

**DIMENSIONAMENTO DE SUPERELEVAÇÃO FÉRREA PARA CURVAS
CIRCULARES DE ACORDO COM A ABNT NBR 16810:2019**

***RAILWAY SUPERELEVATION DIMENSIONING FOR CIRCULAR CURVES
ACCORDING TO ABNT NBR 16810:2019***

Breno Rodrigues Prioli¹

Valdir Guilherme Cardoso²

Marcelo Augusto Amancio³

Bebedouro – SP, 2020

RESUMO

O planejamento do traçado geométrico de uma linha férrea é de extrema importância para a concepção de um projeto economicamente viável. Um dos pontos mais importantes a ser analisado dentro de um projeto geométrico são as curvas inseridas ao decorrer do trajeto, pois influenciam diretamente, tanto na vida útil do conjunto ferrovia-comboio, quanto no conforto dos passageiros e cargas. Portanto, esse artigo tem como intuito a elaboração de uma planilha de cálculo para a superelevação férrea de acordo com os parâmetros definidos na ABNT NBR 16810:2019. Ao final deste estudo constatou-se que o aumento da velocidade diretriz gera um aumento na superelevação prática, e conseqüentemente um aumento nos raios das curvas a serem adotadas. Conclui-se também, que apesar da norma instruir o engenheiro quanto ao equacionamento para a superelevação prática, ela não especifica os coeficientes de segurança a serem utilizados em cada caso.

Palavras-chave: Traçado Geométrico. Engenharia Ferroviária. Via Permanente.

ABSTRACT

The planning of the geometric layout of a railway is extremely important for the conception of an economically viable project. One of the most important points to be analyzed within a geometric design is the curves inserted along the route, as they directly influence the useful life of the railway-train set, as well as the comfort of passengers and loads. Therefore, this article aims to prepare a worksheet for calculation railway superelevation according to the parameters defined in ABNT NBR 16810: 2019. At the end of the study, it was found that the increase in the guiding speed generates an increase in practical superelevation, and consequently an increase in the radii of the curves to be adopted. It was also concluded that despite the standard instructing the engineer as to the equation for practical superelevation, it does not specify the safety coefficient to be used in each case

Keywords: Geometric tracing. Railway Engineering. Permanent Way.

¹ Graduando em Engenharia Civil no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: brenorodriguesprioli@hotmail.com.

² Graduando em Engenharia Civil no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: valdir.cardoso01@etec.sp.gov.br.

³ Professor Doutor em Engenharia Civil no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: engcivilunip17@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

O bom desempenho econômico de uma região é resultante da rede de transporte implantada, pois é nesta rede que são transportados os diferentes instrumentos de apoio às mais diversas atividades econômicas (CASTILHO; ARRAIS, 2017).

Com o crescente aumento da produção agrícola no Brasil instaurou-se uma necessidade de meios de transporte cada vez mais eficientes e eficazes. Como consequência, a rede ferroviária está se modernizando por meio de expansões, melhorias e adequações, sendo esses investimentos incentivados pelos últimos governos brasileiros (KERETCH; PAIVA, 2016).

Com isso, pode-se destacar a importância do transporte ferroviário para a realidade econômica-espacial brasileira. Como inferência, a engenharia de transportes se torna cada vez mais relevante na medida que os projetos viários devem suprir a adequabilidade técnica demandada pela crescente expansão dos meios de transporte no Brasil (ISLER; WIDMER, 2017).

Assim, desde 1992, verifica-se um aumento de investimentos em malhas ferroviárias no Brasil, principalmente pela retomada da participação privada no setor, devido ao Programa Nacional de Desestatização (CASTRO, 2019). Porém, ainda há um enorme desafio a ser superado: a inviabilidade econômica, pois o custo da execução de ferrovias é alto, se tornando um investimento viável apenas quando há um elevado benefício envolvido (PAIVA, 2016).

Nesse sentido, a engenharia ferroviária tem se desenvolvido frequentemente ao longo dos anos, analisando alternativas economicamente viáveis para a concepção de projetos ferroviários, visando melhorar a segurança e o conforto de seus passageiros e cargas (CARMALI, 2018).

Conseqüentemente, é importante que sejam avaliadas diferentes alternativas para projetos ferroviários, para que sejam verificadas as opções mais econômicas e viáveis para sua implementação (PEREIRA; ROSA; LUNKES, 2015).

O bom comportamento de uma via férrea é resultado de cada elemento estrutural cumprindo adequadamente sua função, gerando assim estabilidade e eficiência para o material rodante, contendo assim as deformações permanentes no traçado geométrico da ferrovia (CASTRO, 2019).

Portanto, um ponto que deve ser analisado com cautela em obras ferroviárias são as curvas do trajeto, pois além de o comboio perder estabilidade nesses locais, as mesmas podem ser dimensionadas de forma a haver um consumo excessivo de material construtivo (PAZ; OLIVEIRA, 2015).

A perda de estabilidade dos veículos ferroviários nas curvas decorre da ação da força centrífuga, forçando as rodas para o lado externo do trilho, ocasionando grande desgaste do mesmo. Para combater a ação da força centrífuga é aplicada certa elevação no trilho externo, deste modo a diferença de cota entre o trilho externo e interno é denominada superelevação (DNIT, 2015a).

Conseqüentemente, este estudo tem como objetivo confeccionar uma planilha para o dimensionamento da superelevação férrea, de acordo com a ABNT NBR 16810:2019 e com os estudos realizados por PAIVA (2016).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente referencial teórico objetiva apresentar conceitos que serão utilizados no decorrer deste trabalho, principalmente em relação a geometria de uma ferrovia.

2.1 Histórico das Ferrovias

A falta de meios de transportes rápidos e eficientes sempre foram um problema para o desenvolvimento. Uma das soluções para esse problema foi o surgimento das ferrovias, que substituíram as carruagens, revolucionando assim o transporte de passageiro e cargas na Era Moderna (BORGES, 2011).

O transporte ferroviário foi criado na Inglaterra no século XIX, passou por grandes transformações tecnológicas nas décadas seguintes, sendo aperfeiçoado para suportar maiores cargas por eixo e suportar as solicitações geradas pela operação em alta velocidade (PAIVA, 2016).

No Brasil, o investimento no transporte ferroviário se iniciou no começo da década de 1940, fundamentado na estatização total das malhas ferroviárias que viriam a ser implantadas no território brasileiro (NUNES, 2016).

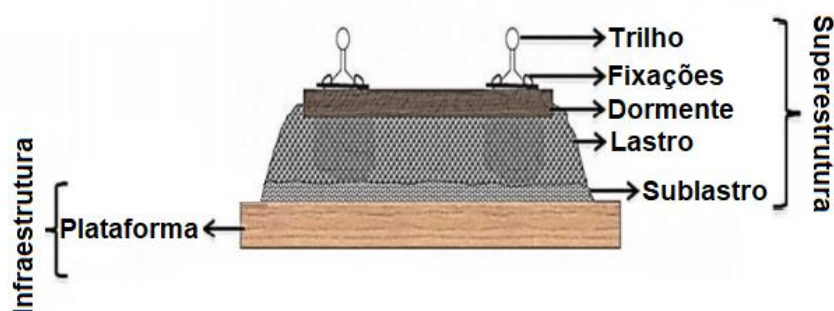
Foi apenas quando o principal investimento se tornou privado, ou seja, advindo de grandes empresas internacionais, no início da década de 1990, com a criação do

programa de desestatização de serviços e infraestrutura, que as ferrovias realmente se expandiram pelo território brasileiro (CASTILHO; ARRAIS, 2017).

2.2 Via férrea

O conjunto de infraestrutura somado a superestrutura é o que compõe a denominada via férrea, que tem como principal função receber e suportar, assim como transmitir ao solo os esforços advindos do deslocamento do comboio (PASSOS, 2018). A Figura 1 demonstra os componentes de uma via férrea.

FIGURA 1 - Elementos da via férrea



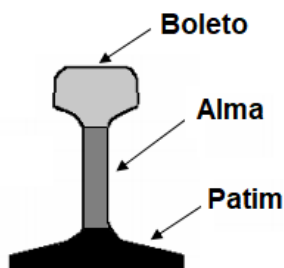
Fonte: Adaptado de Campos (2014, p. 8)

Obras de terraplanagem, como cortes e aterros, obras de artes especiais, como túneis e viadutos, além de obras de artes correntes, como drenos e canaletas, formam juntamente com a plataforma, a infraestrutura de uma ferrovia (PASSOS, 2018).

Já a superestrutura é formada pelos trilhos, pelos dormentes, pelo lastro e sublastro, assim como pelas fixações entre trilhos e dormentes (CORDERO, 2016). Os trilhos são os principais elementos da superestrutura, pois estão em contato direto com o material rodante (CARMALI, 2018).

Para exercer a sua principal função, que é o suporte de cargas transportadas pelo comboio, é de extrema importância que o trilho possua alta dureza, tenacidade, elasticidade assim como resistência a tração, e conseqüentemente o material mais utilizado para a sua fabricação é o aço (DNIT, 2015b). A Figura 2 demonstra a composição de um trilho vignole.

FIGURA 2 – Trilho vignole



Fonte: Adaptado de Semprebone (2006, p. 9)

O boleto é a pista de rolamento da ferrovia, o patim é a base de apoio do trilho, e a alma é a conexão entre boleto e patim. Todos esses elementos devem seguir as dimensões recomendadas pela ABNT NBR 7590:2012.

A fixação dos trilhos é feita diretamente no dormente, que possui duas importantes funções: manter a bitola da via uniforme e distribuir as cargas absorvidas do trilho sobre o lastro (DNIT, 2015b). Os dormentes mais usualmente empregados são os de madeira, aço ou concreto (CARMALI, 2018). O Quadro 1 apresenta algumas vantagens e desvantagens dos materiais empregados na fabricação dos dormentes.

QUADRO 1 – Vantagens e desvantagens do emprego de dormentes de diferentes materiais

Material	Vantagem	Desvantagem
Madeira	<ul style="list-style-type: none">• Baixo Custo Inicial• Fácil Manuseio• Podem ser utilizados em qualquer tipo de via	<ul style="list-style-type: none">• Menor vida útil• Alto custo de manutenção• É passível de ataque de fungos e insetos
Aço	<ul style="list-style-type: none">• Longa vida útil• Baixo custo de manutenção• Leve	<ul style="list-style-type: none">• Passível de corrosão• Alto custo Inicial• Provocam problemas no circuito da via
Concreto	<ul style="list-style-type: none">• Longa vida útil• Alta estabilidade• Menos manutenção	<ul style="list-style-type: none">• Alto custo Inicial• Dificuldade de manejo• Passível de quebra

Fonte: Adaptado de Paiva (2016 p. 93-97)

Os dormentes são envolvidos até certa parte pelo lastro, e este tem como principal função distribuir a energia gerada pelo contato roda-trilho para a plataforma, além de impedir o deslocamento dos dormentes. Já o sublastro é a camada de

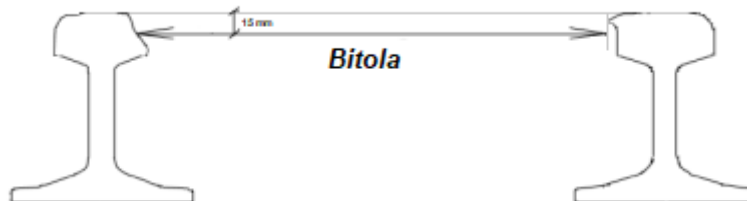
separação entre a plataforma e o lastro, e sua finalidade é reduzir as tensões transmitidas ao subleito e diminuir a altura necessária de lastro (DNIT, 2015c).

2.3 Geometria da via: curvas e superelevação

A adequação entre a geometria e a característica do tráfego de uma ferrovia é o que define o seu bom desempenho (NABAIS, 2015). O projeto geométrico de uma via férrea deve analisar as curvas e tangentes, com especial atenção aos raios de curvatura (RIBEIRO, 2018).

A bitola de uma via é a menor distância entre as faces interior dos trilhos, sendo medida a cerca de 15 mm abaixo do plano de rodagem (AL-DOURI; TRETEN; KARIM, 2016). No Brasil, a bitola mais usual é a métrica (1000 mm), porém em diversas vias também foram adotadas as bitolas largas (1600 mm) e mistas, e a bitola internacional (1435 mm), em menor quantidade (PAIVA, 2016). A Figura 3 mostra a bitola de uma via.

FIGURA 3 – Bitola de uma via férrea

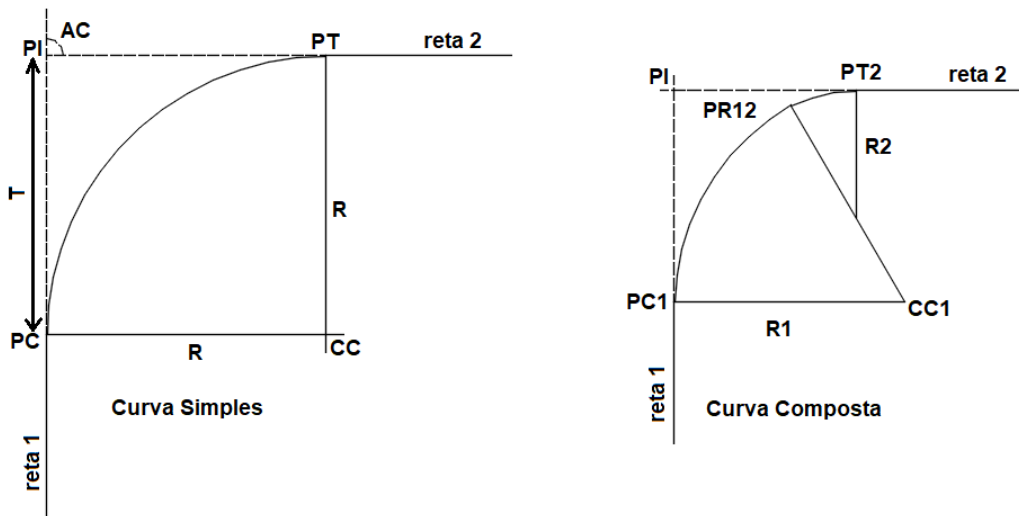


Fonte: Adaptado de Cordeiro (2016, p. 26)

A existência de curvas nos traçados geométricos de uma via férrea acarreta em novos esforços a serem considerados. Assim se faz necessário uma adequação nas características da via para que se mantenha as condições de segurança e conforto (RIBEIRO, 2018).

As curvas circulares podem ser divididas em simples e compostas, como demonstrado na Figura 4. A curva circular simples possui apenas um raio de curvatura, enquanto a composta é formada por dois ou mais raios (PAIVA, 2016).

FIGURA 4 – Traçado de curva circular

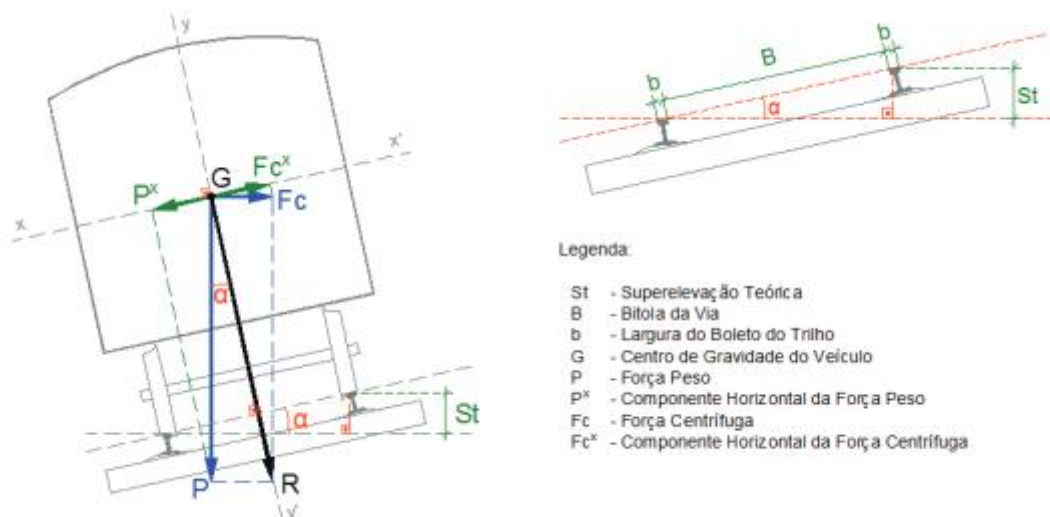


Fonte: Adaptado de Paiva (2016, p.21-23)

Ao percorrer uma curva o veículo ferroviário sofre uma ação centrífuga, que provoca o aumento do desgaste da superestrutura férrea, podendo em casos extremos causar o descarrilamento do comboio. Tais problemas podem ser evitados adotando-se a superelevação (NABAIS, 2015).

Segundo a ABNT NBR 16810:2019 a superelevação é a diferença de cota entre o trilho interno e o externo, obtendo portanto uma inclinação na via férrea. A Figura 5 demonstra as forças atuantes na superelevação.

FIGURA 5 – Superelevação teórica



Fonte: Paz, Oliveira (2015, p.346)

O equilíbrio é alcançado quando as forças horizontais são iguais, ou seja, quando a componente horizontal da força peso (P) for igual a horizontal da força centrífuga (F_c) (PAZ; OLIVEIRA, 2015).

Contudo, como as ferrovias possuem diferentes composições, o valor teórico encontrado pelo equilíbrio das forças não é utilizado na prática, servindo apenas como base para os cálculos da superelevação que deve ser adotada (RIBEIRO, 2018).

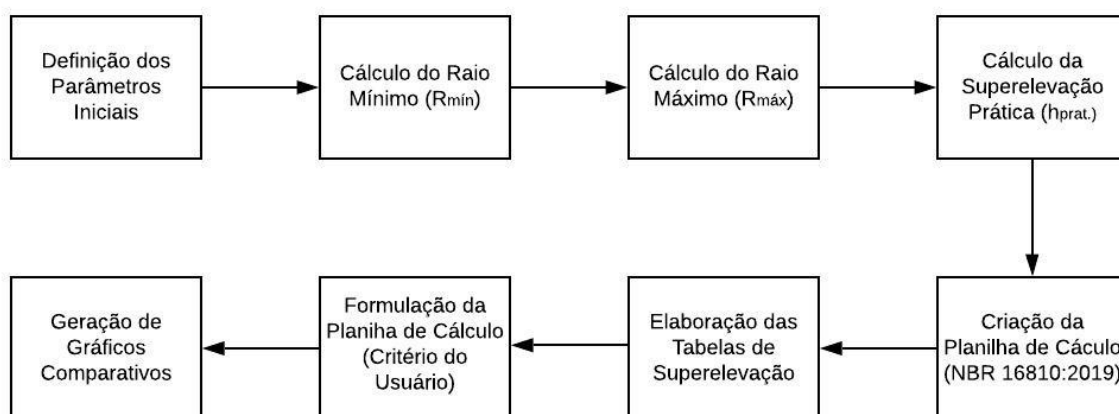
A ABNT NBR 16810:2019 define que para a superelevação prática seja calculada é necessário se ter o conhecimento do tipo de material rodante que passa sobre a via, além de adotar um fator de segurança coerente para cada caso.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo é fundamentado nos equacionamentos e hipóteses levantadas nos manuais do DNIT (2015) e na ABNT NBR 16810:2019, assim como nos estudos realizados por PAIVA (2016). Assim, a pesquisa caracteriza-se como exploratória, possuindo uma abordagem quantitativa dos dados.

Os dados abordados são relevantes para todas velocidades diretrizes, igualmente são relevantes para curvas com quaisquer ângulos centrais (AC). O procedimento para a obtenção dos dados foi uma marcha de cálculo que relacionou as velocidades diretrizes com as bitolas analisadas, além dos parâmetros definidos pela ABNT NBR 16810:2019, representado pela Figura 6.

FIGURA 6 – Fluxograma de cálculo



Fonte: Elaborado pelos Autores

A marcha de cálculo se inicia com a definição dos parâmetros iniciais, este estudo teve como foco a análise da superelevação nas bitolas métricas (1 metro) e largas (1,6 metros), mais comumente utilizadas no Brasil, além de considerar apenas as vias para transporte de cargas.

Para se calcular a superelevação prática das curvas analisadas foram adotados os valores de centro de gravidade segundo o limite operacional dos vagões especificados na ABNT NBR 12210:2015. Portanto, o valor adotado para a bitola métrica foi de 1,83 metros e para a bitola larga foi de 2,49 metros.

A ABNT NBR 16810:2019 estabelece a equação 1 para calcular a superelevação prática, além de definir os valores de segurança de acordo com a altura máxima do centro de gravidade estabelecidas na ABNT NBR 12210:2015. Assim, os coeficientes de segurança contra tombamento adotados para a bitola métrica foi de 3,6 e para a bitola larga foi de 4,5.

$$h_p = \frac{B \cdot V^2}{127 \cdot R} - \frac{B}{H \cdot n} \cdot \left(\frac{B}{2} - d \right) \quad (1)$$

Ao igualar a superelevação prática (h_p) a zero obtém-se a equação 2 que determina o raio máximo ($R_{m\acute{a}x}$) para que não haja a necessidade do emprego da superelevação, ou seja, curvas com raios maiores ou iguais a $R_{m\acute{a}x}$ não necessitam adotar superelevação. Para o cálculo do h_p foram utilizados valores de raios de curvatura com taxa de variação de 50 m até um raio igual a 800 m.

$$R_{m\acute{a}x} = \frac{B \cdot V^2}{\left[\left(\frac{B}{H \cdot n} \right) \cdot \left(\frac{B}{2} - d \right) \right] \cdot 127} \quad (2)$$

Para se obter o raio mínimo ($R_{m\acute{i}n}$) que pode ser admitido com o emprego da superelevação prática deve-se utilizar a equação 3, que iguala o h_p à superelevação máxima ($h_{m\acute{a}x}$), que segundo Paiva (2016) deve ser igual a 10% do valor da bitola. Assim sendo, para a bitola métrica têm-se 100 mm e para a bitola larga 160 mm. Com isso, valores de superelevação maiores que $h_{m\acute{a}x}$ não poderão ser empregados, sendo, portanto, considerados valores inválidos.

$$R_{m\acute{i}n} = \frac{B \cdot V^2}{\left[h_{m\acute{a}x} + \left(\frac{B}{H \cdot n} \right) \cdot \left(\frac{B}{2} - d \right) \right] \cdot 127} \quad (3)$$

De modo que:

- h_p é a superelevação prática em metros (m)

- $h_{\text{máx}}$ é a superelevação máxima em metros (m)
- B é a distância entre os eixos dos trilhos em metros (m)
- V é a velocidade em quilômetros por hora (Km/h)
- R é o raio da curva em metros (m)
- H é a altura do centro de gravidade do material rodante em relação à superfície de rolamento em metros (m)
- n é o coeficiente de segurança contra tombamento
- d é o deslocamento do centro de gravidade do material rodante que pode ser tomado como 0,10 m

Com isso, foi criada uma planilha de cálculo de acordo com as sugestões da ABNT NBR 16810:2019 e da ABNT NBR 12210:2015. Após a finalização da planilha foram elaboradas tabelas de dimensionamento da superelevação práticas para as velocidades diretrizes de 50 Km/h, 60 Km/h, 70 Km/h e 80 Km/h, que contemplam raios de até 800 m.

Enfim, foi formulada uma nova planilha de cálculo que possibilita aos usuários substituir os valores sugeridos pelas normas por valores observados em sua vivência prática. Esta nova planilha irá gerar tabelas de superelevação prática para raios de até 1800 m.

Por fim, foi realizada uma comparação gráfica de superelevações férreas obtidas ao se variar apenas o coeficiente de segurança indicado na ABNT NBR 16810:2019. Para as alturas de centro de gravidade dos vagões foram utilizados os valores sugeridos pela ABNT NBR 12210:2015, a velocidade diretriz foi fixada em 80 Km/h e o raio utilizado para a análise foi de 350 metros.

4 RESULTADOS

A Figura 7 mostra a interface da planilha de cálculo para superelevação prática, que toma como base as sugestões da ABNT NBR 16810:2019, para os coeficientes de segurança contra tombamento, e da ABNT NBR 12210:2015, para as alturas de centros de gravidade dos materiais rodantes em relação à superfície de rolamento.

FIGURA 7 – Interface da Planilha de Cálculo para Superelevação Prática (Pela Sugestão das Normas)

Cálculo de Superelevação Férrea (Pela Sugestão das Normas)	
Bitola	Métrica
Velocidade Diretriz	80 Km/h
Centro de Gravidade do Vagão Tipo	1,83 m
Coefficiente de Segurança	3,6
Raio Mínimo	767,62 m
Raio Adotado	300 m
Superelevação	INVÁLIDO cm
Raio para Superelevação Máxima	315,86 m

Fonte: Elaborado pelos Autores

O usuário deve definir o tipo de bitola analisada, a velocidade diretriz da via férrea e o raio adotado. No exemplo apresentado na planilha de cálculo, a bitola escolhida é a métrica e a velocidade diretriz da via é 80 Km/h. Com tais dados, a planilha automaticamente define o centro de gravidade do vagão tipo, sugerido pela ABNT NBR 12210:2015 e o coeficiente de segurança, sugerido pela ABNT NBR 16810:2019.

A planilha calcula o valor do raio máximo ($R_{\text{máx}}$), que delimita a superelevação, ou seja, valores de raios maiores ou iguais ao $R_{\text{máx}}$ não necessitam adotar superelevação, e calcula o valor do raio mínimo ($R_{\text{mín}}$), que limita os valores adotados para a superelevação prática. Por fim, a planilha compara o raio adotado ao raio máximo calculado, e válida ou invalida o resultado obtido. Portanto, no exemplo, como o raio adotado é menor que o $R_{\text{mín}}$, a superelevação não pode ser empregada, assim o valor obtido é inválido.

As Tabela 1 e 2 mostram as superelevações obtidas para as velocidades diretrizes de 50 Km/h, 60 Km/h, 70 Km/h e 80 Km/h, calculadas a partir da sugestão das normas apresentadas.

TABELA 1 – Superelevação Prática (mm) para Bitola Métrica

Raio (m)	Velocidade Diretriz / Superelevação (mm)			
	50 Km/h	60 Km/h	70 Km/h	80 Km/h
50	INVÁLIDO	INVÁLIDO	INVÁLIDO	INVÁLIDO
100	INVÁLIDO	INVÁLIDO	INVÁLIDO	INVÁLIDO
150	70	INVÁLIDO	INVÁLIDO	INVÁLIDO
200	35	81	INVÁLIDO	INVÁLIDO
250	14	51	94	INVÁLIDO
300	0	31	67	INVÁLIDO
350	0	16	47	83
400	0	6	33	64
450	0	0	21	49
500	0	0	12	37
550	0	0	5	28
600	0	0	0	20
650	0	0	0	13
700	0	0	0	7
750	0	0	0	2
800	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pelos Autores

TABELA 2 – Superelevação Prática (mm) para Bitola Larga

Raio (m)	Velocidade Diretriz / Superelevação (mm)			
	50 Km/h	60 Km/h	70 Km/h	80 Km/h
50	INVÁLIDO	INVÁLIDO	INVÁLIDO	INVÁLIDO
100	INVÁLIDO	INVÁLIDO	INVÁLIDO	INVÁLIDO
150	110	INVÁLIDO	INVÁLIDO	INVÁLIDO
200	55	127	INVÁLIDO	INVÁLIDO
250	22	80	148	INVÁLIDO
300	0	48	105	INVÁLIDO
350	0	26	75	131
400	0	9	52	101
450	0	0	34	78
500	0	0	20	59
550	0	0	8	44
600	0	0	0	31
650	0	0	0	20
700	0	0	0	11
750	0	0	0	3
800	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pelos Autores

As tabelas 1 e 2 apresentam a superelevação prática que deve ser adotada para cada combinação entre velocidades e raios, para as bitolas métricas e largas. Caso a superelevação prática calculada ultrapasse a superelevação máxima definida por Paiva (2016), o valor se torna inválido e o raio não pode ser adotado para a condição analisada.

A Figura 8 mostra interface da planilha de cálculo para superelevação prática, que toma como base a perícia do usuário, que define os coeficientes de segurança contra tombamento e as alturas de centros de gravidade dos materiais rodantes em relação à superfície de rolamento.

FIGURA 8 – Interface da Planilha de Cálculo para Superelevação Prática (Critérios Definidos pelo Usuário)

Cálculo de Superelevação Férrea (Critérios Definidos pelo Usuário)	
Bitola	Larga
Velocidade Diretriz	80 Km/h
Centro de Gravidade do Vagão Tipo	2 m
Coefficiente de Segurança	4
Raio Mínimo	550,37 m
Raio Adotado	250 m
Superelevação	INVÁLIDO cm
Raio para Superelevação Máxima	268,54 m

Fonte: Elaborado pelos Autores

O usuário deve definir nesta planilha de cálculo todas as variáveis, assim além de definir a bitola e a velocidade diretriz da via deve definir também o coeficiente de segurança e o centro de gravidade do vagão tipo. Após a definição dos parâmetros de cálculo, a planilha atua de forma idêntica a primeira planilha de cálculo apresentada nesse trabalho.

Caso haja dúvidas sobre qual raio adotar, a planilha de cálculo possui uma tabela anexa, que está ligada aos parâmetros definidos pelo usuário. A Tabela 3 demonstra os resultados de superelevações práticas para o exemplo apresentado na figura 8, para raios de até 1800 m.

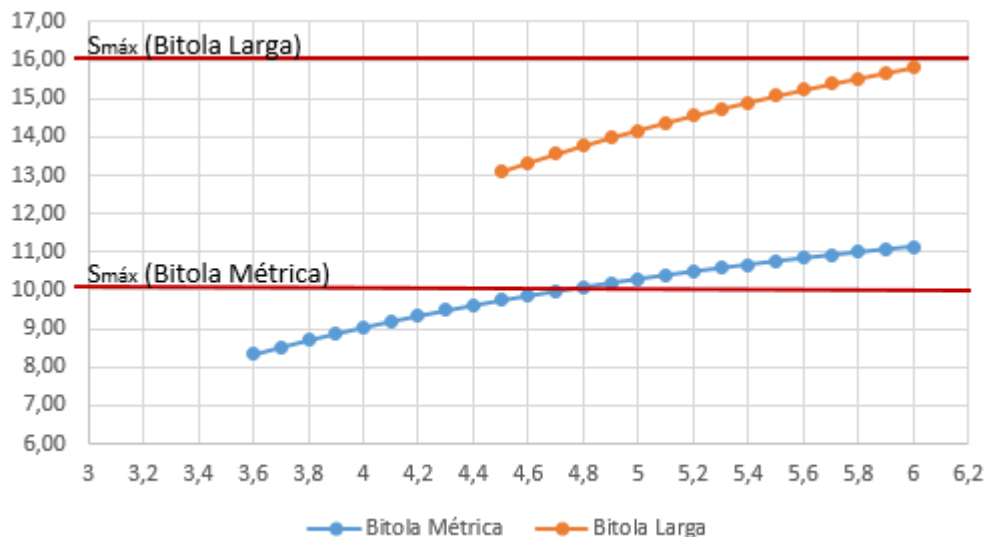
**TABELA 3 – Superelevação Prática (mm) para o Exemplo Apresentado na
Figura 8**

Raio (m)	Superelevação (mm)	Raio (m)	Superelevação (mm)
20	INVÁLIDO	920	0
40	INVÁLIDO	940	0
60	INVÁLIDO	960	0
80	INVÁLIDO	980	0
100	INVÁLIDO	1000	0
120	INVÁLIDO	1020	0
140	INVÁLIDO	1040	0
160	INVÁLIDO	1060	0
180	INVÁLIDO	1080	0
200	INVÁLIDO	1100	0
220	INVÁLIDO	1120	0
240	INVÁLIDO	1140	0
260	INVÁLIDO	1160	0
280	147	1180	0
300	127	1200	0
320	110	1220	0
340	94	1240	0
360	81	1260	0
380	68	1280	0
400	57	1300	0
420	47	1320	0
440	38	1340	0
460	30	1360	0
480	22	1380	0
500	15	1400	0
520	9	1420	0
540	3	1440	0
560	0	1460	0
580	0	1480	0
600	0	1500	0
620	0	1520	0
640	0	1540	0
660	0	1560	0
680	0	1580	0
700	0	1600	0
720	0	1620	0
740	0	1640	0
760	0	1660	0
780	0	1680	0
800	0	1700	0
820	0	1720	0
840	0	1740	0
860	0	1760	0
880	0	1780	0
900	0	1800	0

Fonte: Elaborado pelos Autores

Por fim, foram analisados os acréscimos causados pela alteração do coeficiente de segurança, conforme demonstrado na Figura 9.

FIGURA 9 – Coeficiente de Segurança x Superelevação



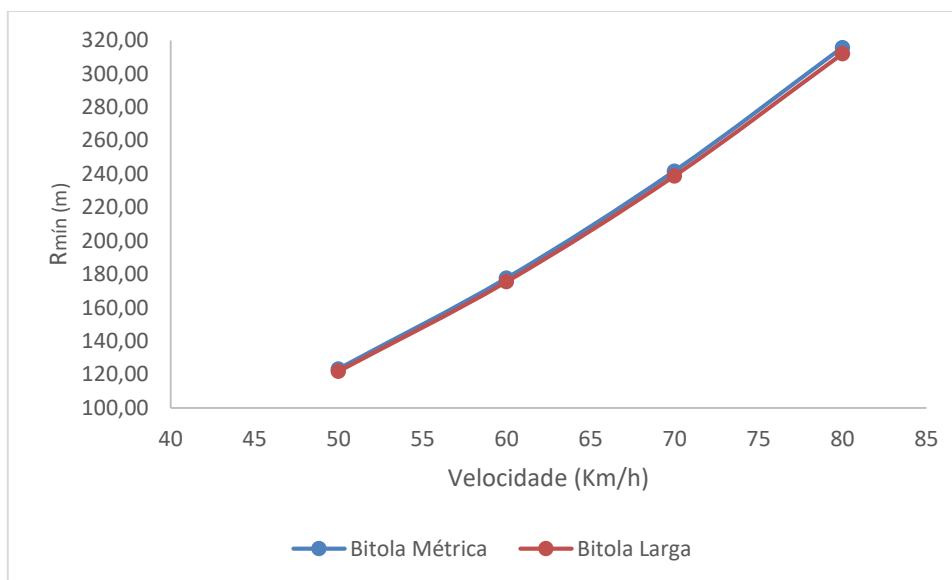
Fonte: Elaborado pelos Autores

Nota-se um aumento gradativo nos valores de superelevação prática, ou seja, coeficientes de segurança maiores geram superelevações práticas maiores. Na figura 9, para a bitola métrica, o acréscimo no valor do coeficiente de segurança gerou superelevações práticas que não poderiam ser adotadas, pois ultrapassam o valor de 100 mm, definido por PAIVA (2016) como superelevação máxima para bitolas métricas.

5 CONCLUSÃO

Ao analisar a Figura 10, baseada nos dados das tabelas 1 e 2, nota-se que o aumento da velocidade diretriz causa um acréscimo nos valores de R_{\min} , portanto, entende-se que quanto maior for a velocidade diretriz da via férrea analisada maiores serão os raios mínimos e máximos, e, conseqüentemente, os raios adotados também serão maiores. Outro fato importante, que pode ser notado ao analisar-se a Figura 10, é que a mudança do tamanho da bitola da via não possui grande influência no cálculo do R_{\min} .

FIGURA 10 – Raio Mínimo x Velocidade



Fonte: Elaborado pelos Autores

Os critérios para a definição das superelevações máximas e mínimas não estão presentes na ABNT NBR 16810:2019, portanto cabe ao engenheiro definir tais parâmetros e analisar a coerência dos valores obtidos para cada situação.

A ABNT NBR 16810:2019 define os equacionamentos e sugere valores mínimos para o coeficiente de segurança contra tombamento para o cálculo da superelevação prática, porém caso o valor do centro de gravidade do vagão seja diferente dos valores máximos sugeridos pela ABNT NBR 12210:2015, tais coeficientes não podem ser empregados. Assim, é necessário uma análise crítica em relação a esses coeficientes e, em uma futura revisão da ABNT NBR 16810:2019, deve haver uma padronização de tais critérios.

Portanto, se faz necessário que futuros trabalhos acadêmicos analisem os critérios de segurança empregados na prática, para então haver uma padronização de tais critérios, seja por meio de tabelas ou equacionamentos.

Por fim, a planilha desenvolvida nesse estudo pode vir a ser útil como ferramenta de cálculo de superelevação prática em projetos reais, desde que o usuário possua experiência como engenheiro ferroviário, pois em certos casos pode ser necessário a alteração dos critérios sugeridos pela ABNT NBR 16810:2019 e pela ABNT NBR 12210:2015.

REFERÊNCIAS

- AL-DOURI, Y. K.; TRETEN, P.; KARIM, R. Improvement of railway performance: a study of Swedish railway infrastructure. **Journal Of Modern Transportation**, v. 24, n. 1, p.22-37, 21 jan. 2016. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40534-015-0092-0>. Acesso em: 08 mar. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7590**: Trilho Vignole — Requisitos. 2 ed. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12210**: Vagão ferroviário — Cálculo da altura do centro de gravidade para tráfego. 2 ed. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16810**: Via férrea — Superelevação em curvas. 1 ed. 2019.
- BORGES, B. G. Ferrovia e Modernidade. **Revista UFG**, v. 13, n. 11, 1 ago. 2011.
- CAMPOS, R. C. **Aplicação da Metodologia PRONIC a Obras Ferroviárias - Princípios Gerais e Via-férrea**. 2014. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Porto, Porto, 2014. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/76703/2/32804.pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2019.
- CARMALI, S. R. H. **Aplicação de BIM a Infraestruturas Ferroviárias. Controlo da qualidade na construção**. 2018. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2018. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10362/57617>>. Acesso em: 31 ago. 2019.
- CASTILHO, D.; ARRAIS, T. A. A Ferrovia Norte-Sul e a economia regional do centro-norte do Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 29, n. 2, p.209-228, 29 nov. 2017. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/view/39027>. Acesso em: 08 mar. 2020.
- CASTRO, G. B. **Avaliação da Influência das Condições Geotécnicas e Climáticas no Comportamento Hidromecânico de um Subleito Ferroviário**. 2019. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-19072019-090009/en.php>>. Acesso em: 31 ago. 2019.
- CORDERO, P. M. **Engenharia Ferroviária – Traçado e Materiais de Via**. 2016. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.21/6505>>. Acesso em: 31 ago. 2019.
- DNIT. **Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes: Ferrovias**. Rio de Janeiro, 2015a. 113 p. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/custos-e->

pagamentos/sicro/manuais-de-custos-de-infraestrutura-de-transportes/volume-10-manuais-tecnicos/volume-10-manuais-tecnicos. Acesso em: 09 mar. 2020.

DNIT. **ISF-213**: Projeto de Superestrutura da Via Permanente - Trilhos e Dormentes. Rio de Janeiro, 2015b. 16 p. Disponível em: <https://www.dnit.gov.br/ferrovias/instrucoes-e-procedimentos/instrucoes-de-servicos-ferroviarios/isf-213-projeto-de-superestrutura-da-via-permanente-trilhos-e-dormentes.pdf/view>. Acesso em: 08 mar. 2020.

DNIT. **ISF-212**: Projeto de Superestrutura da Via Permanente - Lastro e Sublastro. Rio de Janeiro, 2015c. 18 p. Disponível em: <https://www.dnit.gov.br/ferrovias/instrucoes-e-procedimentos/instrucoes-de-servicos-ferroviarios/isf-212-projeto-de-superestrutura-da-via-permanente-lastro-e-sublastro.pdf/view>. Acesso em: 08 mar. 2020.

ISLER, C. A.; WIDMER, J. A. Análise Socioeconômica de Alternativas para o Transporte Ferroviário de Passageiros em uma Rede Regional. **Transportes**, v. 25, n. 3, p.138-152, 29 out. 2017. Disponível em: <https://revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1332>. Acesso em: 30 ago. 2019.

KERETCH, E. M.; PAIVA, C. E. L. *Rail Accidents Caused by Failure on the Permanent Way*. **Journal Of Traffic And Logistics Engineering**, p.61-66, jun. 2016. EJournal Publishing. Disponível em: <http://www.jtle.net/uploadfile/2015/1023/20151023051916381.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2019.

NABAIS, R. J. S. **Manual Básico de Engenharia Ferroviária**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

NUNES, I. Expansão e crise das ferrovias brasileiras nas primeiras décadas do século XX. **América Latina En La Historia Económica**, v. 23, n. 3, p.204-235, 1 set. 2016. America Latina en la Historia Economica. Disponível em: <http://alhe.mora.edu.mx/index.php/ALHE/article/view/723>. Acesso em: 08 mar. 2020.

PAIVA, C. E. L. **Super e Infraestruturas de Ferrovias**: Critérios para Projeto. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. 313 p.

PASSOS, W. L. **Geometria de Via Permanente: Um Fator Determinante para a Velocidade de uma Composição**. 2018. 44 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil), Centro Universitário do Cerrado Patrocínio, Patrocínio, 2018. Disponível em: <http://www.unicerp.edu.br/ensino/cursos/engenhariacivil/monografias/2018/GEOMETRIADEVIAPERMANENTE.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2019.

PAZ, I. B. F.; OLIVEIRA, F. H. L. Análise dos Métodos de Cálculo de Superelevação Ferroviária em Transporte de Cargas. **Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da Anpet Ouro Preto**, Ouro Preto, v. 29, p.343-354, nov. 2015. Disponível em: http://146.164.5.73:20080/ssat/interface/content/anais_2015/TrabalhosFormatados/AC648.pdf. Acesso em: 31 ago. 2019.

PEREIRA, M. A.; ROSA, F. S.; LUNKES, R. J. Análise da eficiência ferroviária no Brasil nos anos entre 2009 a 2013. **Transportes**, v. 23, n. 3, p.56-63, 23 dez. 2015. Lepidus Tecnologia. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/909>. Acesso em: 09 mar. 2020.

RIBEIRO, Rômulo L. P. **Análise Automática de Normas Aplicada em Projeto Geométrico de Superestrutura Ferroviária**. 2018. 103 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <<https://posgrad.etg.ufmg.br/wp-content/uploads/2018/07/diss083-1.pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2019.

SEMPREBONE, P. S. **Desgastes em trilhos ferroviários – Um estudo teórico**. 2006. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/258211>>. Acesso em: 31 ago. 2019.