UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

VINICIUS GALLINA FONSECA

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE DEFEITOS EM RODAS FERROVIÁRIAS

VITÓRIA 2017 VINICIUS GALLINA FONSECA

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE DEFEITOS EM RODAS FERROVIÁRIAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Cesar Bozzi

VITÓRIA 2017

VINICIUS GALLINA FONSECA

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE DEFEITOS EM RODAS FERROVIÁRIAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio César Bozzi Universidade Federal do Espírito Santo Orientador

Luiz Carlos Bragatto Junior, M.Sc. Universidade Federal do Espírito Santo Examinador

Leonardo Belichi Vieira, M.Sc. Universidade Federal do Espírito Santo Examinador

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e discernimento concedidos, sem os quais eu não teria sido capaz de transpor as dificuldades surgidas ao longo deste trabalho e de toda a graduação.

À minha família, pela dedicação, o apoio e, principalmente, pelos bons exemplos que meus pais, Alberto e Lúcia, foram, para mim, nesta etapa e durante toda a vida; ao meu irmão, Gabriel, pela companhia e paciência.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antônio César Bozzi, pela oportunidade oferecida, pelas sugestões, paciência e confiança em meu trabalho.

Ao Professor José Luiz Borba, do Departamento de Engenharia Elétrica, por disponibilizar a disciplina Tração Ferroviária aos alunos da Engenharia Mecânica, por contribuir com parte fundamental da bibliografia usada e pelo conhecimento compartilhado.

Aos amigos da graduação que me acompanharam ao longo dos últimos cinco anos, pela contribuição com as discussões sobre as disciplinas, pelo conhecimento agregado, pelas montanhas movidas, e, acima de tudo, pela amizade.

RESUMO

A alta eficiência energética no transporte ferroviário deve-se às baixas perdas de energia no contato de rolamento entre as superfícies da roda e do trilho, que se tocam apenas em uma pequena área de contato, equivalente à de um círculo de 13 mm de diâmetro. Nessa pequena área, elevadas tensões são observadas, as quais, associadas a fatores tribológicos e metalúrgicos, promovem diferentes mecanismos de degradação. Esses mecanismos de degradação levam ao surgimento de defeitos em rodas ferroviárias, o que gera maiores custos de manutenção pela redução da vida de rodas e trilhos, aumento no consumo de combustível e prejuízo à segurança. Devido à relevância desses fenômenos e à relação com o contato roda-trilho, diversos manuais, normas e handbooks abordam o tema, tratando, inclusive, sobre os defeitos em rodas. A descrição desses defeitos, no entanto, é basicamente morfológica e apresenta superficialmente as relações com os mecanismos causadores. Artigos técnicos tendem a descrever mais detalhadamente os mecanismos envolvidos na degradação dos materiais de rodas e trilhos, no entanto, são geralmente baseados em ensaios de laboratório e nem sempre comprovam a ocorrência, em campo, dos mecanismos observados. A partir dessa bibliografia dispersa, este trabalho reúne e apresenta os principais mecanismos de degradação e defeitos associados às rodas ferroviárias. Além disso, baseadas na bibliografia, relações de causalidade entre os mecanismos de degradação, fatores operacionais e os defeitos são estabelecidas e apresentadas. Alguns dos pontos conflitantes mais relevantes entre as diferentes referências são, também, abordados ao longo do trabalho.

ABSTRACT

The high energetic efficiency on railway transportation is dued to the low energy losses on the rolling contact between the surfaces of wheel and rail, wich touch only at a small contact patch, whose area is equivalente to that of a 13 mm diameter circle. In that small area, high stresses can be noticed, and that, along with tribological and metalurgical factors, lead to different degradation mechanisms. These degradation mechanisms result in defects arising in railway wheels, leading to higher maintenance costs by reducing the life of wheels and rails, increase in fuel consumption and reduced safety. Due to the relevance of these phenomena and the relation with wheel-rail contact, several manuals, standards and handbooks address the subject, also adressing wheel defects. The description of these defects, however, is basically morphological and the relation with causative mechanisms superficially presented. Technical papers tend to describe in more detail wheel and rail materials' degradation machanisms, however, they are usually based on laboratory tests, and do not always prove the actual occurrence of the observed mechanisms. From this dispersed bibliography, this work brings together and presents the main degradation mechanisms and defects of railway wheels. Furthermore, based on the literature, causal relations between degradation mechanisms, operational factors and defects are established and presented. Some of the most relevant conflicting points between the different references are also addressed throughout the work.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático de uma roda ferroviária. Fonte: Adaptado de [4]16
Figura 2 - Microestrutura de roda classe B. Microscopia óptica. Fonte: Adaptado de
[12]
Figura 3 - Microestrutura de rodas classe C. (a) Resfriamento lento, com perlita e
ferrita. (b) Resfriamento rápido, com martensita revenida. Fonte: Adaptado de [13] 18
Figura 4 – Perfil típico de trilho vignole. Fonte: Adaptado de [14]
Figura 5 - Microestruta perlítica do boleto do trilho. Microscopia óptica, trilho grau
260 (0,81 %C). Fonte: [1]20
Figura 6 - Franjas de interferência no contato entre duas lentes cilíndricas cujos
eixos estão orientados a 45°. (a) Descarregado. (b) Carregado. Fonte: Adaptado de
[15]21
Figura 7 - Contato Hertziano genérico entre dois sólidos: (a) Corpos em contato. (b)
Área de contato elíptica. Fonte: [1]22
Figura 8 - Fatores de correção para o contato elíptico. Fonte: [1]25
Figura 9 - Magnitude e localização da tensão máxima de cisalhamento. Fonte: [1]. 25
Figura 10 - Contato com deslizamento entre um corpo curvo e um plano. Fonte:
Adaptado de [15]26
Figura 11 - Contato entre cilindros: (a) Tensões subsuperficiais ao longo do eixo de
simetria, (b) curvas de nível da tensão de cisalhamento principal. Fonte: [15]29
Figura 12 - Tensões na superfície devido à força de atrito. Fonte: [1]
Figura 13 - Curvas de nível da tensão principal de cisalhamento na subsuperfície do
contato com deslizamento. Fonte: [15]30
Figura 14 - Aderência e escorregamento devido às deformações elásticas. Fonte:
[16]32
Figura 15 - Relação entre força de atrito (μN) e escorregamento relativo (λ). Fonte:
Adaptado de [2]
Figura 16 - Velocidades e ângulo de ataque na vista superior de uma roda
deslocando-se sobre um trilho. Fonte: [16]
Figura 17 - Escorregamento e força laterais num trecho tangente. Fonte: Adaptado
de [2]
Figura 18 - Representação do spin devido à conicidade da roda. Fonte: [16]35

Figura 19 - Forças tangenciais e microescorregamento (creepage) na região de
contato. Fonte: [16]
Figura 20 - Respostas do material a diferentes intensidades de carregamento cíclico.
Fonte: Adaptado de [18]37
Figura 21 - Diagrama de Shakedown. Fonte: Adaptado de [10]
Figura 22 - Representação da nucleação e crescimento de trinca de FCR a partir de
defeito subsuperficial. Adaptado de [1]40
Figura 23 - Representação do crescimento de trincas superficiais potencializado pela
presença de fluidos. Fonte: Adaptado de [3]42
Figura 24 - Micrografia da superfície desgastada em ensaio twin disc com
características de desgaste oxidativo. Fonte: Adaptado de [7]44
Figura 25 - Micografia da superfície desgastada, seção na direção de rolamento,
ensaio <i>twin disc</i> . Fonte: Adaptado de [7]46
Figura 26 - Calo de roda. Fonte: [1]49
Figura 27 - Lascamento (spall) de martensita em calos de roda formados em duas
rodas de um mesmo rodeiro. Fonte: [10]50
Figura 28 - Roda afetada por <i>shelling</i> . Fonte: [1]51
Figura 29 - Relação entre a direção do microescorregamento resultante e a direção
das trincas de FCR na superfície. Fonte: Adaptado de [10]51
Figura 30 - Estágio intermediário de shelling sendo formado a partir do lascamento
(spall) em um calo de roda. Fonte: [10]52
Figura 31 - Spalling na pista de rolamento sendo formando a partir de trincas numa
região de martensita. Fonte: [2]53
Figura 32 - Roda com trincas térmicas (região central da pista de rolamento,
próximas à fita adesiva), trincas de FCR são observadas à esquerda. Fonte:
Adaptado de [1]54
Figura 33 - Trincas térmicas apresentando separação entre as faces das trincas,
região do friso da roda. Fonte: [5]55
Figura 34 - Roda com trinca térmica propagando-se pelo disco em direção ao cubo.
Fonte: [1]55
Figura 35 - Defeito profundo, com extensão aproximada de 2 cm, provocado pela
combinação de FCR e tensões térmicas. Fonte: [1]56
Figura 36 - Representação do perfil da roda quando nova e desgastada, bem como
o perfil de um trilho novo. Fonte: Adaptado de [1]57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AAR Association of American Railroads
- FCR Fadiga de Contato de Rolamento
- IHHA International Heavy Haul Association
- UFES Universidade Federal do Espírito Santo
- Unicamp Universidade Estadual de Campinas
- USP Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

а	Semieixo maior da elipse de contato		
b	Semieixo menor da elipse de contato		
E	Módulo de elasticidade		
E*	Módulo de elasticidade equivalente		
FL	Força devido ao friso		
Fs	Força de microescorregamento		
G	Módulo de elasticidade ao cisalhamento		
k	Limite de escoamento em cisalhamento		
Ν	Força normal		
Р	Carregamento normal		
Рm	Tensão média no contato		
ро	Tensão máxima no contato		
Q	Força tangencial		
R	Raio equivalente		
\overline{u}_z	Deformação local na direção Z		
Vc	Velocidade circunferencial		
Vt	Velocidade de translação		
z	Posição em Z da tensão máxima de cisalhamento		
μ	Coeficiente de atrito		
α	Ângulo de ataque		
θ	Ângulo entre os eixos principais		

γ	Conicidade da roda		
ω	Velocidade angular		
V	Coeficiente de Poisson		
λ	Escorregamento relativo		
$ au_1$	Tensão principal de cisalhamento		
au1max	Tensão de cisalhamento máxima		
σ	Tensão normal		
3	Deformação		

1. INTRODUÇÃO	14
2. RODAS E TRILHOS	16
2.1 RODA FERROVIÁRIA	16
2.2 TRILHO FERROVIÁRIO	19
3. CONTATO RODA-TRILHO	20
3.1 CONTATO HERTZIANO	22
3.2 CONTATO CARREGADO TANGENCIALMENTE	26
3.3 CONTATO DE ROLAMENTO	
3.4 FORÇAS NO CONTATO	
4. MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO	
4.1 FADIGA DE CONTATO DE ROLAMENTO (FCR)	
4.1.1 Trincas iniciadas na subsuperfície	
4.1.2 Trincas iniciadas na superfície	41
4.2 DESGASTE	42
4.3 DEGRADAÇÃO TÉRMICA	47
5. DEFEITOS EM RODAS	48
5.1 CALO DE RODA	48
5.2 SHELLING (ESCAMAÇÃO)	50
5.3 SPALLING (LASCAMENTO)	53
5.4 TRINCAS TÉRMICAS	54
5.5 DESGASTE CÔNCAVO	57
5.6 DESGASTE DE FRISO	59
6. CONCLUSÕES	62
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO

A alta eficiência energética no transporte ferroviário só é possível devido às baixas perdas de energia no contato de rolamento entre as superfícies duras da roda e do trilho, que se tocam apenas em uma pequena área de contato [1]. Tipicamente, essa região apresenta uma forma próxima à de uma elipse e uma área equivalente à de um círculo de 13 mm de diâmetro. Em decorrência disso, elevadas tensões são observadas no contato (que podem facilmente chegar a 3000 MPa) [2] e vários fenômenos indesejados ocorrem.

A depender de uma gama de fatores (como a geometria no contato, o traçado da ferrovia, o peso sobre os rodeiros, a ocorrência de deslizamentos) as tensões no contato apresentam diferentes magnitudes e variações. As diferentes distribuições de tensão no contato, associadas a fatores tribológicos e metalúrgicos, resultarão em diferentes mecanismos de degradação, que alteram a geometria, as propriedades mecânicas e causam a remoção de material do par roda-trilho. É através desse processo que os defeitos são formados em rodas e trilhos, sendo o caso das rodas objeto de estudo deste trabalho.

Defeitos em rodas podem comprometer a dinâmica do veículo, aumentar ainda mais as forças no contato, as vibrações e a resistência ao rolamento. Como consequência, maiores custos de manutenção são gerados pela redução da vida de rodas e trilhos, além do aumento no consumo de combustível e prejuízo à segurança. Em casos extremos, defeitos em rodas podem provocar o descarrilamento e graves acidentes [1].

Em busca de uma maior eficiência no transporte ferroviário, maiores carregamentos e velocidades têm sido continuamente buscados por empresas do setor. Em consequência disso, esforços cada vez maiores são provocados no contato entre a roda e o trilho, tornando defeitos em rodas ainda mais propensos a ocorrer [3]. No caso da Vale, rodas representam o terceiro maior custo associado à operação da ferrovia, ficando atrás apenas dos custos com combustível e trilhos [4]. Tendo em vista a importância do contato roda-trilho para a otimização do transporte ferroviário, diversos manuais, normas e *handbooks* abordam esse tema, tratando, inclusive, sobre os defeitos em rodas ([1]; [2]; [5]; [6]). No entanto, a descrição desses defeitos é basicamente morfológica, sem definições claras (às vezes havendo contradições entre diferentes referências) e apresenta poucas relações com os mecanismos causadores. Artigos técnicos tendem a descrever mais detalhadamente os mecanismos envolvidos na degradação dos materiais de rodas e trilhos ([7]; [8]; [9]; [10]), no entanto, são geralmente baseados em ensaios de laboratório e nem sempre comprovam a ocorrência, na prática, dos mecanismos observados.

Este trabalho baseia-se nessa bibliografia existente e tem o objetivo de apresentar os principais defeitos nela abordados, bem como os mecanismos de degradação, estabelecendo uma relação de causalidade entre eles (e, também, as condições operacionais) sempre que possível.

No capítulo seguinte, é feita uma descrição detalhada de rodas e trilhos ferroviários, apresentando a geometria, a denominação das regiões e os materiais empregados. O capítulo 3 aborda o contato roda-trilho, apresentando teorias que descrevem as distribuições de tensão e as forças que surgem na área de contato e no interior do material. Nos capítulos 4 e 5 são apresentados os mecanismos de degradação e os defeitos comumente encontrados em rodas ferroviárias, respectivamente. Os mecanismos de degradação são divididos em três principais; relacionados à fadiga, ao desgaste e aos efeitos térmicos. Os defeitos, no capítulo 5, são apresentados com figuras e definições baseadas na bibliografia. Suas causas são relacionadas aos mecanismos de degradação e aos possíveis fatores operacionais e ambientais envolvidos. Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões a respeito das informações expostas ao longo dos capítulos anteriores e a respeito da própria bibliografia utilizada neste trabalho.

2. RODAS E TRILHOS

O movimento de rolamento das rodas sobre os trilhos é o fundamento básico do transporte ferroviário. O contato entre esses componentes de aço produz uma resistência ao rolamento particularmente baixa [2].

Neste capítulo é feita uma descrição detalhada de rodas e trilhos ferroviários, apresentando a geometria, a denominação das regiões e os materiais comumente empregados em sua fabricação.

2.1 RODA FERROVIÁRIA

De modo geral, as rodas ferroviárias são compostas pelo cubo (por onde a roda é fixada ao eixo do rodeiro), disco, aro, pista de rolamento e friso. As regiões assim denominadas podem ser observadas na Figura 1.



Figura 1 - Desenho esquemático de uma roda ferroviária. Fonte: Adaptado de [4].

Elemente	Classe			
Elemento	L	Α	В	С
C [%]	máx. 0,47	0,47 - 0,57	0,57 - 0,67	0,67 - 0,77
Mn [%]	0,60 - <mark>0</mark> ,90	0,60 - 0,90	0,60 - 0,90	0,60 - 0,90
P [%]	máx. 0,03	máx. 0,03	máx. 0,03	máx. 0,03
S [%]	0,005 - 0,040	0,005 - 0,040	0,005 - 0,040	0,005 - 0,040
Si [%]	0,15 - 1,00	0.15 - 1.00	0.15 - 1.00	0.15 - 1.00
	Elementos Residuais			
Ni [%]	máx. 0,25	máx. 0,25	máx. 0,25	máx. 0,25
Cr [%]	máx. 0,25	máx. 0,25	máx. 0,25	máx. 0,25
Mo [%]	máx. 0,10	máx. 0,10	máx. 0,10	máx. 0,10
Va [%]	máx. 0,04	máx. 0,04	máx. 0,04	máx. 0,04
Cu [%]	máx. 0,35	máx. 0,35	máx. 0,35	máx. 0,35
AI [%]	máx. 0,06	máx. 0,06	máx. 0,06	máx. 0,06
Ti [%]	máx. 0,03	máx. 0,03	máx. 0,03	máx. 0,03
Nb [%]	máx. 0,05	máx. 0,05	máx. 0,05	máx. 0,05

Tabela 1 – Composição química, em peso, das classes de rodas ferroviárias.

Fonte: Adaptado de [11].

Soares *et al* [12] analisaram a microestrutura de uma roda da classe B por meio de microscopia óptica (Figura 2). Evidências claras de uma estrutura perlítica puderam ser observadas. Além disso, cementita (Fe₃C) e ferrita também são encontradas, devido à composição próxima à do ponto eutetoide e devido à elevada taxa de resfriamento no aro provocada pela têmpera.



Figura 2 - Microestrutura de roda classe B. Microscopia óptica. Fonte: Adaptado de [12].

Maia *et al* [13] compararam a microestrutura de rodas forjadas da classe C com diferentes parâmetros de tratamento térmico. Martensita revenida foi observada na superfície das rodas submetidas a taxas de resfriamento mais elevadas (Figura 3 b). Já nas rodas que sofreram resfriamento mais lento, a microestrutura observada era composta de perlita e ferrita desde a superfície (Figura 3 a).



Figura 3 - Microestrutura de rodas classe C. (a) Resfriamento lento, com perlita e ferrita. (b) Resfriamento rápido, com martensita revenida. Fonte: Adaptado de [13]

2.2 TRILHO FERROVIÁRIO

Os trilhos ferroviários, sobre os quais se movimentam as rodas, são compostos basicamente de patim, alma e boleto. O perfil típico de um trilho do tipo vignole pode ser observado na Figura 4.



Figura 4 – Perfil típico de trilho vignole. Fonte: Adaptado de [14].

De modo similar às rodas ferroviárias, os trilhos são produzidos em aços de elevado teor de carbono (0,65 – 0,82%) e apresentam estrutura perlítica ou próxima de perlítica [2]. A Tabela 2 mostra as variações nas composições químicas de trilhos empregados no transporte de carga em diferentes países.

Elemento	Brasil, Canada, EUA	Austrália	Rússia	Suécia
C [%]	0,72 - 0,82	0,72 - 0,82	0,71 - 0,82	0,60 - 0,82
Mn [%]	0,80 - 1,10	0,80 - 1,25	0,75 - 1,05	0,80 - 1,30
Si [%]	0,10 - 0,60	0,15 - 0,58	0,25 - 0,45	0,30 - 0,90
S [%]	máx. 0,037	máx. 0,025	máx. 0,45	máx. 0,025
P [%]	máx. 0,035	máx. 0,025	máx. 0,035	máx. 0,025
Cr [%]	0,25 - 0,50	-	-	0,80 - 1,30
V [%]	máx. 0,03	-	0,03 - 0,07	-
Ni [%]	máx. 0,25	-	-	-
Mo [%]	máx. 0,10	-	-	-

Tabela 2 – Composição química, em peso, de trilhos em diferentes países.

Fonte: Adaptado de [2].

A microestrutura de trilhos pode variar em função da composição da liga e do tratamento térmico. Para trilhos fabricados em aço carbono de baixa liga e resfriados ao ar, a microestrutura resultante é a perlita, como pode ser visto na Figura 5 [1].



Figura 5 - Microestruta perlítica do boleto do trilho. Microscopia óptica, trilho grau 260 (0,81 %C). Fonte: [1].

3. CONTATO RODA-TRILHO

Pode-se considerar que o início do estudo da mecânica do contato deu-se em 1882, a partir da publicação da teoria do contato elástico, por Heinrich Hertz, que tinha 24 anos à época e trabalhava como assistente de pesquisa na Universidade de Berlim.

O interesse de Hertz no assunto surgiu após realizar experimentos de interferência ótica em lentes de vidro. A questão que o intrigava era se a deformação elástica das lentes, causada pela força que as mantinha em contato, poderia, ou não, exercer influência significativa na configuração das franjas de interferência.



Figura 6 - Franjas de interferência no contato entre duas lentes cilíndricas cujos eixos estão orientados a 45°. (a) Descarregado. (b) Carregado. Fonte: Adaptado de [15].

A teoria original de Hertz é restrita a superfícies sem atrito e sólidos perfeitamente elásticos. No entanto, ao longo do século passado e até hoje, os avanços no estudo da mecânica do contato deram-se no sentido de superar tais restrições. Através de tratamentos adequados, a consideração do atrito no contato permitiu que a teoria elástica pudesse ser estendida aos casos de deslizamento e rolamento de forma satisfatória. Do mesmo modo, as teorias de plasticidade e viscoelasticidade linear permitiram a análise de corpos inelásticos [15].

Quando dois corpos não-conformes são postos em contato, os mesmos tocam-se, inicialmente, em um único ponto ou ao longo de uma linha. Sob ação de uma carga, os corpos deformam-se ao redor do ponto de contato inicial, de forma a tocarem-se por meio de uma área de contato. Essa área de contato é finita e pequena se comparada às dimensões dos corpos. A teoria do contato é estabelecida para prever a forma dessa área, seu crescimento com o aumento da carga, a magnitude e distribuição das tensões normais e cisalhantes no contato, além das deformações e tensões na vizinhança da região [15].

No caso ferroviário, as características da área de contato e as forças no contato roda-trilho são fortemente influenciadas pela geometria do trilho e da roda. Conhecendo-se a força normal, as propriedades do material e a geometria local do trilho e da roda, é possível estimar a área e a geometria do contato.

Ainda que restrita a superfícies sem atrito e sólidos perfeitamente elásticos, a teoria clássica do contato de Hertz fornece um valioso ponto de partida para a maioria das situações de contato, sendo incluída na maioria dos programas computacionais que lidam com o contato roda-trilho [1].

3.1 CONTATO HERTZIANO

Um contato Hertziano genérico pode ser descrito como na Figura 7. Dois corpos inicialmente tocam-se em um único ponto, o qual define a origem de dois sistemas de coordenadas retangulares com um eixo comum, Z, perpendicular. Conhecendo-se os raios principais de cada corpo (R1x, R1y, R2x, R2y) a geometria de ambos pode ser descrita. Os raios principais são definidos como o maior e o menor raio de curvatura no ponto de contato. As direções X e Y de cada sistema são definidas nas direções dos raios principais de cada corpo. A geometria do contato, portanto, é descrita em função dos raios principais e do ângulo θ entre os eixos dos corpos [1].



Figura 7 - Contato Hertziano genérico entre dois sólidos: (a) Corpos em contato. (b) Área de contato elíptica. Fonte: [1].

Na Figura 7, ambos os corpos apresentam forma convexa em todas as direções. A teoria de Hertz também pode ser aplicada para casos em que os raios de curvatura são côncavos se θ = 0. Nesse caso, os raios côncavos são descritos com sinal negativo.

Os parâmetros do contato Hertziano são calculados através das equações apresentadas na Tabela 3.

Módulo de elasticidade equivalente	$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2}$
Raio equivalente	Ver Equações [1] a [4]
Dimensão do contato	$c = \sqrt{ab} = \left(\frac{3PR}{4E^*}\right)^{\frac{1}{3}} F_1(\xi)$
Tensão normal máxima no contato	$p_0 = \left(\frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R^2}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{1}{F_1^2(\xi)}$
Distribuição de tensão	$p(x,y) = p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2}$
Tensão de cisalhamento máxima	Ver Figura 9
Lozalização da tensão de cisalhamento máxima	Ver Figura 9

Tabela 3 – Principais equações do contato hertziano.

Fonte: Adaptado de [1].

O contato assumirá forma de elipse, com o eixo maior localizado entre os eixos X1 e X2 (Figura 7 b). O ângulo α entre o eixo da elipse e X1 pode ser calculado por:

$$\tan 2\alpha = \frac{\sin 2\theta}{\frac{1/R_{1x} - 1/R_{1y}}{1/R_{2x} - 1/R_{2y}} + \cos 2\theta}$$
[1]

O qual é usado para o cálculo dos raios equivalentes nas direções X, Y e o raio equivalente para o contato (R).

$$\frac{1}{R_x} = \frac{\cos^2 \alpha}{R_{1x}} + \frac{\sin^2 \alpha}{R_{1y}} + \frac{\cos^2(\theta - \alpha)}{R_{2x}} + \frac{\sin^2(\theta - \alpha)}{R_{2y}}$$
[2]

$$\frac{1}{R_y} = \frac{\sin^2 \alpha}{R_{1x}} + \frac{\cos^2 \alpha}{R_{1y}} + \frac{\sin^2(\theta - \alpha)}{R_{2x}} + \frac{\cos^2(\theta - \alpha)}{R_{2y}}$$
[3]

$$R = \left(R_x R_y\right)^{1/2} \tag{4}$$

O parâmetro ξ é dado por:

$$\xi = \left(\frac{R_x}{R_y}\right)^{1/2}$$
[5]

E, bem como o raio equivalente, é uma das variáveis necessárias para a aplicação das equações do contato Hertziano.

Quanto à área de contato, as dimensões a e b dos semieixos da elipse são calculadas em função do parâmetro c (Tabela 3) e do fator de correção F₃, cujo valor é dado como na Figura 8.

$$a = c / F_3(\xi) \tag{6}$$

$$b = c F_3(\xi) \tag{7}$$



Figura 8 - Fatores de correção para o contato elíptico. Fonte: [1].

A distribuição de tensões na interface de contato produz tensões no interior de ambos os corpos. Dentre as tensões produzidas, destaca-se a máxima tensão de cisalhamento (τ_{1max}) já que o escoamento plástico deverá ocorrer quando τ_{1max} exceder a tensão de escoamento para cisalhamento. A localização e a magnitude dessa tensão máxima de cisalhamento no interior do corpo são dadas pela Figura 9 para o contato elíptico [1].



Figura 9 - Magnitude e localização da tensão máxima de cisalhamento. Fonte: [1].

3.2 CONTATO CARREGADO TANGENCIALMENTE

As rodas ferroviárias estão sujeitas não apenas a forças normais, como prevê a Teoria de Hertz, mas também a forças tangenciais. As forças tangenciais surgem em consequência da aceleração, da frenagem ou devido ao próprio atrito de rolamento das rodas sobre os trilhos. Essas forças tangenciais introduzem tensões de cisalhamento na interface de contato, causando importantes alterações na distribuição de tensões no interior dos corpos e na própria interface.

O efeito da força tangencial no contato entre corpos foi analisado por Johnson [15]. Quando a força tangencial é suficientemente grande, dá-se o deslizamento, situação em que a velocidade relativa entre as superfícies em contato é diferente de zero. A Figura 10 retrata o caso de um corpo com perfil curvo deslizando sobre uma superfície plana a uma velocidade constante. Nesse caso, o corpo sobre a superfície plana desliza da direita para a esquerda, de forma que a situação pode ser representada analogamente com o corpo plano movendo-se da esquerda para a direita sob o corpo curvo fixo.



Figura 10 - Contato com deslizamento entre um corpo curvo e um plano. Fonte: Adaptado de [15].

Os corpos são mantidos em contato por uma força normal P, que, na ausência de forças tangenciais, apresentariam as características descritas pela Teoria de Hertz. Portanto, num contato sem atrito as tensões não seriam afetadas pelo movimento de deslizamento. No entanto, em situações reais, devido ao deslizamento (ou a

qualquer tendência a deslizar) surgem forças tangenciais de atrito (Q) nas superfícies em contato, na direção contrária ao movimento.

Se os corpos em contato possuírem módulos de elasticidade iguais, qualquer força tangencial transmitida entre eles num ponto da interface dará origem a deformações de mesma magnitude na direção normal e em sentidos opostos [15]:

$$q_1(x, y) = -q_2(x, y)$$
[8]

$$\frac{G_1}{1-2\nu_1}\bar{u}_{Z1}(x,y) = -\frac{G_2}{1-2\nu_2}\bar{u}_{Z2}(x,y)$$
[9]

Sendo assim, as deformações causadas em uma superfície se conformam exatamente com as da outra, e não perturbam a distribuição da tensão normal na interface. A forma e a dimensão da área de contato são, portanto, determinadas pela geometria dos corpos em contato e pela força normal, de forma independente da força tangencial.

No caso de corpos com módulos de elasticidade diferentes, as deformações causadas pela força tangencial são diferentes e a distribuição de tensão normal é afetada. Contudo, essa influência é geralmente pequena, principalmente quando μ <1. É possível, portanto, assumir que as tensões e deformações devidas à força normal e à tangencial são independentes, e as resultantes são dadas pela superposição dos efeitos de cada caso [15].

Uma vez que a distribuição da tensão normal no contato é conhecida e dada pela Teoria de Hertz, é possível estabelecer, através da 1^a Lei do Atrito (Amontons), uma relação que descreva a distribuição da tensão devida ao atrito.

$$\frac{|q(x,y)|}{p(x,y)} = \frac{|Q|}{P} = \mu$$
[10]

Hertz considerou o contato entre corpos cilíndricos paralelos como uma situação limite do contato elíptico, na qual um semieixo da elipse se torna muito maior do que o outro. O caso de um cilindro deslizando sobre um plano pode ser analisado como uma situação bidimensional e é usado para descrever as tensões e deformações causadas pelo deslizamento [15].

Se o cilindro, deslizando na direção perpendicular ao seu eixo de revolução, e o plano sob ele possuem o mesmo módulo de elasticidade, então o contato se dará ao longo de uma faixa de largura 2a, e a distribuição de tensão no contato será dada por:

$$a^2 = \frac{4PR}{\pi E^*}$$
[11]

$$p(x) = \frac{2P}{\pi a^2} (a^2 - x^2)^{1/2}$$
[12]

$$p_o = \frac{2P}{\pi a} = \frac{4p_m}{\pi} = \left(\frac{PE^*}{\pi R}\right)^{1/2}$$
[13]

Onde p_0 é a tensão máxima no contato e P é a força normal por unidade de comprimento pressionando o cilindro contra o plano.

Nesse caso, quando não há deslizamento, a tensão máxima de cisalhamento estará ao longo do eixo Z, e será dada por:

$$(\tau_1)_{max} = 0.30p_0$$
 em $z = 0.78a$ [14]

A variação das tensões σ_x , $\sigma_z \in \tau_1$ no interior dos sólidos pode ser representada como na Figura 11, bem como as curvas de nível correspondentes à tensão principal de cisalhamento.



Figura 11 - Contato entre cilindros: (a) Tensões subsuperficiais ao longo do eixo de simetria, (b) curvas de nível da tensão de cisalhamento principal. Fonte: [15].

Se uma força tangencial é aplicada ao cilindro e o mesmo desliza sobre o plano, a distribuição da tensão cisalhante devida ao atrito no contato, pelas Equações [12] e [10], é dada por:

$$q(x) = \mp \frac{2\mu P}{\pi a^2} (a^2 - x^2)^{1/2}$$
[15]

Sendo o sinal negativo adotado quando a velocidade for positiva.

Além da tensão de cisalhamento, o deslizamento faz surgir tensões normais na direção X na superfície do plano, como mostra a Figura 12:



Figura 12 - Tensões na superfície devido à força de atrito. Fonte: [1].

Sendo que uma tensão máxima de compressão é observada no limite anterior ao contato (x = -a) e uma tensão máxima de tração é observada no limite imediatamente posterior ao contato (x = a) [15].

No interior do sólido, para μ = 0,2, os efeitos combinados da força normal e da força tangencial produzem tensões principais de cisalhamento, τ_1 , como mostra a figura abaixo.



Figura 13 - Curvas de nível da tensão principal de cisalhamento na subsuperfície do contato com deslizamento. Fonte: [15].

Em comparação ao caso em que há apenas a força normal agindo sobre o cilindro (Figura 11), as curvas de nível mostram que a localização da tensão de cisalhamento máxima desloca-se do eixo Z e aproxima-se da superfície. Essa aproximação será tão maior quanto maior for o coeficiente de atrito entre os corpos. Será exposto, posteriormente, que esse efeito está relacionado com a região em que surgirão as trincas causadas por fadiga de contato de rolamento (FCR) [10], bem como com a predominância de um dado mecanismo de desgaste em rodas ferroviárias [7].

Pelo Critério de Tresca, é na posição da tensão máxima de cisalhamento que o escoamento plástico inicia-se [15]. Dessa forma, é possível determinar tensão po no contato (e, portanto, a força aplicada sobre o corpo) para que o escoamento ocorra,

em função da tensão de escoamento do material e do coeficiente de atrito entre os corpos.

3.3 CONTATO DE ROLAMENTO

Quando uma força tangencial é aplicada a um contato sujeito a uma carga normal, eventualmente os corpos em contato deslizarão. No entanto, antes que a situação de deslizamento generalizado ocorra, alguns pontos na interface de contato apresentarão deslizamento localmente, enquanto o restante do contato adere [15]. A esse fenômeno dá-se o nome de microescorregamento (*micro-slip* ou *creepage*), o qual é especialmente importante no contexto do contato roda-trilho.

O escorregamento localizado tende a ocorrer nas regiões onde a distribuição de tensão normal for relativamente baixa, como nas bordas do Contato Hertziano. Dessa forma, na região central do contato ocorreria a adesão (*stick*) e a região de escorregamento (*slip*) ocorreria ao seu redor, numa área anular para o contato circular [1].

No contato de rolamento, a influência das deformações elásticas nos corpos deve ser considerada. O carregamento normal se relaciona com a área de contato como prevê a Teoria de Hertz. No entanto, a distribuição da força tangencial e a configuração das regiões de adesão e escorregamento (*stick* e *slip*) apresentam diferenças com relação ao caso anterior, de deslizamento (ou tendência de deslizamento) sem rolamento.

O microescorregamento surge devido a forças tangenciais agindo no contato entre corpos. No rolamento, uma diferença entre as deformações tangenciais em cada corpo na região de adesão leva a um deslizamento localizado, causando o microescorregamento [15].

O problema das tensões e do microescorregamento no contato de rolamento de dois corpos com módulos de elasticidade diferentes foi discutido por Reynolds em 1875. A situação se deve à diferença entre as deformações tangenciais nas superfícies de

cada corpo, o que introduz forças tangenciais e, possivelmente, escorregamento na interface [15].

No caso da roda ferroviária, ao rolar sobre o trilho, mesmo que não haja aceleração ou frenagem, existe uma resistência ao movimento. A roda sofre uma compressão na região anterior ao contato e o trilho é submetido a tração. Essa configuração se inverte na região posterior ao contato. Devido a isso, a roda e o trilho estão sujeitos a deformações relativas durante o rolamento, o que gera forças tangenciais no contato e, potencialmente, microescorregamento [16].



Figura 14 - Aderência e escorregamento devido às deformações elásticas. Fonte: [16].

O microescorregamento devido ao rolamento dá-se na região posterior do contato e a área de adesão é localizada na região anterior. A área em que ocorre o microescorregamento tende a crescer com o aumento da tração aplicada à roda, até que não haja região de adesão no contato. Nesse caso, deslizamento generalizado ocorre em todo o contato e a força tangencial na superfície da roda atinge um valor máximo e igual à força de atrito no deslizamento [2]. Esse comportamento pode ser observado na Figura 15, com a força de atrito (μ N) em função do escorregamento relativo (λ), dado pela razão entre a velocidade relativa das superfícies e a velocidade linear das superfícies.



Figura 15 - Relação entre força de atrito (μN) e escorregamento relativo (λ). Fonte: Adaptado de [2].

3.4 FORÇAS NO CONTATO

Além do microescorregamento na direção logintudinal, devido ao rolamento e a forças tangenciais na aceleração ou frenagem, a interação entra a roda e o trilho produz outros fenômenos que atuam na região de contato, como o microescorregamento lateral e o *spin* [2]. O microescorregamento lateral depende do ângulo de ataque (α) da roda no trilho e atua na direção transversal à direção de rolamento. A posição da roda sobre o trilho que causa o surgimento do ângulo de ataque deve-se ao movimento ondulatório do veículo ferroviário e à dinâmica do rodeiro em curvas. O ângulo de ataque e as velocidades de translação (Vt) e circunferencial (Vc) são representados na Figura 16.



Figura 16 - Velocidades e ângulo de ataque na vista superior de uma roda deslocando-se sobre um trilho. Fonte: [16].

Na Figura 17, forças devido à conicidade da roda ou ao friso (FL) atuam de forma a impedir que o rodeiro siga a direção preferencial do rolamento da roda, seguindo, então, a direção do trilho. Nessas condições, uma força de microescorregamento (Fs) é observada devido ao movimento (ou à tendência de movimento) lateral sobre os trilhos [2].



Figura 17 - Escorregamento e força laterais num trecho tangente. Fonte: Adaptado de [2].

Já o microescorregamento de *spin*, está relacionado à conicidade (γ) da roda. Como é possível observar na Figura 18, a velocidade angular da roda, ω , não é paralela ao

plano de contato. Nesse caso, regiões diferentes do contato rolam em trajetórias com diferentes raios em relação ao eixo central da roda. Sendo assim, uma resistência rotacional surge na área de contato e uma componente de rotação ω_z pode ser definida em torno do eixo Z [16].



Figura 18 - Representação do spin devido à conicidade da roda. Fonte: [16].

As principais forças atuantes na região do contato roda-trilho são consequências dos eventos descritos anteriormente e estão representadas em conjunto na figura abaixo. As forças tangenciais atuam na direção longitudinal ou lateral, enquanto o momento de *spin* atua no eixo perpendicular à superfície de contato.





4. MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO

Como exposto ao longo do capítulo anterior, a constante interação entre a roda e o trilho induzem elevadas tensões no contato. A depender das características dessas tensões (como magnitude, direção, número de ciclos) e de outros fatores (como temperatura no contato, presença de contaminantes e características do material), diferentes mecanismos de degradação tornam-se presentes. Os principais mecanismos de degradação observados em rodas ferroviárias estão relacionados à fadiga, ao desgaste e à degradação térmica, e serão apresentados ao longo deste capítulo. Em consequência desses mecanismos, defeitos surgirão na roda. Os principais defeitos em rodas ferroviárias são expostos no capítulo seguinte e relacionados aos possíveis mecanismos e fatores operacionais causadores.

4.1 FADIGA DE CONTATO DE ROLAMENTO (FCR)

Rodas e trilhos estão sujeitos a um número elevado de contatos repetidos ao longo de suas vidas. Apesar de espalhados pela superfície da banda de rolagem e do friso, é provável que esses contatos ocorram até 10 milhões de vezes por ano numa mesma região da roda [3].

Como já mencionado, desses contatos entre a roda e o trilho resultam forças normais e tangenciais, causando tensões cíclicas e, consequentemente, fadiga. Um dado material sujeito a rolamentos e/ou deslizamentos repetidos pode, portanto, estar enquadrado num dos seguintes casos: [17]

- Comportamento perfeitamente elástico: se a tensão no contato não exceder o limite elástico em qualquer ciclo de carregamento.
- Shakedown elástico: ocorre deformação plástica nos ciclos iniciais, mas, devido ao surgimento de tensões residuais e encruamento causados por essa deformação inicial, o comportamento no estado estacionário é perfeitamente elástico.

- Shakedown plástico: depois de atingido o estado estacionário, o material é submetido a um "loop" em que há uma sucessão de deformações elásticas e plásticas. Nesse "loop", o incremento de deformações plásticas resultantes a cada ciclo é nulo. Esse comportamento também é conhecido como plasticidade cíclica.
- Ratcheting: acima da tensão limite em que ocorre o shakedown plástico dá-se o processo de ratcheting. Nesse caso, o material é sujeito a ciclos de deformação elastoplásticas, mas, diferente do caso anterior, com um acúmulo progressivo de deformações plásticas unidirecionais a cada ciclo.

Os quatro casos anteriores são representados na figura a seguir. Para cada caso há uma tensão limite abaixo da qual se dá o fenômeno. A condição mais adequada para projeto e operação é aquela que evita a plasticidade cíclica, reduzindo, portanto, as taxas de desgaste e degradação superficial devido ao contato [3].



Figura 20 - Respostas do material a diferentes intensidades de carregamento cíclico. Fonte: Adaptado de [18].

Johnson [17] elaborou o diagrama de *shakedown* para o contato bidimensional com deslizamento. Esse diagrama (Figura 21) relaciona o coeficiente de atrito μ , a tensão máxima no contato P₀ e a tensão limite de escoamento para o cisalhamento k com o comportamento do material sujeito ao contato. A depender dessas condições, o diagrama estabelece qual dos quatro possíveis comportamentos o material

apresentará, bem como a posição (superfície ou subsuperfície) em que se dará a plasticidade.



Figura 21 - Diagrama de Shakedown. Fonte: Adaptado de [10].

Como demonstrado anteriormente, a posição em que se dará a plasticidade está intimamente relacionada ao coeficiente de atrito, uma vez que a posição da tensão máxima de cisalhamento tende a se aproximar da superfície com o aumento das forças tangenciais no contato.

Combinando os limites do diagrama de *shakedown* com a expressão de Hertz para o contato elíptico, o *ratcheting* ocorre se atender às seguintes condições: [10]

$$\frac{1}{k} \left(\frac{PE^{*2}}{R^2}\right)^{1/3} > \frac{4\pi}{6^{1/3}}$$
[16] (a)

$$\frac{\mu}{k} \left(\frac{PE^{*2}}{R^2}\right)^{1/3} > \frac{\pi}{6^{1/3}}$$
[16] (b)

Sendo µ o coeficiente de atrito, k a tensão de escoamento em cisalhamento, P o carregamento normal (incluindo impactos), E* o modulo de elasticidade equivalente, R o raio equivalente.

A Equação [10] (a) descreve a situação em que a tensão máxima de cisalhamento, o *ratcheting* e a iniciação da trinca dar-se-ão na subsuperfície. A Equação [10] (b) é aplicada no caso em que o *ratcheting* e a iniciação da trinca ocorrem na superfície da roda.

Tipicamente o *ratcheting* mais acentuado dá-se na superfície e, portanto, a maioria das trincas causadas por fadiga de contato de rolamento em rodas ocorre na superfície. Quando a iniciação da trinca dá-se na subsuperficie, esta tende a ocorrer a partir de inclusões e porosidades presentes no material [10].

4.1.1 Trincas iniciadas na subsuperfície

As trincas formadas na subsuperfície geralmente iniciam-se a uma distância de 4 a 25 mm com relação à superfície da roda. Quando o coeficiente de atrito é baixo, a tensão máxima de cisalhamento localiza-se no interior do material. Dessa forma, tensões de cisalhamento elevadas, associadas a imperfeições no material, determinam localizações críticas de iniciação de trincas [18].

O mecanismo de iniciação de trinca, nesse caso, dá-se com o material próximo ao defeito sendo sujeito a um carregamento de compressão devido ao rolamento. Uma vez que defeitos no material agem como concentradores de tensão, a tensão de compressão mais elevada tende a ocorrer nas laterais dessas imperfeições. Caso a tensão seja suficientemente elevada, ocorre deformação plástica do material por

compressão e, após aliviado o carregamento, um campo de tensões residuais de tração surge próximo ao defeito. Portanto, a trinca, nesse estágio inicial (Estágio I), está sujeita ao modo de abertura de propagação (Modo I). No entanto, o efeito do campo residual de tração é altamente localizado na proximidade do defeito e, uma vez fora dessa região, a trinca passa a se propagar devido à tensão de cisalhamento principal no material, seguindo o Modo II (deslizamento) [1].



Figura 22 - Representação da nucleação e crescimento de trinca de FCR a partir de defeito subsuperficial. Adaptado de [1].

Após iniciada, a trinca de subsuperfície pode propagar-se até alcançar a superfície ou desviar em direção ao cubo da roda. Ao atingir a superfície, seja por ter sido exposta pelo desgaste ou por ter encontrado trincas superficiais, a trinca iniciada na subsuperfície tende a propagar-se como qualquer trinca superficial [10].

Em outros casos, a trinca iniciada na subsuperfície tende a desviar-se para o cubo da roda devido à influência do atrito entre as faces da trinca. Quanto maior a trinca, maior será o efeito do atrito entre as faces e, portanto, maior a tendência da trinca de desviar em direção ao interior do material. Por mais que a intensidade das tensões de cisalhamento na trinca diminua à medida que se afasta da superfície, o efeito do atrito na trinca também é reduzido, de forma que o efeito resultante favorecerá a propagação da trinca. Além desse fator, a presença de tensões residuais também pode promover o desvio da trinca.

A fratura causada por trincas de subsuperfície tipicamente se dá com a ramificação em direção à superfície. Nesse caso, é comum que a trinca tenha um diâmetro superior a 10 cm, causando a remoção de grandes fragmentos do aro [1].

4.1.2 Trincas iniciadas na superfície

As trincas iniciadas na superfície são mais comuns que as na subsuperfície, porém menos severas [1]. Devido às forças de atrito no contato entre a roda e o trilho, as trincas de FCR iniciadas na superfície geralmente são causadas por *ratcheting*. Nesse processo, há um acúmulo progressivo de deformações plásticas a cada ciclo e a trinca será formada quando ocorrer o esgotamento plástico [18].

Se a roda operar nos dois sentidos de rolamento, as forças tangenciais no contato serão alternadas e, consequentemente, não ocorrerá acúmulo de deformações plásticas unidirecionais. Nesse caso ocorrerá o *shakedown* plástico e o mecanismo de iniciação da trinca será a fadiga de baixo ciclo [18].

Uma vez iniciadas, as trincas são propagadas pelas tensões de cisalhamento resultantes do contato roda-trilho, seguindo o Modo II de propagação. Quando há a presença de fluidos, como água e lubrificantes, na interface de contato, a propagação da trinca é facilitada.

A presença de água e lubrificantes reduz o atrito entre as faces da trinca, facilitando a propagação pelo Modo II (Figura 23 d). Além disso, devido às tensões de compressão deslocando-se pela superfície (Figura 23 a) no contato de rolamento, a abertura da trinca é fechada quando esta encontra-se na região de contato (Figura 23 b). Dessa forma, os fluidos no interior da trinca são aprisionados e comprimidos, produzindo tensões de tração na ponta da trinca (Figura 23 c), o que possibilita uma severa propagação pelo Modo I [10].



Figura 23 - Representação do crescimento de trincas superficiais potencializado pela presença de fluidos. Fonte: Adaptado de [3].

O crescimento das trincas iniciadas na superfície dá-se, inicialmente, num ângulo raso em relação à superfície, seguindo a orientação da microestrutura deformada. Nas rodas ferroviárias, as trincas geralmente seguem essa tendência até uma profundidade de 0,5 a 3 mm da superfície, quando tendem a se ramificar e desviar para uma direção radial [1]. Eventualmente, trincas formadas na superfície vão encontrar e unir-se a trincas adjacentes, fazendo com que porções do material da roda sejam removidas.

4.2 DESGASTE

As definições mais abrangentes de desgaste em rodas ferroviárias geralmente incluem qualquer forma de dano que cause a perda (ou deslocamento) de material da superfície da roda devido ao contato com o trilho [1]; [18]. Nesse sentido, além da abrasão, adesão e deslocamento de material por deformação plástica, também a FCR poderia ser classificada como um mecanismo de desgaste ao provocar danos superficiais como *shelling* e *spalling*. Apesar de intimamente ligada aos outros mecanismos de desgaste, a FCR pode provocar defeitos na roda como trincas no disco e no aro, que podem levar à remoção de grandes fragmentos ou até à fratura

da roda, e que não são classificados como desgaste. Sendo assim, a FCR é apresentada de forma mais abrangente à parte do desgaste neste trabalho, na seção anterior.

De modo geral, o desgaste é um processo intrinsecamente sistêmico e os mecanismos que o governam são determinados por vários fatores, como a tensão normal no contato, a velocidade de deslizamento, a presença de partículas ou filmes óxidos, as propriedades do material na superfície de contato, a temperatura, etc. No âmbito do contato roda-trilho, cinco principais mecanismos de desgaste podem ser observados: [1]; [18]

• Desgaste oxidativo

Nesse mecanismo, uma camada de óxidos é formada na superfície do material, quebra-se e é removida [1]. Uma vez que o metal é novamente exposto, uma nova camada de óxidos começa a se formar, a qual também será eventualmente removida, dando continuidade ao processo. O desgaste oxidativo dá-se sob tensões normais e velocidades de deslizamento relativamente baixas, associado a um regime de desgaste moderado, com taxas de desgaste geralmente baixas.

Esse mecanismo de desgaste tipicamente ocorre no contato entre o topo do boleto e a pista de rolamento da roda, associado a trechos tangentes (sem curvas) da ferrovia [1]. A Figura 24 apresenta a micrografia da superfície desgastada obtida em um ensaio com tribômetro na configuração *twin disc*. Nela é possível observar a ocorrência de *score marks* de abrasão e evidências da remoção da camada de óxidos na superfície, em conformidade com o observado em situações reais de desgaste oxidativo de trilhos e rodas [7].



Figura 24 - Micrografia da superfície desgastada em ensaio *twin disc* com características de desgaste oxidativo. Fonte: Adaptado de [7].

• Adesão

O desgaste por adesão é um processo associado ao contato entre as asperezas em pontos discretos da superfície, formando junções devido às ligações adesivas. Uma vez que as superfícies apresentam movimento relativo, essas junções são quebradas, geralmente removendo parte do material do topo da aspereza menos dura. Esse material adere-se à superfície de maior dureza, eventualmente desprendendo-se dela e formando *debris* [1].

O mecanismo de desgaste adesivo tende a ocorrer em condições de contato mais severas, como no caso de curvas acentuadas (raio inferior a 500 m [3]), em que o friso da roda toca o canto de bitola, apresentando elevadas tensões de contato e maior velocidade de deslizamento [1].

• Abrasão

O processo de desgaste abrasivo ocorre quando o material é removido pelo riscamento da superfície. Esse mecanismo deve-se ao movimento relativo entre

superfícies em contato em que há a presença de asperezas duras (abrasão a dois corpos) ou partículas duras entre as superfícies (abrasão a três corpos). Partículas podem ser introduzidas entre as superfícies da roda e do trilho a partir da contaminação do ambiente, da aplicação de areia para controle de tração ou produzidas a partir do desgaste (*debris*) [1].

Na Figura 24 é possível identificar a ocorrência de mecanismos de desgaste abrasivo ocorrendo simultaneamente ao mecanismo dominante (oxidativo) [7]. Essa conclusão deve-se à presença de *score marks* (marcas de riscamento) de abrasão na superfície desgastada.

• Delaminação

O desgaste por delaminação deve-se à ocorrência de trincas que se propagam paralelamente à superfície (ou em baixos ângulos com relação a ela) e que eventualmente unem-se ou desviam para a superfície, causando a remoção de material. Os *debris* gerados nesse processo tendem a ser alongados e pouco espessos, em forma de plaquetas [7]; [8].

A nucleação e a propagação dessas trincas derivam dos mecanismos descritos para a fadiga de contato de rolamento, expostos anteriormente neste capítulo. Esse processo tende a ocorrer em condições de contato mais severas do que as do desgaste oxidativo, com maiores forças tangenciais e escorregamento [1]. De modo geral, as trincas seguem a orientação da microestrutura deformada plasticamente na superfície, como pode ser observado na micrografia obtida do ensaio *twin disc*, na Figura 25 [7].



Figura 25 - Micografia da superfície desgastada, seção na direção de rolamento, ensaio *twin disc.* Fonte: Adaptado de [7].

• Thermal wear

Esse processo de desgaste está diretamente relacionado com o aumento da temperatura devido ao calor produzido pelo atrito no contato roda-trilho. O principal mecanismo de desgaste nessa categoria ocorre quando a temperatura atingida no contato é suficientemente elevada para que, devido à redução da resistência mecânica e até à fusão, o material seja removido como um fluido viscoso [1]. As condições de elevadas velocidades de deslizamento necessárias para que esse tipo de desgaste ocorra tipicamente são atingidas em situações de frenagens bruscas ou durante a partida sem um controle de tração adequado e resultam em elevadas taxas de desgaste.

Também outros mecanismos de desgaste, como a delaminação e a adesão podem ser acelerados devido à redução da resistência mecânica e da dureza em temperaturas elevadas [1]; [10]; além da possibilidade de fadiga e trincas térmicas, como será exposto na próxima seção.

4.3 DEGRADAÇÃO TÉRMICA

As rodas ferroviárias estão sujeitas a situações que produzem calor no contato, por exemplo, durante a frenagem ou aceleração. Nessas situações, o atrito entre a roda e a sapata de freio ou o escorregamento/deslizamento no contato roda-trilho causam a elevação da temperatura na superfície da roda, produzindo tensões térmicas e até transformações de fase.

Devido ao aquecimento e subsequente resfriamento, trincas térmicas podem ser originadas na roda. A elevação da temperatura pode resultar na deformação plástica do material por compressão devido à restrição da expansão térmica na direção circunferencial. Após isso, quando o material é resfriado, tensões residuais trativas na direção circunferencial são induzidas na superfície da roda, o que leva ao surgimento de trincas. Em casos moderados, as trincas geradas atingem apenas alguns micrômetros de profundidade, enquanto que em casos severos podem se propagar radialmente até o disco, podendo provocar a fratura completa da roda em situações extremas [1].

Frequentemente concomitante às trincas de origem térmica ocorre a formação de martensita na superfície da roda. Para que haja esse fenômeno, as temperaturas geradas no contato devem ser suficientemente elevadas (superiores a 700 °C) a ponto de produzir austenita, seguidas de um rápido resfriamento. A martensita é uma fase dura e frágil, podendo agir como área de iniciação de trincas de fadiga [10].

Além dos danos provocados isoladamente pela degradação térmica, esse mecanismo pode interagir com a fadiga mecânica e com o desgaste. Elevadas temperaturas são responsáveis pelo processo de desgaste térmico (*thermal wear*), trincas iniciadas por fadiga térmica podem se propagar sob influência do carregamento mecânico, bem como trincas iniciadas por FCR podem ser influenciadas pelas tensões térmicas. De modo geral, as trincas mecânicas, quando sob efeito de tensões térmicas, tendem a apresentar maiores inclinações com relação à superfície da roda e a produzir defeitos (*shelling* e *spalling*) com aspecto mais escarpado [1].

5. DEFEITOS EM RODAS

Os mecanismos de degradação descritos no capítulo anterior ocorrem ao longo de toda a vida das rodas e trilhos, eventualmente resultando na formação de defeitos. Esses defeitos formados alteram a geometria do perfil em ambos, o que pode comprometer a dinâmica do veículo e aumentar ainda mais as forças no contato e as vibrações. Como consequência, maiores custos de manutenção são gerados pela redução da vida de rodas e trilhos, além do prejuízo à segurança.

As rodas ferroviárias, quando apresentam defeitos que ultrapassam os limites de tolerância, são direcionadas para o reperfilamento ou descarte. Em ambos os casos o custo envolvido é elevado e implica na retirada de locomotivas e vagões da operação. Em casos extremos, descarrilamento pode ser provocado por esses defeitos se trilhos ou rodas fraturarem ou se o friso da roda ultrapassar o trilho [1]. Os principais defeitos em rodas ferroviárias são apresentados ao longo deste capítulo e relacionados aos possíveis fatores operacionais e mecanismos causadores.

5.1 CALO DE RODA

O calo de roda é um defeito geométrico discreto na pista de rolamento, caracterizado pela alteração do raio numa pequena seção da roda, o que introduz cargas de impacto no contato [1]. Um exemplo desse defeito é apresentado na Figura 26.



Figura 26 - Calo de roda. Fonte: [1]

O defeito é causado pelo deslizamento não intencional da roda sobre o trilho. Geralmente esse deslizamento está relacionado à frenagem e pode ser provocado por falhas no freio, erros operacionais ou devido ao baixo atrito entre a roda e o trilho associado a forças elevadas de frenagem. Como consequência, uma parte da pista de rolamento é severamente desgastada e a temperatura é significativamente elevada na região devido à dissipação de energia pelo atrito. Após esse deslizamento, a região sofre um rápido resfriamento, o que pode levar a transformações de fase no material, formando martensita e tensões residuais. O campo de tensões residuais produzido é predominantemente compressivo na região martensítica e trativo ao seu redor [1].

Em caso de formação de martensita na superfície da roda, ocorrerá nucleação e propagação de trincas nesse material frágil devido ao repetido contato de rolamento. Por consequência das tensões residuais de tração ao redor da martensita, as trincas provocadas tendem a crescer radialmente até profundidades maiores, provocando uma remoção relativamente grande de material da roda [1].

Calos de roda são facilmente identificados pelo dano presente nas mesmas posições angulares em ambas as rodas do rodeiro. A Figura 27 mostra o lascamento

(*spalling*) da martensita formada em regiões de calo de roda em duas rodas de um mesmo rodeiro [10].



Figura 27 - Lascamento (*spall*) de martensita em calos de roda formados em duas rodas de um mesmo rodeiro. Fonte: [10].

5.2 SHELLING (ESCAMAÇÃO)

O *shelling* é um das mais visíveis manifestações de defeito na pista de rolamento das rodas ferroviárias. Esse defeito é resultante da propagação de trincas, sejam elas iniciadas por fadiga de contato de rolamento ou por fratura de martensita gerada na superfície da roda [10]. As trincas se propagam devido aos ciclos de carregamento provocados pelo rolamento e se unem abaixo da superfície, causando a remoção de porções do material na forma de escamas.



Figura 28 - Roda afetada por shelling. Fonte: [1].

As trincas propagadas por FCR na pista de rolamento tendem a apresentar a abertura numa direção perpendicular ao microescorregamento resultante na superfície. Esse fenômeno fornece indícios de fatores operacionais que influenciam na propagação das trincas [10] e é representado na Figura 29.



Figura 29 - Relação entre a direção do microescorregamento resultante e a direção das trincas de FCR na superfície. Fonte: Adaptado de [10].

Historicamente, considerava-se que calos de roda causavam *spalls*, enquanto que o *shelling* era causado apenas por FCR. No entanto, essa distinção não é tão clara uma vez que trincas iniciadas em regiões de martensita na superfície podem se

propagar ao longo da circunferência da roda, produzindo *shelling* [10], como mostra a Figura 30.



Figura 30 - Estágio intermediário de *shelling* sendo formado a partir do lascamento (*spall*) em um calo de roda. Fonte: [10].

À medida que o carregamento cíclico prossegue, as trincas continuam a se propagar e o defeito tende a manifestar-se por toda a circunferência da roda. Uma vez que a roda estiver afetada por *shelling* ao redor de toda a sua pista de rolamento, torna-se difícil identificar a origem das trincas.

A Associação Americana de Ferrovias (AAR) estabelece um limite de tolerância para a ocorrência de *shelling* e *spalling* na pista de rolamento. Uma região com defeito causado por *shelling* leva a roda a ser condenada se, na área afetada, puder ser inscrita uma circunferência com diâmetro de 1" em que todo o material da superfície original foi removido [5].

5.3 SPALLING (LASCAMENTO)

A bibliografia consultada não apresenta uma definição que permita a distinção clara entre *shelling* e *spalling* em rodas ferroviárias. Geralmente, esses dois defeitos apresentam um aspecto visual indistinguível [2], além de poderem ocorrer em consequência um do outro [10]. A Figura 30, na seção anterior, mostra o desenvolvimento de *shelling* a partir da ocorrência de *spalling* na superfície da roda.

Como é mencionado na seção anterior, historicamente, o *spalling* foi associado à formação de martensita em defeitos de calo de roda, apresentando-se em regiões localizadas e formado por trincas mais inclinadas em direção ao interior do material. Em contraste, o *shelling* provocado unicamente por FCR tende a apresentar-se por toda a circunferência da roda, com trincas mais rasas e próximas da direção circunferencial, como pode ser observado na Figura 28.

As Figuras 27 e 31 ilustram o defeito tradicionalmente classificado como *spalling*: o lascamento da região martensítica formada em calos de roda.



Figura 31 - *Spalling* na pista de rolamento sendo formando a partir de trincas numa região de martensita. Fonte: [2].

5.4 TRINCAS TÉRMICAS

Como abordado no capítulo anterior, trincas térmicas podem ser originadas em rodas ferroviárias devido ao aquecimento e subsequente resfriamento. A elevação da temperatura pode resultar na deformação plástica do material por compressão devido à restrição da expansão térmica na direção circunferencial. Após isso, quando o material é resfriado, tensões residuais trativas na direção circunferencial são induzidas na superfície da roda, o que leva ao surgimento de trincas.

As trincas térmicas são diferenciadas visualmente das trincas de fadiga devido ao comprimento e à orientação que apresentam. Na superfície da roda, enquanto as trincas de fadiga tendem a ser estreitas, alongadas e apresentarem diferentes ângulos, as trincas térmicas geralmente apresentam separação entre as superfícies da trinca e sempre são orientadas axialmente [10].



Figura 32 - Roda com trincas térmicas (região central da pista de rolamento, próximas à fita adesiva), trincas de FCR são observadas à esquerda. Fonte: Adaptado de [1].



Figura 33 - Trincas térmicas apresentando separação entre as faces das trincas, região do friso da roda. Fonte: [5].

Em casos moderados, as trincas geradas atingem apenas alguns micrômetros de profundidade, enquanto que em casos severos podem se propagar radialmente até o disco, podendo provocar a fratura completa da roda em situações extremas [1].



Figura 34 - Roda com trinca térmica propagando-se pelo disco em direção ao cubo. Fonte: [1].

Trincas iniciadas por fadiga térmica podem se propagar sob influência do carregamento mecânico, bem como trincas iniciadas por FCR podem ser influenciadas pelas tensões térmicas. De modo geral, as trincas mecânicas, quando sob efeito de tensões térmicas, tendem a apresentar maiores inclinações com relação à superfície da roda e a produzir defeitos (*shelling* e *spalling*) com aspecto mais escarpado. A Figura 35 mostra um defeito de aproximadamente 2 cm, produzido pelo efeito combinado de FCR e tensões térmicas, o que é evidenciado pela maior inclinação das trincas [1].



Figura 35 - Defeito profundo, com extensão aproximada de 2 cm, provocado pela combinação de FCR e tensões térmicas. Fonte: [1].

5.5 DESGASTE CÔNCAVO

Existem duas principais regiões de desgaste envolvidas no contato roda-trilho. A primeira ocorre no contato entre o topo do boleto do trilho e a pista de rolamento da roda. A segunda deve-se ao contato entre o friso da roda e o canto de bitola, principalmente em curvas [2]. No primeiro caso, o desgaste tende a alterar progressivamente a geometria da roda, levando ao defeito de desgaste côncavo, que é abordado nesta seção. Na seção seguinte é apresentado o defeito decorrente do segundo caso.



Figura 36 - Representação do perfil da roda quando nova e desgastada, bem como o perfil de um trilho novo. Fonte: Adaptado de [1].

O contato entre o topo do boleto e a pista de rolamento normalmente está sujeito a tensões normais que variam de 1300 a 1700 MPa e a níveis relativamente baixos de escorregamento (inferiores a 1,5%). Nesse caso, um desgaste moderado tende a ocorrer, predominando o mecanismo de desgaste oxidativo, [2] como abordado no capítulo anterior.

Partículas duras podem ser introduzidas entre as superfícies da roda e do trilho a partir da contaminação do ambiente, da aplicação de areia para controle de tração ou produzidas a partir do desgaste (*debris*) [1]. A presença dessas partículas

promove a ocorrência do mecanismo de desgaste abrasivo no contato, o que pode aumentar a taxa de desgaste em duas ou até três vezes [2].

Com a progressão desses mecanismos de desgaste no contato, a geometria da roda é continuamente alterada, tendendo a formar uma concavidade ao longo da pista de rolamento. Uma roda apresentando desgaste côncavo pode ser observada na figura abaixo.



Figura 37 - Roda apresentando desgaste côncavo (entre as setas). Fonte: [1].

O defeito de desgaste côncavo forma um falso friso na borda da pista de rolamento, alterando a geometria do contato [2]. Esse efeito aumenta sensivelmente as tensões no contato, a resistência ao rolamento e as forças laterais em curvas, podendo promover a formação de outros defeitos, como trincas de FCR, tanto na roda quanto no trilho [10].

5.6 DESGASTE DE FRISO

Além da pista de rolamento, também o friso da roda está sujeito à ocorrência de defeitos causados por desgaste. Esse fenômeno ocorre principalmente em trechos curvos da ferrovia, onde o friso da roda toca o canto de bitola do trilho.

A depender do perfil da roda e do trilho (sendo novos ou desgastados) e do raio de curvatura no trecho da ferrovia, diferentes distribuições de tensão e escorregamento no contato ocorrerão. Consequentemente, diferentes modos e taxas de desgaste podem ser verificados no contato entre o friso e o canto de bitola. Nos casos mais severos, a tensão no contato pode alcançar 3000 MPa e o escorregamento relativo varia de 0,06 a 0,1 [2].

Mecanismos de desgaste como o adesivo e o térmico (apresentados no capítulo anterior) tipicamente ocorrem em condições de contato severas como as observadas no contato entre o friso e o canto de bitola em curvas acentuadas [1]. Além disso, escoamento plástico pode ocorrer no friso, principalmente quando o boleto apresenta um perfil desgastado [2]. A figura abaixo representa esse fenômeno, com o material sendo deformado plasticamente em direção ao topo do friso.



Figura 38 - Representação do escoamento plástico no friso da roda. Fonte: [2].

A AAR estabelece as classificações de "friso fino" e "friso vertical" como defeitos decorrentes do desgaste de friso, bem como os limites de desgaste permitido em cada caso. O limite para o "friso fino" é a espessura de 15/16", já o "friso vertical", determina o reperfilamento/descarte da roda quando o friso apresenta uma superfície plana e vertical elevando-se a 1" ou mais da pista de rolamento [5].



Figura 39 - Limites de desgaste de friso estabelecidos pela AAR, medição com calibre de roda. Friso fino (esquerda). Friso vertical (direita). Fonte: Adaptado de [5].

O desgaste de friso tende a ser mais custoso do que o desgaste na pista de rolamento, uma vez que o defeito no friso requer uma maior remoção de material durante o reperfilamento para a correção da geometria. A Figura 40, a seguir, apresenta uma roda com o aspecto típico do desgaste de friso:



Figura 40 - Roda com desgaste de friso. Fonte: Disponibilizado por Antônio César Bozzi.

6. CONCLUSÕES

Na bibliografia consultada para a elaboração deste trabalho, em especial no caso de manuais, normas e *handbooks*, a descrição dos defeitos em rodas é basicamente morfológica. Em alguns casos não há definições claras que permitam a classificação adequada dos defeitos, ocorrendo inclusive, contradições entre diferentes referências.

Em vários casos, a bibliografia consultada apresenta as relações entre os defeitos e os mecanismos de degradação de forma limitada. Isso ocorre principalmente em manuais e normas voltados para a manutenção, em que os defeitos são relacionados principalmente a fatores operacionais e ambientais.

Raramente os defeitos apresentados são relacionados às propriedades e à microestrutura dos materiais das rodas ferroviárias.

Artigos técnicos tendem a descrever mais detalhadamente os mecanismos envolvidos na degradação dos materiais de rodas e trilhos, no entanto, são geralmente baseados em ensaios de laboratório e nem sempre comprovam a ocorrência, na prática, dos mecanismos observados.

A compreensão das teorias da mecânica do contato e das forças atuantes no par roda-trilho é fundamental para a análise dos mecanismos de degradação (em especial a FCR e o desgaste) envolvidos na formação de defeitos em rodas.

Os diferentes mecanismos de degradação, FCR, desgaste e degradação térmica, ocorrem simultaneamente e podem ser induzidos uns pelos outros.

Mais de um mecanismo de degradações pode estar envolvido na formação de um determinado defeito.

Do mesmo modo que os mecanismos de degradação, os diferentes defeitos observados em rodas frequentemente estão relacionados e entre si. Defeitos como *spalling* e *shelling* podem ser provocados em decorrência de defeitos anteriores, *shelling* e trincas térmicas podem atuar em conjunto, etc.

A complexidade das relações entre os mecanismos e os defeitos e entre os próprios defeitos justifica, em parte, a falta de definições claras na literatura para alguns casos.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Mapear os defeitos comumente encontrados em rodas na prática da atividade ferroviária, em parceria com empresas do setor;
- A partir de amostras de rodas com defeitos, empregar metodologia científica para uma caracterização mais precisa dos defeitos, permitindo que definições claras sejam estabelecidas;
- Identificar os mecanismos de degradação atuantes em rodas ferroviárias com defeitos, estabelecendo relações de causalidade;
- Realizar ensaios com materiais empregados em rodas e trilhos de forma a reproduzir os mecanismos causadores dos defeitos observados na prática ferroviária.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] LEWIS, R.; OLOFSSON, U. Wheel-rail interface handbook. Woodhead Publishing, 1st Edition, 2009.

[2] IHHA – International Heavy Haul Association. Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: wheel and rail interface issues. 1st edition, Virginia Beach, 2001.

[3] BUSHAN, Bharat. **Modern tribology handbook.** Department of Mechanical Engineering, Ohio State University. Columbus, 2001.

[4] ALMEIDA, Leandro Prates Ferreira de. Estudo do desgaste por deslizamento de pares metálicos empregados no contato roda-trilho. Vitória – ES. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

[5] AAR – ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROAD. Field Manual of the Interchange Rules. Washington, 2011.

[6] CLARKE, M. Wheel rolling contact fatigue and rim defects investigation. Rail Safety & Standards Board, 2008.

[7] LEWIS, R.; DWYER-JOYCE, R. S. Wear mechanisms and transitions in railway wheel steels. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2004.

[8] HE, C. G.; HUANG, Y. B.; MA, L.; GUO, J.; WANG, W. J.; LIU, Q. Y.; ZHU, M. H. **Experimental investigation on the effect of tangencial force on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel material.** Tribology International 92, 2015.

[9] BOLTON, P. J.; CLAYTON, P. Rolling-sliding wear damage in rail and tyre steels. Wear, 1984: n. 93, p. 145-165.

[10] MAGEL, E.; KALOUSEK, J. Identifying and interpreting railway wheel defects. International Heavy Haul Association Conference on Freight Car Trucks/Bogies. Montreal, 1996.

[11] AAR – ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROAD. M-107/M-208: Manual of Standards and Recommended Practices Wheels and Axles - Section G. Washington, 2011.

[12] SOARES, H.; ZUCARRELI, T.; VIEIRA, M.; FREITAS, M.; REIS, L. **Experimental characterization of the mechanical properties of railway wheels manufactured using class B material.** XV Portuguese Conference on Fracture, Paço de Arcos, 2016.

[13] MAIA, Fernando Silvano; MELLO, Ricardo Silva Homem de; CARDOSO, Kátia Regina; VILLAS BOAS, Renato Lyra. **Análise microestrutural da variação da têmpera na pista de rolamento das rodas ferroviárias.** São José dos Campos – SP, 2010.

[14] ARCELORMITTAL – Long Products - Rails & Especial Sections. Acesso em 17/07/2017, http://rails.arcelormittal.com/products/tram-rails.

[15] JOHNSON, K. L. **Contact Mechanics.** Cambridge University Press, Cambridge, 1985.

[16] SANTOS, Francisco de Carvalho. Análise do contato roda-trilho e sua influência na vida em serviço de rodas ferroviárias. Campinas-SP. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2000.

[17] JOHNSON, K. L. **The strength of surfaces in rolling contact.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C. Journal of Mechanical Engineering Science 203 (C3), 1989.

[18] KARTTUNEN, K. Influence of rail, wheel and track geometries on wheel and rail degradation. Doctoral Thesis, Chalmers University of Technology. Göteborg, 2015.

[19] HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials.** University of Cambridge - Department of Materials Science and Metallurgy. Londres, 1992.