

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

LUIZA CORIOLANO SOARES DALPASQUALE

ANÁLISE DA EQUAÇÃO DE NADAL PELA TEORIA DE PROPAGAÇÃO DE ERROS

Joinville

2019

LUIZA CORIOLANO SOARES DALPASQUALE

ANÁLISE DA EQUAÇÃO DE NADAL PELA TEORIA DE PROPAGAÇÃO DE ERROS

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. Alexandre Mikowski, Dr. Fís.

Joinville

2019

LUIZA CORIOLANO SOARES DALPASQUALE

ANÁLISE DA EQUAÇÃO DE NADAL PELA TEORIA DE PROPAGAÇÃO DE ERROS

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:

Prof. Alexandre Mikowski, Dr. Fís.
Orientador
Presidente

Prof. Evandro Cardozo da Silva, Dr. Eng.
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Thiago Antonio Fiorentin, Dr. Eng.
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Aos meus pais, irmãos, amigos e professores,
pelo apoio incondicional e grande incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre, pela dedicação na orientação do trabalho e pelos grandes ensinamentos que me foram passados. Obrigada por me desafiar a crescer academicamente e acreditar na minha capacidade. Também agradeço ao LabMAD – Laboratório de Modelagem e Análise de Dados, pelo espaço físico.

Agradeço ao meu pai Léo e a minha mãe Adriane, por todo amor, incentivo, dedicação, esforço, companheirismo e intercessão até aqui. Tenho muito orgulho e espero honrá-los tornando-me dedicada e comprometida, agindo sempre com caráter, respeito e amor em tudo que eu faço. Os senhores me proporcionaram tudo de melhor que eu poderia ter, e são minhas inspirações diárias.

Gostaria de agradecer, também ao meu noivo, meus irmãos, ao tio Julio e a tia Sandra que me ajudaram em momentos de muita tristeza e compartilharam comigo toda a felicidade das minhas conquistas. Eu os amo indescritivelmente.

Por fim, gostaria de agradecer a Deus, que me capacitou, acalmou meu coração e me preencheu com amor e compaixão. É a rocha e o alicerce em minha vida, e, eu, nada poderia sem Ele.

Para se conhecer a sabedoria e a instrução; para se discernir as palavras do entendimento; Para se receber a instrução da prudência, a justiça, o juízo, e a equidade; Para dar aos simples sagacidade; e aos moços, conhecimento e bom siso; Para o sábio ouvir e crescer em conhecimento, e o que tem discernimento adquirir sábios conselhos; Para entender provérbios, e a sua interpretação, como também as palavras dos sábios, e os seus enigmas. O temor do Senhor é o princípio do conhecimento; os tolos desprezam a sabedoria e a instrução.

Provérbios 1: 2-7

RESUMO

O transporte ferroviário fornece alta rentabilidade, sendo um dos modos mais importantes de transporte de cargas de baixo valor agregado. Além disso, é um dos modos de transporte mais seguro, rápido e organizado, de certa forma. Devido a sua importância no escoamento de produtos, é imprescindível um elevado nível de confiabilidade. Deste modo, o estudo de descarrilamento cresce buscando atender as demandas e tornar o sistema mais eficiente. Neste contexto, o estudo das dinâmicas longitudinal e lateral, relacionadas como contato roda-trilho é abordado, buscando diminuir o índice de acidentes e maximizar o tempo de operação e a quantidade de carga transportada. O objetivo geral deste trabalho é realizar a elaboração de modelo matemático quanto à propagação de erros no equacionamento do coeficiente de descarrilamento, razão L/V , mais conhecida como equação ou critério de Nadal. Para tanto, é avaliado o erro propagado na equação de Nadal ao considerar uma variação de 2,5% e 5% para o ângulo de contato e o coeficiente de atrito entre o trilho e a roda devido à incerteza de medição ou erro no processo de obtenção dos parâmetros. Os resultados indicaram que o valor do coeficiente Nadal é diretamente proporcional ao ângulo de contato roda-trilho e inversamente ao coeficiente de atrito. Os valores obtidos para o atrito mínimo de 0,12 estabeleciam um ângulo de até 51,85 graus, enquanto que ao analisar o erro propagado, o valor máximo passa a ser de 50,7 graus para erros associados de 2,5% e de 49,5 graus para um erro de 5%. Um comportamento similar foi obtido ao realizar a análise para coeficientes de atrito maiores, que representam boas condições de operação. Os resultados, no geral, são satisfatórios e evidenciam uma fragilidade nos limites de segurança de eixo e de roda estabelecidos pela norma da AAR.

PALAVRAS-CHAVE: Equação de Nadal; Propagação de Erro; Coeficiente de Descarrilamento; Contato roda-trilho.

ABSTRACT

The rail transport offers high rentability, being one of the most important means of transport for low value-added products. Moreover, this mean of transport is also very safe, fast and organized. Given the importance of rail transport in the supply chain, it is imperative to be highly reliable. Therefore, the research on the causes of derailment grows in attempt to meet the demands of the market and improve the efficiency of the system. In this context, the study of the dynamics longitudinal and lateral related to the contact wheel-rail is discussed in the search for lower the number of accidents, maximize the life cycle of the machinery and also maximize the amount of cargo carried. The main objective of this work is to elaborate a mathematical model related to the error propagation on the equation of derailment coefficient, L/V ratio, which is known as Nadal equation. To meet this objective, the error propagation is evaluated for a range of variation from 2.5% to 5% for the contact angle and the coefficient of friction between the rail and the wheel, due to the uncertainty of measurement or errors in the data acquisition. The results obtained shows that the Nadal coefficient is directly proportional to the wheel-rail contact angle and inversely proportional to the coefficient of friction. The minimal coefficient of friction of 0.12 established an angle of 51.85 degrees. Analyzing the error propagated through the equation, the value obtained, considering an error of 2.5%, is 50.7 degrees, while considering an error of 5% the result indicates an angle of 49.5 degrees. A similar behavior is obtained in the analysis using higher coefficients of friction, which are found in good operational conditions. In a general point of view, the results obtained are satisfactory, showing a fragility on the safety limits related to the shaft and the wheel, established in the norm defined by A.A.R.

Key words: Nadal Equation. Error Propagation. Derailment Coefficient. Wheel-rail contact.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Trilho Vignole e a denominação de suas partes.....	14
Figura 2 – Superelevação	15
Figura 3 – Roda ferroviária em corte longitudinal e suas partes.	16
Figura 4 – Partes de uma roda ferroviária.	16
Figura 5 – Contato roda-trilho em tangente de um perfil de roda: (a) novo e; (b) usado.....	17
Figura 6 – Contato real entre duas superfícies.	18
Figura 7 – Elipse de Hertz.	19
Figura 8 – Área de aderência da roda ferroviária e trilho ao aplicar carga sem movimento....	20
Figura 9 – Área de aderência da roda ferroviária em movimento com aplicação de carga.....	21
Figura 10 – Movimento de hunting de um rodeiro.....	22
Figura 11 – Desenho esquemático do contato roda trilho.	23
Figura 12 – Distribuição dos acidentes de acordo com os critérios de descarrilamento.	24
Figura 13 – Análise de forças do contato roda trilho.	26
Figura 14 – Curva característica da equação de Nadal.....	27
Figura 15 – Curva característica da equação de Nadal para diferentes coeficientes de atrito..	32
Figura 16 – Razão L/V em função do ângulo: (a) para coeficiente de atrito 0,12; (b) para coeficiente de atrito 0,36.	34
Figura 17 – Erro de Nadal propagado para diferentes ângulos de contato.....	35
Figura 18 – Erro de Nadal propagado para diferentes coeficientes de atrito.	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo Geral	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 TRILHO FERROVIÁRIO	14
2.2 RODA FERROVIÁRIA	15
2.3 CONTATO RODA-TRILHO	18
2.4 MOVIMENTOS OSCILATÓRIOS	22
2.5 CRITÉRIO DE NADAL	24
2.6 ESTADO DA ARTE	28
3. METODOLOGIA	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 MODELO MATEMÁTICO DE ERRO PARA A EQUAÇÃO DE NADAL	30
4.2 INTERVALO DE CONFIANÇA PARA A EQUAÇÃO DE NADAL	31
5. CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário é um dos mais antigos, seu surgimento está ligado diretamente com a Primeira Revolução Industrial, devido à necessidade de escoamento de maior volume de produção. Este modal possui capacidade para transporte de altos volumes de carga, mas encontra barreiras quanto à flexibilidade de rotas, uma vez que possui uma rota determinada pela via férrea com apenas um grau de liberdade (SOUZA, 2014).

O transporte no modal ferroviário possui um excelente custo benefício, sendo amplamente utilizado em diversos países para o transporte de cargas e pessoas. Segundo o Furtado (2005), no Brasil a extensão da malha férrea não é tão grande quando comparada com países que possuem grandes dimensões, como por exemplo, os Estados Unidos, o Canadá e a Rússia. As expansões ferroviárias significativas não ocorrem há algum tempo em nosso país, e o setor conta com vias fora de padrões e antigas, o que desfavorece o escoamento de cargas com baixo custo.

Além da alta rentabilidade, o modal ferroviário é um dos modos mais importantes de transporte cargas de baixo valor agregado. Como este sistema é executado em trilhos e rodas de metal, ele possui alguns benefícios, por exemplo, a menor resistência ao atrito, o que ajuda a fixar mais carga nos vagões. Além disso, é um dos modos de transporte mais seguros, rápido e o menos afetado pelas condições climáticas usuais, como chuva ou neblina. Seus serviços são mais seguros, uniformes e regulares em comparação com outros, como o rodoviário.

Dada à importância e influência deste setor no escoamento de produções, é imprescindível uma confiabilidade cada vez maior. O Departamento de Transportes dos Estados Unidos possui um sistema de estatísticas que correlacionam todos os acidentes ferroviários desde 1980, e os descarrilamentos correspondem a 73% das falhas no período (U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2019). Deste modo, o estudo de falhas e em especial de descarrilamento cresce, buscando atender as demandas e tornar o sistema mais eficiente.

Neste contexto, o estudo da dinâmica longitudinal e lateral, especificamente na temática do contato roda-trilho surgem, buscando diminuir o índice de acidentes e maximizar o tempo de operação e a quantidade de carga transportada. Tornando, assim, o sistema cada vez mais atrativo, para mercados que não o possuem em sua cultura, como o brasileiro, e garantindo sua participação cada vez maior em meios já estabelecidos.

Como o contato-roda trilho é dependente direto da geometria e condições da via e das rodas, no presente trabalho serão abordadas algumas características a fim de otimizar a

compreensão quanto às condições ideais do meio para a redução de descarrilamentos. Além disso, propõe-se a elaboração de modelos matemáticos quanto à propagação de erros no equacionamento do coeficiente de descarrilamento, relação L/V , proposto por Nadal em 1809 e amplamente utilizado no setor.

Desse modo, pretende-se averiguar se as equações e as simplificações são confiáveis para a realização de um projeto e podem ser empregadas com um índice de confiabilidade aceitável. Os modelos de propagação de incertezas desenvolvidos baseiam-se na equação de Nadal, e esta é desenvolvida através de um sistema geométrico com equações de equilíbrio de forças. Outro modelo, que não será analisado, uma vez que a equação de Nadal é mais conservadora, torna-se sugestão para trabalhos futuros, é referente à equação de Nadal modificada por Barbosa (2005), que considera o ângulo de ataque do rodeiro dianteiro e traseiro, e, portanto pode vir a ser mais assertiva e com menor erro.

Os valores normativos encontrados na AAR (Association of American Railroads) não levam a taxa de erro do processo de medição em consideração. Desta forma, de antemão um coeficiente de descarrilamento que se encontra dentro dos limites estabelecidos é considerado seguro, quando analisado com a faixa de valores referentes ao erro, não mais se enquadra e portando tende a descarrilar. Desta forma, a análise da propagação de erros torna-se primordial, buscando verificar os limites de erro e das variantes empregadas na formulação do coeficiente de descarrilamento proposto por Nadal.

1.1 OBJETIVOS

A seguir, os objetivos geral e específicos do trabalho serão apresentados.

1.1.1 Objetivo Geral

Modelar e analisar a equação de Nadal quando submetida à teoria de propagação de erros.

1.1.2 Objetivos Específicos

- i. Desenvolver um modelo matemático para o erro da equação de Nadal, pela teoria de propagação de erros;

- ii. Verificar a influência de erros das variáveis independentes, ângulo de contato roda-trilho e coeficiente de atrito entre a roda e trilho, da equação de Nadal, ou seja, na razão L/V , através da teoria da propagação de erros;
- iii. Verificar as influências do ângulo de contato roda-trilho e do coeficiente de atrito entre a roda e trilho no erro da equação de Nadal propagada;
- iv. Realizar análise com dados experimentais encontrados na literatura.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco seções, sendo uma seção de introdução e motivação do tema, uma de fundamentação teórica, uma seção de metodologia, uma de resultados e discussão, e por fim uma seção de conclusão.

Na primeira seção será abordado o tema e a problemática, bem como a motivação e justificativa do desenvolvimento do estudo. Após apresentar sua importância e necessidade, os objetivos do trabalho encontram-se listados.

A segunda seção traz uma pesquisa documental (ZANELLA, 2011), de modo a reunir a maior quantidade de informações encontradas na literatura, em órgãos públicos e materiais de especialização de instituições privadas para fornecer um embasamento teórico ao leitor. Assim, com o conhecimento necessário quanto às definições e normas para trilhos e rodas ferroviárias são apresentadas as teorias de contato e definida a aplicação da teoria de Hertz no contato roda-trilho. Finalmente, os tipos de movimento e seus conceitos básicos são listados e a equação de Nadal é apresentada e discutida.

A terceira seção aborda segundo Zanella (2011) a metodologia científica para um estudo analítico dos dados. Nesta seção são apresentados os métodos utilizados para elaboração dos modelos matemáticos de propagação de erros, bem como as características da pesquisa teórica para a caracterização do intervalo de dados analisados na seção 4.

A seção 4 aborda o modelo matemático de erro da equação de Nadal, bem como apresenta toda a análise numérica através do intervalo de confiança estabelecido, os resultados e as discussões são apresentados.

E finalmente a quinta seção traz a conclusão do trabalho. Após a análise dos resultados e discussões, são realizadas as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

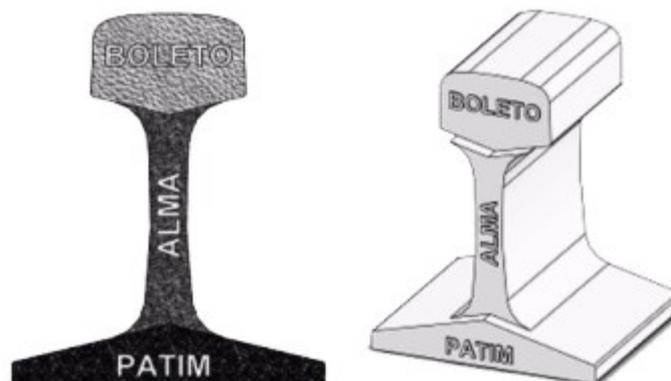
Este trabalho aborda o estudo das forças de contato roda-trilho no setor ferroviário. A partir da caracterização da equação de Nadal, e análise das forças verticais, laterais e seus efeitos, tem-se como finalidade reunir informações quanto às variações desta equação e suas implicações.

2.1 TRILHO FERROVIÁRIO

No meio ferroviário, a movimentação é realizada de modo diferente dos demais meios, uma vez que se possui mobilidade apenas quanto à direção do veículo, e o trajeto é totalmente guiado pelos trilhos. A isto, atribui-se o nome de eixos guiados. O contato do veículo com a via permanente dá-se através do contato roda-trilho, e necessita de grande atenção devido a robustez, intempéries e alta solicitação demandada no transporte de cargas.

Segundo Xavier (2008), o trilho é responsável por servir de suporte, pista e guia para as rodas das composições que circulam na linha e é o elemento mais importante e com maior custo na superestrutura da linha férrea. O perfil de trilho amplamente utilizado no Brasil é do tipo Vignole, conforme Figura 1, que possui suas formas, características mecânicas e dimensões definidas pela norma NBR 7590 (ABNT, 2012). Ele é composto por alma, boleto e patim. Dar-se-á enfoque ao boleto do trilho, que é a zona em que a superfície de rolamento encontra-se.

Figura 1 – Trilho Vignole e a denominação de suas partes.



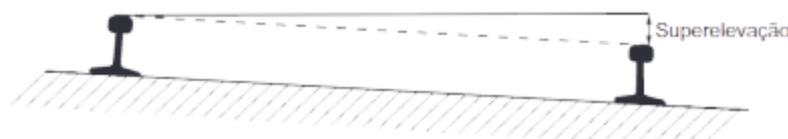
Fonte: NBR 7640 (ABNT, 2014 p. 2).

A superfície de rolamento, localizada no boleto, conforme a ABNT NBR 7590 (2012), deve possuir características como: superfície do trilho o mais lisa possível, elevada rigidez mecânica e capacidade de converter a energia do tráfego em deformação elástica. Desta forma, o estado de conservação, desgaste e possíveis defeitos do boleto tornam-se necessários no estudo das forças nele aplicadas e devem estar em conformidade com a ABNT NBR 7640 (2014), uma vez que seu estado influi diretamente na velocidade da via, na capacidade de carga e na direção da reação das forças nele aplicadas.

O meio ferroviário possui liberdade para realizar movimentos laterais quando excitados por irregularidades na via e inscrição em curvas. As curvas quando niveladas horizontalmente geram uma componente de força centrífuga que deslocará o veículo no sentido do trilho externo, criando resistência à tração e podendo levar ao tombamento do trem (BRINA, 1983). A inscrição em curva é tratada com uma análise quase estática com aplicação de força lateral equivalente as acelerações centrífugas, com seus fenômenos transitórios negligenciados (ALMEIDA, 2006).

Segundo Brina (1983) ao elevar o trilho externo, conforme a Figura 2, cria-se um equilíbrio com a força centrífuga. Se a aceleração centrífuga na curva for da ordem de 1 m/s^2 , a força é parcialmente compensada pela superelevação do trilho externo (BARBOSA, 1999).

Figura 2 – Superelevação



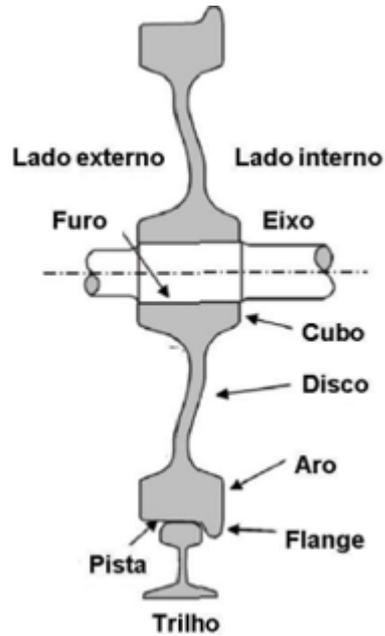
Fonte: ABNT NBR 16387 (2016).

2.2 RODA FERROVIÁRIA

A roda ferroviária é um componente do rodeiro que no Brasil é fabricado conforme normas específicas da Association of American Railroads, por meio da AAR MSRP 750, 2011. Sua fabricação pode ser em aço fundido ou forjado e necessita atender limites de dureza e homogeneidade do material. Ela possui formato cônico para o desenvolvimento de forças de direcionamento no contato com a via pré-definida (BARBOSA, 2000).

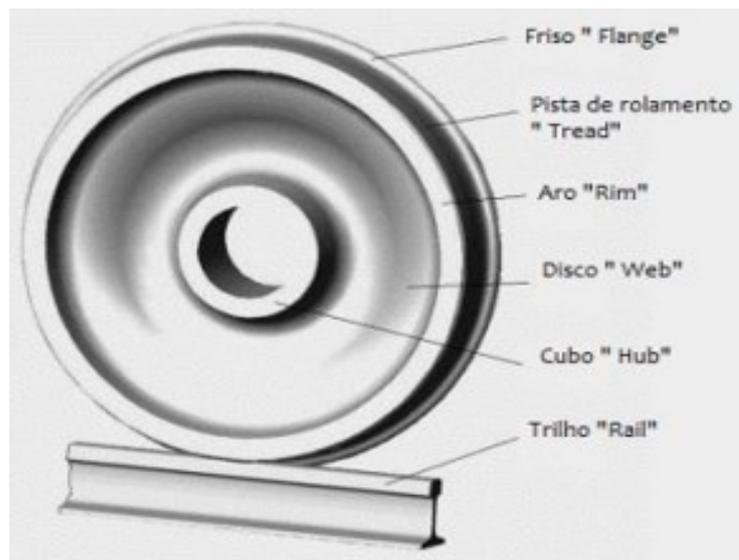
Para facilitar a compreensão sobre o formato de uma roda ferroviária, são apresentadas as Figuras 3 e 4, que demonstram as partes em uma visão em corte e o formato em visão tridimensional, respectivamente.

Figura 3 – Roda ferroviária em corte longitudinal e suas partes.



Fonte: Chaves (2017, p.18).

Figura 4 – Partes de uma roda ferroviária.



Fonte: Fonseca (2015, p.12).

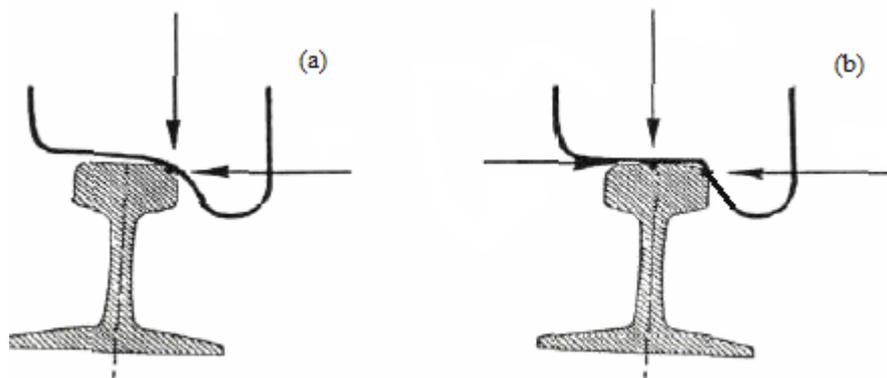
O perfil cônico da roda proporciona o seu auto direcionamento, importante na análise de forças de contato. Segundo Barbosa (2000), este sistema de guiagem do veículo permite a centralização do rodéiro em retas e a inscrição em curvas. Contudo ao utilizar-se da conicidade das rodas, alguns fatores como a velocidade crítica de tráfego devem ser analisados, uma vez que o sistema adquire instabilidade lateral.

Em curvas, ou quando o sistema sofre algum tipo de alteração dinâmica do movimento, o friso irá impedir que a roda exceda o limite de deslocamento lateral. Logo, na região do friso aparecem intensas forças tangenciais laterais e forças laterais dependentes do escorregamento no contato, e ao afastar-se às forças tangenciais terão predominância da parcela que depende do deslocamento lateral (ALMEIDA, 2006).

O perfil da roda e o perfil do trilho fornecem os raios de rolamento nos pontos de contato. A dirigibilidade na inscrição de uma curva ou a restituição para o centro da via após a aplicação de uma força externa lateral depende dos perfis de rolamento. Desta forma, os desgastes dos perfis passam a ser de interesse, uma vez que ao mudar o raio dos pontos de contato e o ângulo da conicidade da roda, as forças tangenciais também mudam (figura 5).

Semprebone (2006), afirma que a qualidade de tráfego dos veículos ferroviários está ligada a ausência de instabilidade lateral e boa inscrição em curvas. Desta forma, a interação do veículo com a via permanente deve produzir baixo nível de forças de interação, minimizando o desgaste e a instabilidade, por consequência. Os escorregamentos e a tensão de contato geram desgastes que podem ser verificados através da visualização dos perfis usados. Quando as solicitações estão acima do esperado do projeto o nível de agressividade das rodas aumentam, prejudicando o desempenho e durabilidade dos perfis.

Figura 5 – Contato roda-trilho em tangente de um perfil de roda: (a) novo e; (b) usado.



Fonte: adaptado de Semprebone (2006, p. 33).

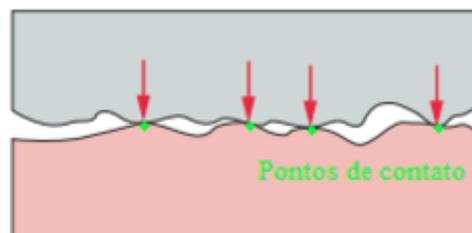
Segundo Almeida (2006), a área de contato entre o perfil de rolamento do trilho e da roda se forma com tamanho reduzido e pode ser considerada como um ponto de contato. Ao serem adicionadas forças laterais e carga, surgem múltiplos pontos de contato que dificultam a determinação das forças tangenciais uma vez que a teoria de Hertz é válida para apenas uma área de contato. Desta forma, é proposta uma análise através de um ponto equivalente representativo dos demais pontos de contato, e para este único ponto, é calculado a elipse de contato equivalente (elipse de Hertz), que permitirá a determinação das forças tangenciais equivalentes. É importante ainda salientar que uma precisa determinação dos parâmetros de contato ocasiona uma modelagem mais próxima do comportamento dinâmico real.

2.3 CONTATO RODA-TRILHO

O estudo da mecânica de contato objetiva analisar a interação entre duas superfícies sólidas. Esta interação ocorre através de deslocamentos, deformações e tensões, provenientes do contato entre duas superfícies paralelas. Segundo Chaves (2017) este estudo pode ser aplicado na análise de diversos equipamentos mecânicos, como cilindros de laminação, engrenagens e também no sistema roda-trilho.

Norton (2004) afirma que há grande complexidade na análise de superfícies de contato. Uma vez que quando duas superfícies são pressionadas uma contra a outra com aplicação de uma força, sua área aparente de contato pode ser calculada por geometria. Porém sua área real de contato é afetada pela rugosidade presente (Figura 6) e pela força normal desenvolvida. De forma que, se a carga normal aplicada aumentar, a área de contato também irá aumentar.

Figura 6 – Contato real entre duas superfícies.



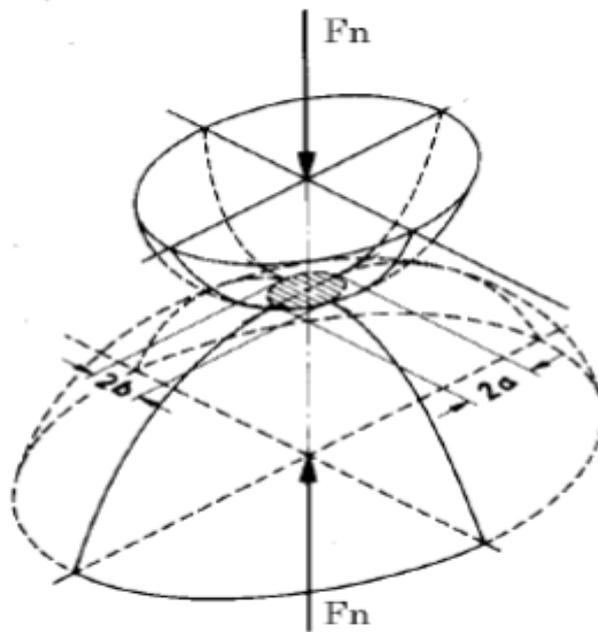
Fonte: adaptado de Norton (2004, p.423).

Norton (2004) relata que devido à dificuldade de se determinar com precisão a área de contato para diferentes tipos de superfícies, realiza-se a separação em três categorias distintas, sendo elas:

- Contato pontual: ocorre entre duas superfícies em formato de esfera;
- Contato linear: ocorre no contato de um cilindro contra outro cilindro;
- Contato superficial: ocorre no contato entre duas superfícies planas.

Segundo Goloshchapov (2019), a teoria de Hertz afirma que dois sólidos esféricos, elásticos e ideais não exercem qualquer pressão entre si, então o contato entre eles se resume a um único ponto. Quando pressionado um contra o outro, produz-se na região de contato uma pequena deformação de configuração elíptica, denominada de elipse de Hertz (Figura 7).

Figura 7 – Elipse de Hertz.



Fonte: Chaves (2017, p. 27).

Peixoto (2008) propõe que as superfícies da roda e do trilho devam ser apresentadas por dois raios de curvatura principais. Respeitando-se certos limites e condições de contorno, estima-se que no sistema roda-trilho, em virtude da curvatura destes dois elementos, se nenhuma carga vertical fosse aplicada, a área de contato seria um ponto muito pequeno (BORBA, 2009). Esta formulação é dada para o caso de contato entre dois corpos elásticos sem atrito e escorregamento e apesar de não representar exatamente o contato roda-trilho a aproximação é inicialmente adotada.

Ao ser aplicada uma carga normal no contato, há a ocorrência de uma deformação, acarretando no aumento da área, que toma a forma de uma pequena elipse. Desta forma, ao aplicar-se a teoria de contato de Hertz desenvolvida em 1882, ao transporte ferroviário, temos um contato idealmente pontual, de forma que as tensões observadas na região de contato possam ser obtidas. É necessário que as rodas e trilhos possuam resistência à fadiga de contato e que essa resistência seja suficiente para resistir às tensões de Hertz, sendo imprescindível que as rodas possuam resistência ao desgaste na pista e na flange (OKAGATA, 2013).

A pressão máxima de Hertz para contato elíptico é definida matematicamente a seguir, e nota-se que quanto menor a área de contato maior ela é. De forma que para um ponto único, como o utilizado para a análise simplificada do contato roda-trilho, tem-se a pressão máxima de contato (NORTON, 2004).

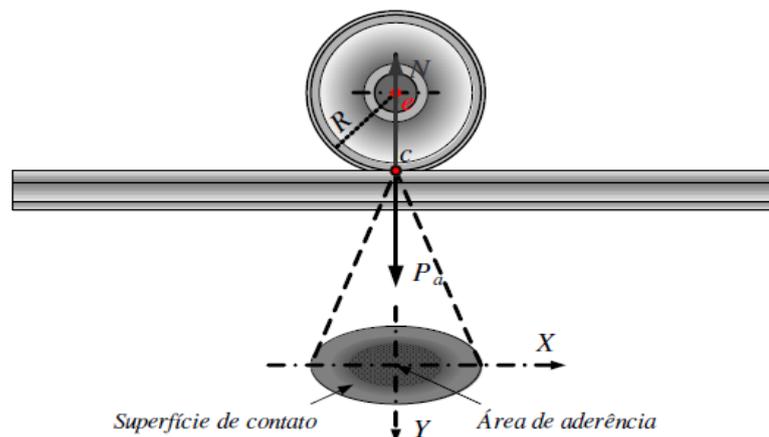
$$p_o = \frac{3 F_n}{2 \pi ab} \quad (-2.1)$$

onde F_n é a força normal aplicada e a , b são os eixos da elipse de contato.

A distribuição de esforços dentro desta elipse de contato não é homogênea. Pelo contrário, verifica-se de forma aproximadamente parabólica (BORBA, 2009). A roda ao rolar sobre o trilho faz com que a área de aderência seja reduzida e se desloque em direção da extremidade da superfície, a frente do sentido de movimento. Abaixo são apresentados os esforços sofridos no trilho e na roda, a superfície de contato, a área de aderência no contato roda trilho quando ele encontra-se parado e em movimento.

Na análise estática (Figura 8) a área de aderência é exatamente no centro da superfície de contato. O trilho e a roda não sofrem tração e compressão. A força normal é equivalente à força peso.

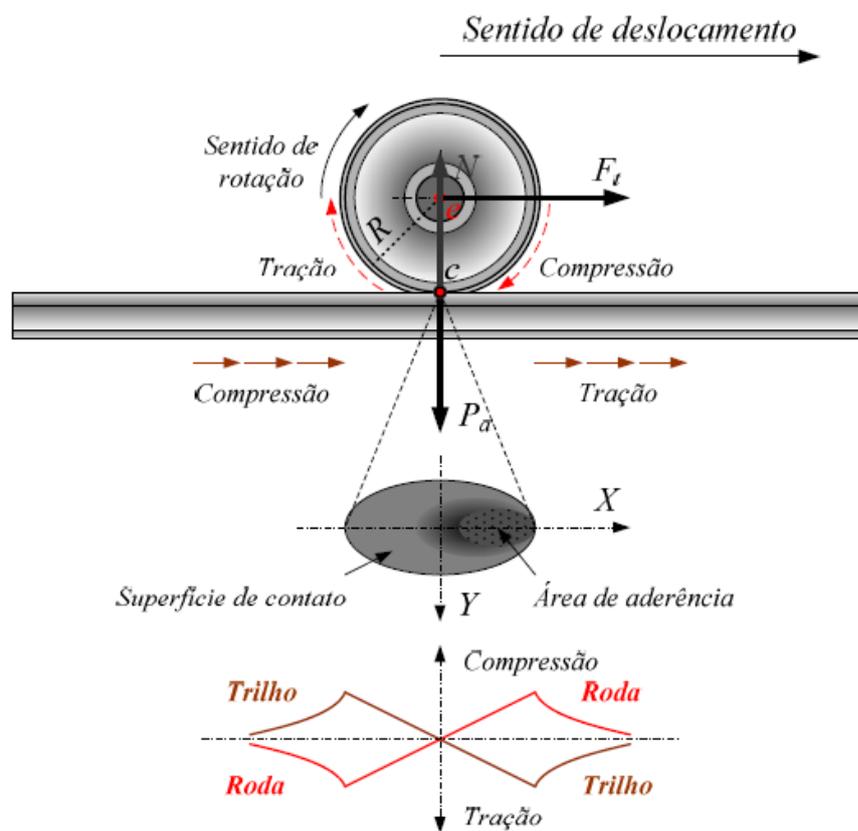
Figura 8 – Área de aderência da roda ferroviária e trilho ao aplicar carga sem movimento.



Fonte: BORBA (2009, p. 21).

Durante o movimento, a roda quando rola sobre o trilho faz com que a área de aderência seja reduzida e se desloque em direção da extremidade da superfície a frente do sentido de movimento, conforme Figura 9. Neste momento, a roda sofre compressão na parte posterior da superfície de contato e tração na parte anterior. Enquanto isso, as reações no trilho são dadas da seguinte forma: tração na frente da superfície de contato e compressão na parte anterior.

Figura 9 – Área de aderência da roda ferroviária em movimento com aplicação de carga.



Fonte: Borba (2009, p. 22).

Conforme apresentado anteriormente, a conicidade das rodas ferroviárias, que são rigidamente conectadas entre si, possui a importante propriedade de auto guiamento que é indispensável para a centralização do rodeiro em retas e inscrição em curvas. Ao trafegar pela via com irregularidades, o carro torna-se sujeito a diversos tipos de excitação diferentes, que podem levá-lo ao desequilíbrio. Este aspecto produz um sistema dinâmico (JINGMANG et. al, 2017).

2.4 MOVIMENTOS OSCILATÓRIOS

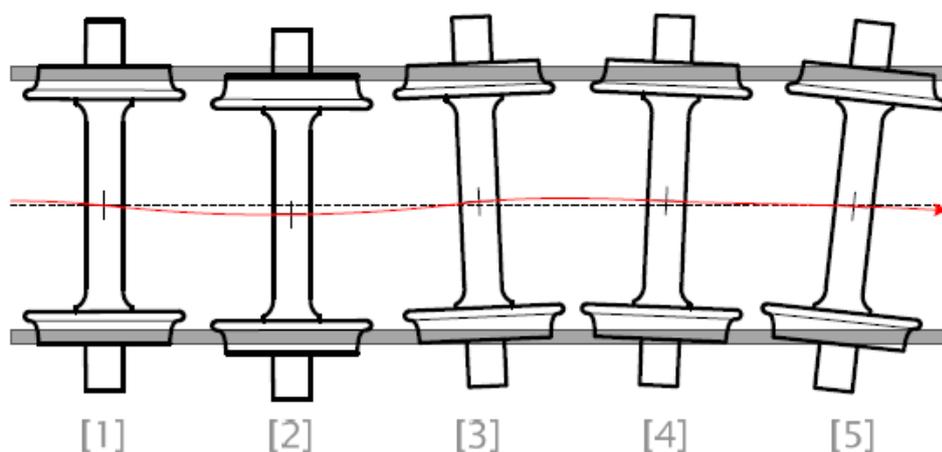
No sistema roda-trilho podem ser observados dois tipos de condições cinemáticas. Na região da pista de rolamento é aplicada uma carga vertical, ocorrendo tanto rolamento como escorregamento. Na região do flange, a carga é aplicada lateralmente e ocorre também rolamento combinado com escorregamento, porém nas curvas da trajetória ou durante a aplicação do freio pode ser observado desgaste por escorregamento (PEREZ-UNZUETA; BEYNON, 1993).

Segundo Almeida (2006) a conicidade das rodas garante a centralização do rodeiro em trajetória retilínea e atua na geração de forças laterais para inscrição curvas, garantindo sua guiagem automática nas curvas.

Conforme Borba (2009), o auto guiamento proveniente principalmente da geometria de contato entre a roda e os trilhos é a causa do fenômeno de auto-excitação (conhecido em inglês por hunting). Este efeito é responsável por gerar um sistema dinâmico com frequência natural definida, amortecimento modal inversamente proporcional à velocidade que pode apresentar velocidade crítica acima da qual o sistema torna-se instável.

O hunting não é verificado em uma análise vertical de forças e é observado mais facilmente através de um trecho em tangente, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Movimento de hunting de um rodeiro.



Fonte: Borba (2009, p. 113).

O movimento de autoexcitação define a estabilidade lateral do truque uma vez que descrevem um movimento senoidal, após passarem por alguma oscilação (curvas e perturbações

na via, por exemplo) criando uma perturbação lateral periódica. Este fenômeno pode acarretar uma ressonância incontrolável que causa elevadas forças laterais se o carro encontra-se em elevadas velocidades.

Se há ressonância em alta velocidade, as forças tornam-se suficientemente grandes para causarem escorregamento das rodas sobre os trilhos, pesados impactos entre os flanges das rodas e os trilhos, excessivos desgastes dos truques e do aparelho de choque e tração e danos à carga (BORBA, 2009)

Borba (2009), afirma que o movimento do rodeiro depende diretamente das variações das propriedades de contato, principalmente quando o friso (também conhecido por flange) da roda entra em contato com o boleto do trilho. Neste caso, temos a interação de novas forças de contato e para a representação dos esforços é necessário à determinação do centro instantâneo de rolamento. Na Figura 11 visualiza-se as duas principais regiões de contato, a “região A” é o contato trilho-pista e a “região B” é o contato trilho-flange.

Figura 11 – Desenho esquemático do contato roda trilho.



Fonte: Chaves (2017, p. 28).

A falta de contato das rodas com os trilhos é a resultante do descarrilamento ferroviário, uma vez que este contato deve promover a sustentação do trem. Uma condição de via inadequada pode promover a subida da roda no trilho, que é basicamente o que caracteriza um descarrilamento, bem como fatores como dimensão indevida da bitola, aumento da bitola durante o movimento e instabilidade lateral (IWNICK, 2006). Um estudo com a causa dos descarrilamentos em ferrovias norte americanas no período de 1998 a 2000 é apresentado, conforme Figura 12.

Hong (2011) aponta que os descarrilamentos ocasionados por afastamento de bitola e rolamento do trilho são causados por excesso de força lateral, enquanto as sobreposições do friso ocorrem por uma combinação de excesso de força lateral com força vertical reduzida.

Figura 12 – Distribuição dos acidentes de acordo com os critérios de descarrilamento.

Ano	Número de Incidentes Considerados	Dimensão indevida da bitola e rolamento do trilho	Aumento da Bitola	Instabilidade Lateral	Sobreposição do Flange	Outras Causas
2000	3193	295	46	7	13	985
1999	2924	234	52	6	18	914
1998	2745	189	54	3	6	770
Soma	9972	718	152	16	37	2669

Fonte: Hong (2011, p. 69).

As forças laterais surgem devido a um elevado ângulo de ataque, ou seja, quando uma inscrição em curva, por exemplo, é dada com um alto ângulo de contato entre o friso da roda e o boleto do trilho (ALMEIDA, 2006). Os descarrilamentos por sobreposição do friso também podem ocorrer na via em tangente quando existem irregularidades na via e há grande movimentação lateral, como no caso de hunting (IWNICK, 2006).

2.5 CRITÉRIO DE NADAL

Em veículos ferroviários, o contato entre a roda e o trilho provê a interface de movimentação em que o rodeiro suporta o peso próprio do veículo e é realizada a tração, a frenagem e a guiagem pela trajetória imposta pelos trilhos. Este contato dá-se em uma pequena área, onde se desenvolvem forças normais para sustentação do veículo e sua carga e forças tangenciais, que produzem as acelerações necessárias para o direcionamento lateral e longitudinal (BARBOSA, 1999).

Devido à elevada rigidez do contato, decorrente do tipo de material envolvido (diferentes classes de aços, conforme especificação em normas) e mudanças expressivas nas propriedades de contato da geometria dos perfis, as forças tangenciais podem atingir valores elevados, com rápida variação de intensidade e direção. O cálculo acurado dos valores das forças de contato é imprescindível para uma boa representatividade do modelo, pois influenciam expressivamente no comportamento dinâmico do veículo.

Segundo Santos (2015), a forma mais comum de se estudar a segurança no transporte ferroviário é analisar a relação entre os esforços presentes no contato roda e trilho. De forma particular, a razão entre a carga lateral (transversal) e vertical constitui um critério bem difundido, que apresenta um limite entre a razão das forças empregadas.

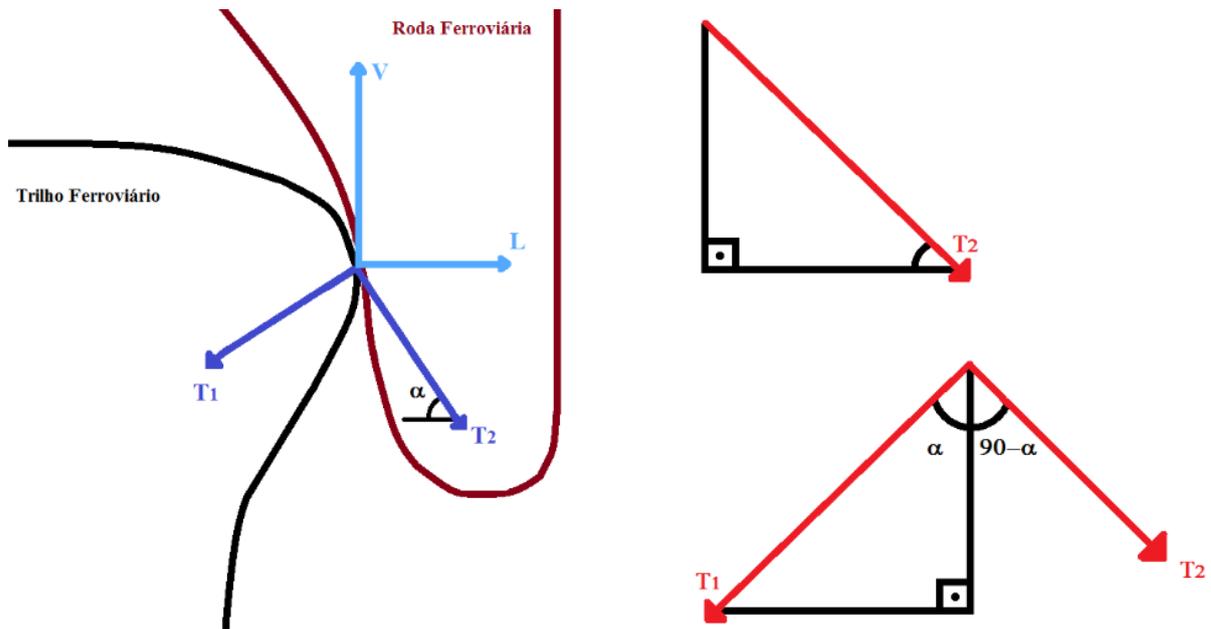
A razão entre as forças horizontal (lateral) e vertical define o critério para o descarrilamento por sobreposição do friso da roda sobre o trilho. A elevada força lateral atribuída ao grande ângulo de contato da roda com o trilho e a distribuição irregular das massas do truque ocasiona o aumento da razão entre forças (IWNICK, 2006). O limite da razão de forças para que não ocorra o descarrilamento é conhecido como critério de Nadal.

Almeida (2006) salienta que descarrilamentos por sobreposição do friso acontecem geralmente em curvas e que a razão de forças lateral pela vertical é principalmente relacionada com:

- O raio de curvatura da via: exerce influência direta no ângulo de inscrição da roda com o trilho, e pode ocasionar movimentos oscilatórios como o hunting;
- O perfil de roda e do trilho: exercem influência no ângulo de contato entre o friso e o boleto;
- Irregularidades na via: podem causar grandes oscilações dinâmicas com severas variações nas forças laterais e verticais;
- As características do truque: um truque mais rígido tende a amortecer menos as perturbações da via, o que pode transmitir um movimento de oscilação que tornar-se-á crescente até ficar instável, ou ainda o mal alinhamento pode induzir um ângulo de ataque maior.
- Velocidade do veículo: que impacta diretamente no coeficiente de aderência conforme Curtius e Kniffler (BORBA, 2009).

O critério de Nadal, conforme relatado por Barbosa (1999), resume-se em identificar a influência do ângulo de contato e do coeficiente de atrito do par de rolamento (contato entre friso e trilho) e sua representação esquemática (Figura 13) e formulação matemática são apresentadas a seguir.

Figura 13 – Análise de forças do contato roda trilho.



Fonte: Próprio Autor.

Tem-se α como sendo o ângulo do plano de contato da roda e do trilho, L é a componente da força lateral, V é a componente da força vertical e μ é o coeficiente de atrito.

$$L = T_2 \cos(\alpha) - T_1 \sin(\alpha) \quad (2.1)$$

$$V = -T_2 \sin(\alpha) - T_1 \cos(\alpha) \quad (2.2)$$

$$T_2 = \mu T_1 \quad (2.3)$$

Desta forma, substituindo a equação (2.3) em (2.2), e também a equação (2.3) em (2.1), temos:

$$-V = \mu T_1 \sin(\alpha) + T_1 \cos(\alpha) \quad (2.4)$$

$$L = \mu T_1 \cos(\alpha) - T_1 \sin(\alpha) \quad (2.5)$$

Efetuada a razão entre as equações (2.5) e (2.4) obtém-se:

$$-\frac{L}{V} = \frac{\mu T_1 \cos(\alpha) - T_1 \sin(\alpha)}{\mu T_1 \sin(\alpha) + T_1 \cos(\alpha)} = \frac{\mu \cos(\alpha) - \sin(\alpha)}{\mu \sin(\alpha) + \cos(\alpha)} \quad (2.6)$$

Ao multiplicar-se todos os termos por menos um e dividi-los por $\cos(\alpha)$, ter-se-á a equação de Nadal, dada por:

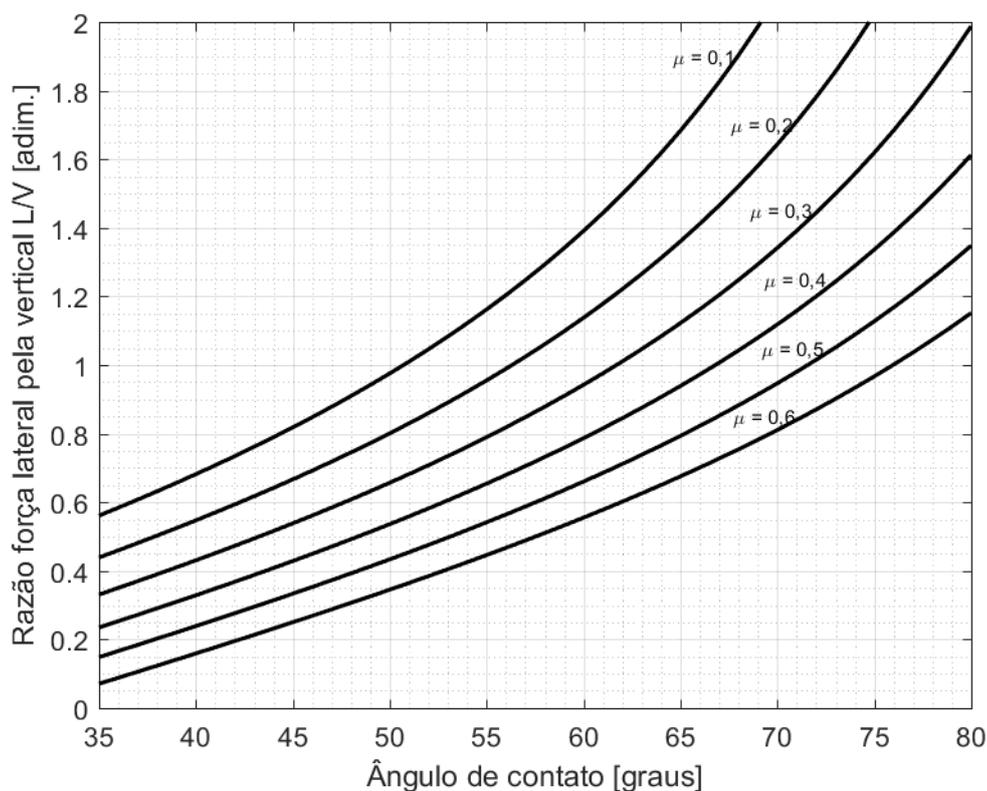
$$\frac{L}{V} = \frac{\tan(\alpha) - \mu}{1 + \mu \tan(\alpha)} \quad (2.7)$$

A análise do processo de descarrilamento é crucial para a avaliação da segurança operacional. Este fenômeno é determinado pela interação de vários efeitos não lineares,

incluindo a variação do ponto de contato entre a roda e o trilho, ângulo de contato, geometria da região de contato e as forças de interação (SANTOS, 2015).

Conforme Barbosa (2005), o coeficiente de descarrilamento, razão L/V , na qual L e V são as forças laterais e verticais no friso da roda, respectivamente, é utilizado como uma medida de segurança operacional para os veículos ferroviários, sendo que há diversos limites estabelecidos.

Figura 14 – Curva característica da equação de Nadal.



Fonte: Autor - adaptada pelo autor de Santos (2008, p. 45).

Pascal (1990) apresentou limites para o coeficiente de descarrilamento. Nota-se que a carga por eixo para um veículo ferroviário deve ser tal que as forças laterais da roda contra o trilho não excedam metade da força vertical, uma vez que o rodeiro está sujeito a forças laterais crescentes.

Neste contexto a AAR (1993) que é norma que regulamenta as operações, limites de segurança e práticas de manutenção em território americano na norma M-1001, Chapter 11 estabelece os limites de segurança para o coeficiente de descarrilamento através de ensaios experimentais. O valor máximo da razão L/V para uma Roda é igual a 1,0; o valor máximo das

somas dos coeficientes de descarrilamento para um Eixo é igual a 1,5; o valor máximo da soma de L/V de um dos lados do Truque é igual a 0,6 e a mínima carga vertical sendo de 10% (% da carga nominal estática).

2.6 ESTADO DA ARTE

Ao realizar a medida de uma grandeza física encontra-se um valor o qual a caracteriza, e para a aplicação é necessário saber a confiança empregada no processo de medição. Deste modo, a propagação de erros pode ser utilizada em diversas vertentes, nas quais são necessárias as análises dos parâmetros empregados. Nestes casos, a aplicação deixa de ser com relação a um valor único e passa a ser de uma faixa de valores.

A teoria de propagação de erro é bastante utilizada em diversos trabalhos e em diferentes áreas. Contudo, na área ferroviária é empregada em menor escala. Encontram-se na literatura alguns trabalhos que discorrem quanto ao erro empregado, como o de Martinho (2016) em que realiza a análise de erro para comunicações móveis em ferrovias, o de Ribeiro (2004) que discorre quanto ao comportamento dinâmico de pontes sob a ação de trens de alta velocidade ou o de Vernilli (2017) que realiza uma modelagem velocidades na via permanente.

3. METODOLOGIA

A equação de Nadal (Eq. 2.7) foi obtida através de uma revisão bibliográfica, a fim de que fossem estudadas as análises geométricas empregadas. Encontra-se na norma americana vigente, limites para os valores do coeficiente de descarrilamento obtidos através de ensaios experimentais.

A equação de Nadal apresentada foi deduzida para verificar se estava correta. E com isso, aplicou-se o método para a propagação de erros, nesta equação. A incerteza (ou erro) pode ser definida com relação à quantidade que um valor obtido pode ser diferente de seu valor verdadeiro. O objetivo da teoria de erros é determinar o melhor valor possível com relação a qual o valor obtido pode ser diferente do valor verdadeiro (VUOLO, 2005).

Assim, o valor da grandeza calculada ou medida deve ser o mais próximo possível do seu valor real. De acordo com Vuolo (2005), a propagação de incertezas de uma função qualquer $w = w(x, y \dots)$, pode ser determinada pela Equação 3.1:

$$\sigma_w^2 = \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \sigma_y^2 \right] + \left[2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \sigma_{xy}^2 \right] \quad (3.1)$$

Interpreta-se a Equação 3.1 através dos parâmetros, como sendo σ a incerteza ou variância, logo, σ_w é a incerteza propagada da função $w = w(x, y)$, σ_x e σ_y são os erros adotados para as variáveis x e y , respectivamente. O símbolo ∂ representa a derivada parcial, logo, $\partial w / \partial x$ e $\partial w / \partial y$ são as derivadas parciais da função w em relação à x , y , respectivamente. O segundo termo da equação, referente à covariância, o qual pode ser desconsiderado para esta aplicação, uma vez que para variáveis independentes ele é zero, indicando que as grandezas da Equação 2.7 não são correlacionáveis.

Desenvolveu-se um modelo matemático para a propagação de incertezas da equação de Nadal (Equação 4.14), no qual as variáveis de ângulo de contato e atrito são analisadas. A razão L/V , como já definida na seção 2.5 possui uma faixa de valores considerados aceitáveis pela AAR. Deste modo, como estes devem seguir a norma vigente, trataremos a razão como um fator que será denominado $F_{L/V}$. Este fator é determinado através dos limites estabelecidos pela AAR M 1001, Chapter 11 (AAR, 1993).

Após desenvolver os cálculos iremos utilizar de valores numéricos pré-estabelecidos para determinar a variação e impacto do coeficiente de atrito e do ângulo através de um erro aceitável. Os valores limites de coeficiente de atrito e ângulo de contato foram definidos conforme Borba (2009) e Santos (2008) através de um estudo de caso da ferrovia Estrada de Ferro Vitória Minas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir os resultados obtidos neste trabalho, que compreendem um modelo matemático para o erro da equação de Nadal e a análise de um intervalo de confiança, serão apresentados.

4.1 MODELO MATEMÁTICO DE ERRO PARA A EQUAÇÃO DE NADAL

O fator $F_{L/V}$ (Equação 4.1) é uma função real que depende apenas do ângulo de contato roda-trilho (α) e do atrito no contato (μ), como pode ser analisado na Equação 4.2.

$$F_{L/V} = \frac{L}{V} = \frac{\tan(\alpha) - \mu}{1 + \mu \tan(\alpha)} \quad (4.1)$$

$$F_{L/V} = f(\alpha, \mu) \quad (4.2)$$

A expressão para cálculo de propagação de incerteza padrão na grandeza para duas variáveis é apresentada. Devido à equação de Nadal apresentar apenas fatores independentes entre si, o segundo termo da equação pode ser considerado zero, de forma a obter-se apenas:

$$\sigma_w^2 = \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \sigma_y^2 \right] + \left[2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \sigma_{xy}^2 \right] \quad (4.3)$$

$$\sigma_w^2 = \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \sigma_y^2 \right] \quad (4.4)$$

Aplicando a equação de propagação de erros na equação de Nadal, tem-se:

$$\sigma_{F_{L/V}}^2 = \left[\left(\frac{\partial F_{L/V}}{\partial \alpha} \right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left(\frac{\partial F_{L/V}}{\partial \mu} \right)^2 \sigma_\mu^2 \right] \quad (4.5)$$

Pelo coeficiente de atrito e o ângulo de contato por serem fatores físicos independentes, pode-se adotar a regra do quociente, que rege a diferenciação desses termos. Desta forma, encontra-se, para o ângulo de contato:

$$\frac{\partial F_{L/V}}{\partial \alpha} = \frac{\{\sec^2(\alpha) [1 + \mu \tan(\alpha)] - \mu \sec^2(\alpha) [\tan(\alpha) - \mu]\}}{[1 + \mu \tan(\alpha)]^2} \quad (4.6)$$

Isolando o termo $[\tan(\alpha) - \mu]$ no numerador.

$$\frac{\partial F_{L/V}}{\partial \alpha} = \frac{[\tan(\alpha) - \mu] \{\sec^2(\alpha) [1 + \mu \tan(\alpha)] [\tan(\alpha) - \mu]^{-1} - \mu \sec^2(\alpha)\}}{[1 + \mu \tan(\alpha)]^2} \quad (4.7)$$

Comparando a função $F_{L/V}$ com a derivada parcial, pode-se reescrever:

$$\frac{\partial F_{L/V}}{\partial \alpha} = F_{L/V} \cdot \frac{\{\sec^2(\alpha) [1 + \mu \tan(\alpha)] [\tan(\alpha) - \mu]^{-1} - \mu \sec^2(\alpha)\}}{[1 + \mu \tan(\alpha)]} \quad (4.8)$$

Analogamente ao realizado, ao derivar-se a equação para o termo dependente do atrito, isolar-se o termo $[\tan(\alpha) - \mu]$ e por fim comparar com a equação obtida com a função $F_{L/V}$, deve-se encontrar:

$$\frac{\partial F_{L/V}}{\partial \mu} = -F_{L/V} \cdot \frac{\{[1 + \mu \tan(\alpha)] [\tan(\alpha) - \mu]^{-1} + \tan(\alpha)\}}{[1 + \mu \tan(\alpha)]} \quad (4.9)$$

Substituindo as derivadas parciais do erro obtidas nas Equações 4.8 e 4.9 na Equação 4.5, tem-se:

$$\sigma_{F_{L/V}}^2 = F_{L/V}^2 \left[k_1 \left(\frac{\sigma_\alpha}{\alpha} \right)^2 + k_2 \left(\frac{\sigma_\mu}{\mu} \right)^2 \right] \quad (4.10)$$

∴

$$\sigma_{F_{L/V}} = F_{L/V} \sqrt{\left[k_1 \left(\frac{\sigma_\alpha}{\alpha} \right)^2 + k_2 \left(\frac{\sigma_\mu}{\mu} \right)^2 \right]} \quad (4.11)$$

Em que os termos k_1 e k_2 , são dados por:

$$k_1 = \alpha^2 \frac{\{\sec^2(\alpha) [1 + \mu \tan(\alpha)] [\tan(\alpha) - \mu]^{-1} - \mu \sec^2(\alpha)\}^2}{[1 + \mu \tan(\alpha)]^2} \quad (4.12)$$

$$k_2 = \mu^2 \frac{\{[1 + \mu \tan(\alpha)] [\tan(\alpha) - \mu]^{-1} + \tan(\alpha)\}^2}{[1 + \mu \tan(\alpha)]^2} \quad (4.13)$$

Por fim, tem-se que a equação de Nadal, ou seja a razão L/V com o respectivo erro, torna-se:

$$F_{L/V} = \frac{L}{V} \left\{ 1 \pm \left[k_1 \left(\frac{\sigma_\alpha}{\alpha} \right)^2 + k_2 \left(\frac{\sigma_\mu}{\mu} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (4.14)$$

4.2 INTERVALO DE CONFIANÇA PARA A EQUAÇÃO DE NADAL

Santos (2008) estabelece através de um estudo de caso da ferrovia EFVM (Estrada de Ferro Vitória Minas) que os ângulos de contato roda-trilho para um perfil de roda novo (perfil torneado para 32 mm de espessura) é de 65° e para uma roda usada é de 75°. Deve-se ressaltar que estes valores podem sofrer alterações em diferentes trechos, devido ao estado de conservação do trilho ferroviário.

Para o intervalo de confiança do coeficiente de atrito no contato roda-trilho foram utilizados dados de ensaios de Barbosa (1999), que mostram para um trilho com óleo, o

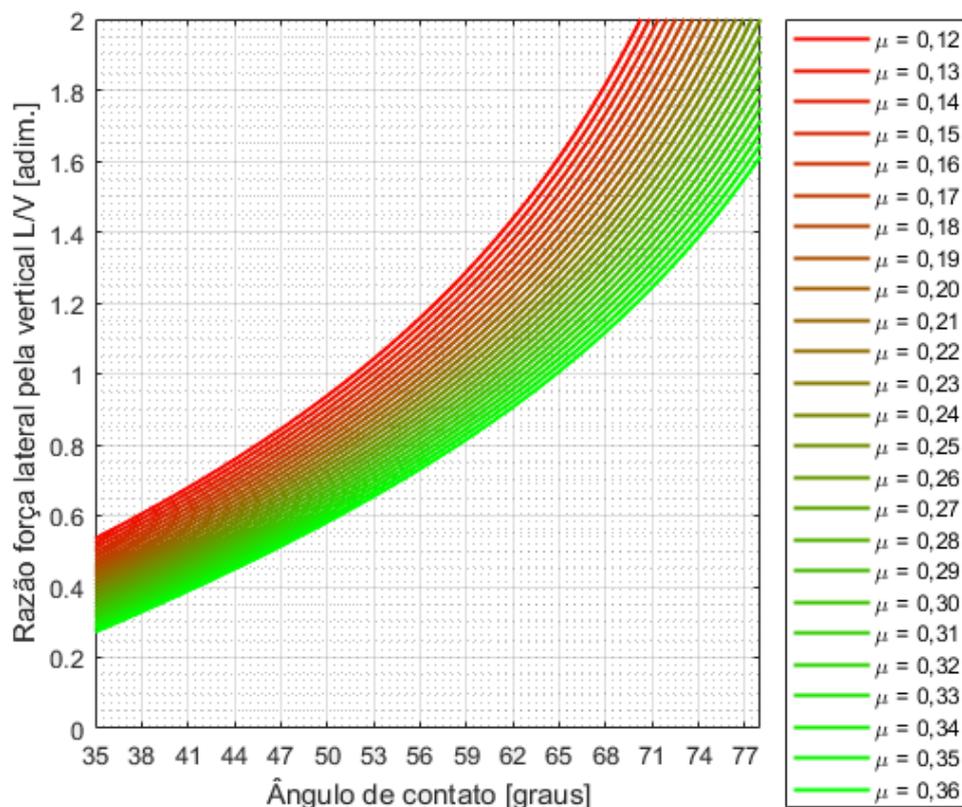
coeficiente máximo de atrito de 0,13. Borba (2009) mostra, através da formulação de Curtius e Kniffler, que o coeficiente de atrito no contato roda-trilho é condizente com o apontado por Barbosa, sendo este valor aproximadamente igual a 0,128. Almeida (2006) aponta como o coeficiente de atrito mínimo 0,1 para trilhos com óleo, e caracteriza como 1 um caso ideal.

Borba (2009) ainda com a metodologia Curtius e Kniffler mostra que para um caso real, em excelentes condições contempladas por trilhos secos, lubrificados e com alta carga vertical, e uma velocidade de 16,3 km/h (que é a média de tráfego brasileira) teríamos um coeficiente de atrito próximo de 0,37.

A faixa de coeficientes de atrito e de ângulos de contatos para a análise do erro da razão entre força lateral e vertical, neste trabalho, foi definida consoante aos limites apresentados por Barbosa (1999), Almeida (2006), Santos (2008) e Borba (2009). A faixa de coeficientes de atrito do contato roda-trilho é de 0,12 a 0,36 e com variação de 0,01. O ângulo de contato varia de 35 a 78 graus, linearmente espaçados em um grau.

Na Figura 15, podem ser visualizadas o espectro de variação das curvas características da razão de força lateral pela vertical, para cada atrito analisado. Nela, é possível verificar a variação crescente com o aumento do ângulo de contato como apontado por Jingmang (2019).

Figura 15 – Curva característica da equação de Nadal para diferentes coeficientes de atrito.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 16 (a), temos a curva característica da razão de força lateral pela vertical, representada pela linha preta, para um atrito mínimo de 0,12. E ainda, observa-se em amarelo e vermelho os limites do coeficiente de Nadal estabelecidos pela AAR para roda e eixo ferroviários, respectivamente. Em verde e azul são apresentados os impactos sofridos no coeficiente de Nadal com erros associados a 2,5% e 5% do processo de medição ou incerteza na obtenção dos parâmetros de ângulo de contato e atrito.

O valor do coeficiente de Nadal é diretamente proporcional ao ângulo de contato rodatrielho. Sendo aceitável através das normas um coeficiente equivalente ao ângulo de até 51,85 graus como representado pela curva preta. Quando analisados os erros associados, o máximo ângulo de contato que respeita o limite do coeficiente de descarrilamento de roda passa a ser de 50,7 graus quando inseridos os erros de medição de 2,5% e de 49,5 graus para um erro de 5%, o que representa uma variação de 2,33% e 4,32%.

A sensibilidade do coeficiente em relação ao ângulo de contato pode ser calculada através da Equação 4.15. Para uma análise de erro, temos uma sensibilidade de 0,0557 como aponta a Equação 4.16 para a formulação de Nadal. Já para erros associados de 5% passa a ser de 0,1008 (Eq. 4.18) e erros de 2,5% temos sensibilidade de 0,078 (Eq. 4.17).

$$\frac{F_{L/V} (78^\circ, 0,12) - F_{L/V} (35^\circ, 0,12)}{78^\circ - 35^\circ} \quad (4.15)$$

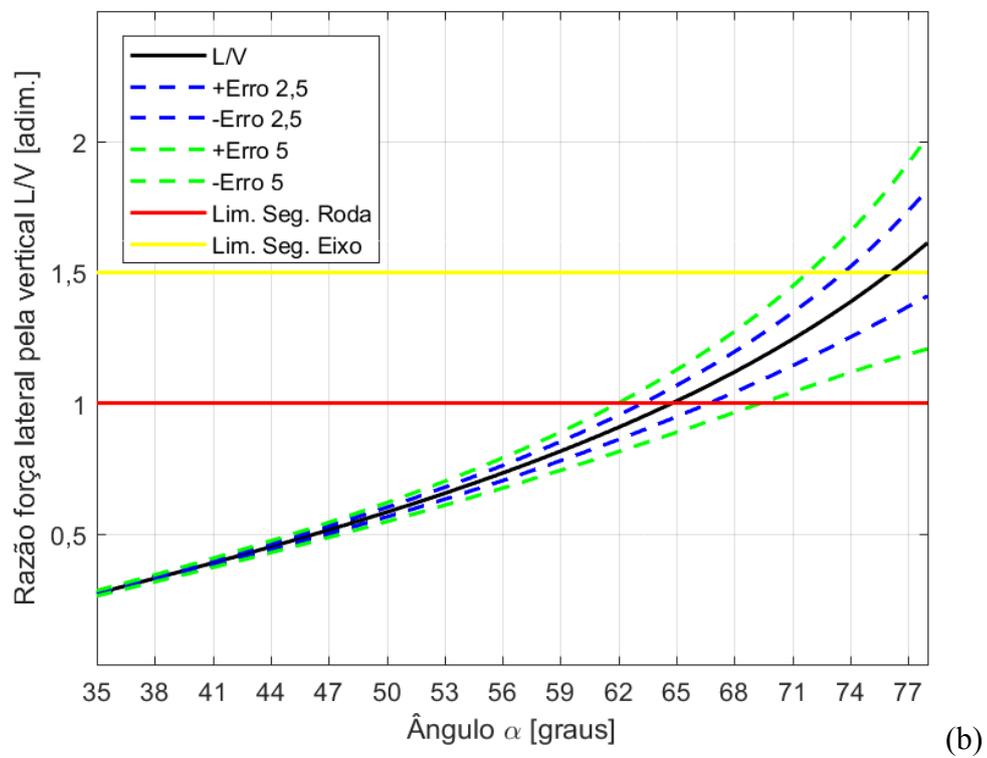
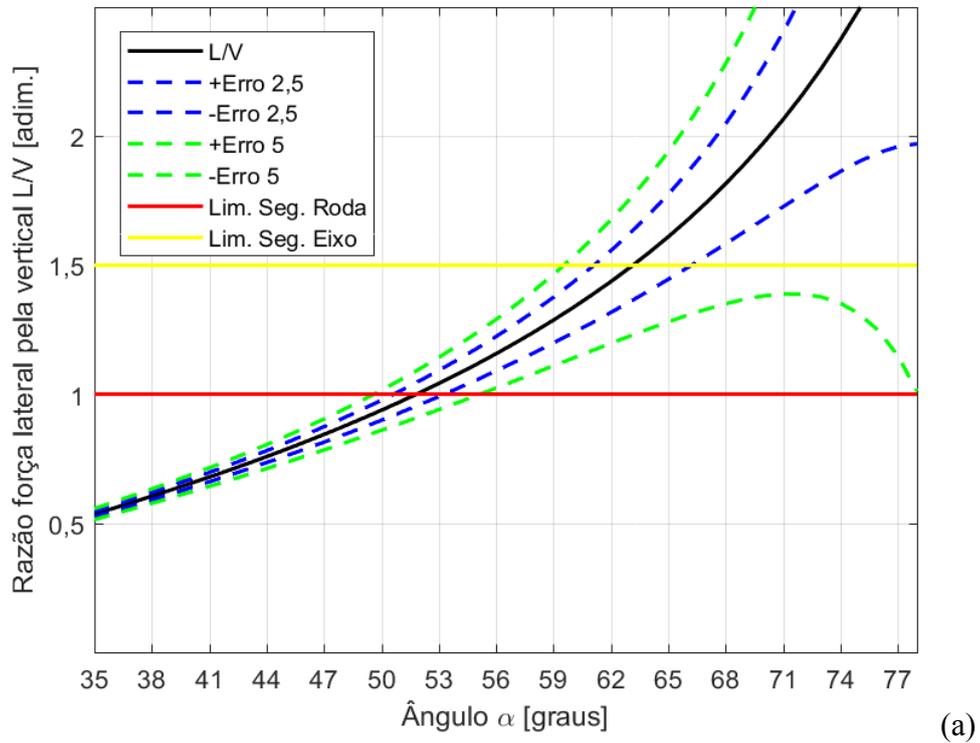
$$\frac{F_{L/V} (78^\circ, 0,12) - F_{L/V} (35^\circ, 1,2)}{78^\circ - 35^\circ} |_{\text{Erro}_{0\%}} = \frac{2,9303 - 0,5352}{78^\circ - 35^\circ} = 0,0557 \quad (4.16)$$

$$\frac{F_{L/V} (78^\circ, 0,12) - F_{L/V} (35^\circ, 0,12)}{78^\circ - 35^\circ} |_{\text{Erro}_{2,5\%}} = \frac{3,8900 - 0,5245}{78^\circ - 35^\circ} = 0,078 \quad (4.17)$$

$$\frac{F_{L/V} (78^\circ, 0,12) - F_{L/V} (35^\circ, 1,2)}{78^\circ - 35^\circ} |_{\text{Erro}_{5\%}} = \frac{4,8497 - 0,5138}{78^\circ - 35^\circ} = 0,1008 \quad (4.18)$$

A mesma análise pode ser aplicada a curva característica da equação de Erro de Nadal, para um coeficiente de atrito de 0,36, na Figura 16 (b). A linha preta representa a função puramente, sem erros associados, enquanto as linhas em azul e verde apontam a variação quando inseridos erros de medição (ou incertezas, referidas ao ângulo de contato e ao atrito) de 2,5% e 5%. Em amarelo e vermelho encontram-se os limites de segurança do coeficiente de Nadal definidos como máximos aceitáveis pela norma da AAR para a roda e para o eixo ferroviário, respectivamente.

Figura 16 – Razão L/V em função do ângulo: (a) para coeficiente de atrito 0,12; (b) para coeficiente de atrito 0,36.

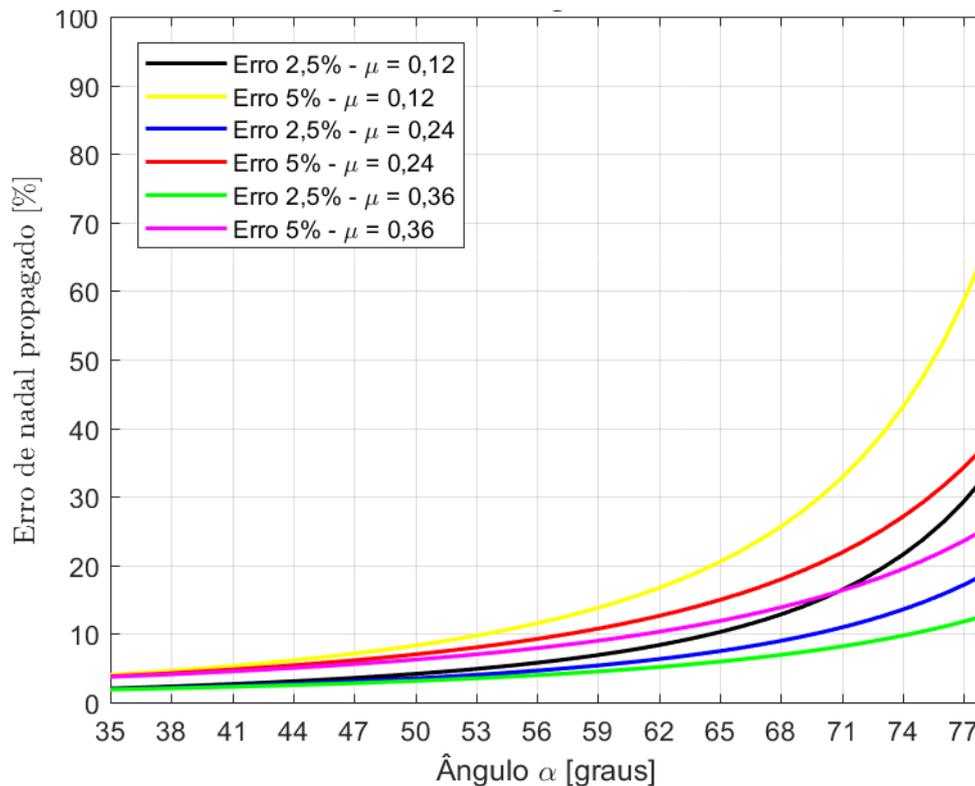


Fonte: Próprio Autor.

O valor do coeficiente de Nadal mantém-se apresentando um comportamento crescente, contudo nota-se um deslocamento na curva, de modo que o ângulo de contato passa a ser maior com o aumento do atrito. Desta forma, passa a ser aceitável através das normas um coeficiente equivalente ao ângulo de até 64,8 graus como representado pela curva preta. Quando analisados os erros associados, o máximo ângulo de contato que respeita o limite do coeficiente de descarrilamento de roda passa a ser de 63,3 graus quando inseridos os erros de medição de 2,5% e de 62 graus para um erro de 5%. A sensibilidade do coeficiente em relação ao ângulo de contato pode ser calculada através da Equação 4.15.

Para maior facilidade de compreensão foi avaliado o erro equivalente da razão entre força lateral e vertical mediante erros pré-estabelecidos de 2,5% e 5% para ângulos de contato variando de 35 graus a 78 graus e três coeficientes de atritos diferentes, como pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 – Erro de Nadal propagado para diferentes ângulos de contato.



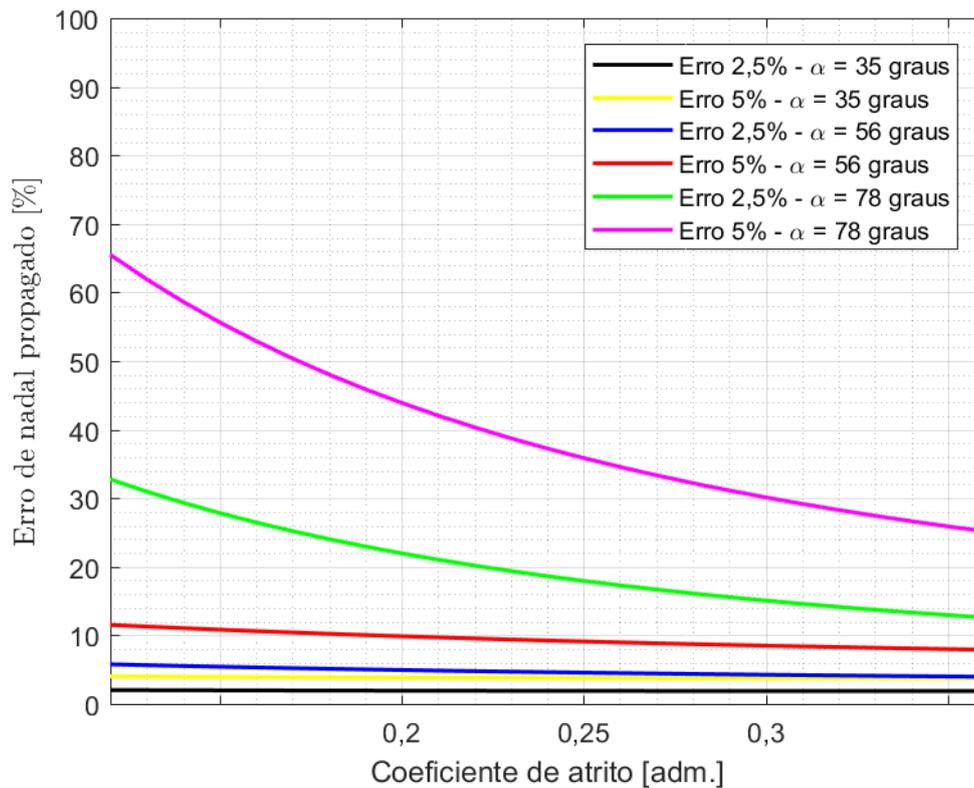
Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que o erro cresce com o aumento do ângulo e que a angulação do flange no contato roda-trilho é mais impactante no unitário do que a decimal do atrito. Para um erro associado de 2,5%, um coeficiente de atrito de 0,12 e um ângulo de contato de 35 graus temos

um erro da equação de Nadal de 2% já quando o ângulo passa a ser de 78 graus o erro sobe para 32,75%, o que representa uma variação de 1537,5% ao variar-se 43 graus.

Ao analisarmos o impacto do aumento do atrito de contato, verifica-se que quanto maior ele se torna, menor é o erro para a equação de Nadal. Isso pode ser facilmente verificado na Figura 18, em que para um mesmo valor de ângulo de contato (78°) tem-se para um atrito de 0,12 e erro de 5% um erro do coeficiente de descarrilamento de 65,5%, enquanto que para um coeficiente de atrito de 0,36 o erro passa a ser de 25,18%; ou seja, ao triplicar o atrito verifica-se uma redução do erro de 61,56%.

Figura 18 – Erro de Nadal propagado para diferentes coeficientes de atrito.



Fonte: Próprio Autor.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os procedimentos da modelagem matemática da equação de Nadal, ou seja, a sua dedução matemática, e ainda, com a aplicação da teoria de propagação de erros, um modelo matemático para a análise do erro da equação de Nadal foi desenvolvido.

A modelagem matemática funcionou de forma adequada, pois com erros associados ao processo de medição ou incerteza para 2,5% e 5%, foi possível mensurar a propagação de erros quando as variáveis do coeficiente de atrito e ângulo de contato, ambas as variáveis na situação do contato roda-trilho, foram inseridas na expressão para o erro da equação de Nadal, estabelecendo intervalos de confiança.

Além disso, foi possível analisar por cálculos numéricos o impacto da variação de ângulos de contato e de coeficientes de atritos no erro da equação de Nadal, que corresponderam aos valores encontrados na literatura por Barbosa, Jingmang, Quian, Wan, Jian e Santos.

Dessa forma, se a razão L/V for elevada, a probabilidade de descarrilamento é alta, tornando-se cada vez maior com a elevação deste índice. Caso a razão L/V esteja elevada e o veículo ferroviário entre em ressonância, mesmo que com amplitude baixa, a probabilidade de descarrilamento torna-se maior pela associação de fatores de risco.

O desenvolvimento da Equação (4.14) permitiu calcular o coeficiente de descarrilamento (coeficiente de Nadal), ajustado ao considerarmos a propagação de erros devido à incerteza de obtenção dos parâmetros ângulo de contato e coeficiente de atrito. Deste modo foi possível realizar uma análise da faixa de valores na qual ao considerarmos os erros do ângulo de contato e do coeficiente de atrito, o coeficiente de Nadal adicionado ao erro propagado, pode ser superior ao valor pré-estabelecido em norma, ocorrendo assim, a possibilidade de descarrilamento.

REFERÊNCIAS

/

- ALMEIDA, Fabio Cardoso. **Análise das forças de contato e comportamento dinâmico de rodeiro ferroviário**. Dissertação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 132 p, 2006.
- AAR, **Association of American Railroads, Capítulo XI**, Service-worthiness tests and analyses for new freight cars, 1993.
- AAR, **Association of American Railroads, Manual Standards and Recommended Practices 750**, Wheel-mounting compound approval test procedure, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7590**. Trilho Vignole – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7640**. Defeitos de trilhos utilizados para via férrea. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16441**. Vagão-tanque ferroviário – requisitos de projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16387**. Via férrea – Classificação das vias. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- BARBOSA, R. S. **Aplicação de Sistemas Multicorpos na Dinâmica de Veículos Guiados**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), 273 p. 1999.
- BARBOSA, R. S. **Interação de contato do par roda/trilho**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, São Paulo, 2000.
- BARBOSA, R. S. **Safety criterion for railway vehicle derailment**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- BRINA, Helvécio Lapertosa. **Estrada de Ferro 2 - Tração - Frenagem - Material Rodante - Circulação dos Trens**. 2. ed. 1983.
- BORBA, J. L. **Mecânica de Locomotivas: Dinâmica ferroviária**. 1. ed. [S.l.]: PUC Minas, 2009.
- CHAVES, Ana Paula Gonçalves. **Rodas ferroviárias: Análise, microestrutura e propostas de melhoria**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- FONSECA, Solange Tamara da. **Efeito de adições de vanádio, nióbio e molibdênio na estrutura e propriedades mecânicas de aços com 0,7 % C utilizados na fabricação de rodas ferroviárias**. Tese (Doutorado) - Universidade de Campinas - UNICAMP, Campinas, 2015.
- FURTADO, Clarissa. Infraestrutura - Uma corrida sobre trilhos. **Revista Desafios do Desenvolvimento**, 2005. IPEA, Ano 2, Edição 9, Brasília, 2005.

GOLOSHCHAPOV, Nikolay. **Contact Dynamics: Method of Differential Specific Forces**. 1 ed. Apple Academic Press, 2019.

HONG, William. **Aplicação do método de análise de risco ao estudo de descarrilamento**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

IWNICK, Simon. **Handbook of Railway Vehicle Dynamics**. 1ª ed. Nova Iorque: Taylor & Francis, 2006. 535 p.

JINGMAN, Xu; QIAN, Yao; WAN, Ping; WUANG, Jian ; MA, Xiaochuan; MA, Daolin. Theoretical 3D Model for Quasistatic Critical Derailment Coefficient of Railway Vehicles and a Simplified Formula. **Mathematical Problems in Engineering**, Hindawi, 2017.

MARTINHO, João Pedro Rebelo. **Calibração Automática de Modelos de Propagação em Ferrovias**. Técnico Lisboa, 2016.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas - Uma abordagem integrada**. 4 ed. Bookman, 2004.

OKAGATA, Y. Design technologies for railway wheels and future prospects. **Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report No 105**, n. 105, 2013.

PASCAL, J.P. **Benchmark to test wheel/rail contact forces**. 1990.

PEIXOTO, D. F. C. **Estudo do contacto roda/ carril: análise de tensões e fadiga**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia do Porto, 2008.

PEREZ-UNZUETA, A. J.; BEYNON, J. H. Microstructure and wear resistance of pearlitic rail steels. **Wear**, 1993;

RIBEIRO, Diogo Rodrigo Ferreira. **Comportamento Dinâmico de Pontes sob Acção de Tráfego Ferroviário a Alta Velocidade**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.

SANTOS, Guilherme Fabiano Mendonça dos. **Comportamento dinâmico do vagão GDE na passagem sobre o travessão**. Instituto Militar de Engenharia - IME, Rio de Janeiro, 2008.

SANTOS, Guilherme Fabiano Mendonça dos Santos. **Análise de segurança de veículo ferroviário de carga em tangente considerando a excitação periódica da via permanente**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SEMPREBONE, Paula da Silva. **Desgastes em trilhos ferroviários – Um estudo teórico**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SOUZA, Ricardo Cardoso de. **O modo ferroviário e sua contribuição no transporte de carga utilizando a intermodalidade no brasil**. Monografia (Graduação) - Faculdade Redentor, Itaperuna, 2014.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Bureau of transportation statistics**. Train Fatalities, Injuries, and Accidents by Type of Accident(a). Washington, DC: Federal Railroad Administration, 2019.

VERNILLI, Bruno. **Modelagem matemática de propagação de incertezas para velocidades em via permanente**. Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

VUOLO, J. H. **Fundamento da Teoria dos Erros**. 2. ed. [S.l.]: Blucher, 2005.

XAVIER, Rafael De Melo Rezende E Sampaio. **Melhor aproveitamento do intervalo concedido**. Monografia (Especialização) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

ZANELLA, Liane Carly Hermes. **Metodologia de Pesquisa**. 2. ed. Florianópolis, 2011.