

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA FERROVIÁRIA E METROVIÁRIA

FABRINA MARIA SOARES TIBURCIO

OS MODELOS DA MECÂNICA DO CONTATO RODA-TRILHO: REVISÃO
SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Joinville

2019

FABRINA MARIA SOARES TIBURCIO

OS MODELOS DA MECÂNICA DO CONTATO RODA-TRILHO: REVISÃO
SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Ferroviária e Metroviária do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Mikowski.

Joinville

2019

FABRINA MARIA SOARES TIBURCIO.

**OS MODELOS DA MECÂNICA DO CONTATO RODA-TRILHO: REVISÃO
SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ferroviária e Metroviária, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Banca Examinadora:

Alexandre Mikowski, Prof. Dr. Fís.

Universidade Federal de Santa Catarina

Orientador

Vanessa Aparecida Alves de Lima, Prof^a. Dr^a.

Universidade Federal de Santa Catarina

Régis Kovacs Scalice, Prof. Dr. Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado saúde, força nos momentos mais difíceis e iluminado meu caminho na conquista dessa etapa.

Aos meus pais, Simone e Edivaldo, que sempre estiveram do meu lado me apoiando e incentivando a não desanimar, me dando os melhores conselhos, fornecendo todo o carinho e suporte necessário durante toda essa trajetória.

Ao meu irmão Felipe e a minha cunhada Leilane, por todo o companheirismo e amizade, desde sempre, pra sempre.

Agradeço ao meu amor, Márcio, pela paciência, por sempre estar sempre ao meu lado ajudando, dando força, carinho, apoio, me motivando a crescer e acreditando no meu potencial.

Ao meu orientador, Dr. Alexandre Mikowski, pela ajuda no desenvolvimento do tema, por transmitir seus conhecimentos, pelas dicas e correções, e por disponibilizar o uso do LabMAD – Laboratório de Modelagem e Análise de Dados, onde fiz minhas pesquisas.

Aos meus amigos da família “*The Fantastic*”, que nossa amizade de 12 anos dure para sempre, onde quer que cada um esteja.

Aos amigos que fiz durante minha trajetória na universidade, tanto para jogar conversa fora quanto para estudar. E em especial os amigos do LEF – Laboratório de Estudos Ferroviários.

Agradeço a todos que estiveram presentes de alguma forma nessa caminhada, amigos e familiares.

“Os jovens se cansarão e se fatigarão, e os moços certamente cairão; Mas os que esperam no Senhor renovarão as forças, subirão com asas como águias; correrão, e não se cansarão; caminharão, e não fatigarão.”

Isaías 40: 30-31

RESUMO

No Brasil, a dinâmica ferroviária e metroviária também se dá pelo contato roda-trilho. Os conhecimentos específicos da superfície de rolamento e do friso da roda ferroviária, bem como do boleto do trilho ferroviário são essenciais para o estudo do contato roda-trilho. Nesse caso, o contato se dá entre materiais metálicos, e ambos sofrem desgastes com a operação do material rodante na via permanente. O peso total de um veículo ferroviário, ou metroviário, é transmitido para a via permanente pela distribuição da força peso pelo somatório das áreas de contato das rodas do veículo com o trilho. Na região do contato entre roda e trilho têm-se uma distribuição de tensões na via permanente, assim como na roda, resultado da 3ª Lei de Newton, ou seja, a ação e reação. Essas tensões são geradas por carregamentos estáticos ou dinâmicos, para o veículo parado ou em movimento, respectivamente. Quando a tensão num dado ponto de um sólido, seja a roda ou trilho, exceder a tensão de escoamento do material metálico que compõem a estrutura ferroviária, os fenômenos de desgaste e fadiga termo-mecânica estarão envolvidos. Atualmente a literatura dispõe das teorias: i) Hertz, ii) Carter, iii) Johnson e Vermeulen e iv) Kalker; para explicar o contato roda-trilho. Dentro desse contexto, este trabalho revisa e compara as teorias que explicam a mecânica do contato roda-trilho, além de apontar os avanços científicos na área, a fim de fundamentar um levantamento teórico, aplicando a metodologia da Revisão Sistemática da Literatura.

Palavras-chave: Contato Roda-Trilho. Teorias da Mecânica de Contato. Revisão Sistemática da Literatura.

ABSTRACT

In Brazil, the railway and subway dynamics are due to wheel-rail contact. Specific knowledge of the rolling surface and the rail frieze as well as the rail billet is essential for the study of wheel-rail contact. In this case, the contact occurs between metallic materials, and both suffer wear, with the operation of the rolling stock in the permanent way. The total weight of a rail vehicle, or subway, is transmitted to the permanent way by the distribution of this weight force by the sum of the contact areas of the wheels of this vehicle with the rail. In the region of contact between wheel and rail there is a distribution of stresses in the permanent path, as well as in the wheel, result of Newton's 3rd law, that is, of the action and reaction. These voltages are generated by static or dynamic loads for the stationary or moving vehicle, respectively. When the stress at a given point of a solid, be it the wheel or rail, exceeds the flow stress of the metallic material that makes up the railway structure, the phenomena of thermal fatigue and fatigue will be involved. Currently the literature has theories: i) Hertz, ii) Carter, iii) Johnson and Vermeulen and iv) Kalker; to explain wheel-rail contact. In this context, the objective is to review and compare theories that explain the mechanics of wheel-rail contact, as well as to perform a bibliographical research of the scientific advances in the area, in order to base a theoretical survey, applying the methodology of Systematic Review of Literature.

Keywords: Wheel-Rail Contact. Theories of Contact Mechanics. Systematic Review of Literature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil Vignole.....	18
Figura 2 - Especificação para roda ferroviária.	19
Figura 3 - Desenho esquemático da roda ferroviária.....	20
Figura 4 - Elipse de Hertz.....	21
Figura 5 - Área de contato roda-trilho com carga.	22
Figura 6 - Área de contato de sistema roda-trilho.	22
Figura 7 - Franjas de interferência no contato entre duas lentes cilíndricas.....	24
Figura 8 - Coordenadas que esquematizam as Equações 1 e 2.	26
Figura 9 - Relação de forças com escorregamento e rolamento.....	29
Figura 10 - Região de contato segundo Johnson.	30
Figura 11 - Forças tangenciais, microescorregamento longitudinal atuando na região de contato.	31
Figura 12 - Formato da região de contato para Kalker.....	33
Figura 13 - Passos da metodologia de RSL.....	37
Figura 14 - Comparação da área de contato fornecida por MV e SRST.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados Brutos: Quantidade de documentos encontrados nas diferentes plataformas, Fase 2.....	41
Tabela 2 - Quantidade de trabalhos científicos após Filtro na Fase 3.	42
Tabela 3 - Quantidade de artigos científicos disponíveis na UFSC, para download.....	43
Tabela 4 - Quantidade de artigo selecionado após a aplicação do Filtro 2, na Fase 3.	43
Tabela 5 - Quantidade de artigos selecionados na Fase 4.	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Variáveis Ka e Kb	28
Quadro 2 - Comparação entre coeficiente de rigidez no contato apresentado por Johnson - Vermeulen (J – V) e o de Kalker.....	34
Quadro 3 - Coeficiente de rigidez para algumas relações a/b e v	35
Quadro 4 - Resultado da Fase 1 da RSL.....	39
Quadro 5 - Conjunto de palavras-chave utilizadas na RSL.	41
Quadro 6 - Catálogo de artigos da RSL.....	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Quantidade de publicações por período na plataforma ScienceDirect.	57
Gráfico 2 - Quantidade de publicações por período na plataforma Scopus.	58
Gráfico 3 - Quantidade de publicações por período na plataforma Scielo.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
AAR	<i>Association of American Railroads</i>
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
MEF	Método dos Elementos Finitos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.1.1 Objetivo Geral.....	15
1.1.2 Objetivos Específicos.....	15
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TCC	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 TRILHO FERROVIÁRIO	17
2.2 RODA FERROVIÁRIA.....	19
2.3 CONTATO RODA-TRILHO	20
2.4 TEORIAS DA MECÂNICA DO CONTATO	23
2.4.1 Teoria de Hertz.....	24
2.4.2 Teoria de Carter	28
2.4.3 Teoria de Johnson e Vermeulen.....	29
2.4.4 Teoria de Kalker.....	33
3 METODOLOGIA.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1 APLICAÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	39
4.1.1 RSL - Fase 1.....	39
4.1.2 RSL – Fase 2	40
4.1.3 RSL – Fase 3	42
4.1.3.1 Fase 3 – Filtro 1.....	42
4.1.3.2 Fase 3 – Filtro 2.....	42
4.1.4 RSL – Fases 4 e 5.....	43
4.2 ESTADO DA ARTE.....	45
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
REFERÊNCIAS	54

APÊNDICE A – Gráficos dos anos de publicações referentes à Fase 3.	57
--	-----------

1 INTRODUÇÃO

Desde o início do século XVI, diversos países europeus já utilizavam transportes sobre trilhos. No entanto, esses caminhos de trilhos destinavam-se exclusivamente ao transporte de carvão e minério de ferro (SILVA, 2011). Durante esse período, o transporte era realizado sobre trilhos de madeira e as principais fontes de tração eram animal e humana. Segundo Silva (2011), a instalação desses trilhos, proporcionava maior facilidade de movimentação em relação ao chão das minas.

Santos (2011) completa, que no início do século XVIII, algumas empresas de mineração de carvão da Inglaterra começaram a revestir os trilhos de madeira com tiras metálicas a fim de torná-los mais duráveis. Com essa mudança, o deslocamento se tornava mais fácil e os cavalos conseguiam tracionar uma série de vagões. No final do século XVIII, os ferreiros ingleses começaram a fabricar trilhos inteiramente de ferro, mudança que proporcionou maior facilidade na locomoção dos vagões de transporte.

Com a evolução do transporte sobre trilhos, estudos referentes ao contato da roda e o trilho foram realizados buscando descrever e analisar sua importância. Segundo Santos (2000), o estudo dos fenômenos relacionados ao contato entre corpos cilíndricos rolantes teve seu início com Hertz (1882), desenvolvendo a primeira teoria com objetivo de explicar e quantificar os parâmetros envolvidos. Carter (1926) foi o primeiro a analisar, em específico, a região de contato entre a roda e o trilho, descrevendo sua forma geométrica. Outros autores, como Johnson e Vermeulen (1964) e Kalker (1967), realizaram pesquisas semelhantes, incluindo fatores não analisados nas pesquisas anteriores.

Steffler (2013) descreve esse contato entre roda e trilho como o conjunto de estudos que analisam a interação entre dois componentes. O contato roda-trilho somente foi encarado como prioridade conforme as cargas por eixo e as velocidades das composições atingiram altos valores. Assim, mesmo que pequenos defeitos na superfície do rolamento do trilho ou da roda influencie a vida útil, estudos do contato roda-trilho podem acarretar em ganhos de segurança, disponibilidade ou perdas, principalmente relacionadas a custos.

Para que o transporte ferroviário seja feito de maneira eficiente, um dos fatores mais importantes a ser levado em consideração é a aderência entre a roda e o trilho, ou seja, o contato entre esses. A capacidade de tração, aceleração e frenagem de uma locomotiva é determinada por estes fatores físicos (BORBA, 2009).

Segundo Steffler (2013), a redução do atrito na rolagem entre as rodas dos vagões e os trilhos é uma grande vantagem das estradas de ferro, pois é possível transportar maior volume de carga. Com o baixo coeficiente de atrito, é necessário que sejam maximizados traçados com poucas rampas e curvas, permitindo que os esforços traçadores de locomotivas sejam multiplicados quando comparados aos rendimentos utilizados em estradas de rodagem.

Como é possível observar, a interação da roda com o trilho representa um fator determinante para a eficiência da locomotiva e qualidade da via permanente. Partindo disso, o presente trabalho analisa o contato roda-trilho, e verifica a influência das forças geradas no contato sobre a via permanente.

1.1 OBJETIVOS

Neste tópico são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Revisar e comparar os modelos da mecânica do contato roda-trilho e apontar os avanços científicos na área para fundamentar um levantamento teórico com base na Revisão Sistemática da Literatura (RSL).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Aplicar a metodologia da Revisão Sistemática da Literatura (RSL) buscando materiais bibliográficos que abordam os modelos da mecânica do contato roda-trilho;
- Quantificar os dados obtidos pela Revisão Sistemática da Literatura, através das pesquisas bibliográficas e qualitativas.

- Apresentar o Estado da Arte dos artigos selecionados com a Revisão Sistemática da Literatura.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TCC

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) está estruturado em cinco capítulos, sendo este o primeiro deles, onde se apresenta uma introdução sobre o assunto, expondo a motivação e a justificativa pela qual buscou-se trabalhar com este tema, bem como o objetivo geral e os objetivos específicos estabelecidos.

O segundo capítulo trata de uma fundamentação teórica e foi dividido em quatro seções: Trilho Ferroviário, Roda Ferroviária, Contato Roda-Trilho e Teorias da Mecânica do Contato. Busca-se apresentar de maneira objetiva as definições desses elementos, para melhor entendimento do tema proposto.

O terceiro capítulo refere-se à metodologia empregada na elaboração deste estudo, sendo quantitativa, apresentando o estado da arte que busca mapear e discutir produções acadêmicas como publicações em periódicos. Neste capítulo destacam-se todas as etapas relacionadas à Revisão Sistemática da Literatura (RSL), passando por todo o processo de filtragem e refinamento deste material para torná-lo o mais adequado possível aos objetivos pré-estabelecidos. Conforme Gil (2009, p. 44), a pesquisa bibliográfica “...é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos.” Caracterizando a metodologia de pesquisa empregada neste TCC.

O quarto capítulo, por sua vez, descreve a aplicação da Revisão Sistemática da Literatura que forma o catálogo de artigo. Nele se evidencia as principais características de produção científica em torno dos modelos da mecânica do contato roda-trilho, que envolve análise das datas de publicação, periódicos, autores, nacionalidades, palavras-chaves, entre outros aspectos que possam ser considerados relevantes neste processo de revisão. Ainda, neste capítulo, os artigos científicos que foram filtrados e selecionados, pela aplicação da RSL, serão revisados e analisados bibliograficamente.

No último capítulo são apresentadas as considerações finais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os conceitos teóricos de Trilho Ferroviário, Roda Ferroviário, Contato Roda-Trilho e Teoria da Mecânica do Contato serão apresentados.

2.1 TRILHO FERROVIÁRIO

O trilho representa o elemento ativo da via permanente de maior custo de manutenção da ferrovia, por isso ao longo dos anos, estudos vêm sendo realizados para a sua melhor utilização. A forma atual recebe o nome do seu idealizador Vignole, e o material utilizado na composição química vem mudando junto com a necessidade das ferrovias em transportar cada vez mais carga, o que exige que o trilho resista mecanicamente a um maior número de passadas de rodas e peso maior (PETRONI, 2006).

Segundo Semprebone (2005), os trilhos têm algumas funções, como: constituir a superfície de rolamento pelo qual trafegam os veículos ferroviários, servindo como guia, e transmitir os esforços decorrentes do movimento do veículo para a infraestrutura viária.

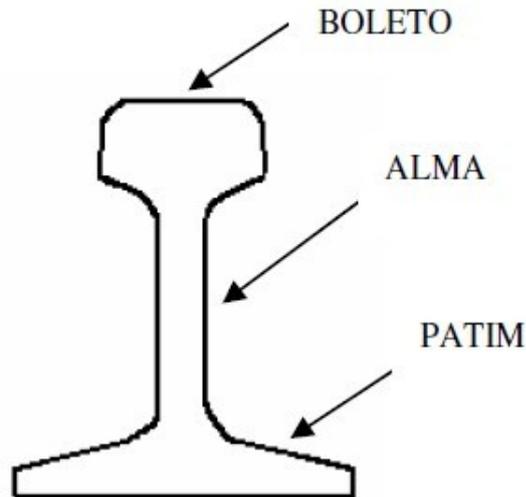
Segundo Schneider (2005), os trilhos devem possuir as seguintes características para realizar suas funções:

- Altos limites de escoamento e de resistência mecânica, aliados a uma boa tenacidade à fratura;
- Resistência ao desgaste, alta dureza e resistência mecânica à fadiga;
- Alta tenacidade à fratura é a resistência à propagação de trincas pré-existentes;
- Soldabilidade adequada e baixa susceptibilidade a fragilização pelo hidrogênio.

O perfil básico utilizado em trilhos ferroviários convencionais, Vignole, é formado por boleto, alma e patim, definido pela norma NBR 7590:2012 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), apresentado na Figura 1, e são compostos por dois perfis

metálicos paralelos mantidos pelos dormentes. Esse perfil favorece a resistência à flexão devido à sua geometria, que concentra a maior parte da massa do trilho nos pontos onde as tensões normais são maiores (SEMPREBONE, 2005).

Figura 1 - Perfil Vignole



Fonte: Semprebone (2005, p. 9).

O boleteo localiza-se na parte superior do trilho e é caracterizado por sua largura, altura e inclinação da face e do abaulamento da superfície de rolamento que, possui grande importância, não só no contato roda-trilho, mas também na estabilidade do rolamento. Também deve ser *massudo*, para que o desgaste não afete o momento de inércia da seção.

A alma é a parte mais fina e encontra-se no centro do trilho. Quanto maior a alma, maior a distância do boleteo e do patim com relação à linha neutra da seção, conseqüentemente, maior será o momento de inércia (SEMPREBONE, 2005).

O patim é a parte inferior do trilho e é assentado sobre os dormentes, recebem e transmitem os esforços produzidos pelas cargas ao lastro, constituído basicamente de pedra britada e cascalho. Não pode ser muito fino para garantir que alma continue perpendicular ao dormente durante as solicitações transversais, como em curvas, onde essas são mais pronunciadas. Caso a espessura não seja adequada ao nível de solicitação transversal, pode ocorrer o acúmulo de deformações permanentes ao longo da vida útil e provocar acidentes (SEMPREBONE, 2005).

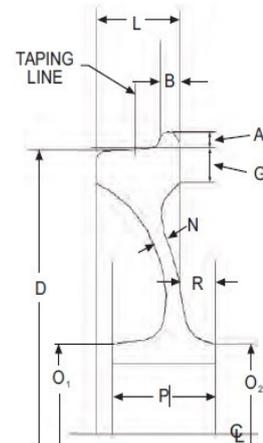
2.2 RODA FERROVIÁRIA

A roda ferroviária é um componente do rodeiro fabricado em aço fundido ou forjado. As ferrovias de carga no Brasil utilizam os tipos de roda recomendados pela Associação de Ferrovias Americanas (AAR), através das Especificações M-107 e M-208, como pode ser visto na Figura 2. Tais especificações definem as classes de aplicação, materiais e composição química, tratamentos térmicos, níveis de dureza, marcação, processos de homologação e de inspeção, certificação do fornecedor e critérios de recebimento (SISDELLI, 2006).

Figura 2 - Especificação para roda ferroviária.

STANDARD AAR WHEEL TYPES—WIDE-FLANGE CONTOUR—FOR FREIGHT CAR SERVICE—CARBON STEEL												
AAR TYPE	A-28 CA-28	E-28 CA-28	A-30 CA-30	J-33 CJ-33	M-33 CM-33	P-33 CP-33	H-36 CH-36	J-36 CJ-36	K-36 CK-36	B-38 CB-38	C-38 CC-38	D-38 CD-38
STATUS DATE	STND 1952	STND 1985	STND 1946	STND 1956	STND 1961	STND 1984	STND 1962	STND 1962	STND 1962	STND 1964	STND 1964	
EFFECTIVE DATE	1971	7/1/85	1971	1968	1968	3/1/85	10/1/72	1968	1968	9/1/73	1968	
TREAD TYPE	M-W	1-W	M-W	1-W	2-W	M-W	1-W	2-W	M-W	1-W	2-W	M-W
INTENDED AXLE CLASS	F, K	E	F, K	D, E	D, E	D, E, F, G	F	F	F	G	G	G
MAX. CAP PER WHEEL (LB)	32,875	24,375	32,875	27,500	27,500	32,875	35,750	35,750	35,750	39,375	39,375	39,375

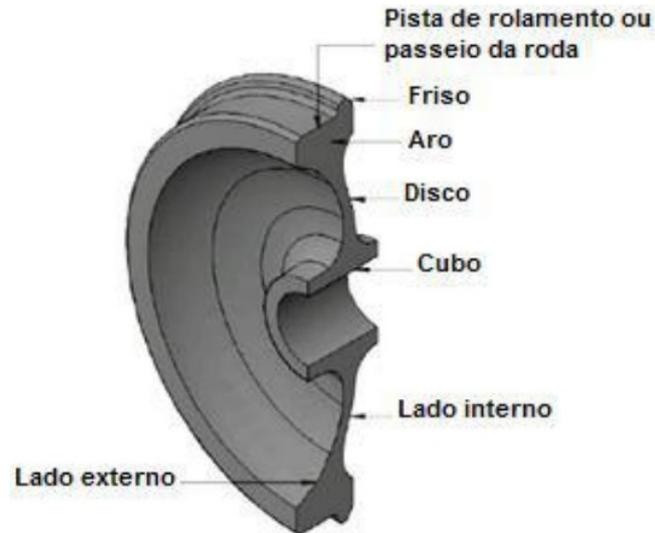
DIMENSION AND TOLERANCES—ALL ENTRIES IN INCHES, EXCEPT TAPES												
D	28 + 14 TAPES (5%–5)	28 + 14 TAPES (5%–5)	30 + 14 TAPES (5%–5)	33 + 14 TAPES (5%–5)	33 + 14 TAPES (5%–5)	33 + 14 TAPES (5%–5)	36 + 14 TAPES (5%–5)	36 + 14 TAPES (5%–5)	36 + 14 TAPES (5%–5)	38 + 14 TAPES (5%–5)	38 + 14 TAPES (5%–5)	38 + 14 TAPES (5%–5)
G (MIN)	2 1/2	1 1/2	2 1/2	1 1/4	1 1/4	2	2 1/2	1 1/2	2	2 1/2	1 1/2	2 1/2
N (MIN)	3/4	5/8	3/4	5/8	5/8	3/4	3/4	3/4	3/4	7/8	7/8	7/8
O ₁	11 1/8-0 +1	10 5/8-0 +1	11 1/8-0 +1	10 5/8-0 +1	10 5/8-0 +1	11 1/8-0 +1	11 1/8-0 +1	11 1/8-0 +1	11 1/8-0 +1	12 1/8-0 +1	12 1/8-0 +1	12 1/8-0 +1
O ₂	11 1/8-0 +1	10 5/8-0 +1	11 1/8-0 +1	10 5/8-0 +1	10 5/8-0 +1	11 1/8-0 +1	11 1/8-0 +1	11 1/8-0 +1	11 1/8-0 +1	12 1/8-0 +1	12 1/8-0 +1	12 1/8-0 +1
MAX FINISH BORE	8 7/8	8 3/8	8 7/8	8 3/8	8 3/8	9 5/8	8 7/8	8 7/8	8 7/8	9 5/8	9 5/8	9 5/8
MIN HUB WALL	1 1/8	1 1/8	1 1/8	1 1/8	1 1/8	1 1/8	1 1/8	1 1/8	1 1/8	1 1/4	1 1/4	1 1/4
P ₁	7 ± 1/8	7 ± 1/4	7 ± 1/4	7 ± 1/4	7 ± 1/4	7 ± 1/4	7 ± 1/4	7 ± 1/4	7 ± 1/4	7 ± 1/4	7 ± 1/4	7 ± 1/4
R	2 1/2 ± 1/8	2 1/2 ± 1/8	2 1/2 ± 1/8	2 1/2 ± 1/8	2 1/2 ± 1/8	2 1/2 ± 1/8	2 1/2 ± 1/8	2 1/2 ± 1/8	2 1/2 ± 1/8	2 1/2 ± 1/8	2 1/2 ± 1/8	2 1/2 ± 1/8



Fonte: Association of American Railroad (2009, p. 31).

De modo geral, as rodas ferroviárias são compostas pelo cubo, disco, aro, pista de rolamento e friso. As regiões assim denominadas podem ser observadas na Figura 3. Os rodeiros são compostos, geralmente, por rodas com configuração cônica, tendo duas funções, a primeira é centralizar o veículo nos trilhos uma vez que, quando o mesmo se desloca mais para o lado de um trilho, a geometria cônica o faz escorregar pela gravidade de volta ao centro, e que desenvolvem forças de direcionamento no contato, e a outra, diminuir o efeito do escorregamento das rodas nas curvas (PORTO, 2004).

Figura 3 - Desenho esquemático da roda ferroviária.



Fonte: Fonseca (2017, p. 16).

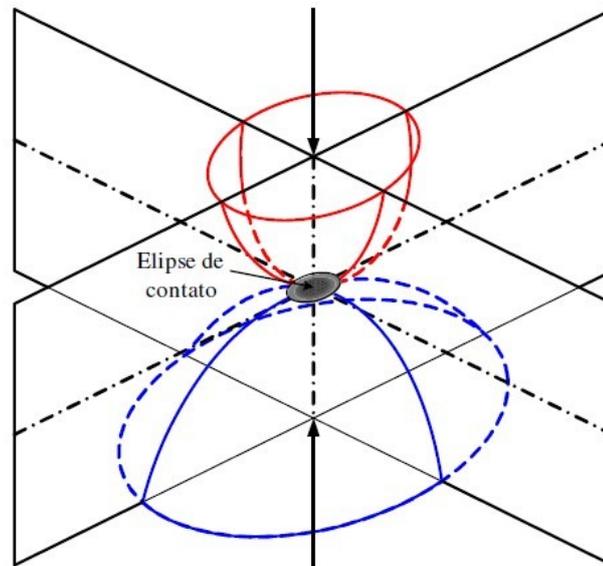
Segundo Brina (1983), o aro é a parte da roda que proporciona a superfície de rodagem (ou pista de rolamento) da roda sobre o trilho, ou seja, onde ocorre o contato roda-trilho. Os aros são providos de um friso saliente, lado interno da roda, que fica dentro da via e o seu perfil deve ser tal que possa ser restabelecido quando modificado pelo uso.

2.3 CONTATO RODA-TRILHO

O contato roda-trilho compreende o conjunto de estudos que analisam a interação entre esses dois componentes ferroviários. O estudo dessa relação somente foi encarado como prioridade conforme as cargas por eixo e as velocidades das composições atingiram altos valores. Assim, mesmo pequenos defeitos na superfície do rolamento do trilho ou da roda influenciam sua vida útil, podendo acarretar em ganhos de segurança e disponibilidade ou perdas, principalmente relacionadas a custos (STEFFLER, 2013).

O contato entre dois sólidos, esféricos, elásticos e ideais, é resumido em um único ponto quando não exercem qualquer pressão entre si. Mas quando pressionados um contra o outro, produz-se na região de contato uma pequena deformação de configuração elíptica, denominada de elipse de Hertz, como apresentado na Figura 4 (BORBA, 2009).

Figura 4 - Elipse de Hertz.

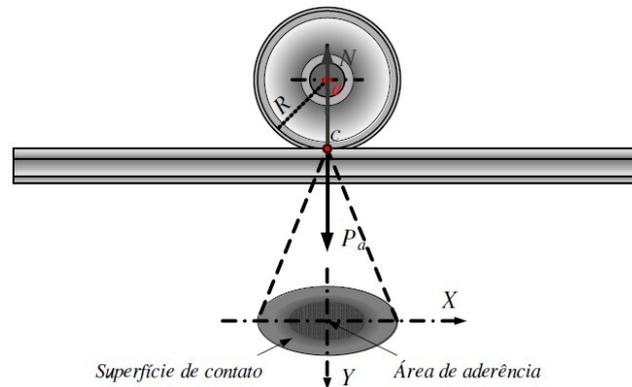


Fonte: Borba (2009, p. 20).

A distribuição de esforços mecânicos, dentro da elipse de contato, não é homogênea, pelo contrário, verifica-se uma forma aproximadamente parabólica. A tensão máxima de compressão ocorre na parte central da elipse e sua intensidade é calculada segundo a equação de Hertz, que será apresentada posteriormente (MAGALHÃES, 2000).

Segundo Pinto (1997), o contato roda-trilho gera solicitações em ambos os elementos, podendo ser estáticas, isto é, com contato sempre no mesmo ponto ao longo do tempo; ou cíclicas, o que pode levar os componentes à falha por fadiga, que inicia uma fratura localizada ou trinca devido às tensões localizadas. Além disso, existem outras peculiaridades quanto à distribuição das tensões mecânicas em problemas de contato. Algumas tensões máximas ocorrem no interior do corpo, denominada como área de aderência, como mostra a Figura 5, em que há certa distância da superfície de contato, existindo clara relação fato com os defeitos encontrados, na prática, em rodas ferroviárias e trilhos.

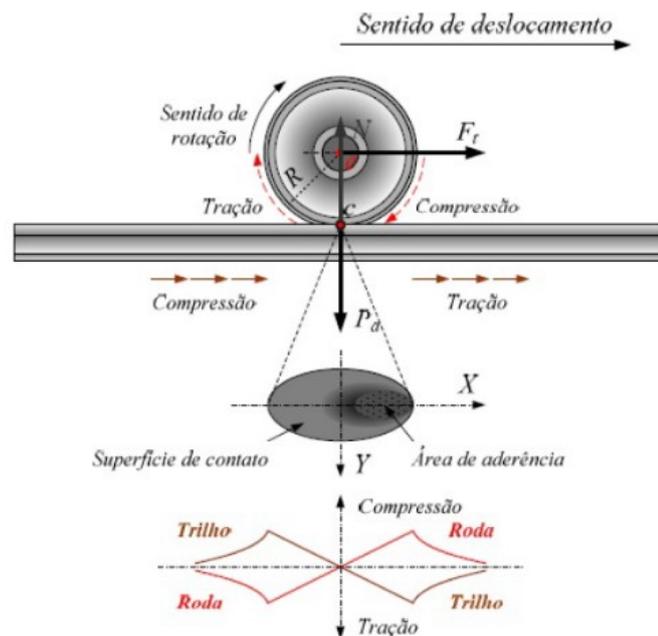
Figura 5 - Área de contato roda-trilho com carga.



Fonte: Borba (2009, p. 21).

Borba (2009) explica quais são as regiões na roda e no trilho que sofrem compressão e tração. Como pode ser visto na Figura 6, onde se pode verificar que uma parte da roda está sofrendo compressão e a outra parte sofre tração, tais tensões são dinâmicas, visto que a roda está em movimento. As constantes mudanças de tensões levam os materiais à fadiga, e a região de contato é a mais prejudicada, pois é onde está localizada a tensão máxima. Esses, juntamente com a pressão de frenagem que ocorre diretamente no perfil da roda, são as maiores causas de desgastes, por isso a importância de se estudar o contato roda-trilho.

Figura 6 - Área de contato de sistema roda-trilho.



Fonte: Borba (2009, p. 22).

O desgaste do trilho e das rodas, decorrente do atrito, faz com que a geometria de contato se altere, podendo comprometer a estabilidade do veículo ferroviário, que se refere às interações das forças que surgem quando o veículo se desloca sobre a via (VILLA, 1993).

No contato roda-trilho atuam forças permanentes e forças dinâmicas. As forças permanentes são forças de atrito que ocorrem nos pontos de contato das superfícies de rolamento e pontos de contato no canto da bitola, a força centrífuga, quando em curva. As forças dinâmicas são constituídas pela força vertical.

2.4 TEORIAS DA MECÂNICA DO CONTATO

O problema da determinação das tensões de contato entre sólidos elásticos de superfícies curvas, pressionadas umas contra as outras, é extremamente complexo, e diversos estudiosos propuseram soluções ao longo do tempo (BORBA, 2009).

Segundo Borba (2009), a complexidade da modelagem exata da condição do contato roda-trilho se torna difícil para o caso ferroviário, uma vez que:

- Os materiais em contato não são isotrópicos ou homogêneos, especialmente quando endurecidos por ação do tráfego ao longo do tempo, ou seja, suas propriedades mecânicas e térmicas não são as mesmas em todas as direções;
- Muitos problemas de contato são estudados em circunstância onde há escoamento plástico visível, com tensões mecânicas sensivelmente superiores ao limite elástico do aço;
- As tensões ortogonais, apesar de não estarem previstas, ocorrem associadas a deslizamentos e aos esforços laterais e longitudinais de origem diversa, inclusive térmica;
- Fatores como a tensão mecânica residual, presentes na roda e no trilho, variam ao longo de uma seção e variam também por ação do tráfego ao longo do tempo;
- Há modificações importantes no nivelamento da superfície, ou seja, a rugosidade, bem como na curvatura de desgaste do trilho;
- As sobrecargas são distintas e variam continuamente ao longo do tempo.

Apesar da complexidade dos problemas apresentados, alguns estudiosos publicaram pesquisas referentes a mecânica do contato roda-trilho. As primeiras pesquisas sobre o contato mecânico foram publicadas em 1882 pelo físico alemão Heinrich Hertz, que descobriu qual seria o formato da área de contato entre duas superfícies cilíndricas (SANTOS, 2000). Essa descoberta foi o ponto de partida para diversas teorias que evoluíram com o passar dos anos, sendo a de Kalker, em 1967, a mais aceita. Nessa teoria consegue-se levar em consideração todos os microescorregamentos que existem no contato roda-trilho.

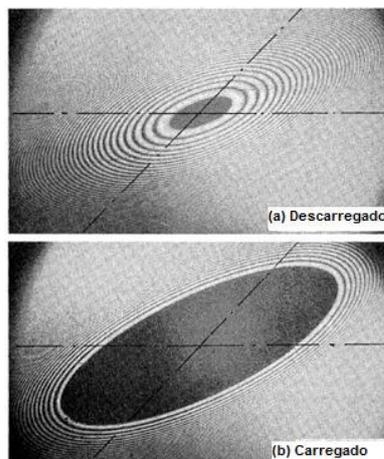
Nas próximas seções deste trabalho serão apresentadas as principais teorias da mecânica do contato roda-trilho e suas evoluções em relação à anterior.

2.4.1 Teoria de Hertz

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 na época trabalhava como assistente de pesquisa na Universidade de Berlim.

Fonseca (2017) comenta que o interesse de Hertz pelo 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 a mantinha em contato, poderia, ou não, exercer influência significativa na configuração das franjas de interferência (Figura 7).

Figura 7 - Franjas de interferência no contato entre duas lentes cilíndricas.



Fonte: Santos (2000, p. 8).

A teoria original de Hertz (1882) é restrita a superfícies sem atrito e sólidos perfeitamente elásticos. Hertz teorizou que o contato entre dois sólidos de perfil curvo, quando postos em contato era um único ponto (esfera com esfera, ou esfera com um plano) ou ao longo de uma linha (cilindro com cilindro ou cilindro com plano), quando não existisse carga entre os corpos. Ao aplicar uma carga no sentido normal à região de contato, ocorrerá uma deformação elástica na região, formando uma área de contato do tipo estático, ou seja, as deformações são reversíveis. Concluiu então que essa área de contato possui uma forma elíptica quando os corpos possuem um raio de curvatura (SANTOS, 2000).

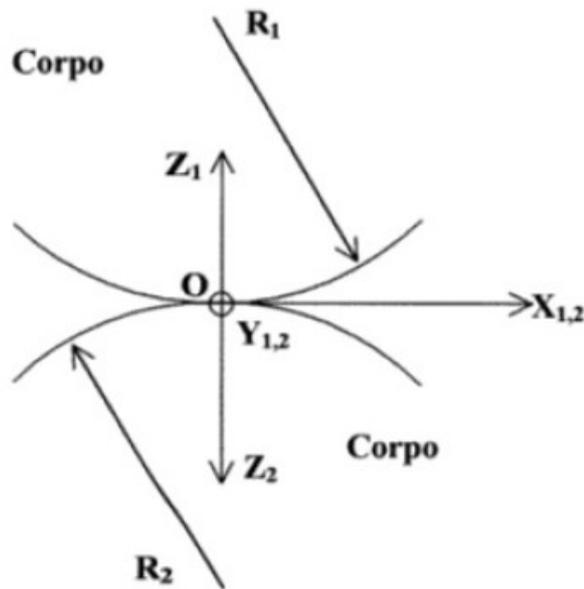
A teoria também pode ser empregada para o estudo de contato entre corpos em rolamento puro, isto é, não havendo o deslizamento entre os mesmos. Apesar de Hertz ter direcionado seu trabalho considerando apenas a elasticidade de um sólido, quando esse está sob certa pressão de contato, não considerou que, a depender da magnitude dessa pressão, pode haver um escoamento do material em contato. Isso se deveu à dificuldade de determinar o ponto inicial de escoamento do material sob a ação das tensões normais de contato.

Na teoria de Hertz, os modelos mais utilizados para contato entre corpos rolantes são contato elíptico (caso geral), contato cilindro – cilindro, e contato esfera – esfera. Cada corpo em contato possui basicamente dois raios de curvaturas, localizados em planos perpendiculares entre si. O modelo cilindro – cilindro é um caso particular de contato elíptico, no qual um dos raios de curvatura de cada corpo é infinito. O modelo esfera – esfera é outro caso particular de contato elíptico, no qual cada corpo tem apenas um raio de curvatura ou um dos corpos possui o raio infinito (contato esfera – plano). Hertz apresenta equações para estimar os semi-eixos da elipse, a qual é a mesma estimativa aceita pelas demais teorias que serão apresentadas posteriormente (JOHNSON, 1985).

As equações modeladas por Hertz para o cálculo dos semi-eixos da área em forma de elipse no contato entre dois corpos, com raios de curvaturas conhecidos, serão apresentados a seguir, sendo elas baseadas na dissertação de Santos (2000).

Para calcular os valores dos semi-eixos da elipse de contato, deve-se definir duas coordenadas cartesianas, uma para cada corpo em contato. Essas coordenadas possuem origem no ponto teórico de contato, como mostra a Figura 8. No caso roda-trilho, o contato possui um ângulo que é responsável pela estabilidade do veículo ferroviário no trilho.

Figura 8 - Coordenadas que esquematizam as Equações 1 e 2.



Fonte: Santos (2000, p.47).

Considerando os dois corpos em contato no ponto “O”, as coordenadas cartesianas x_1 , y_1 e x_2 , y_2 são tangentes ao ponto de contato. Considerando somente os valores do eixo x , os termos que contêm a variável y irão desaparecer, e quando se considera a direção y , os termos que contêm x somem. Portanto, pode-se concluir que o termo xy desaparecerá. Dessa forma, a representação das superfícies dos corpos é dada pelas Equações 1 e 2:

$$Z_1 = A_1 x_1^2 + B_1 y_1^2 \quad (1)$$

$$Z_2 = A_2 x_2^2 + B_2 y_2^2 \quad (2)$$

onde x_1 é coordenada longitudinal e y_1 é coordenada lateral de um dos corpos em contato, o mesmo vale para x_2 e y_2 no outro corpo de contato, Z_1 e Z_2 seriam vetores normais à área de contato dos dois corpos. As constantes A_1 , A_2 , B_1 e B_2 dependem dos raios principais (R_1 e R_2) e dos raios ortogonais (R'_1 e R'_2), de cada um dos corpos, conforme apresenta na Equação 3.

$$A_1 = \frac{1}{2R_1}, \quad B_1 = \frac{1}{2R'_1}, \quad A_2 = \frac{1}{2R_2} \text{ e } B_2 = \frac{1}{2R'_2} \quad (3)$$

Considerando que não há inclinação entre os sistemas de coordenadas, os dois planos cartesianos estarão paralelos, sendo possível somar os termos $Z_1 + Z_2$, como na Equação 4.

$$Z_1 + Z_2 = \left(\frac{1}{2R_1} + \frac{1}{2R_2}\right)x^2 + \left(\frac{1}{2R'_1} + \frac{1}{2R'_2}\right)y^2 \quad (4)$$

Pode-se definir uma constante $A + B$ (Equação 5):

$$A + B = (A_1 + A_2) + (B_1 + B_2) = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'_2}\right) \quad (5)$$

Caso os eixos de coordenadas de cada um dos corpos estejam inclinados com um ângulo (Θ) entre os planos cartesianos, define-se a constante $B - A$ como (Equação 6):

$$B - A = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2}\right)^2 + 2\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1}\right)\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2}\right)\cos 2\Theta} \quad (6)$$

Para determinação dos valores dos semi-eixos, é necessário o uso de outra constante determinada por Hertz, estando relacionada ao material utilizado por cada um dos corpos em contato. Esta constante depende do coeficiente de Poisson (ν_1 e ν_2) e do módulo de elasticidade (E_1 e E_2) do material.

$$m_1 = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} \quad m_2 = \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (7)$$

Para concluir, tem-se abaixo as Equações 8 e 9, para calcular os semi-eixos da elipse. Sendo a o semi-eixo maior e b o semi-eixo menor.

$$a = K_a \sqrt[3]{\frac{3N(m_1+m_2)}{4(A+B)}} \quad b = K_b \sqrt[3]{\frac{3N(m_1+m_2)}{4(A+B)}} \quad (8)$$

Portanto, o tamanho da área de contato depende de alguns fatores, sendo, a carga aplicada (N), o material de ambos os corpos em contato e a geometria dos corpos. Na Equação 8 existem duas variáveis ainda desconhecidas, K_a e K_b , que foram tabeladas por Hertz, mostradas no Quadro 1. Para o cálculo das variáveis, é necessário calcular o parâmetro ϕ , apresentado na Equação 9:

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{B-A}{A+B}\right) \quad (9)$$

onde $A + B$ e $A - B$ são constantes provenientes das Equações 5 e 6, respectivamente.

Quadro 1 - Variáveis K_a e K_b .

Φ	K_a	K_b
0	∞	0
0,5	61,400	0,102
1	36,890	0,131
1,5	27,480	0,152
2	22,260	0,169
3	16,500	0,196
4	13,310	0,219
6	9,790	0,255
8	7,860	0,285
10	6,612	0,319
20	3,778	0,408
30	2,731	0,493
35	2,397	0,530
40	2,136	0,567
45	1,926	0,604
50	1,754	0,641
55	1,611	0,678
60	1,486	0,717
65	1,378	0,759
70	1,284	0,802
75	1,202	0,846
80	1,128	0,893
85	1,061	0,944
90	1,000	1,000

Fonte: Santos (2000, p. 52).

A teoria apresentada nessa seção só será válida se consideradas todas as restrições impostas por Hertz. Com o intuito de tornar a abordagem do fenômeno do contato, numa forma mais realística, Carter aprimorou essa teoria removendo as restrições apresentadas.

2.4.2 Teoria de Carter

Com a publicação do artigo *On the Action of a Locomotive Driving Wheel*, Carter (1926) deu continuidade às pesquisas sobre o contato, em particular o contato roda-trilho. Os estudos tiveram como objetivo a remoção das restrições impostas por Hertz, em sua teoria, e ele foi o primeiro a considerar o fenômeno de microescorregamento, porém, apenas o microescorregamento longitudinal foi considerado (MORILLO, 2015).

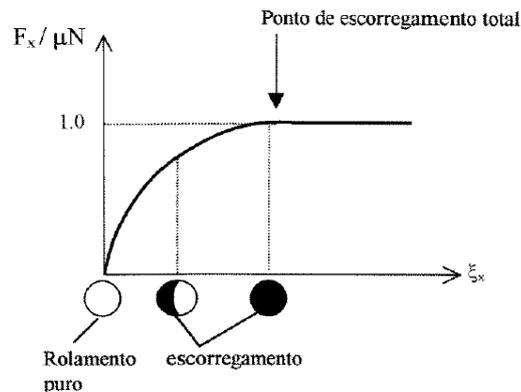
Em sua teoria, Carter modelou a roda como sendo um cilindro e o trilho como uma placa espessa. Para o caso de rodas e trilho novos, a dimensão do semi-eixo a da elipse na

direção longitudinal é ligeiramente maior do que o comprimento do semi-eixo b na direção lateral. Com o passar do tempo, o desgaste da roda e do boleto do trilho formam uma área de contato que se aproxima de um retângulo, deixando de ser uma elipse (SANTOS, 2000).

Segundo Carter, a velocidade circunferencial da roda (R_w) e a velocidade de translação (V_t) são diferentes. Isso ocorre durante a aceleração e a frenagem, quanto maior a aceleração em valor absoluto, maior será a diferença entre as velocidades. Com isso, ele notou que o movimento da roda no trilho é de rolamento e deslizamento simultaneamente, diferente do rolamento puro que acreditava Hertz. A teoria de Carter é considerada bidimensional, pois ele conseguiu incluir somente o microescorregamento longitudinal (KALKER, 1979).

O valor máximo do microescorregamento longitudinal (ξ_x) obedece à lei de Coulomb, onde existirá escorregamento total quando a força tangencial (F_x) (mesmo sentido que o microescorregamento longitudinal) na roda, for maior ou igual a força resistente de atrito ($F_x \geq F_{N\mu}$), como mostra a Figura 9 (SANTOS, 2000).

Figura 9 - Relação de forças com escorregamento e rolamento.



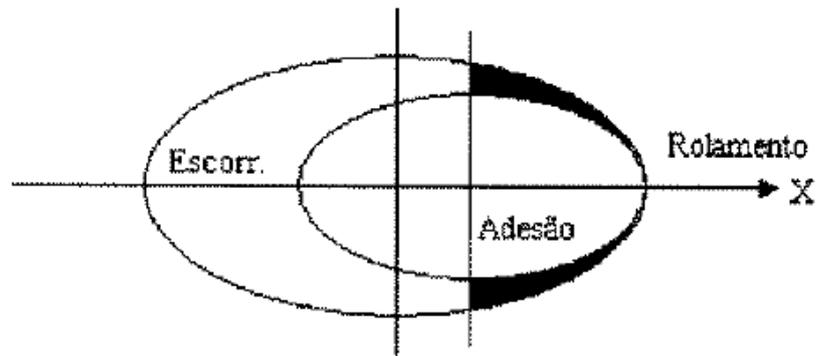
Fonte: Kalker (1979, p. 322).

2.4.3 Teoria de Johnson e Vermeulen

Em 1958, Johnson e Vermeulen escreveram o artigo *Contact of Nonspherical Elastic Bodies Transmitting Tangential Forces*, que estendeu a teoria de Carter (bidimensional) para uma teoria tridimensional. Johnson e Vermeulen basearam-se no modelo desenvolvido em duas esferas rolando uma sobre a outra, onde tanto o microescorregamento longitudinal quanto o microescorregamento lateral foram considerados (MORILLO, 2015).

Johnson e Vermeulen (1964) dividiram a superfície de contato em duas regiões distintas, uma região de escorregamento e outra de adesão. Assumiram a área de adesão como sendo um círculo dentro da região de contato. A área de escorregamento seria a diferença entre a área total de contato e área de adesão, estenderam essa análise para o caso da região de contato ser uma elipse, como mostra a Figura 10 (SANTOS, 2000).

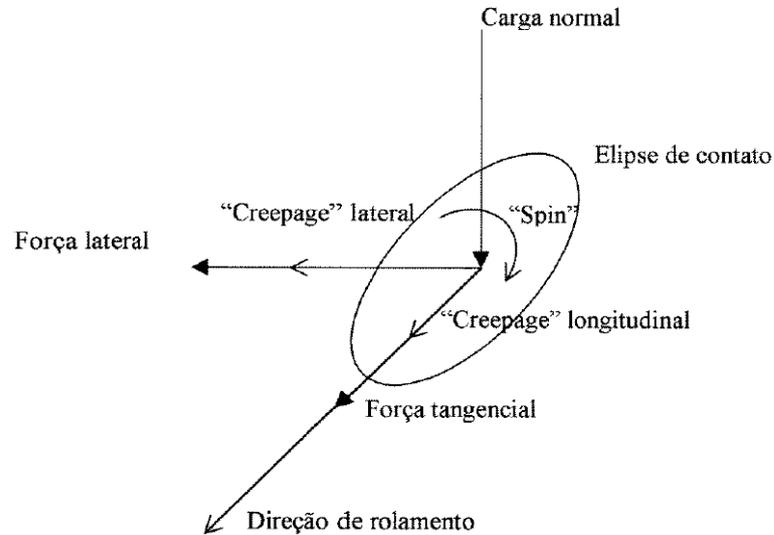
Figura 10 - Região de contato segundo Johnson.



Fonte: Santos (2000, p. 12).

Como resultado da sua teoria, Johnson e Vermeulen formularam equações para o cálculo dos valores das forças longitudinais (F_x) e forças laterais (F_y) (Equações 10 e 11). Em seu modelo, não consideraram o *spin*, que seria o escorregamento rotacional, fenômeno causado devido à conicidade da roda, que faz com que tenda a girar em torno do eixo normal ao plano de contato, apresentado na Figura 11 (SANTOS, 2000).

Figura 11 - Forças tangenciais, microescorregamento longitudinal atuando na região de contato.



Creepage = escorregamento linear; Spin = escorregamento rotacional

Fonte: Santos (2000, p. 68).

O modelo matemático apresentado por Johnson e Vermeulen é apresentado nas Equações 10 e 11.

$$F_x = \begin{cases} [1 - (1 - \xi)^3] \mu N & \xi < 1 \\ \mu N & \xi \geq 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$F_y = \begin{cases} [1 - (1 - \eta)^3] \mu N & \eta < 1 \\ \mu N & \eta \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

No modelo, Johnson e Vermeulen utilizam os valores de “ ξ ” e “ η ” como correção dos valores de microescorregamento longitudinal (ξ_x) e lateral (ξ_y), respectivamente. Os valores são calculados na Equação 12.

$$\xi = \frac{Gabc_{11}\xi_x}{3\mu N} \text{ e } \eta = \frac{Gabc_{22}\xi_y}{3\mu N} \quad (12)$$

Sendo G o módulo de cisalhamento, a o comprimento longitudinal da elipse formada pelo contato, b o comprimento lateral da elipse e “ C_{ij} ” o coeficiente de rigidez no contato, que foi calculado por Johnson e Vermeulen analiticamente. Nessa aproximação, o coeficiente de rigidez elástica no contato é dependente da forma geométrica da superfície de contato e do coeficiente de Poisson, como apresentado nas Equações 13 a 21.

Se $a < b$, temos:

$$C_{11} = -\frac{\pi}{B-\nu(D-C)} \quad (13)$$

$$C_{22} = -\frac{\pi}{B-\nu\left(\frac{a}{b}\right)^2 C} \quad (14)$$

Caso $a > b$, os coeficientes são:

$$C_{11} = -\frac{\pi}{[D-\nu(D-C)]\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (15)$$

$$C_{22} = -\frac{\pi}{[B-\nu C]\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (16)$$

Onde ν é o número de Poisson e B , C e D são:

$$B = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(\cos \theta)^2}{[1-k^2(\sin \theta)^2]^{\frac{1}{2}}} d\theta, \quad (17)$$

$$C = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(\cos \theta)^2(\sin \theta)^2}{[1-k^2(\sin \theta)^2]^{\frac{1}{2}}} d\theta \quad (18)$$

e

$$D = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(\sin \theta)^2}{[1-k^2(\sin \theta)^2]^{\frac{1}{2}}} d\theta \quad (19)$$

Onde k :

$$k = \sqrt{1 - \frac{a^2}{b^2}} \quad a < b \quad (20)$$

$$k = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad a > b \quad (21)$$

2.4.4 Teoria de Kalker

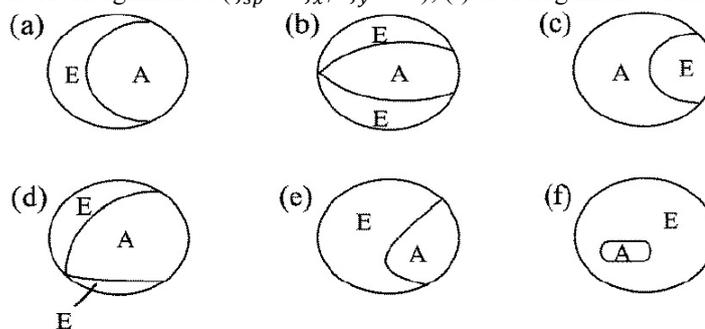
As primeiras pesquisas sobre o contato com microescorregamento foram feitas por Carter em 1930. Nas décadas seguintes, outros pesquisadores deram continuidade tentando explicar, da melhor maneira possível, o que acontece durante o contato, em particular o efeito do microescorregamento. Mas foi J. J. Kalker, com a Teoria Linear (*Linear Theory*), que esse microescorregamento foi melhor definido e equacionado.

Em 1967 Kalker apresentou sua tese de doutorado com o título *On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction*. Nessa tese ele apresentou uma teoria para contato entre corpos rolantes, determinando as forças tangenciais no contato, sendo amplamente aceita no meio científico e principalmente no ferroviário (SANTOS, 2000).

Como resultado de suas pesquisas, Kalker afirmou que a área de adesão proposta pelo modelo de Johnson estaria errada. Segundo Kalker, as direções de escorregamento e de tração não obedecem à lei de Coulomb. Experimentos feitos por Johnson e Vermeulen mostraram uma diferença de aproximadamente 25% quando comparado com o modelo de Kalker, para os valores da força tangencial resultante, como é possível ver no Quadro 2. Essa diferença ocorreu porque o coeficiente de rigidez apresentado por Johnson e Vermeulen possuía erros consideráveis de aproximação pela escolha errônea da área de adesão. Na Figura 12 pode-se observar a geometria da área de adesão descoberta por Kalker.

Figura 12 - Formato da região de contato para Kalker. E = escorregamento, A = adesão.

- (a) Sem escorregamento rotacional ($\xi_{sp} = 0$); (b) escorregamento rotacional puro ($\xi_x = \xi_y = 0$);
 (c) sem escorregamento longitudinal ($\xi_x = 0$); (d) sem escorregamento rotacional lateral ($\xi_y = 0$);
 (e) com todos os escorregamentos ($\xi_{sp} \neq \xi_x \neq \xi_y \neq 0$); (f) escorregamento rotacional puro (alto).



Fonte: Kalker (1979, p. 323)

Quadro 2 - Comparação entre coeficiente de rigidez no contato apresentado por Johnson -Vermeulen (J – V) e o de Kalker, sendo a e b os semi-eixos da elipse de contato.

a/b	C_{11}			C_{22}			C_{23}		
	$\nu = 0$	$\nu = 1/4$	$\nu = 1/2$	$\nu = 0$	$\nu = 1/4$	$\nu = 1/2$	$\nu = 0$	$\nu = 1/4$	$\nu = 1/2$
Kalker	2,51	3,31	4,85	2,51	3,31	4,85	0,334	0,473	0,731
J - V	3,18	4,21	6,24	3,18	3,19	3,21	0,335	0,336	0,338
Erro	27%	27%	29%	27%	27%	27%	0%	-29%	-54%
Kalker	3,40	4,12	5,20	3,40	3,67	3,98	1,33	1,47	1,63
J - V	4,00	4,92	6,40	4,00	4,27	4,57	1,33	1,42	1,52
Erro	18%	19%	23%	18%	16%	15%	0%	-3%	-7%
Kalker	10,70	11,90	12,90	10,70	12,80	16,00	12,20	14,60	18,00
J - V	11,60	12,80	14,20	11,60	13,80	17,10	12,20	14,60	18,00
Erro	8%	9%	10%	8%	8%	7%	0%	0%	0%

Fonte: Adaptado de Santos (2000, p. 20).

O modelo apresentado por Kalker para o cálculo da força longitudinal (F_x), força lateral (F_y) e momento (M_z) e apresentado nas Equações 22 a 24 (KALKER, 1967):

$$F_x = -abGC_{11}\xi_x \quad (22)$$

$$F_y = -abGC_{22}\xi_y - (ab)^{\frac{3}{2}}GC_{23}\xi_{sp} \quad (23)$$

$$M_z = -(ab)^{\frac{3}{2}}GC_{23}\xi_{sp} + (ab)^2GC_{33}\xi_{sp} \quad (24)$$

onde, ξ_x , ξ_y e ξ_{sp} são os coeficiente de microescorregamento longitudinal, lateral e de spin.

Em 1957 Kalker calculou, analiticamente, todos os valores de C_{ij} (coeficiente de rigidez) para o caso de $a = b$ e $\nu = 0$. Também estendeu seus cálculos até remover as restrições propostas. No Quadro 3 são apresentados valores das relações (a/b) , (b/a) e ν , estimados por Kalker, para a matriz rigidez. Observa-se que quando o coeficiente de Poisson varia de 0 até $\frac{1}{2}$, os coeficientes C_{11} , C_{22} e C_{23} também aumentam, influenciando os valores das forças e do momento (Equações 22 a 24).

Quadro 3 - Coeficiente de rigidez para algumas relações a/b e v.

		C_{11}			C_{22}			C_{23}		
		$\nu = 0$	$\nu = 1/4$	$\nu = 1/2$	$\nu = 0$	$\nu = 1/4$	$\nu = 1/2$	$\nu = 0$	$\nu = 1/4$	$\nu = 1/2$
a/b (b > a)	0,1	2,51	3,31	4,85	2,51	2,52	2,53	0,334	0,473	0,731
	0,2	2,59	3,37	4,81	2,59	2,63	2,66	0,483	0,603	0,809
	0,3	2,68	3,44	4,80	2,68	2,75	2,81	0,607	0,715	0,889
	0,4	2,78	3,53	4,82	2,78	2,88	2,98	0,720	0,823	0,977
	0,5	2,88	3,62	4,83	2,88	3,01	3,14	0,827	0,929	1,07
	0,6	2,98	3,72	4,91	2,98	3,14	3,31	0,930	1,03	1,18
	0,7	3,09	3,81	4,97	3,09	3,28	3,48	1,03	1,14	1,29
	0,8	3,19	3,91	5,05	3,19	3,41	3,65	1,13	1,15	1,4
	0,9	3,29	4,01	5,12	3,29	3,54	3,82	1,23	1,36	1,51
a = b	1,0	3,40	4,12	5,20	3,40	3,67	3,98	1,33	1,47	1,63
b/a (a > b)	0,9	3,51	4,22	5,30	3,51	3,81	4,16	1,44	1,59	1,77
	0,8	3,65	4,36	5,42	3,65	3,99	4,39	1,58	1,75	1,94
	0,7	3,82	4,54	5,58	3,82	4,21	4,67	1,76	1,95	2,18
	0,6	4,06	4,78	5,80	4,06	4,50	5,04	2,01	2,23	2,50
	0,5	4,37	5,10	6,11	4,37	4,90	5,56	2,35	2,62	2,96
	0,4	4,84	5,57	6,57	4,84	5,48	6,31	2,88	3,24	3,70
	0,3	5,57	6,34	7,34	5,57	6,40	7,51	3,79	4,32	5,01
	0,2	6,96	7,78	8,82	6,96	8,14	9,79	5,72	6,63	7,89
	0,1	10,70	11,70	12,90	10,70	12,80	16,0	12,20	14,60	18,00

Fonte: Adaptado de Kalker (1979, p. 326).

3 METODOLOGIA

A expansão da ciência e da tecnologia tornou cada vez mais evidente a necessidade de avaliar tais avanços e determinar os desenvolvimentos alcançados pelas diversas disciplinas do conhecimento. Tal fato indica a mensuração das taxas de produtividade dos centros de pesquisa e dos investigadores individuais, com a produção de artigos científicos, por exemplo.

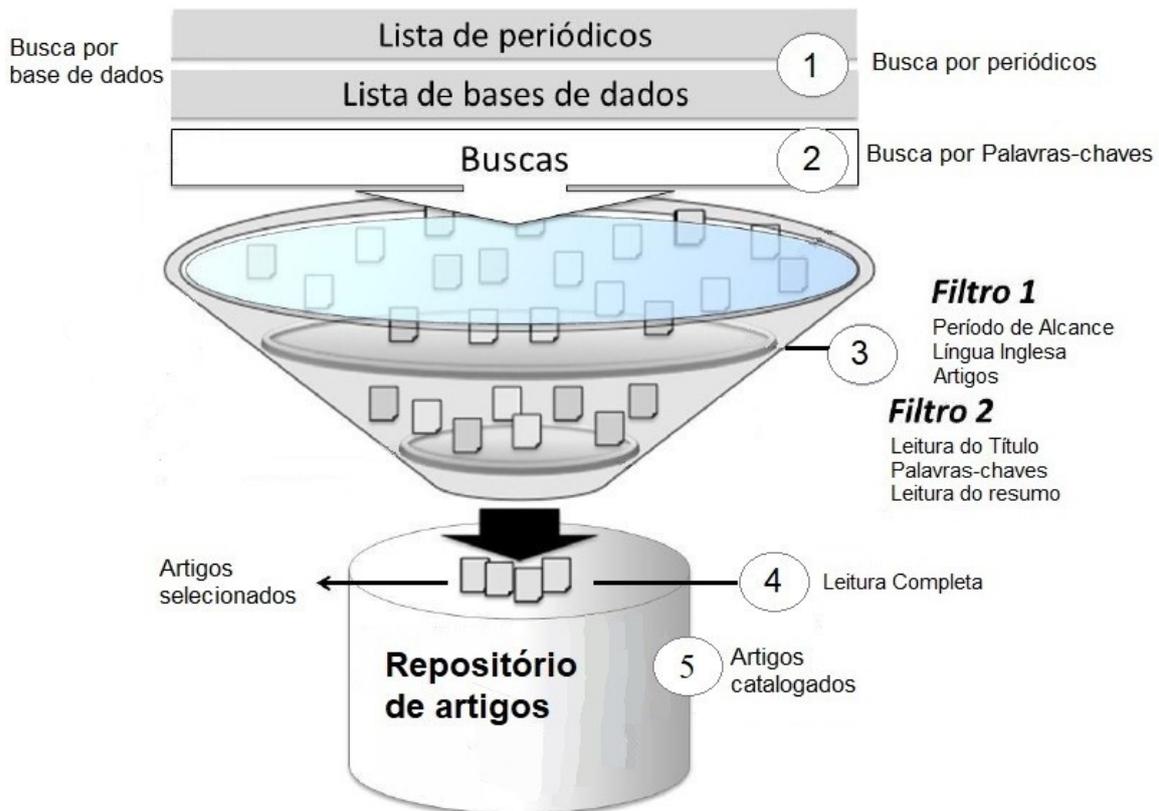
Para Vanti (2002), existem diversas formas de medição voltadas para avaliar a ciência e os fluxos da informação, como a: bibliometria, cienciometria, infometria e a webmetria. No desenvolvimento do presente trabalho, a forma de medição utilizada será a bibliometria.

Segundo Tague-Sutcliffe (1992), a bibliometria é o estudo dos aspectos quantitativos da produção, disseminação e uso da informação registrada, desenvolve padrões e modelos matemáticos para medir tais processos, usando os resultados para elaborar previsões e apoiar tomadas de decisão.

De acordo com Pao (1989), a finalidade central da bibliometria é, com a utilização de métodos quantitativos, gerar uma avaliação objetiva de resultados da produção científica. Em seu estudo, o autor destaca alguns itens que podem ser utilizados como parâmetros para quantificar a literatura estudada, por exemplo, bases de dados, autores, palavras-chave, citações e publicações, definindo-se então o repositório de artigos.

Neste trabalho, foi utilizado o método de Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para a definição do portfólio bibliográfico. Essa técnica apresenta bons resultados na eliminação da tendenciosidade no processo de buscas de artigos científicos. A Revisão Sistemática da Literatura pode ser vista como um método padronizado de busca para realizar e analisar resultados, com contínuos ciclos de pesquisas, podendo responder questões específicas de um tema através de critérios de elegibilidade predefinidos (HIGGINS, 2008 *apud* ARAÚJO, 2013). A Figura 13 ilustra o processo iterativo da RSL utilizado e aplicado por Conforto (2011) adaptado para o presente estudo, utilizando cinco passos.

Figura 13 - Passos da metodologia de RSL.



Fonte: Adaptado de Conforto *et al.* (2011, p. 8).

Conforme apresentado na Figura 13, a Fase 1 consiste na busca por periódicos, portanto, trata-se de estudos secundários, que utilizam como fonte de dados estudos primários. Assim sendo, é necessário definir uma lista inicial de periódicos relevantes para o tema pesquisado. Ainda na primeira fase, devem-se selecionar plataformas para busca de dados (CONFORTO *et al.*, 2011).

A segunda fase consiste na combinação de termos inerentes ao tema desenvolvido, ou seja, os logaritmos de busca que serão usados ou palavra-chave. Para cada base de dados selecionada foi realizada uma busca utilizando os conjuntos de palavras-chaves. Os resultados foram registrados individualmente para que pudessem ser aplicados os filtros da próxima fase (CONFORTO *et al.*, 2011).

Uma vez realizada a busca nas bases de dados, os resultados deveriam ser submetido aos filtros da Fase 3, sendo necessário para melhor adequação ao tipo de documento desejado, dentro de critérios específicos e bem delimitado. O primeiro filtro esta relacionado ao período

de alcance, linguagem e o tipo de documento. O segundo filtro é a leitura superficial dos documentos selecionados. Nesse filtro, apenas o título, resumo e palavras-chaves são lidos. Os artigos selecionados, que estavam alinhados com os objetivos da pesquisa e atenderem os requisitos de inclusão, foram selecionados para a próxima fase (CONFORTO *et al.*, 2011). Documentos iguais, porem em bases diferentes foram descartados, mantendo somente os artigos de uma das bases.

A Fase 4 é especialmente importante, pois é o processo para a seleção final dos artigos. Foi o momento de ler por completo o trabalho, analisar e interpretar o texto, tendo por objetivo principal identificar estudos relevantes ao tema pesquisado. Após o processo apresentado, tem-se a Fase 5, que aponta a quantidade de documentos catalogados que compõe o repositório de artigos, seguindo a metodologia de RSL. Ao final, o objetivo foi apresentar o estado da arte do tema contato roda-trilho, escrevendo os principais pontos dos artigos catalogados, apontando seus objetivos, metodologias, resultados, conclusões e relevância em relação ao tema.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a Aplicação da Revisão Sistemática da Literatura (RSL) bem como, uma discussão será efetuada no Estado da Arte, que compreende a síntese e análise de artigos científicos da temática desse trabalho.

4.1 APLICAÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A aplicação da metodologia de Revisão Sistemática da Literatura, buscou identificar os trabalhos científicos sobre os modelos da mecânica do contato roda-trilho. Nos tópicos a seguir, serão apresentadas as fases da metodologia RSL.

4.1.1 RSL - Fase 1

A Fase 1 da RSL busca identificar os periódicos de referência na área pesquisada e a seleção das bases de dados onde serão realizadas posteriormente as buscas. O Quadro 4 apresenta os resultados desta fase para a pesquisa em questão.

Quadro 4 - Resultado da Fase 1 da RSL.

Periódico	Base de dado
Wear	ScienceDirect
International Journal of Mechanical Sciences	
Tribology International	
Journal of Sound and Vibration	
Engineering Failure Analysis	
International Journal of Solids and Structures	
IFAC Proceedings Volumes	
Applied Acoustics	

Continuação (...)

Periódico	Base de dado	
International Journal Fatigue	ScienceDirect	
Theoretical and Applied Fracture Mechanics		
Mechanical Systems and Signal Processing		
Wheel-Rail Interface Handbool, 2009		
Engineering Structures		
Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation		
Dynamics of Railway Vehicle Systems, 1984		
Tribology Series		
Computers & Structures		
International Journal Of Applied Engineering Research		Scopus
Journal Of Tribology		
Vehicle System Dynamics		
Wear		
Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit		
Journal of Manufacturing Science and Engineering Transaction of the ASME		
Journal pf Engineering for Industry		
Journal of Sound and Vibration		
Nonlinear Dynamics		
Acta Mechanica Solida Sinica		
Applied Thermal Engineering		
Computers & Structures		
Multibody System Dynamics		
Communications Scientific Letters of the University of Zilina		
International Journal of Automation and Computing		
International Journal of Heavy Vehicle Systems		
Latin American Journal of Solids and Structures	Scielo	

Fonte: Autor (2019).

Um total de 34 (trinta e quatro) periódicos internacionais foram identificados em três bases de dados de pesquisa, ScienceDirect com onze periódicos, Scopus com 22 (vinte e dois) periódicos e Scielo com um periódico.

4.1.2 RSL – Fase 2

Conforme indicado anteriormente, as bases de dados selecionadas para realização desta pesquisa foram a ScienceDirect, Scopus e Scielo. Para iniciar as pesquisas nestas

plataformas, foi necessário identificar os conjuntos de palavras-chave selecionadas para a busca, como mostra o Quadro 5.

Quadro 5 - Conjunto de palavras-chave utilizadas na RSL.

Palavras-Chave
"Wheel-rail contact" AND "Hertz"
"Wheel-rail contact" AND "Carter"
"Wheel-rail contact" AND "Johnson and Vermeulen"
"Wheel-rail contact" AND "Kalker"

Fonte: Autor (2019).

Definidas as palavras-chave, foi realizada a pesquisa nas plataformas selecionadas. Com isso, foi possível obter os valores de documentos encontrados em cada plataforma, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados Brutos: Quantidade de documentos encontrados nas diferentes plataformas, Fase 2.

Palavras-Chave	Science Direct	Scopus	Scielo
"Wheel-rail contact"	1.518	2.372	6
"Wheel-rail contact" AND "Hertz"	416	122	1
"Wheel-rail contact" AND "Carter"	77	9	0
"Wheel-rail contact" AND "Johnson and Vermeulen"	7	0	0
"Wheel-rail contact" AND "Kalker"	330	124	0

Fonte: Autor (2019).

Quando foi utilizado na pesquisa somente um conjunto de palavras-chave, *Wheel-rail contact*, conforme Tabela 1, a quantidade de artigos científicos encontrados é grande, em comparação as base de dados ScienceDirect e Scopus. Ao adicionar uma palavra-chave e formar um conjunto de palavras-chave, por exemplo, *Wheel-rail contact AND Carter*, ou *Wheel-rail contact AND Johnson and Vermeulen*, a quantidade de artigos encontrados diminuiu consideravelmente, incluindo resultados nulos, para as bases de dados Scopus e Scielo.

4.1.3 RSL – Fase 3

Após realizar as buscas nas plataformas (ou base de dados), ScienceDirect, Scopus e Scielo, e a definição das palavras-chave indicadas na fase anterior, iniciou-se a Fase 3 da RSL. Essa fase foi composta por duas etapas de filtro, sendo apresentadas a seguir.

4.1.3.1 Fase 3 – Filtro 1

A primeira etapa dos filtros está relacionada aos seguintes fatores:

- a. Tipo do Documento: “*Article*”
- b. Linguagem: “*English*”
- c. Período de Alcance: Livre

A Tabela 2 apresenta a quantidade de trabalhos científicos que foram obtidos após o primeiro filtro.

Tabela 2 - Quantidade de trabalhos científicos após Filtro na Fase 3.

Palavras-Chave	ScienceDirect	Scopus	Scielo
"Wheel-rail contact"	1.301	1.056	4
"Wheel-rail contact" AND "Hertz"	367	51	1
"Wheel-rail contact" AND "Carter"	62	4	0
"Wheel-rail contact" AND "Johnson and Vermeulen"	6	0	0
"Wheel-rail contact" AND "Kalker"	287	66	0

Fonte: Autor (2019).

Comparando os dados obtidos da Tabela 1 com a Tabela 2, após a aplicação do Filtro 1, observa-se uma redução na quantidade de artigos científicos.

4.1.3.2 Fase 3 – Filtro 2

Para a segunda etapa dos filtros, foi necessário o download dos artigos encontrados, porém a quantidade de artigos com a palavra-chave *Wheel-rail contact* foi um número elevado, tornando inviável o download de todos, portanto, optou-se por eliminar esses artigos para essa etapa.

O critério adotado para a realização dos downloads dos artigos foi à disponibilidade dos arquivos para a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), sendo a quantidade apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantidade de artigos científicos disponíveis na UFSC, para download.

Palavras-Chave	ScienceDirect	Scopus	SciELO
"Wheel-rail contact" AND "Hertz"	367	34	1
"Wheel-rail contact" AND "Carter"	62	3	0
"Wheel-rail contact" AND "Johnson and Vermeulen"	6	0	0
"Wheel-rail contact" AND "Kalker"	287	52	0

Fonte: Autor (2019).

O período de alcance dos documentos foi deixado livre objetivando abranger o máximo de artigos possíveis. O Apêndice A traz os gráficos com a distribuição do número de publicações ao longo dos anos, separados por base de dados.

Após o download de todos os artigos apresentados na Tabela 3, foi realizada a leitura do título, resumo e palavras-chaves de cada um. Verificado se o artigo estava dentro do escopo da proposta da pesquisa, avançava para a próxima Fase. A Tabela 4 apresenta a quantidade de artigos selecionados nesse segundo filtro.

Tabela 4 - Quantidade de artigo selecionado após a aplicação do Filtro 2, na Fase 3.

Palavras-Chave	ScienceDirect	Scopus	SciELO
"Wheel-rail contact" AND "Hertz"	26	12	0
"Wheel-rail contact" AND "Carter"	4	1	0
"Wheel-rail contact" AND "Johnson and Vermeulen"	1	0	0
"Wheel-rail contact" AND "Kalker"	12	9	0

Fonte: Autor (2019).

4.1.4 RSL – Fases 4 e 5

A Fase 4 da Revisão Sistemática da Literatura é composta pela leitura completa dos artigos apresentados na Fase 3 após o Filtro 2. Esse passo teve por objetivo selecionar somente os estudos relevantes para o tema dos modelos da mecânica do contato roda-trilho. Na Tabela 5 é mostrada a quantidade de artigos selecionados na Fase 4.

Tabela 5 - Quantidade de artigos selecionados na Fase 4.

Palavras-Chave	Total
"Wheel-rail contact" AND "Hertz"	5
"Wheel-rail contact" AND "Carter"	2
"Wheel-rail contact" AND "Johnson and Vermeulen"	0
"Wheel-rail contact" AND "Kalker"	3

Fonte: Autor (2019).

Para finalizar a aplicação da Revisão Sistemática da Literatura, foram catalogados todos os artigos selecionados na etapa anterior. O Quadro 6 mostra as principais informações dos artigos selecionados, sendo: código, título, periódico, autores e ano de publicação.

Quadro 6 - Catálogo de artigos da RSL.

Código	Informações dos artigos		Ano
ART1	Título	The contact between a locomotive driving wheel and the rail	1958
	Autores	H. L. Andrews	
	Periódico	Wear	
ART2	Título	The influence of tangencial tractions at the surface on the stresses in contacting bodies during rolling-sliding contact	1983
	Autores	Hans Krause, Gerhard Poll	
	Periódico	Wear	
ART3	Título	A surface roughness parameter in hertz contact	1984
	Autores	J. A. Greenwood, K. L. Johnson, E. Matsubara	
	Periódico	Wear	
ART4	Título	Wheel-rail rolling contact theory	1991
	Autores	J. J. Kalker	
	Periódico	Wear	
ART5	Título	A new method for the solution of the normal contact problem in the dynamic simulation of railway vehicles	2006
	Autores	A. Alonso, J. G. Giménez	
	Periódico	Vehicle System Dynamics	
ART6	Título	History of wheel/rail contact mechanics: from Redtenbacher to Kalker	2009
	Autores	K. Knothe	
	Periódico	Vehicle System Dynamics	

Continuação (...)

Código	Informações dos artigos		Ano
ART7	Título	Contact stress analysis in wheel-rail by hertzian method and finite element method	2014
	Autores	J. P. Srivastava, P. K. Sarkar, V. Ranjan	
	Periódico	Springer	
ART8	Título	A novel method to model wheel-rail normal contact in vehicle dynamics simulation	2014
	Autores	Matin Sh. Sichani, Roger Enblom, Mats Berg	
	Periódico	Vehicle System Dynamics	
ART9	Título	A fast wheel-rail contact model for application to damage analysis in vehicle dynamics simulation	2016
	Autores	Matin Sh. Sichani, Roger Enblom, Mats Berg	
	Periódico	Wear	
ART10	Título	Applicability of half-space-based methods to non-conforming elastic normal contact problems	2017
	Autores	Xiangyun Deng, Zhiwei Qian, Zili Li, Rolf Dollevoet	
	Periódico	International Journal of Mechanical Science	

Fonte: Autor (2019).

A próxima seção é destinada a apresentar o *Estado da Arte* do tema proposto, e listar os resultados do catálogo de artigos obtidos após a aplicação da metodologia da Revisão Sistemática da Literatura.

4.2 ESTADO DA ARTE

Com o artigo *The contact between a locomotive deiving wheel and the rail* em 1958, Andrews foi um dos primeiros a publicar sobre as teorias da mecânica do contato. Em seu artigo, o autor estuda as condições de contato existente entre as rodas da locomotiva e o trilho. Algumas observações foram feitas no estudo, como a forma da área de contato, movimento relativo ou fluência do rolamento, diâmetro da roda e limitação do coeficiente de atrito com diferentes valores de carga vertical. O autor relata que algumas medições foram feitas em rodas e trilhos reais.

Andrews (1958) comparou os resultados de seu estudo com as teorias de Hertz e Carter, e obteve uma concordância razoável entre os valores reais e calculados pelas teorias. O autor constatou que a área e as dimensões de contato entre a roda e o trilho são aproximadamente de acordo com os cálculos de Hertz, exceto que, por alguma razão, a área é

um pouco maior que o esperado, e a distribuição da carga sobre a área de contato é presumivelmente elipsoidal. Andrews (1958) também explica que a impressão da roda sobre o trilho produz uma deflexão dos materiais, e que alguma medida de fluência ocorre mesmo quando nenhuma força de tração é aplicada na roda. E quando há força de tração aplicada, haverá fluência adicional produzida na roda e no trilho, de acordo com a teoria de Carter.

Em 1983, os autores Krause e Poll apresentaram o artigo *The influence of tangential tractions at the surface on the stresses in contacting bodies during rolling-sliding contact*, onde discutem sobre as restrições da teoria de Hertz. Krause e Poll (1983) explicam que se uma carga normal é aplicada ao plano tangencial comum dos corpos, a deformação elástica causará uma área de contato. De acordo com a teoria hertziana, seu esboço estará na forma de uma elipse, e a superfície de contato é submetida a pressões, porém, a teoria de Hertz só é válida nas seguintes condições: 1) Os materiais dos corpos exibem propriedades de deformação isotrópicas; 2) Apenas mudanças de forma elástica ocorrem; 3) As superfícies são idealmente lisas; 4) Nenhuma tensão de cisalhamento atua nas superfícies de contato; 5) Os principais raios de curvatura são constantes nas proximidades da área de contato.

Os autores explicam no artigo, a veracidade das restrições apresentadas na teoria, e afirmam que, como numerosas deformações plásticas ocorrem durante o rolamento, a primeira condição é incompleta, pois tais deformações levam à perda da orientação original dos cristalitos em materiais cristalinos, e como resultado dessa forma de textura, a anisotropia das propriedades de deformação das monocristalinas também podem se tornar macroscopicamente eficaz. O tipo e a clareza das texturas determinam o grau de desvio da teoria hertziana. A segunda condição também parece não ser cumprida em muitos casos. No entanto, geralmente pode-se supor que o rearranjo de tensões mecânicas no material faz com que a deformação plástica cesse em momento posterior, de modo que sob a mesma carga, ou menor, a deformação será puramente elástica. Contudo, deformação plástica pode levar a uma mudança nos principais raios de curvatura, a teoria hertziana só então se aplicará corretamente quando nova geometria é considerada.

Krause e Poll (1983) comentam que é tecnicamente impossível produzir superfícies completamente lisas, e quanto maior a dimensão das áreas de contato em relação à rugosidade, mais próximo será a aproximação da coesão ideal. Para a quarta condição, os autores afirmam que estresses (tensões mecânicas) de cisalhamento na superfície de contato, na realidade, só não ocorrem quando os corpos exibem as mesmas propriedades elásticas,

mesma geometria, velocidades absolutas das superfícies de contato coincidem com o ponto imaginário de contato dos corpos considerados rígidos, e quando as forças tangenciais não são transmitidas de um corpo para o outro. A única exceção é o caso teórico de um coeficiente zero de fricção.

A última condição aplica-se rigidamente para alguns tipos de testes de rolamento, mas, no entanto, não para aplicação com vários contatos ao mesmo tempo. Os autores afirmam que embora as condições não sejam tão bem atendidas, como seria desejável, a teoria hertziana ainda representa o método preferido para se obter informações sobre a geometria da área de contato e a pressão da superfície, mantendo o desgaste dentro de limites razoáveis.

No ano seguinte, 1984, Greenwood *et al* apresentaram o estudo *A surface roughness parameter in hertz contact*, que trata da influência da rugosidade superficial comparada com a teoria de contato elástico de Hertz, no caso da pressão e a área de contato entre uma esfera e um plano. Após a análise teórica e experimental, os autores constataram que a influência da rugosidade superficial no contato, é governada primariamente por um parâmetro não dimensional, definido pela rugosidade combinada das superfícies, raio da esfera, e raio de contato para superfícies lisas dadas pela teoria de Hertz. Como resultado da pesquisa, Greenwood *et al.* obtiveram que, tanto a teoria quanto o experimento, indicam que, se o valor do parâmetro adimensional for menor que 0,05, o erro no uso da teoria de Hertz para calcular o raio de contato e a pressão máxima de contato provavelmente será menor que 7%.

Com o artigo *Wheel-rail rolling contact theory* em 1991, Kalker explica sobre a teoria de contato de rolamento, sendo aquela que a roda e o trilho são considerados rígidos e o contato é regido pela lei de atrito de Coulomb. Em tal teoria, a velocidade circunferencial e a velocidade de translação da roda sobre o trilho são iguais, a menos que a força tangencial esteja saturada. Como o contato ocorre em um único ponto, as forças transmitidas são forças concentradas. No entanto, assim que se deseja considerar as perdas por atrito na roda motriz da locomotiva, a dinâmica do veículo, calcular as forças e fadiga e os fenômenos de desgaste, essa hipótese simples é muito grosseira.

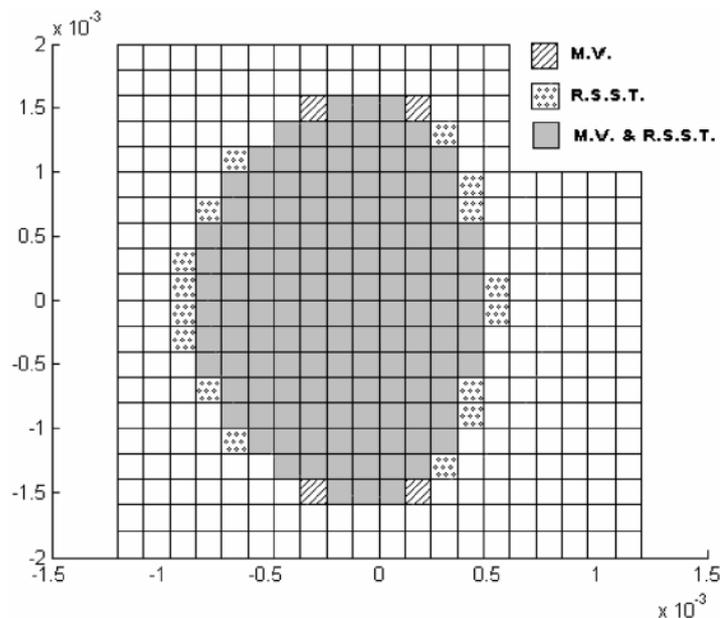
De fato, na dinâmica do veículo, as pequenas velocidades que realmente ocorrem no contato roda-trilho são importantes nos cálculos de força e fadiga, não se podem ter forças concentradas, e nos cálculos de atrito e desgaste, o produto de força de deslizamento é essencial. Para essas aplicações, é preciso uma teoria mais refinada. Por isso, Kalker apresenta em seu artigo várias teorias significativas estabelecidas para este tipo de contato de rolamento,

como a: teoria de Carter, teoria de Hertz, teoria Linear, teoria de Johnson e Vermeulen e teoria Simplificada.

Em 2006, Alonso e Giménez apresentam o artigo *A new method for the solution of the normal contact problem in the dynamic simulation of railway vehicles*. O trabalho trata de um novo método computacional. Devido a requisitos relacionados à eficiência computacional, a maioria dos simuladores dinâmicos ferroviários usa a teoria de Hertz para resolver o problema normal no contato roda-trilho. Pelo fato da teoria hertziana apresentar algumas restrições, os resultados obtidos nesses casos não são precisos. Pensando nisso, os autores apresentam um novo método para resolver o problema normal que supera a limitação acima apresentada.

Primeiro, a exatidão do novo método é testada com casos hertzianos e os resultados obtidos são quase exatos. Em segundo lugar, os resultados calculados com o novo método, em casos mais gerais, são comparados com os obtidos com o método Variacional de Kalker - MV (mais exato, mas computacionalmente menos eficiente). Como os deslocamentos estão relacionados às pressões via raiz quadrada, a proposta do novo método é chamada de teoria simplificada de raiz quadrada (RSST). A Figura 14 apresenta de maneira gráfica a precisão que fornece o método desenvolvido pelos autores. O gráfico compara a área de contato fornecida tanto pelo Variacional de Kalker quanto pelo RSST.

Figura 14 - Comparação da área de contato fornecida por MV e SRST.



Fonte: Alonso e Giménez, 2006.

Como pode ser visto na Figura 14, embora o caso não responda às suposições hertzianas, apenas pequenos erros são apresentados. Os erros resultantes dos cálculos de pressão são maiores que os obtidos na estimativa da área de contato. Contudo, quanto à resolução do problema completo de contato (normal e tangencial), deve-se ressaltar que a distribuição de pressão tem menor influência sobre as tensões tangenciais.

Os autores Srivastava, Sarka e Ranjan (2014) em seu artigo *Contact stress analysis in Wheel-rail by hertzian methos and finite element method* afirmam que a segurança e a economia do tráfego ferroviário são enormemente influenciadas pela variação de tensão de contato causada pelas mudanças no perfil de contato dos trilhos das rodas. Uma mudança na topologia de superfície projetada pode resultar do desgaste que traz uma grande mudança na geometria de contato e nas tensões.

Para estudar a influência da topologia de perfil da roda e trilho, e a interação entre eles, os autores utilizam a formulação analítica baseada na abordagem de Timoshenko e na simulação de problemas com base no Método dos Elementos Finitos (MEF). Com estas ferramentas, distribuição de zonas de contato, tensão de contato e pressão de contato para diferentes configurações dos perfis das rodas e dos trilhos são obtidos.

Segundo Srivastava, Sarka e Ranjan (2014), o contato roda-trilho é a base de toda pesquisa relacionados à interação veículo-pista. Esta pequena interface governa o desempenho dinâmico de veículos ferroviários através de as cargas que transmite e, como qualquer zona de alta concentração de tensão, está sujeita a sérios danos. Assim, uma compreensão clara do contato de rolamento entre a roda e o trilho é a chave para a simulação dinâmica de veículos realistas e análises de danos. A maioria de pesquisa de contato que interage no par de roda-trilho foi levada a cabo com uso da aproximação de Hertz.

Os pesquisadores introduziram um novo método para simplificar a integral elíptica para tornar-se mais simples e o resultado mostra uma boa correlação com os resultados teóricos. Além de usar a aproximação analítico-numérica, a solução de problema de contato Hertziano em contato de trilho de roda foi feita usando MEF. O cálculo de pressão de contato foi comparado usando três métodos, ou seja, teoria de Hertz, MEF e contato de programa de Kalker. Então, a influência de perfis de rodas e trilhos interagindo na distribuição de zonas de contato e tensões foram simuladas usando o método MEF e quasi-Hertz.

Os resultados do modelo analítico indicam decréscimo de tensão com aumento no raio do perfil. O aumento no raio do perfil da roda também aumenta a largura da elipse da

área de contato, enquanto seu comprimento diminui. Nem a suposição de meio-espaço nem um material linear limitam o modelo Elementos Finitos como no caso da solução analítica de Hertz. Além dessas vantagens sobre as soluções clássicas, há uma tendência inconsistente nas soluções MEF para análise de contato de formas complicadas, como no caso de rodas e interação ferroviária.

Os autores Sichani, Enblom e Berg (2014) propõe um método analítico aproximado para calcular o contato roda-trilho e a distribuição de pressão na interface roda-trilho. A deformação das superfícies em contato é aproximada usando a separação entre elas. Isso possibilita estimar o *patch* de contato analiticamente. Presume-se que a distribuição da pressão de contato na direção de rolagem seja elíptica, com seu máximo calculado aplicando a solução da Hertz localmente. Os resultados são idênticos aos de Hertz para casos elípticos.

O método é implementado pelos autores no algoritmo é denominado ANALYN, e seus resultados são comparados com um método numérico mais detalhado e um método rápido disponível. Embora o número de casos de comparação seja limitado, as seguintes conclusões podem ser tiradas de uma combinação de casos de contato teórico e de engenharia estudados:

- Em comparação com os métodos simplificados rápidos baseados no conceito de penetração virtual, a estimativa do *patch* de contato usando o método proposto é consideravelmente melhorada.
- O *patch* de contato e a distribuição de pressão estimada pelo método proposto estão de acordo com os obtidos por um método numérico rigoroso.
- A implementação do método proposto, ANALYN, é pelo menos 300 vezes mais rápida que a CONTACT (implementação do método variacional de Kalker).

Segundo Sichani, Enblom e Berg (2014) pode haver possibilidades de melhorar ainda mais o método proposto, desenvolvendo uma abordagem de correção de curvatura dependendo de cada caso, mantendo o mesmo nível de velocidade computacional.

Em 2015, os autores Sichani, Enblom e Berg publicam o artigo *A fast Wheel-rail contact model for application to damage analysis in vehicle dynamics simulation*, onde comparam o algoritmo ANALYN com o modelo Hertz FASTSIM e avalia o resultado usando o código CONTACT em termos de *patch* de contato e distribuição de tensão, bem como curvas de força de fluência. Os resultados mostram que o modelo proposto pode melhorar

significativamente a solução de contato em termos de estimativa de força de fluência e detalhes de contato, como distribuição de tensão, necessidade de previsões de danos.

E para finalizar Deng, Qian, Li, Dollevoet (2017) publicou o artigo *Applicability of half-space-based methods to non-conforming elastic normal contact problems*, onde mostram a aplicabilidade de métodos baseados no meio-espaço, comparam as soluções obtidas usando a teoria de Hertz e a teoria de Kalker com aquelas do Método dos Elementos Finitos (MEF) que não é limitado à suposição do meio-espaço. Diferentes combinações de dimensões significativas dos corpos de contato em termos de altura, largura e comprimento são estudadas, e várias excentricidades de contato são consideradas. Os cenários considerados cobrem efetivamente toda a faixa de interesse da dimensão significativa quase a menor possível (1,1 vezes o tamanho característico do *patch* de contato) para a dimensão infinita. Com base nas observações dos experimentos numéricos e na análise das discussões, as seguintes conclusões podem ser tiradas: i) os métodos baseados em meio espaço podem fornecer soluções precisas e razoáveis para a maioria dos problemas de contato elástico não-conformes, desde que as dimensões significativas dos corpos de contato sejam 1,1 vezes maiores que o tamanho característico do contato de contato. ii) O erro correspondente está dentro de 9%. Esta nova descoberta amplia a aplicabilidade de métodos baseados em meios-espaços, e empresta maior confiança aos estudos de problemas de contato em engenharia mecânica, onde métodos baseados em meio-espaço são aplicados, pois são relativamente mais fáceis de aplicar e mais computacionalmente eficientes. Caso contrário, o método MEF deve ser considerado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A história da mecânica do contato roda-trilho é parte integrante da mecânica do contato, onde os problemas são investigados desde meados do século XIX. Entretanto, somente foi considerado um estudo relevante quando problemas de estabilidade começaram a ocorrer. Os principais responsáveis pelas teorias desenvolvidas nesse assunto são Heinrich Hertz, Frederick William Carter, Joost Kalker e Ken Johnson.

O contato roda-trilho é a base de toda pesquisa relacionada à interação veículo-pista. Essa pequena interface governa o desempenho dinâmico de veículos ferroviários através das cargas que transmite e, como qualquer zona de alta concentração de tensão, está sujeita a sérios danos. Assim, uma compreensão clara do contato de rolamento entre a roda e o trilho é a chave para o desenvolvimento de pesquisas, simulações e tecnologias sobre esse tema.

Para isso, inicialmente, adotou-se uma metodologia de pesquisa que fosse capaz de selecionar materiais bibliográficos coerentes com o tema em questão. Nesse contexto, a metodologia de Conforto (2011) foi fundamental para iniciar esse trabalho, permitindo a filtragem necessária para a seleção dos artigos.

Com a Revisão Sistemática da Literatura (RSL) foi possível evidenciar os autores, periódicos e os anos de maior destaque no catálogo de artigos, a fim de compreender as teorias da mecânica do contato roda-trilho. O método RSL se mostrou capaz de identificar os principais artigos relacionados ao tema proposto, permitindo assim que pesquisadores e autores tenham acesso a informações nas bases de dados.

As bases de dados utilizadas continham diversos artigos voltados ao tema contato roda trilho, porém, com a aplicação da filtragem de informações foi possível atingir os objetivos específicos esperados, demonstrando o estudo da arte do tema em questão. Vale ressaltar que os dados obtidos de cada base de dados apresentam uma diferença significativa no número de artigos publicados, o que demonstra a necessidade de publicações e pesquisas relacionadas ao tema na América Latina, onde a base de dados Scielo se mostrou inferior no número de publicações comparado às demais.

Durante as etapas de filtragem dos artigos, foi identificado que em algumas situações, publicações avançavam uma etapa, porém, na próxima etapa eram eliminados por não ter relação com o tema proposto, evidenciando assim a capacidade do método RSL em selecionar artigos.

As publicações que compõe o repositório de artigos ao final dos processos de filtragem estão diretamente ligadas ao tema escolhido, permitindo o autor extrair os dados necessários de maneira eficiente, uma vez que para compor o repositório, os artigos selecionados já tinham passado por todas as etapas de filtragem.

Ao final fica clara a utilização da metodologia RSL e as garantias que proporciona em relação à busca de publicações. Através do catálogo de artigos montados é possível elaborar o estado da arte em relação à temática mecânica do contato roda-trilho.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROAD. **M-107/0-208: Manual of Standards and Recommended Practices Wheels and Axles**. Section G. Washington, 2009.
- ALONSO, A.; GIMÉNEZ, J. G. A new method for the solution of the normal contact problem in the dynamic simulation of railway vehicles. **Vehicles System Dynamics**, v. 43, n. 2, p. 149-160. 2006.
- ANDREWS, H. L. The contact between a locomotive driving wheel and the rail. British Transport Commission, Marylebone, London. **Wear**, v. 2. 1958.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7590**: trilho “Vignole”, Rio de Janeiro, 1991.
- BORBA, J. L. **Mecânica da locomotiva**. Belo Horizonte: PUC MINAS, 2009.
- BRINA, H. L.(colab.). 1983) **Estrada de ferro**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1983.
- CARTER, F. W. On the action of locomotive driving wheel, Proc. R. Soc. London, A, **Wear**, v. 112, p. 151-157. 1926.
- CONFORTO, E. C.; et al. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento e gerenciamento de projetos. In: **Congresso brasileiro de gestão de desenvolvimento de produto**, n. 8. Porto Alegre, 2011.
- DENG, X.; QIAN, Z.; LI, Z.; DOLLEVOET, R. Applicability of half-space-based methods to non-conforming elastic normal contact problems. **International Journal of Mechanical Sciences** v. 126, p. 229-234. 2017.
- FONSECA, V. G. **Revisão bibliográfica sobre defeitos em rodas ferroviárias**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2017.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- GREENWOOD, J. A.; JOHNSON, K. L.; MATSUBARA, E. A surface roughness parameter in hertz contact. University Engineering Department, University of Cambridge, Trumpington Street, Cambridge. **Wear**, p. 47-57, 1984.
- JOHNSON, K. L.; VERMEULEN, P. J. Contact of non-spherical bodies transmitting tangential forces. J. Appl. Mech., **Wear**, v. 31 p. 338-340. 1964.
- KALKER, J. J. **On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction**. 1967. Tese (Doutorado) – Delft University of Technology, 1967.

KALKER, J. J. Wheel-rail rolling contact theory. Faculty of Technical Mathematics and Informatics, Technical University of Delft, Delft. **Wear**, p. 243-261. 1991.

KALKER, J. Survey of wheel-rail rolling contact theory. **Vehicle Systems Dynamics**, v. 5, p. 317-358, 1979.

KNOTHE, K. History of wheel/rail contact mechanics: from Redtenbacher to Kalker. **Vehicle System Dynamics**, v. 46, n. 1-2, p. 9-26. 2009.

KRAUS, H.; POLL, G. The influence of tangencial tractions at the surface on the stresses in contacting bodies during rolling-sliding contact. Department of Wear of Material, Technical University of Aachen, Seffenter Weg 8 **Wear**, p. 221-232. 1983.

MAGALHÃES, P. C. Contato Roda-Trilho. In: BRANCO, J. E. S. C.; FERREIRA, R. (Ed.). **Tratado de estradas de ferro**. Rio de Janeiro. 2000. p. 80-111.

MORILLO, A. H. V. **Análise de dados experimentais da literatura sobre desgaste adesivo em aços para rodas ferroviárias**. 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Ferroviária e Metroviária) – Centro de Engenharias da Mobilidade, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2015.

PAO, M. L. **Concepts of information retrieval**. Englewood, Colorado: Libraries Unlimited, Inc, 1989.

PETRONI, C. V. **Estudo da performance dos diversos tipos de trilhos assentados na via da MRS, critérios de desgaste, fadiga de contato**. 2006. Monografia (Especialização em Transporte Ferroviário de Carga) - Instituto Militar de Engenharia, Academia MRS, Rio de Janeiro, 2006.

PINTO, R. I. T. **Estudo de tensões em rodas ferroviárias**. 1997. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

PORTO, T. G. **PTR 2501 – Ferrovias**. 2004. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2004.

SANTOS, F. de C. **Análise de contato roda-trilho e sua influência na vida em serviço de rodas ferroviárias**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2000.

SANTOS, S. **Transporte ferroviário: história e técnicas**. Florianópolis: Cengage Learning, 2011.

SCHNEIDER, E. L. **Análise da vida remanescente de trilhos com defeitos transversais desgastados em serviço**. Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre. 2005.

SEMPREBONE, P. S. **Desgaste em trilhos ferroviários - Um estudo teórico.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2005.

SICHANI, M. Sh.; ENBLUM, R.; BERG, M. A fast wheel-rail contact model for application to damage analysis in vehicle dynamics simulation. **Wear** v. 366, p. 123-130. 2016.

SICHANI, M. Sh.; ENBLUM, R.; BERG, M. A novel method to model wheel-rail normal contact in vehicle dynamics simulation. **Vehicle System Dynamics**, v. 52, n. 12, p. 1752-1764, 2014

SISDELLI, A. **Estudo de desgaste de rodas e suas consequências no material rodante e na via permanente.** 2006. Monografia (Especialização em Transporte Ferroviário de Carga) - Instituto Militar de Engenharia, Academia MRS, Rio de Janeiro, 2006.

SRIVASTAVA, J. P.; SARKAR, P. K.; RANJAN, V. Contact stress analysis in wheel-rail by hertzian method and finite element method. Department of Mechanical Engineering, Indian School of Mines, Dhanbad, Jharkhand, India. **Wear**, p. 319-325. 2014.

STEFFLER, F. **Via permanente aplicada: guia teórico e prático.** Rio de Janeiro: Ltc, 2013.

TAGUE-SUTCKIFFE, J. An introduction to informetrics. **Information Processing & Management**, v. 28, n. 1, p. -3, 1992.

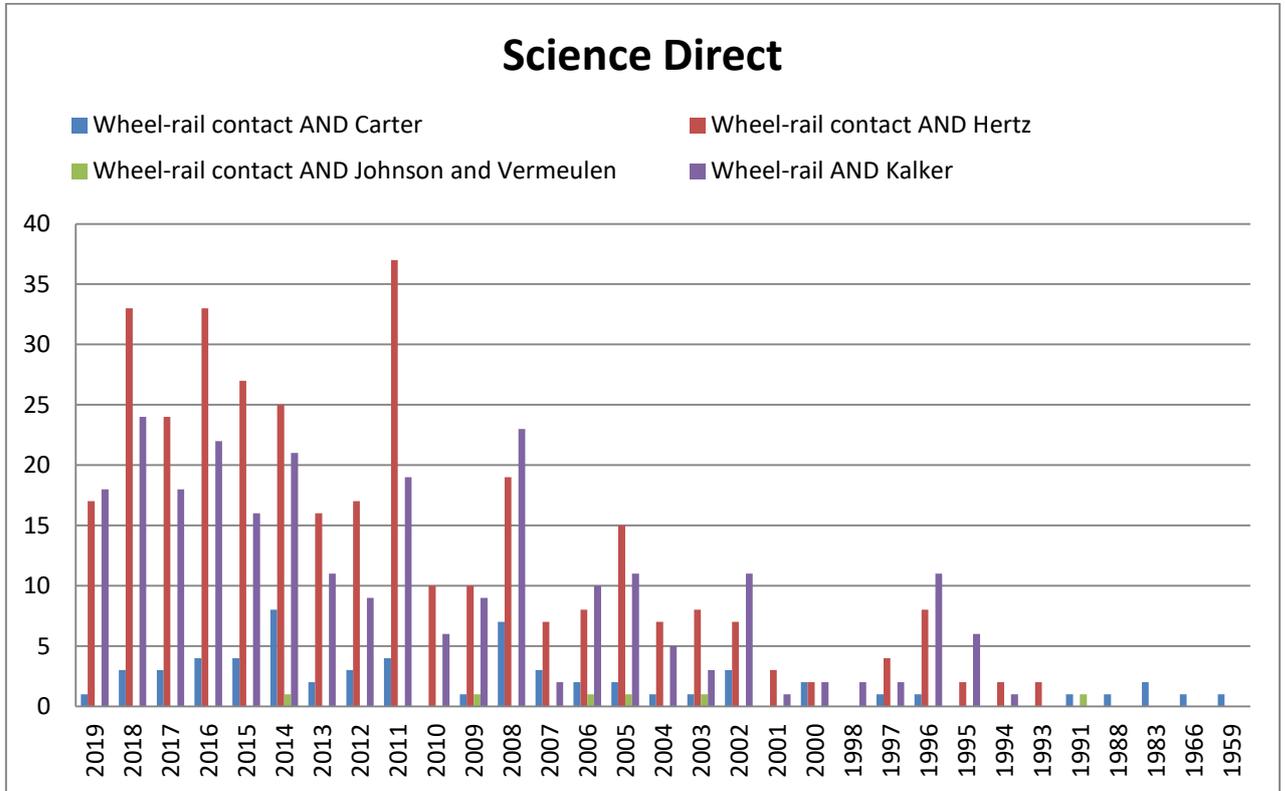
VANTI, N. A. P., 2002. Da bibliometria à webmetria: uma exploração conceitual dos mecanismos utilizados para medir o registro da informação e a difusão do conhecimento. **Ci. Inf.** v, 31, n. 2, p. 152-162. Brasília, 2002.

VERMEULEN, P. J.; JOHNSON, K. L. Contact of nonspherical elastic bodies transmitting tangential forces. **Journal of Applied Mechanics**, v. 31, p. 338-340, 1964.

VILLA, E. C. **Inscrição de um veículo ferroviário em curva.** 1993. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1993.

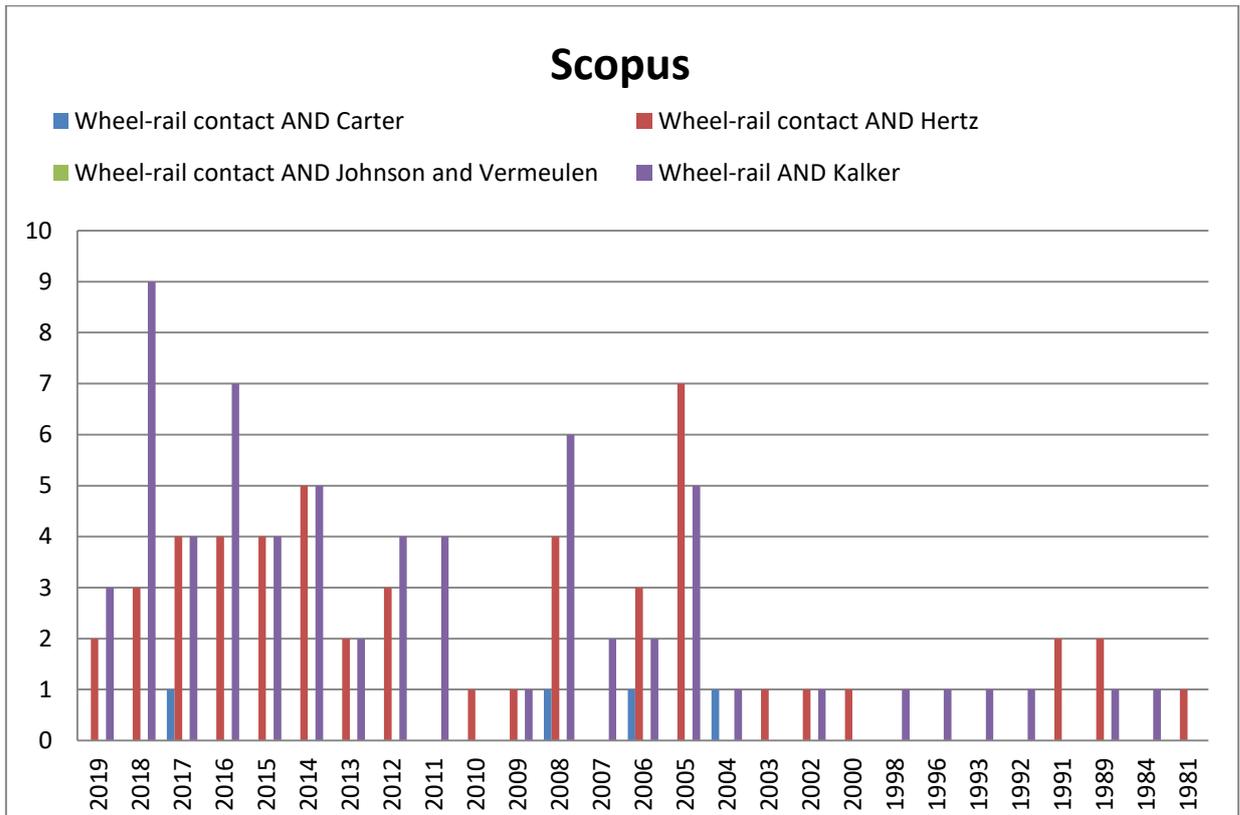
APÊNDICE A – Gráficos dos anos de publicações referentes à Fase 3.

Gráfico 1 - Quantidade de publicações por período na plataforma ScienceDirect.



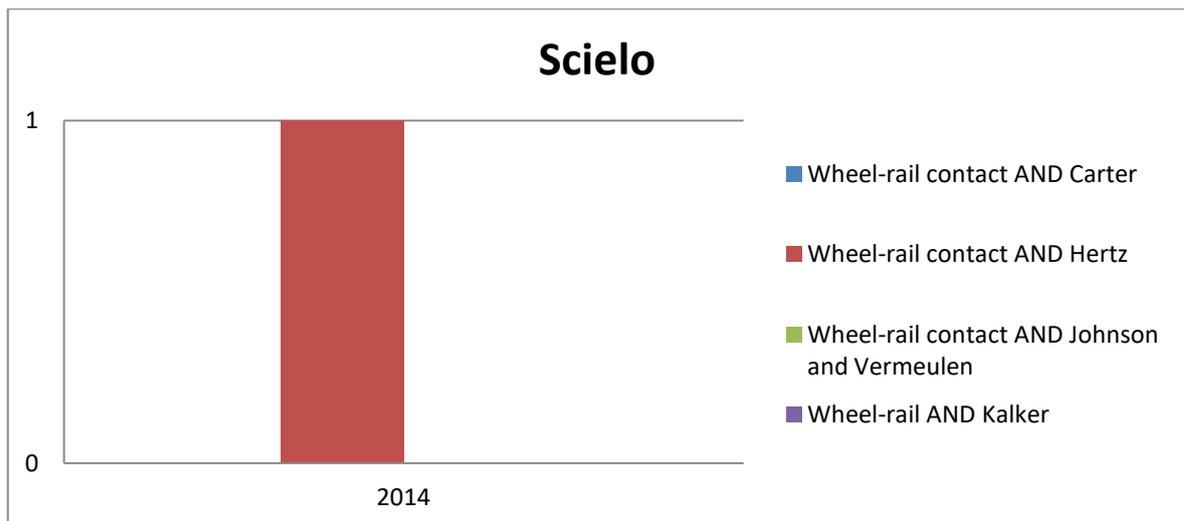
Fonte: Autor (2019).

Gráfico 2 - Quantidade de publicações por período na plataforma Scopus.



Fonte: Autor (2019).

Gráfico 3 - Quantidade de publicações por período na plataforma Scielo.



Fonte: Autor (2019).