  |

Fonte: Autor (2022)

Outros fatores necessários para formulação do problema de Hertz, são as propriedades mecânicas dos materiais, logo, a norma NBR 7590 define os parâmetros construtivos do aço

para o trilho TR-45, e as recomendações construtivas das rodas nas ferrovias brasileiras seguem a norma da Associação de Ferrovias Americanas (AAR), através das especificações M-107/M208, sendo o trilho e a roda equivalentes ao aço ASTM A759 conforme tabela 3.

**Tabela 3:** Equivalência dos sólidos

| <b>Norma</b> | <b>Classificação</b> | <b>Teor de Carbono (%)</b> | <b>Dureza Brinell (HB)</b> |
|--------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| NBR 7590     | TIPO 7               | 0,70-0,80                  | 310-340                    |
| AAR          | C M-107/M-208        | 0,67-0,77                  | 321-363                    |
| ASTM         | A759                 | 0,67-0,84                  | 321-388                    |

Fonte: Autor (2022)

A tabela 4 apresenta as propriedades mecânicas para o aço ASTM A759 necessários para o cálculo do Modulo de Elasticidade Equivalente ( $E^*$ ).

**Tabela 4:** Propriedades aço ASTM A759

| <b>Propriedades</b>    | <b>Símbolo</b> | <b>Valor</b> | <b>Und</b> |
|------------------------|----------------|--------------|------------|
| Módulo de Young        | $E$            | 215          | Gpa        |
| Coeficiente de Poisson | $\nu$          | 0,29         | adm        |

Fonte: Autor (2022)

### 3.2 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Realiza-se a implementação computacional por intermédio do software GNU Octave (versão 7.2.0), e executados em um computador com processador AMD Ryzen 5 3550H with Radeon Vega Mobile Gfx (2.10 GHz) e memória RAM de 16GB.

Os dados da teoria de Hertz no contato pontual, serão aplicados no código matemático, no ambiente do software *Octave*, apresentando os seguintes resultados.

## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

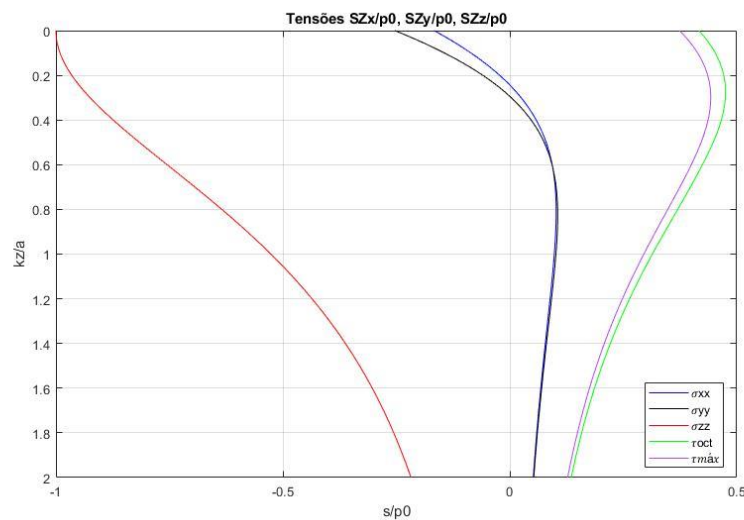
A variação de tensões no eixo OZ pode ser observado na figura 8. A tensão de maior intensidade é  $\sigma_{zz}$ , independente da profundidade, logo  $\sigma_{zz} = \sigma_{m\acute{a}x}$ , sendo  $\sigma_{m\acute{a}x} = p_0$ , indicado na tabela 5. As tensões  $\sigma_{xx}$  e  $\sigma_{yy}$ , atingem o seu valor máximo na superfície em  $Z = 0$ , no entanto suas intensidades são sempre inferiores a  $\sigma_{zz}$  como visto na figura 8.

**Tabela 5:** Dados da teoria de Hertz para o contato pontual

| Propriedades                                        | Símbolo                    | Valor  | Und |
|-----------------------------------------------------|----------------------------|--------|-----|
| Modulo de Young equivalente                         | $E^*$                      | 117,37 | Gpa |
| Curvatura equivalente x                             | $A$                        | 1,4061 | m   |
| Curvatura equivalente y                             | $B$                        | 1,1930 | m   |
| Razão entre as curvaturas                           | $A/B$                      | 1,1786 | m   |
| Semi largura de Hertz em x                          | $a$                        | 7,4293 | mm  |
| Semi largura de Hertz em y                          | $b$                        | 8,2892 | mm  |
| Pressão média de Hertz                              | $p_m$                      | 1,0137 | Gpa |
| Pressão máxima de Hertz                             | $p_o$                      | 1,5206 | Gpa |
| Tensão de referencia                                | $\sigma_{ref}$             | 2,266  | Gpa |
| Tensão principal máxima                             | $\sigma_{m\acute{a}x}$     | 1,5208 | Gpa |
| Tensão de corte máxima                              | $\tau_{max}$               | 521,18 | Mpa |
| Profundidade onde atua a tensão de corte máxima     | $Z_s$                      | 3,14   | mm  |
| Penetração                                          | $\delta$                   | 0,1595 | mm  |
| Tensão de corte octaédrica máxima                   | $\tau_{m\acute{a}x}^{oct}$ | 475,86 | Mpa |
| Tensão de corte ortogonal máxima                    | $\tau_0$                   | 328,57 | Mpa |
| Variação da tensão de corte ortogonal máxima        | $2\tau_0$                  | 657,14 | Mpa |
| Profundidade onde atua a tensão de corte ortogonais | $Z_0$                      | 1,968  | mm  |

Fonte: Autor (2022)

**Figura 8:** Distribuição de tensões atuantes no interior de um sólido em contato pontual



Fonte: Adaptado de GNU Octave (2022)

## 5. CONCLUSÃO

O presente documento consiste no trabalho de conclusão de curso para o programa de bacharelado em Engenharia Mecânica do Centro Universitário FAG, com o tema de pesquisa “Análise de falhas via teoria de Hertz: um estudo de caso aplicado aos trilhos da Estrada de Ferro Paraná Oeste”, sob orientação do Prof. Me. Eng. Bruno dos Santos.

O objetivo do trabalho, foi analisar as tensões via teoria de hertz no contato pontual, aplicado a um caso real, sendo o objeto de estudo o trilho TR-45 utilizado pela Estrada de Ferro Paraná Oeste. Para o desenvolvimento dessas análises, foram identificados os parâmetros geométricos e as propriedades dos sólidos em contato. Com a definição desses parâmetros, foi possível aplicar a simulação via software *Octave*®, com a finalidade de elaborar o gráfico de tensões e gerar os resultados necessários para a análise.

Os resultados nos mostram que a tensão “ $\tau_{max}$ ” equivale a 521,18 Mpa, e “ $\tau_{max}^{oct}$ ” atinge um valor de 475,86 Mpa, sendo que ambas ocorrem a mesma profundidade “ $Z_s$ ” correspondente à 3,14mm.

As tensões que ocorrem no interior do contato “ $\tau_{max}$ ” e “ $\tau_{max}^{oct}$ ”, são indicadores para critérios de avaria ou falha associados ao início da deformação plástica do material, no entanto as tensões não são suficientes para gerar uma deformação plástica no material, pois segundo a norma, o escoamento mínimo do trilho, para o aço liga de media resistência tipo 7, é de 580 Mpa sendo superior a “ $\tau_{max}$ ”.

Sabe-se que a profundidade que ocorre a tensão de corte ortogonal máxima “ $Z_0$ ” equivale a 1,968mm, onde a tensão de corte ortogonal máxima “ $\tau_0$ ” corresponde a 328,57 Mpa, sendo inferior à tensão de corte máxima “ $\tau_{max}$ ”, no entanto, durante um ciclo de carregamento, a variação de tensão de corte ortogonal “ $2\tau_0$ ” atinge 657,14 Mpa, sendo superior à tensão de corte máxima “ $\tau_{max}$ ”. Além de que, a amplitude de “ $2\tau_0$ ” é superior ao limite de escoamento do aço conforme a norma, sendo um grande indicador do surgimento de falhas relacionadas a fadiga por contato.

## REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7590**: Trilho Vignole – requerimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 25 p.

ASSOCIAÇÃO AMERICANA DE FERROVIAS - AAR (ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROAD)-**Manual of Standards and Recommended Practices – Wheel and Axles**, AAR M-107/M-208, USA, 2009.

BUDYNAS, R. G.; MISCHKE, C. R.; SHIGLEY, J. E. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 500 p.

COIMBRA, M. do V. **Modos de falha dos componentes da via permanente ferroviária e seus efeitos no meio ambiente**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2008.

CONSTABLE, T.; BOELEN, R.; PERELOMA, E. V. **The quest for improved wheel steels enters the martensitic phase**. In: Proc. of International Wheelset Congress, n.14, 2004, Orlando. 14p.

GUEDES, Patrick. **Análise de falhas das fraturas de trilhos: o caso da ferrovia do aço**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2008.

JOHNSON, K.L. Contact Mechanics. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1985.

WILLIAMS, J.A. **The influence of repeated loading, residual stresses and shakedown**. Tribology International, 38, p. 786–797, 2005.

MEDEIROS, L. F. M. **Matriz de transportes brasileira: análise dos benefícios do modal ferroviário e uma breve comparação a países desenvolvidos**. Engenharia Civil-Tubarão, 2017.

SEABRA, Jorge H. **Mecânica do contacto hertziano**. 2. ed. Porto: FEUP, 2003. 138 p.

MRS LOGÍSTICA S/A (2008), “**Guia de identificação de defeitos e fraturas em trilhos**”.

VILAÇA, Rodrigo. **Importância do setor ferroviário no cenário logístico e econômico do País**. Jornal Fique por Dentro da CNT. Publicado em, v. 3, n. 10, p. 05, 2005.