

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

AMANDA BABILON ANDRADE

**ANÁLISE COMPARATIVA DE DIMENSIONAMENTO DA ALTURA DE LASTRO
FERROVIÁRIO PELOS MÉTODOS DE TALBOT, SCHRAMM E EISENMANN**

VITÓRIA

2025

AMANDA BABILON ANDRADE

**ANÁLISE COMPARATIVA DE DIMENSIONAMENTO DA ALTURA DE LASTRO
FERROVIÁRIO PELOS MÉTODOS DE TALBOT, SCHRAMM E EISENMANN**

Projeto de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Civil do Centro
Tecnológico da Universidade Federal do
Espírito Santo como requisito para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga
Rosa

VITÓRIA

2025

AMANDA BABILON ANDRADE

**ANÁLISE COMPARATIVA DE DIMENSIONAMENTO DA ALTURA DE LASTRO
FERROVIÁRIO PELOS MÉTODOS DE TALBOT, SCHRAMM E EISENMANN**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa

Aprovado em: _____ de 2025.

COMISSÃO EXAMINADORA

Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa

Orientador

MSc. Antônio Luiz Caus

Examinador

MSc. Patricia Costa Louzada Lopes

Examinadora

CT UFES

**Centro Tecnológico
Colegiado do Curso de Engenharia Civil-CCEC**



ATA DE DEFESA DO PROJETO DE GRADUAÇÃO

Título: Análise Comparativa de Dimensionamento da Altura de Lastro Ferroviário pelos Métodos de Talbot, Schramm e Eisenmann

Aluno (s): Amanda Babilon Andrade

Matrícula: 2019108739

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa

Data da defesa: 24/03/2025 **Local:** Sala 03 – CT 10

Critérios para avaliação:	Nota:
Apresentação oral	10,0
Monografia (apresentação escrita)	10,0
Conhecimento técnico	10,0
Média Final	10,0

Banca Examinadora

Nome:

1. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa

Assinatura:

Rodrigo de Alvarenga Rosa

2. MSc. Antônio Luiz Caus

Antônio Luiz Caus

3. MSc. Patricia Costa Louzada Lopes

Patrícia Louzada Lopes

4. _____ X _____

X

(Mínimo: 3 membros)

Observações: _____

Presidente da Seção: Rodrigo de Alvarenga Rosa

Assinatura: Rodrigo de Alvarenga Rosa

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Josiane, por sempre acreditar em mim e me incentivar. Esta pesquisa é o fruto de uma vida toda me fazendo crer que sou capaz e proporcionando meios para eu conquistar os meus e os nossos sonhos.

À minha avó, Denira, que pacientemente me ensinou a somar, subtrair, dividir e multiplicar quando eu era apenas uma criança que gostava de números. Você me descobriu engenheira antes mesmo de eu saber e eu sou muito grata por todo seu incentivo, amor e dedicação durante todos esses anos.

À minha tia, Sueli, que não mede esforços para me apoiar, tornando a distância geográfica existente entre nós apenas um mero detalhe.

À Amanda por facilitar e colorir meus dias quando eles ficaram difíceis e por ter transbordado aqueles que já estavam bons. Seu amor e compreensão tornaram a jornada mais leve. Obrigada por acreditar tanto em mim!

Ao meu professor e orientador, Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa, por todo apoio, disponibilidade e confiança durante a elaboração desta pesquisa. Por seu vasto conhecimento, você é uma referência profissional para mim.

Aos meus colegas de trabalho da IM Engenharia pelo compartilhamento dos conhecimentos a respeito daquilo que brilha meus olhos: ferrovias. Em especial, à coordenadora MSc. Patricia Costa Louzada Lopes por todo aprendizado, confiança e compreensão.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação. Muito obrigada a todos!

RESUMO

A ferrovia é um sistema de transporte amplamente reconhecido por sua capacidade de transportar grandes volumes de carga com alta eficiência energética e segurança, sobretudo em distâncias superiores a 500 km. Contudo, seu custo de implantação é elevado, o que torna fundamental que o projeto de engenharia seja elaborado de forma a garantir uma operação segura e com alto desempenho, minimizando a necessidade de manutenções durante a vida útil prevista para seus componentes. A definição da altura da camada de lastro desempenha um papel crucial nesse contexto, pois assegura a segurança, estabilidade e durabilidade das vias ferroviárias. A norma brasileira que estabelece as diretrizes para o projeto de lastro ferroviário define, de modo tabelado, as alturas mínimas exigidas para três classes de linha férrea. No entanto, a norma não esclarece os critérios que classificam as vias nem especifica o método adotado para determinar as alturas indicadas, tampouco sugere métodos alternativos. A norma brasileira de classificação das linhas férreas, por sua vez, apresenta uma codificação diferente das classes mencionadas na norma de projeto de lastro, tornando impossível estabelecer uma correlação entre ambas. Diante disso, a pesquisa abordou três métodos de dimensionamento da altura da camada de lastro: Talbot, Schramm e Eisenmann. Para automatizar o dimensionamento, foi desenvolvida uma ferramenta computacional capaz de calcular os valores da altura de lastro para os três métodos a partir dos dados inseridos pelo usuário. A ferramenta mostrou-se eficaz, permitindo sua aplicação em diferentes cenários. Para realizar uma análise comparativa entre os resultados obtidos pelos três métodos, foram definidos quatro casos, que variaram o espaçamento entre dormentes e a velocidade da via. Os resultados dos casos analisados indicaram que o método de Talbot forneceu os valores mais conservadores dentre os três métodos. Além disso, foi o mais impactado pelo aumento da velocidade e do espaçamento entre dormentes. Já o método de Schramm apresentou o mesmo resultado para os quatro casos testados, demonstrando pouca sensibilidade à variação de ambos os parâmetros. Por fim, o método de Eisenmann exibiu maior sensibilidade ao espaçamento entre dormentes do que à velocidade.

Palavras-chave: Dimensionamento de altura de lastro, Talbot, Schramm, Eisenmann.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Áreas de uma ferrovia	12
Figura 2 - Desenho esquemático da superestrutura de uma ferrovia.....	13
Figura 3 - Larguras de apoio do dormente	23
Figura 4 - Distribuição de tensões e diagramas de momento resultante no contato entre dormente e lastro	24
Figura 5 - Arranjo experimental utilizado por Talbot.....	26
Figura 6 - Equipamento utilizado no experimento de Talbot.....	26
Figura 7 - Distribuição de tensões verticais para dormente isolado de Talbot	27
Figura 8 - Distribuição de tensões verticais com três dormentes espaçados de 46 cm	28
Figura 9 - Distribuição de tensões verticais com três dormentes espaçados de 53 cm	28
Figura 10 - Distribuição de tensões verticais com três dormentes espaçados de 61 cm	29
Figura 11 - Curva de flexão da via por Zimermann.....	32
Figura 12 - Distribuição de tensão para lastro de pequenas e grandes alturas.....	34
Figura 13 - Modelo teórico de Zimmermann.....	37
Figura 14 - Conjunto dos cinco dormentes mais carregados e a distribuição das suas pressões na plataforma	38
Figura 15 - Curva de deformação de Zimermann.....	41
Figura 16 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa	44
Figura 17 - Interface da aba "Dados de entrada"	47
Figura 18 - Dados de entrada.....	49
Figura 19 - Memória de cálculo: determinação da tensão admissível da plataforma	50
Figura 20 - Método de Talbot: seção de cálculo da tensão na interface dormente-lastro	51
Figura 21 - Método de Talbot: seção destinada à determinação da altura mínima de lastro	52
Figura 22 - Método de Schramm: seção destinada ao cálculo da faixa de recalque de Zimmermann	53

Figura 23 - Método de Schramm: seção destinada à determinação da altura mínima de lastro	54
Figura 24 - Método de Eisenmann: determinação e cálculo dos parâmetros iniciais	55
Figura 25 - Método de Eisenmann: posicionamento das cargas 01 e 02	56
Figura 26 - Método de Eisenmann: determinação do conjunto dos cinco dormentes mais carregados.....	57
Figura 27 - Método de Eisenmann: tensão no ponto C com altura de lastro de 25,00 cm	58
Figura 28 - Método de Eisenmann: tensão no ponto C com altura de lastro de 30,00 cm	58
Figura 29 - Método de Eisenmann: tensão no ponto C com altura de lastro de 35,00 cm	59
Figura 30 - Método de Eisenmann: tensão no ponto C com altura de lastro de 40,00 cm	59
Figura 31 - Método de Eisenmann: tensão no ponto C com altura de lastro de 45,00 cm	59
Figura 32 - Método de Eisenmann: tensão no ponto C com altura de lastro de 50,00 cm	60
Figura 33 - Método de Eisenmann: tensão no ponto C com altura de lastro de 55,00 cm	60
Figura 34 - Método de Eisenmann: tensão no ponto C com altura de lastro de 60,00 cm	60
Figura 35 - Método de Eisenmann: seção destinada ao resumo dos resultados	61
Figura 36 - Resumo dos resultados dos dados de entrada da Figura 18	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Altura mínima de lastro em função da classe da linha férrea	14
Quadro 2 - Velocidade máxima autorizada.....	14
Quadro 3 - Previsões anuais de transportes	14
Quadro 4 - Principais fatores que influenciam o comportamento do lastro	19
Quadro 5 - Propriedades físicas e critérios para lastro ferroviário.....	19
Quadro 6 - Distribuição granulométrica do lastro ferroviário	20
Quadro 7 - Valores das cargas médias sobre os dormentes segundo Togno e Liechtberger	23
Quadro 8 - Valores dos parâmetros adotados nos ensaios laboratoriais de Talbot ..	27
Quadro 9 - Largura mínima da faixa sem carregamento do lastro	36
Quadro 10 - Parâmetros para o cálculo de P_0 pelo método de Eisenmann	40
Quadro 11 - Exemplo de tabela para estudo da distribuição das cargas nos dormentes	41
Quadro 12 - Valores de N em função dos nove grupos da RFFSA	42
Quadro 13 - Grupos da RFFSA segundo o valor de T.....	43
Quadro 14 - Parâmetros arbitrados para o desenvolvimento dos casos	66
Quadro 15 - Identificação e descrição dos parâmetros adotados em cada caso	67
Quadro 16 - Resumo dos resultados do caso 1	69
Quadro 17 - Resumo dos resultados do caso 2	71
Quadro 18 - Resumo dos resultados do caso 3	75
Quadro 19 - Resumo dos resultados do caso 4	78
Quadro 20 - Resumo dos resultados	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados das tensões atuantes para o caso 1.....	68
Tabela 2 - Resultados das tensões atuantes para o caso 2.....	71
Tabela 3 - Resultados das tensões atuantes para o caso 3.....	74
Tabela 4 - Resultados das tensões atuantes para o caso 4.....	77

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Coeficiente de majoração da reação do material rodante versus.	
Velocidade para as abordagens de Driecsen e da AREMA	64
Gráfico 2 - Tensão <i>versus</i> altura de lastro para o caso 1 para os diferentes métodos	
.....	70
Gráfico 3 - Tensão <i>versus</i> altura de lastro para o caso 2 para os diferentes métodos	
.....	73
Gráfico 4 - Tensão <i>versus</i> altura de lastro para o caso 3 para os diferentes métodos	
.....	76
Gráfico 5 - Tensão <i>versus</i> altura de lastro para o caso 4	79

SUMÁRIO

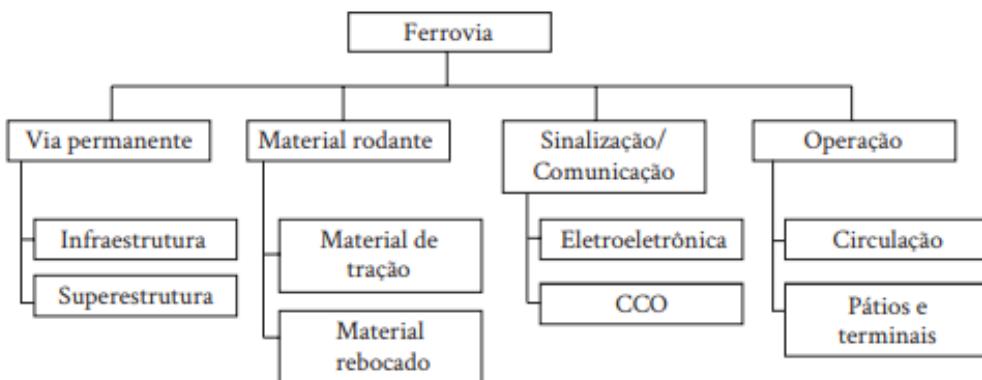
1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3	JUSTIFICATIVA	16
1.4	ESTRUTURA DA PESQUISA	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	LASTRO FERROVIÁRIO	18
2.2	DIMENSIONAMENTO DA ALTURA DA CAMADA DE LASTRO FERROVIÁRIO	21
2.2.1	Esforços atuantes	22
2.2.2	Método de Talbot	25
2.2.3	Método de Schramm	31
2.2.4	Método de Eisenmann	37
2.2.5	Tensão admissível da plataforma	41
3	METODOLOGIA	44
4	FERRAMENTA COMPUTACIONAL	46
4.1	DADOS DE ENTRADA	46
4.2	MEMÓRIA DE CÁLCULO	47
4.3	RESUMO	61
5	RESULTADOS E ANÁLISES	63
5.1	ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS COM DIFERENTES DADOS DE ENTRADA NA FERRAMENTA COMPUTACIONAL	65
5.1.1	Caso 1: E50-V40	68
5.1.2	Caso 2: E50-V80	70
5.1.3	Caso 3: E60-V40	73
5.1.4	Caso 4: E60-V80	76

5.1.5	Resumo dos resultados	79
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	81
7	REFERÊNCIAS.....	82

1 INTRODUÇÃO

Segundo a norma ABNT NBR 7641:1980, a ferrovia é um sistema de transporte sobre trilhos constituído por via férrea, material rodante e outras instalações fixas e equipamentos necessários para a condução segura e eficiente de passageiros e carga. Seus elementos, portanto, podem ser divididos em quatro áreas: via permanente, material rodante, sinalização/comunicação e operação (Figura 1).

Figura 1 - Áreas de uma ferrovia



Fonte: Rosa e Ribeiro (2020), p. 12.

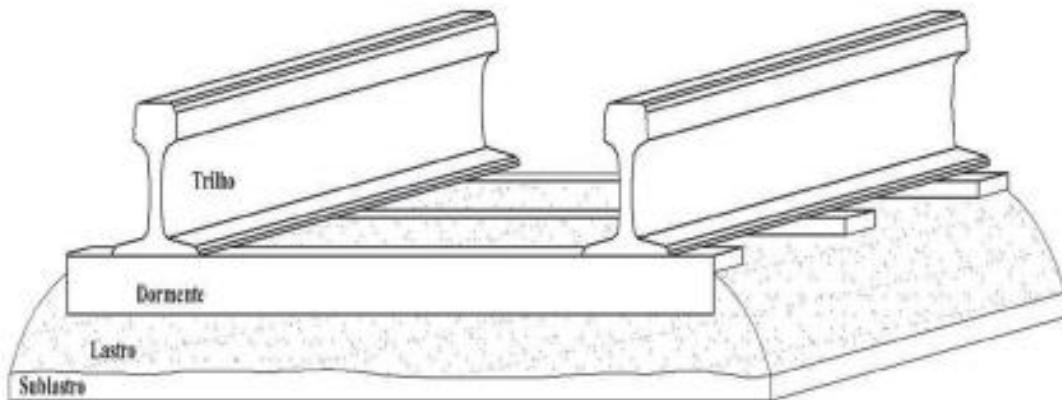
A primeira área refere-se ao conjunto de elementos e instalações que compõem a infra e a superestrutura da ferrovia, sendo capazes de absorver as solicitações geradas pelo tráfego e resistir às intempéries. Já o material rodante é o conjunto de todos os equipamentos que se locomovem sobre a via permanente, podendo ser de tração ou rebocado. A sinalização e a comunicação tratam dos sistemas da via permanente e do material rodante. Por fim, a operação lida com a circulação do material rodante.

A ferrovia é amplamente reconhecida por sua capacidade de transportar grandes volumes de carga com elevada eficiência energética e segurança, principalmente em distâncias superiores a 500 km. É, ainda, o meio de transporte que gera o menor impacto ambiental, requerendo quatro vezes menos energia no transporte de uma tonelada de carga do que em rodovias planas de pavimentação lisa. Contudo, é adequado somente a corredores com altíssima demanda de carga já que o seu custo de construção é muito alto – cerca de US\$ 1 milhão a US\$ 4,5 milhões por quilômetro, segundo Rosa e Ribeiro (2020).

Tendo isso em vista, é fundamental que o projeto de engenharia seja elaborado permitindo que a ferrovia desenvolva uma operação segura e com alto desempenho, sem que haja necessidade de grandes manutenções durante a vida útil prevista para seus componentes. Na construção das primeiras ferrovias, no entanto, dava-se pouca relevância ao estudo da via permanente, cenário que só começou a ser modificado após o aparecimento de pesquisas na literatura técnica ferroviária que destacavam a importância do seu dimensionamento no que se refere à forma, constituição e tensões solicitantes a que está sujeita (STOPATTO, 1986).

A via permanente, conforme visto anteriormente, é dividida em infra e superestrutura. A primeira contempla o conjunto de terraplenagem, obras de arte especiais e elementos de drenagem construídos para permitir o traçado projetado da ferrovia, bem como suportar as cargas de projeto da superestrutura. Já a superestrutura é responsável por receber os impactos diretos da composição ferroviária, sendo constituída pelo conjunto de trilhos, dormentes, acessórios de fixação, aparelhos de mudança de via, lastro e sublastro, conforme Figura 2.

Figura 2 - Desenho esquemático da superestrutura de uma ferrovia



Fonte: Rosa e Ribeiro (2020), p. 148.

No dimensionamento da superestrutura, um fator relevante a ser definido é a espessura da camada de lastro. Tal definição reflete a capacidade de suporte da via, bem como possui importância significativa no custo de implantação da ferrovia. Nesse sentido, a norma ABNT NBR 7914:1990 determina a altura mínima de lastro em função da classificação da via férrea, conforme Quadro 1. Apesar de apresentar a altura mínima de lastro para as três classes de via férrea, a norma não cita o método utilizado

para o dimensionamento nem sugere outras formas de cálculo, indicando apenas que a altura do lastro deve ser calculada em função da capacidade de suporte da plataforma, do trem tipo, da bitola e do espaçamento entre dormentes.

Quadro 1 - Altura mínima de lastro em função da classe da linha férrea

Classe da linha férrea	Altura mínima de lastro (cm)
I	40
II	30
III	25

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7914:1990.

A norma em questão também não apresenta os critérios para a classificação da linha férrea. No entanto, foi publicada em 2020 uma norma brasileira com essa finalidade: a ABNT NBR 16387:2020. Nela, a classificação das linhas férreas é feita pela codificação $XN_A N_B$ em que: X é a indicação se a via possui predominância de circulação de trens de passageiros (P) ou de carga (C); N_A refere-se à velocidade máxima autorizada; e N_B corresponde à previsão anual de transportes para o trecho a ser classificado. As codificações e os critérios para os parâmetros N_A e N_B são apresentados no Quadro 2 e Quadro 3, respectivamente.

Quadro 2 - Velocidade máxima autorizada

Codificação (N_A)	Trens de carga, km/h	Trens de passageiro, km/h
1	0 a 15	0 a 25
2	16 a 40	26 a 45
3	41 a 64	46 a 95
4	65 a 95	96 a 128
5	96 a 128	Não aplicável

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16387:2020

Quadro 3 - Previsões anuais de transportes

Codificação (N_B)	Milhões de toneladas brutas (ano)
1	0 a 30
2	31 a 60
3	61 a 90
4	91 a 140
5	141 a 190
6	Acima de 190

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16387:2020

A codificação apresentada na ABNT NBR 16387:2020, portanto, diverge da classificação de linha férrea contida no Quadro 1, de modo que não é possível correlacioná-las. Assim, embora não apresentado em normas brasileiros, o critério

para classificar a linha férrea nas classes do Quadro 1 trata-se da receita anual gerada pela ferrovia, sendo acima de U\$ 1,05 bilhão para Classe I, entre U\$ 47,3 milhões e U\$ 1,05 bilhão para Classe II e inferior a U\$ 47,3 milhões para Classe III. Esses valores foram estabelecidos pela agência federal dos Estados Unidos, *Surface Transportation Board* (2025), e ajustados pela inflação para o ano de 2019, sendo utilizados nas normas estadunidenses, referências para as normas brasileiras.

Do mesmo modo, a Instrução de Serviço Ferroviário 212 (2015): Projeto de Superestrutura da Via Permanente – Lastro e Sublastro do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) especifica a altura de lastro em função das três classes de via férrea, com valores coincidentes com a norma ABNT NBR 7914:1990. Diferentemente da norma, a ISF-212 recomenda que na elaboração de projeto sejam utilizadas preferencialmente as equações indicadas pela AREMA, como Talbot ou Boussinesq.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este projeto de pesquisa tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre três métodos de cálculo utilizados no dimensionamento da altura da camada de lastro ferroviário: Talbot, Schramm e Eisenmann. Ao término do estudo, será desenvolvida uma ferramenta computacional que permitirá calcular a altura necessária do lastro com base nos dados fornecidos pelo usuário para os três métodos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são relacionados a seguir:

- a) apresentar o referencial teórico sobre as características da camadas de lastro ferroviário e os métodos de cálculo de Talbot, Schramm e Eisenmann: consultar livros, artigos científicos, normas vigentes, dissertações e periódicos;
- b) elaborar ferramenta computacional de cálculo: calcular de forma automatizada a altura da camada de lastro ferroviário necessária para os métodos de Talbot, Schramm e Eisenmann a partir de dados de entrada fornecidos pelo usuário;

- c) discussão dos resultados: realizar análise comparativa entre os resultados obtidos pelos três métodos para casos distintos.

1.3 JUSTIFICATIVA

A escolha do tema abordado está relacionada ao crescente investimento em ferrovias no contexto dos sistemas de transporte no Brasil, principalmente devido à sua eficiência energética, capacidade de carga e sustentabilidade. O dimensionamento adequado da via permanente ferroviária é crucial para garantir a segurança, estabilidade e durabilidade, aspectos que dependem de um projeto bem desenvolvido, sobretudo no que diz respeito à altura da camada de lastro.

A camada de lastro ferroviário é situada entre os dormentes e a plataforma ou sublastro, quando houver, apresentando funções que tangem a drenagem e a estabilidade da via. Quanto ao último fator, atua impedindo o deslocamento dos dormentes e distribuindo as cargas aplicadas pelo tráfego, fazendo com que cheguem à próxima camada em menor intensidade. Assim, seu correto dimensionamento não só contribui para a segurança operacional, mas otimiza custos de manutenção e prolonga a vida útil dos componentes da ferrovia.

Apesar de sua relevância, a definição da altura da camada de lastro apresenta lacunas nas normas técnicas brasileiras. A ABNT estabelece diretrizes gerais para o projeto de lastro segundo três classes de linha férrea, mas não fornece uma especificação dos critérios de classificação nem o método utilizado na definição das alturas mínimas indicadas.

Dessa forma, este trabalho se justifica pela importância de apresentar uma análise comparativa entre três métodos de dimensionamento consolidados na literatura ferroviária: Talbot, Schramm e Eissenmann. Além disso, a implementação de uma ferramenta computacional para automatizar os cálculos permitirá maior agilidade e precisão nas análises, beneficiando os profissionais da área ao proporcionar uma solução acessível e confiável.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este capítulo tem caráter introdutório, contendo a contextualização do tema abordado, os objetivos da pesquisa e a estrutura desenvolvida.

O segundo capítulo apresenta o referencial teórico, abordando os principais conceitos relacionados ao tema, como as funções e propriedades do lastro, os métodos específicos para o dimensionamento a serem analisados (Talbot, Schramm e Eisenmann) e a determinação da tensão admissível da plataforma.

O terceiro capítulo descreve a metodologia empregada, detalhando as etapas necessárias para alcançar os objetivos e as ações que foram implementadas.

O quarto capítulo apresenta, de forma detalhada, a ferramenta computacional desenvolvida para a pesquisa.

O quinto capítulo expõe os resultados obtidos pela ferramenta computacional e as análises feitas para quatro casos distintos.

O sexto capítulo traz as conclusões da pesquisa, além de apresentar as recomendações para o desenvolvimento de pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem como objetivo apresentar o referencial teórico para o dimensionamento da altura da camada de lastro ferroviário. Inicialmente, são abordadas as funções e os critérios aplicados ao lastro, com ênfase nas normas técnicas brasileiras. Em seguida, discute-se a distribuição de tensões geradas pelo tráfego até atingirem a plataforma. Por fim, são detalhados os conceitos e os métodos de dimensionamento da altura da camada de lastro desenvolvidos por Talbot, Schramm e Eisenmann, bem como as diretrizes para determinação da tensão admissível da plataforma.

2.1 LASTRO FERROVIÁRIO

O lastro é uma camada granular situada entre os dormentes e o sublastro, quando presente, ou diretamente sobre a plataforma. Suas funções segundo a ISF-212 são:

- Distribuir de forma uniforme sobre a plataforma os esforços resultantes das cargas dos veículos, produzindo uma taxa de trabalho adequada na plataforma;
- Impedir os deslocamentos dos dormentes, tanto vertical como horizontalmente;
- Atenuar as trepidações resultantes da passagem do material rodante;
- Suprimir as irregularidades da plataforma, formando uma superfície contínua e uniforme para os dormentes e trilhos;
- Facilitar a drenagem da superestrutura.

Em todos os casos, é desejável que o material a ser empregado como lastro apresente alta tenacidade, elevada resistência ao desgaste e abrasão, alta resistência à compressão, baixa porosidade, adequada distribuição granulométrica e disponibilidade (ROSA; RIBEIRO, 2020; PAIVA, 2016). De modo geral, três características principais da via permanente influenciam o comportamento do lastro ferroviário segundo Klincevicius (2011), estando relacionadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Principais fatores que influenciam o comportamento do lastro

Características	Propriedades
Individuais dos fragmentos de lastro	Rocha de origem Resistência ao intemperismo Forma Textura Resistência mecânica
Do conjunto de fragmentos que compõem a camada de lastro	Graduação Compacidade ou índice de vazios Presença de água
Do carregamento	Frequência e amplitude Pressão de confinamento Histórico de tensões Estado de tensões Número de ciclos

Fonte: Klincevicius (2011)

Não há, no entanto, uma convenção universal acerca das especificações adequadas ao material de lastro, de modo que estas divergem para cada país. No Brasil, a norma ABNT NBR 5564:2021 estabelece os requisitos e métodos de ensaio para o lastro ferroviário de rocha britada. Quanto ao material, especifica que deve ser composto por fragmentos obtidos pela britagem de material proveniente de rocha dura e íntegra, com características petrográficas adequadas para utilização como lastro em vias férreas. Quanto às propriedades físicas, o material deve atender aos critérios apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Propriedades físicas e critérios para lastro ferroviário

Característica	Granito	Basalto	Calcário calcítico	Calcário dolomítico	Outras litologias
Forma média das partículas – Método do paquímetro ou calibre (máximo)	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica
Partículas não cúbicas – Método do paquímetro ou calibre (máximo), %	15	17	15	15	15
Massa específica aparente (mínima), kg/m ³	2600	2700	2600	2650	2500
Porosidade aparente (máxima), %	2	2	2	2	2
Absorção de água (máxima), %	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00

Característica	Granito	Basalto	Calcário calcítico	Calcário dolomítico	Outras litologias
Resistência à intempéries (máxima), %	10	10	10	10	10
Limite de massa unitária no estado solto (mínimo), kh/m ³	1250	1250	1250	1250	1250
Material pulverulento (máximo), %	1	1	1	1	1
Torrões de argila (máximo), %	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Resistência ao desgaste - abrasão Los Angeles (máxima), %	35	30	30	30	30

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5564:2021.

Ensaios opcionais podem ser solicitados a critério do comprador. Apesar da norma ABNT NBR 5564:2021 apresentar valores de referência para estes, o não atendimento não implica na rejeição do agregado, de modo que o comprador deve determinar sua aceitação. Já a distribuição granulométrica do lastro é verificada segundo o procedimento contido na NM 248, apresentando faixas de aceitação para linhas principais (Padrão A) e linhas de pátio (Padrão B). O Quadro 6 contém os intervalos de porcentagem em massa acumulada retida para cada peneira.

Quadro 6 - Distribuição granulométrica do lastro ferroviário

Lado da malha da peneira, mm	Porcentagem em massa acumulada retida, %	
	Padrão A	Padrão B
76,2	Não aplicável	0 – 0
63,5	0 – 0	0 – 10
50,8	0 – 10	Não aplicável
38,0	30 – 65	40 – 75
25,4	85 – 100	Não aplicável
19,0	Não aplicável	90 – 100
12,5	95 – 100	98 – 100

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5564:2021.

A ISF-212, por sua vez, também apresenta os critérios referentes às características petrográficas, propriedades físicas e mecânicas, granulometria e substâncias nocivas do lastro ferroviário. De modo comparativo, verifica-se que esta apresenta as

características do lastro ferroviário com valores únicos, sem que haja segmentação em função da litologia do material empregado.

Além disso, os valores de aceitação e os ensaios necessários definidos pela ISF-212 diferem dos estabelecidos pela norma ABNT NBR 5564:2021, mesmo que esta seja citada como documento de referência. Essa divergência ocorre porque a versão mais recente da ISF-212 foi publicada em 2015, utilizando os valores da ABNT NBR 5564 de 2011, cuja revisão está obsoleta tendo em vista a publicação da edição de 2021. Dessa forma, recomenda-se a adoção dos valores estabelecidos na ABNT NBR 5564:2021.

De modo geral, um bom lastro deve apresentar as seguintes características segundo Stopatto (1986):

- Resistência: deve ser capaz de resistir ao atrito quando submetido a altas cargas do material rodante, não quebrando-se facilmente;
- Durabilidade: não deve apresentar abrasão excessiva, tendo em vista que a formação de pó colmata o material;
- Estabilidade: deve impedir a movimentação longitudinal e transversal da via, ancorando-a e fornecendo estabilidade;
- Drenabilidade: os vazios entre os grãos devem ser grandes o suficiente para impedir a capilaridade proveniente da parte inferior do lastro;
- Limpeza: deve estar limpo de pó, sujeira e vegetação, bem como deve permitir limpeza manual ou mecânica;
- Trabalhabilidade: deve ser facilmente trabalhado e movimentado;
- Disponibilidade: tendo em vista que é o lastro é sempre demandado em elevadas quantidades, deve-se usar um material facilmente encontrado e que possua preço razoável; e
- Barateza: deve-se levar em consideração o custo global, abrangendo sua vida útil, qualidade e manutenção.

2.2 DIMENSIONAMENTO DA ALTURA DA CAMADA DE LASTRO FERROVIÁRIO

O dimensionamento adequado da altura da camada de lastro é fundamental para se obter uma via férrea que não exija manutenção recorrente devido às deformações

plásticas ocorridas na plataforma devido ao excesso de carga vertical do material rodante (PAIVA, 2016). O dimensionamento, em todo caso, parte da determinação da tensão admissível da plataforma e da análise dos esforços que atuam na via permanente e, por consequência, na camada de lastro. Para isso, é fundamental compreender as solicitações geradas pelo tráfego e o modo como as tensões são distribuídas até atingirem a plataforma.

2.2.1 Esforços atuantes

Cada elemento que constitui a superestrutura da via permanente absorve parte das tensões que nele chegam, transmitindo tensões menores para a camada seguinte e possibilitando, assim, a transferência das cargas provenientes do tráfego do material rodante à plataforma (KLINCEVICIUS, 2011). Tais cargas geram esforços que são classificados segundo sua direção, podendo ser longitudinal, vertical ou transversal, e possuem correspondentes diretamente transmitidas ao lastro (STOPATTO, 1986).

Os esforços longitudinais são causados devido à variação de temperatura e consequente dilatação dos trilhos, aos esforços de aceleração e frenagem do material rodante e à onda de deformação do trilho (PAIVA, 2016). O último fenômeno, conhecido como caminhamento da via, refere-se ao deslocamento longitudinal do trilho em relação à sua posição inicial ou ao movimento conjunto do trilho e do dormente, afastando-se de sua posição original em relação ao lastro (ESVELD, 2011).

Na direção vertical, os esforços são originados por cargas que podem ser classificadas em estáticas e dinâmicas. As cargas estáticas referem-se, principalmente, ao peso do material rodante, compreendido pela soma da tara do veículo e do peso do material transportado. Já as cargas dinâmicas são causadas por irregularidades geométricas da via ou da roda, por variações de rigidez e pelas características de rolagem no contato roda/trilho, como descontinuidades de vias soldadas ou juntas mal niveladas (KLINCEVICIUS, 2011; PAIVA, 2016). Como os esforços dinâmicos que solicitam a via são de difícil determinação, eles são considerados no projeto por meio de um coeficiente.

Por fim, na transversal os esforços ocorrem pela inscrição do material rodante na curva e pela existência do jogo da via e agulhas (PAIVA, 2016). Além destes, Klincevicius (2011) apontou a ação de ventos laterais, as forças de origem térmica, as

componentes dinâmicas devido a irregularidades da via e a excentricidade de aplicação da carga.

Os esforços gerados pelo tráfego são distribuídos pelos trilhos no sentido longitudinal num conjunto composto por cinco dormentes e transmitidos aos dormentes numa proporção que varia entre 7 e 40% da carga da roda (P_r). O Quadro 7 contém as proporções admitidas por Togno e Liechtberger para o conjunto, considerando a carga vertical localizada sobre o dormente central de número 3 (PAIVA, 2016).

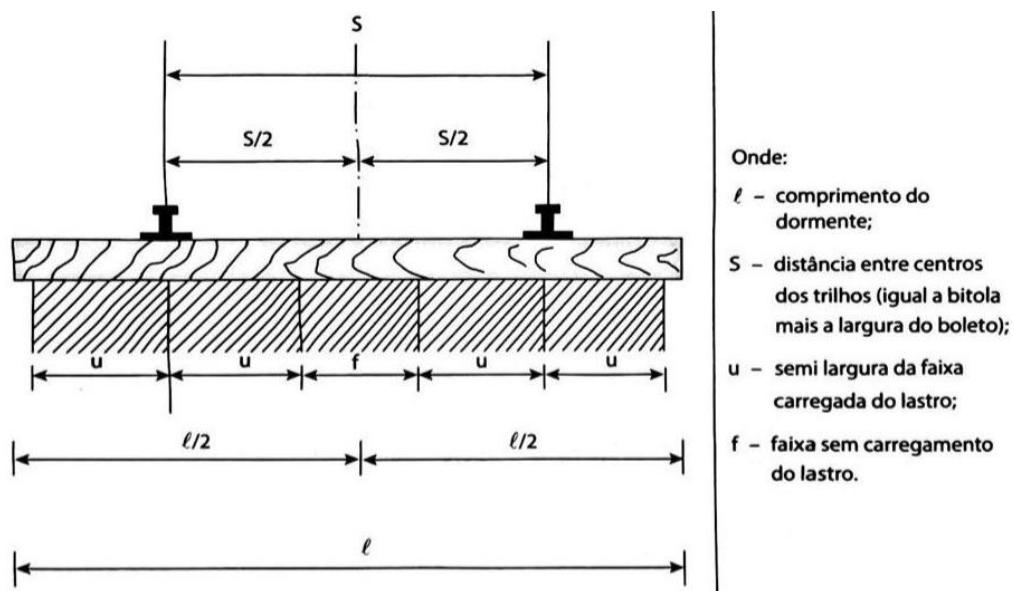
Quadro 7 - Valores das cargas médias sobre os dormentes segundo Togno e Liechtberger

Autor	Dormente 1	Dormente 2	Dormente 3	Dormente 4	Dormente 5
Togno (1975)	10% P_r	20% P_r	40% P_r	20% P_r	10% P_r
Liechtberger (2005)	7% P_r	23% P_r	40% P_r	23% P_r	7% P_r

Fonte: Adaptado de Paiva, 2016, p. 100

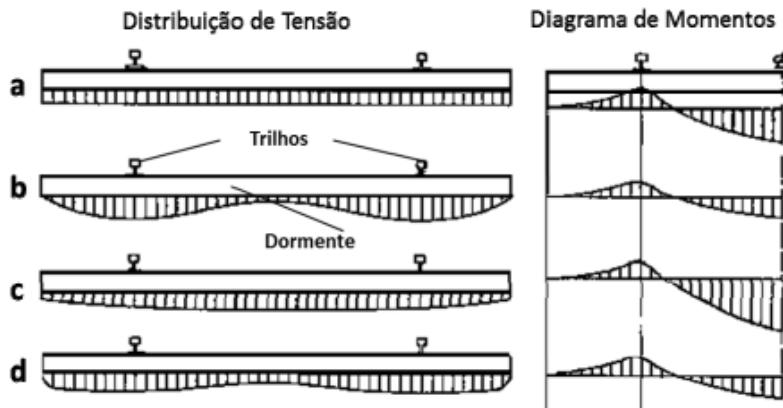
Por simplificação, admite-se que a carga recebida pelo dormente é distribuída uniformemente na área de apoio do dormente, que corresponde às faixas de lastro socado indicadas por u na Figura 3. Nesse contexto, Talbot *et al.* (1920 apud KLINCEVICIUS, 2011, p. 29) formulou a distribuição hipotética de tensões e seus respectivos diagramas de momento resultante no contato entre dormente e lastro em quatro situações, apresentada na Figura 4.

Figura 3 - Larguras de apoio do dormente



Fonte: PAIVA (2016, p. 101)

Figura 4 - Distribuição de tensões e diagramas de momento resultante no contato entre dormente e lastro



Fonte: Talbot et all., 1920 apud KLINCEVICIUS, 2011, p. 29

A situação (a) reflete o cenário ideal, em que a tensão é uniformemente distribuída do dormente para o lastro. Sabe-se, porém, que essa situação não ocorre, pois, a flexão do dormente causa variação na tensão. A situação (b) apresenta maiores tensões nas regiões abaixo do trilho e ocorre após a execução da socaria, uma vez que o contato entre trilho e dormente se concentra na área sob o trilho (KLINCEVICIUS, 2011).

Já a situação (c) é denominada *center bound* e é caracterizada pelos dormentes não apresentarem suporte adequado, oscilando de um lado para o outro quando submetidos ao peso do material rodante (SOLOMON, 2001 apud KLINCEVICIUS, 2011). Por fim, a situação (d) indica uma distribuição de tensões mais uniforme devido ao rearranjo do lastro devido ao tráfego, com a formação de vazios na interface entre dormente e lastro (KLINCEVICIUS, 2011).

A distribuição de tensões na interface dormente-lastro também varia com o tipo de dormente. Dormentes de aço e de madeira concentram mais esforços na faixa de socaria devido a sua maior flexibilidade. Já os dormentes de concreto distribuem mais uniformemente as tensões para o lastro devido a sua maior rigidez (KLINCEVICIUS, 2011; QUEIROZ, 1990).

No interior do lastro, a distribuição das tensões ocorre através de um ângulo de espraiamento constante, variando entre 30° e 45° em relação à horizontal, equivalente ao intervalo entre 45° e 60° com a vertical segundo Paiva (2016). Já Schramm (1977) indicou que o limite superior do ângulo de espraiamento com a vertical é de 45° , observado em lastros grossos, ásperos e secos, enquanto o limite inferior, em torno

de 33°, é associado a lastros finos, lisos e úmidos. Assim, sugeriu adotar 40° como valor médio para o ângulo de espraiamento.

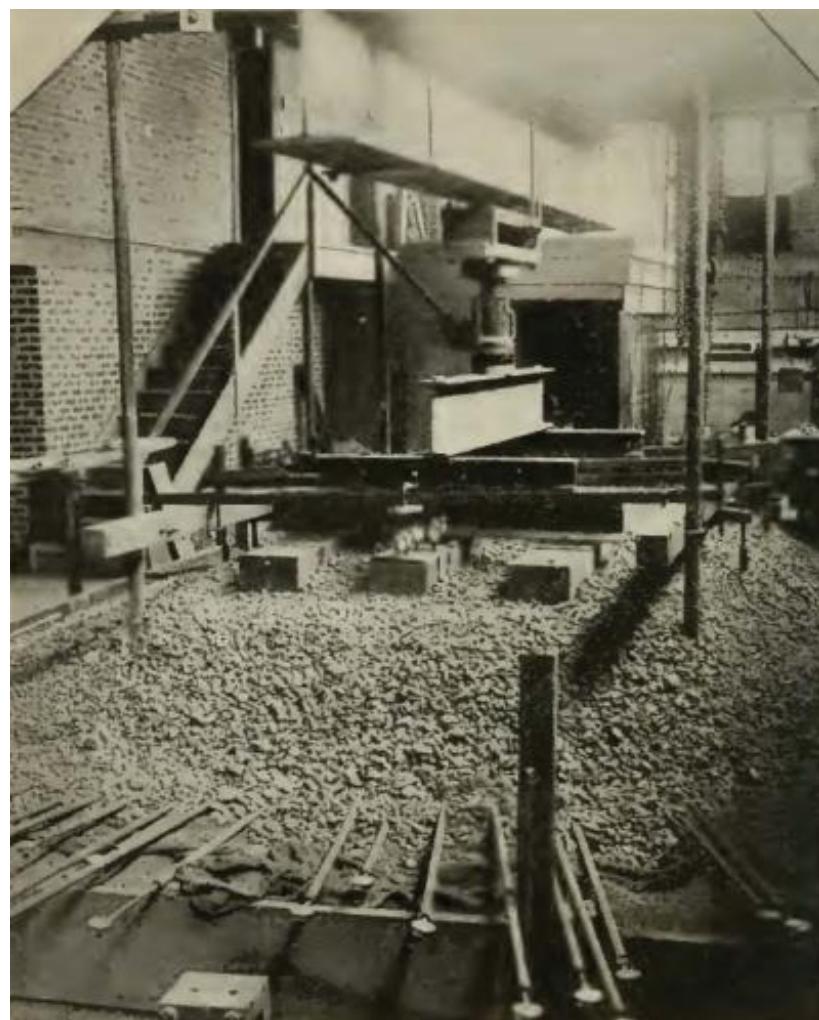
Por fim, a tensão gerada pelo tráfego chega à plataforma em níveis inferiores a depender da altura adotada nas camadas de lastro e sublastro, quando presente. Na literatura há diversos métodos de cálculo para a determinação dessa tensão, de forma que variam em seus conceitos e procedimentos, partindo de modelagens mais simples definidas por experiências de campo a metodologias mais sofisticadas, adotando modelos determinísticos e de elementos finitos (PAIVA, 2016). Nas normas brasileiras não há uma convenção do método a ser empregado, de modo que serão abordados os métodos de Talbot, Schramm e Eisenmann.

O método de Talbot foi selecionado por ser um dos primeiros a quantificar as tensões no lastro ferroviário, proporcionando uma base empírica para o dimensionamento de sua espessura. Embora tenha sido publicado há mais de um século, é amplamente reconhecido como um fundamento clássico nas ferrovias, sendo o método indicado pela AREMA e recomendado pela ISF-212. Da mesma forma, o método de Schramm é frequentemente citado e considerado uma referência tradicional. Já o método de Eisenmann foi escolhido por integrar diferentes abordagens, incluindo o conceito teórico de Zimmermann, permitindo uma previsão do comportamento do lastro ao considerar as propriedades mecânicas dos materiais e a distribuição das cargas nos dormentes.

2.2.2 Método de Talbot

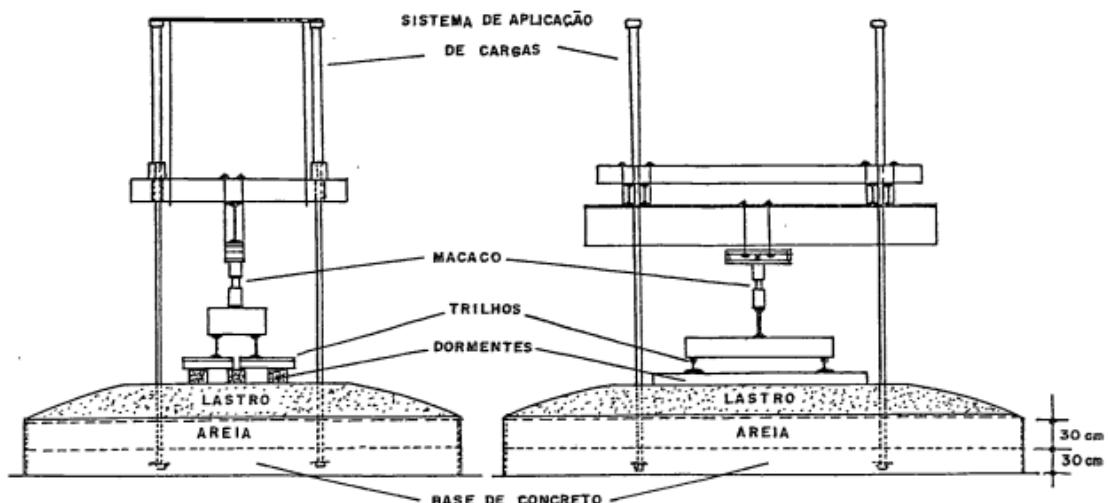
No início do século XX, Talbot realizou uma série de ensaios laboratoriais por meio do arranjo experimental apresentado na Figura 5 e na Figura 6 para a determinação das tensões na camada de lastro, variando a espessura de lastro, a quantidade de dormentes, o material do lastro e a posição dos dispositivos de medição de tensão. Os valores dos parâmetros adotados por Talbot são apresentados no Quadro 8.

Figura 5 - Arranjo experimental utilizado por Talbot



Fonte: TALBOT, 1920 apud KLINCEVICIUS, 2011, p. 35

Figura 6 - Equipamento utilizado no experimento de Talbot



Fonte: TALBOT et all, 1919 apud QUEIROZ, 1990, p. 47

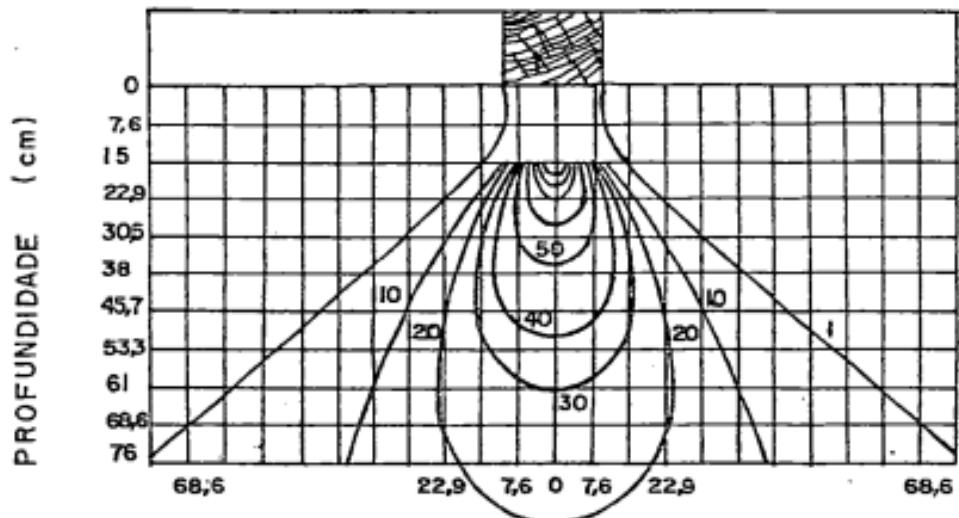
Quadro 8 - Valores dos parâmetros adotados nos ensaios laboratoriais de Talbot

Parâmetros	Valores dos parâmetros
Espessura do lastro	6' (15,2 cm) 9' (22,9 cm) 12' (30,5 cm) 18' (45,7 cm) 25' (63,5 cm)
Quantidade de dormentes	1 3
Material do lastro	Areia Rochas britadas Seixo

Fonte: Adaptado de TALBOT, 1920 apud KLINCEVICIUS, 2011, p. 36

Com os ensaios realizados, Talbot construiu os ábacos de distribuição de tensões verticais indicados nas Figuras 7, 8, 9 e 10, constatando que a intensidade da tensão diminui com a profundidade e que à profundidade igual ou superior ao espaçamento entre os eixos dos dormentes, as tensões são uniformes (STOPATTO, 1986). Além disso, obteve a equação 1 para o cálculo da tensão P_h (kgf/cm²) à profundidade h (cm), onde P_m é a tensão média sob a face inferior do dormente em kgf/cm².

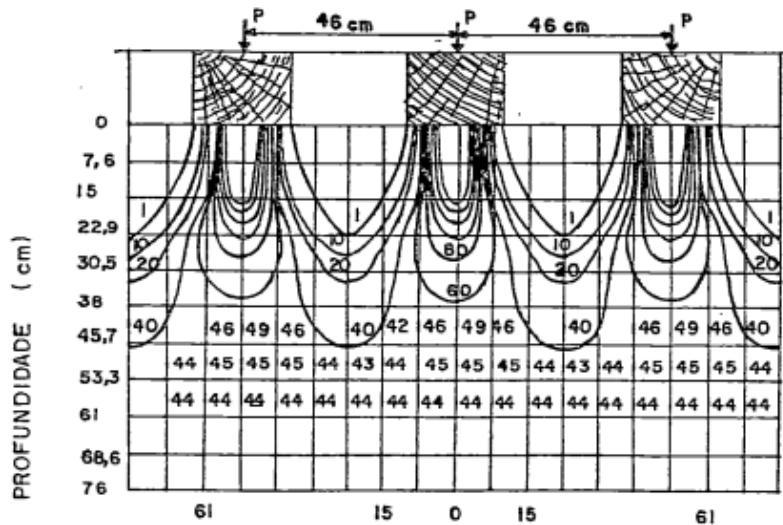
Figura 7 - Distribuição de tensões verticais para dormente isolado de Talbot



(a) BULBOS DE TENSÕES VERTICais PARA DORMENTE ISOLADO

Fonte: TALBOT, 1919 apud QUEIROZ, 1990, p. 48

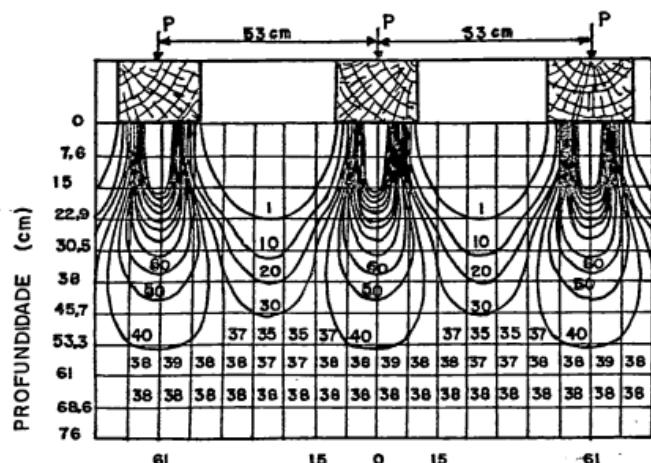
Figura 8 - Distribuição de tensões verticais com três dormentes espaçados de 46 cm



(b) BULBOS DE TENSÕES VERTICais COM DORMENTES ESPAÇADOS DE 46 cm.

Fonte: TALBOT, 1919 apud QUEIROZ, 1990, p. 48

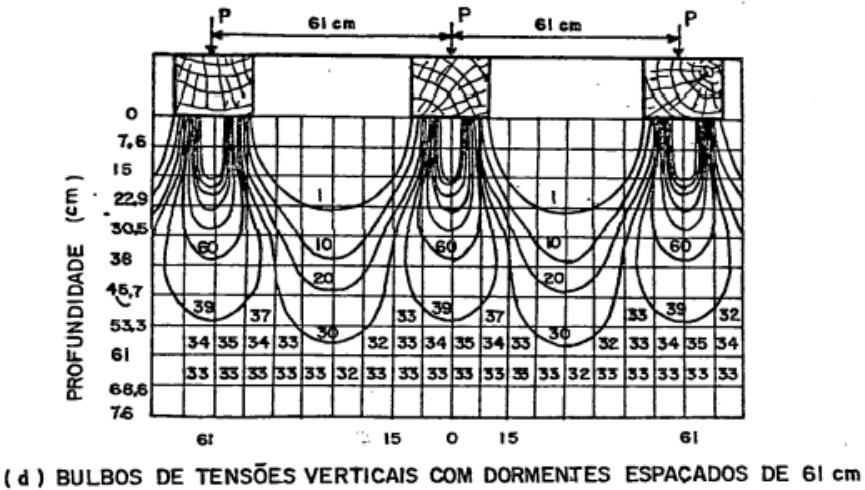
Figura 9 - Distribuição de tensões verticais com três dormentes espaçados de 53 cm



(c) BULBOS DE TENSÕES VERTICais COM DORMENTES ESPAÇADOS DE 53 cm

Fonte: TALBOT, 1919 apud QUEIROZ, 1990, p. 48

Figura 10 - Distribuição de tensões verticais com três dormentes espaçados de 61 cm



Fonte: TALBOT, 1919 apud QUEIROZ, 1990, p. 48

$$P_h = \frac{53,87 P_m}{h^{1,25}} \quad (1)$$

A equação 1, apesar de ser utilizada no dimensionamento da altura de lastro e recomendada pela AREMA, foi concebida considerando apenas um dormente carregado. Para os experimentos conduzidos com três dormentes carregados, Talbot notou que a soma de seus efeitos individuais era próxima de seus efeitos combinados, concluindo que a hipótese de superposição de efeitos poderia ser utilizada (KLINCEVICIUS, 2011).

Para isso, segundo Klincevicius (2011), Talbot equacionou a distribuição de tensões em um plano horizontal no eixo de simetria do dormente, combinando a fórmula teórica para uma carga uniformemente distribuída com a equação obtida experimentalmente para um dormente carregado (equação 2).

$$\left| \frac{KB_d}{\sqrt{\pi}} P_0 e^{-K^2 x^2} \right|_{x=0} = \frac{53,87}{h^{1,25}} P_0 \quad (2)$$

Esse equacionamento resultou na constante K (equação 3) que, substituindo na expressão de distribuição de tensões em um plano horizontal, fornece a equação 4. Nesta, é possível obter a tensão que um dormente provoca em um ponto qualquer, de modo que x é a distância entre o ponto de interesse ao longo do eixo da via e o eixo de simetria do dormente carregado e B_d é o comprimento do dormente, ambos em cm. Nota-se, assim, que a equação 4 é equivalente à equação 1 quando o valor de x

é nulo, ou seja, quando o ponto de interesse está localizado no eixo de simetria do dormente carregado.

$$K = \frac{53,87\sqrt{\pi}}{B_d h^{1,25}} \quad (3)$$

$$P_h = \frac{53,87}{h^{1,25}} P_m e^{-\left(\frac{53,87\sqrt{\pi}}{B_d h^{1,25}}\right)^2 x^2} \quad (4)$$

Já a tensão média na interface dormente-lastro, P_m , é calculada pela equação 5 em função da reação sobre o dormente proveniente da carga vertical do material rodante (R) e da área de apoio do dormente (A_b), compreendida pelo retângulo formado pela faixa de socaria e a largura do dormente. Stopatto (1986) apresentou duas fórmulas empíricas de cálculo para R , sendo estas a de Schramm e a de Driecsen. Dentre elas, a fórmula de Schramm será abordada no Item 2.2.3.

$$P_m = \frac{R}{A_b} \quad (5)$$

A fórmula de Driecsen é função da distância entre eixos de um truque (D), do espaçamento entre dormentes (d), medido eixo a eixo, e do coeficiente de impacto C da via, resultando na equação 6. A determinação do parâmetro C , por sua vez, é feita pela equação 8, a qual considera a velocidade V em km/h e o diâmetro da roda D_r em polegadas.

$$R = \frac{P_r}{N} \times C \quad (6)$$

$$N = \frac{D}{d} \quad (7)$$

$$C = 1,237 \left(\frac{V}{D_r} \right)^{0,243} \quad (8)$$

Brina (1979) e Rosa e Ribeiro (2020), por fim, apresentaram o cálculo de R segundo as equações 9, 10 e 11, formuladas pela AREMA. Os parâmetros P_r , N , D e d são os mesmos do método desenvolvido por Driecsen, de modo que a diferença ocorre pela substituição do coeficiente de impacto C (equação 8) pelo coeficiente dinâmico C_d , calculado em função da velocidade da via, em km/h (equação 11).

$$R = \frac{P_r}{N} \times C_d \quad (9)$$

$$N = \frac{D}{d} \quad (10)$$

$$C_d = 1 + \frac{V^2}{30000} \quad (11)$$

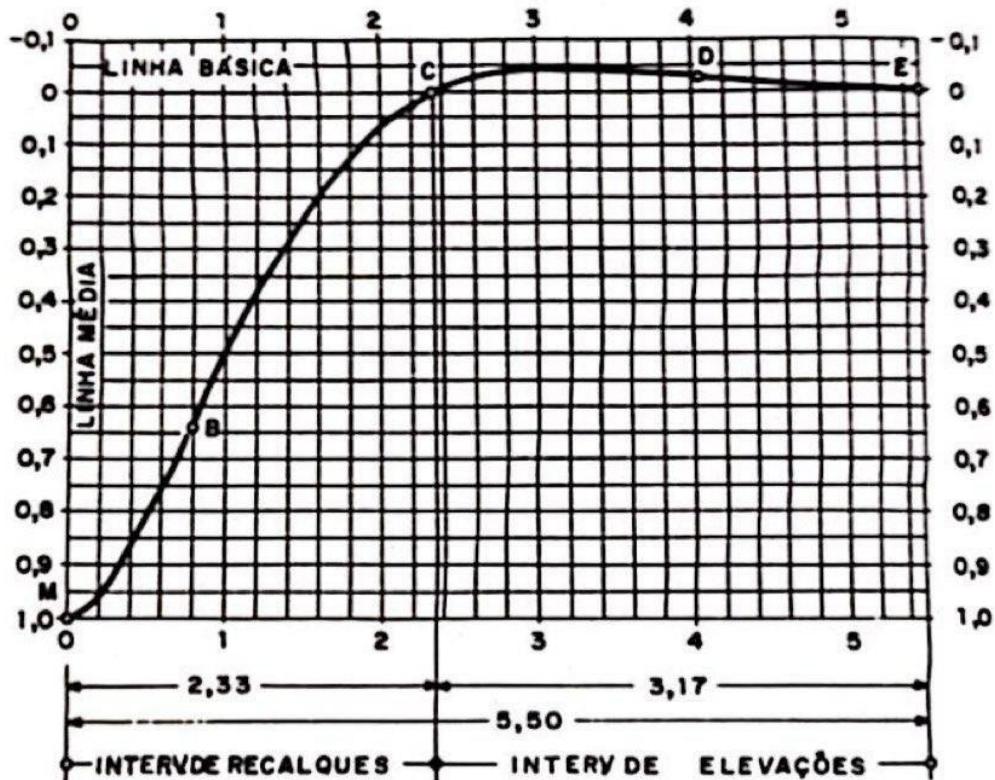
2.2.3 Método de Schramm

O método proposto por Schramm inicia-se pela determinação da tensão exercida na interface entre o dormente e o lastro, a qual será distribuída até a plataforma. Stopatto (1986) apresentou o cálculo de R (reação sobre o dormente devida ao carregamento do material rodante) desenvolvido por Schramm sendo diretamente proporcional à carga estática por roda do material rodante (P_r) e ao coeficiente K (equação 12).

$$R = K \times P_r \quad (12)$$

O coeficiente K foi determinado experimentalmente em 1942 na Inglaterra com cargas exercidas por locomotivas, resultando em valores que variaram entre 0,4 e 0,8. Para isso, foram desprezados valores com frequência inferior a 25%, os quais Schramm (1977, p. 99) indicou que “provavelmente ocorreram imprecisões de medição”. Essa metodologia, no entanto, é adequada para os cálculos referentes aos dormentes tendo em vista seu elevado valor. Schramm (1977, p. 111) apontou que “o valor médio é, na realidade, algo menor”. Portanto, para a determinação da tensão no lastro, o autor partiu da curva de flexão da via desenvolvida por Zimmermann considerando o trilho assentado sobre apoio contínuo e perfeitamente elástico, apresentada na Figura 11.

Figura 11 - Curva de flexão da via por Zimermann



Fonte: Schramm, 1977, p. 110

Para adaptar o traçado da curva a diferentes casos, basta multiplicar as ordenadas por y e as abscissas por L . O parâmetro y refere-se ao deslocamento vertical que o dormente experimenta devido a carga vertical transmitida pelo trilho, sendo calculado pela equação 13. Schramm (1977) utilizou o coeficiente de compressibilidade do apoio (ξ), o qual abrange as características elásticas do lastro e do solo da plataforma.

$$y = 2\xi P_r \quad (13)$$

A determinação de ξ , no entanto, é de elevado custo e alta complexidade, de modo que seus resultados refletem apenas as condições do trecho de linha ensaiado, sem haver correlações ao restante da via. Experiências realizadas em Munique indicaram que ξ varia entre 0,054 e 0,182 mm/Mgf, de modo que seu limite inferior é observado em solos mais resistentes, enquanto o superior ocorre em solos mais plásticos. Nesse sentido, Schramm (1977) recomendou que seja adotado 0,12 mm/Mgf, valor médio aferido com destacada frequência.

Já o parâmetro L expressa o vão de uma dada viga sobre dois apoios que fornece o efetivo momento fletor do trilho do ponto de aplicação da carga, sendo denominado

coeficiente básico da via permanente com dormentes longitudinais. Seu valor corresponde ao obtido pela equação 14, cujas variáveis são: E o módulo de elasticidade do aço de trilhos; J o momento de inércia do trilho; e d a distância entre dormentes, medida eixo a eixo. Schramm (1977) indicou que o valor de L em condições normais de superestrutura não se distancia de 70 cm, de modo que adotar esse valor médio não implica em imprecisões significativas.

$$L = \sqrt[4]{\frac{EJd\xi}{1250}} \quad (14)$$

Nessa concepção, existirão cinco dormentes solicitados pela carga de roda P_r , um diretamente sob a carga e, de ambos os lados, dois dormentes. Nomeando-os da esquerda para a direita, tem-se os dormentes de numeração de 1 a 5, com o dormente 3 sob P_r . As reações de apoio em cada dormente são proporcionais aos respectivos recalques (y_n), obtidos pela curva de Zimermann e pela equação 13, e à reação R_0 . As equações 15 e 16 permitem calcular a reação ocorrida em cada dormente do conjunto.

$$R_n = y_n R_0 \quad (15)$$

$$R_0 = \frac{P_r}{\sum_{n=1}^5 y_n} \quad (16)$$

Schramm (1977) considerou a ação das cargas dinâmicas multiplicando o valor da reação em cada dormente pelo coeficiente dinâmico α , determinado em função da velocidade da via em km/h (equação 17). Medições realizadas para velocidades de até 170 km/h mostraram que os valores de α obtidos pela equação apresentavam boa correspondência com os valores reais, os quais variavam entre 0,3 e 0,8 do resultado teórico, dependendo do tipo de material rodante. Dessa forma, verifica-se que a equação possui um alto grau de segurança.

$$\alpha = 1 + \frac{4,5V^2}{100000} - \frac{1,5V^3}{10000000} \quad (17)$$

A reação transmitida do trilho ao dormente é então distribuída na camada de lastro de cima para baixo, em linhas de contorno retilíneas formando um ângulo com a vertical. Conforme abordado no item 2.2.1, esse ângulo depende das características do lastro,

apresentando tipicamente um limite superior de 45° para lastros grossos, ásperos e secos e inferior de 33° para lastros finos, lisos e úmidos. Com base nessa premissa, o autor desenvolveu duas abordagens para o cálculo da tensão do lastro: uma para pequenas alturas e outra para grandes alturas de lastro, apresentadas na Figura 12.

Figura 12 - Distribuição de tensão para lastro de pequenas e grandes alturas

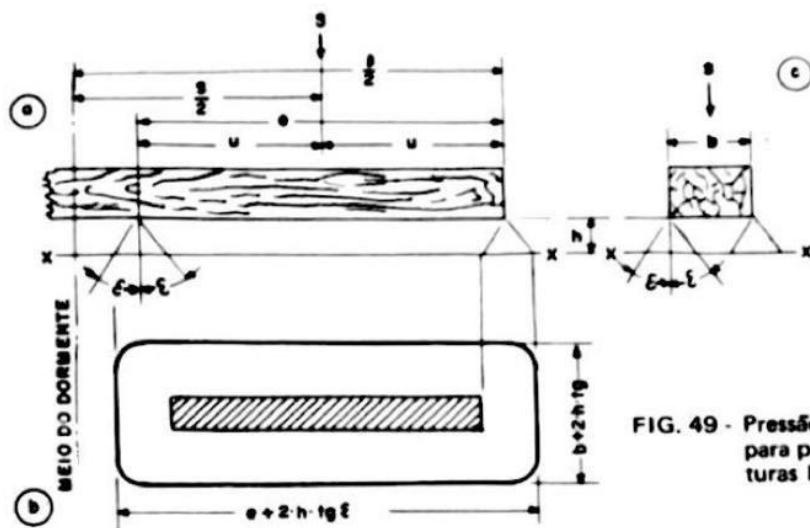


FIG. 49 - Pressão de lastro para pequenas alturas h do lastro.

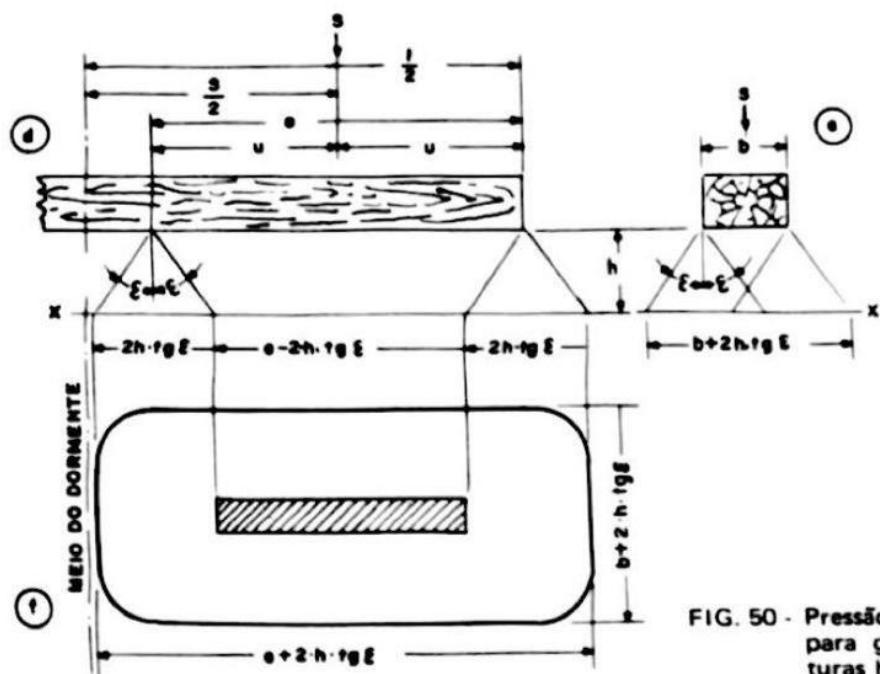


FIG. 50 - Pressão de lastro para grandes alturas h do lastro.

Fonte: Schramm, 1977, p. 113

O primeiro caso ocorre quando a altura de lastro h é tal que as retas limites do contorno da distribuição de tensão da transversal do dormente não se cruzam. Essa situação ocorre quando a equação 18 é verdadeira, sendo b a largura do dormente e ϵ o ângulo de espraiamento com a vertical. Assim, haverá uma região na interface lastro-plataforma cuja tensão máxima será idêntica à tensão na face de apoio do dormente. Essa tensão é determinada por Schramm (1977) pela equação 19 como a razão entre a reação R do material rodante transmitida do trilho ao dormente, em kgf, e a faixa carregada do lastro, de comprimento e e largura b , ambos em cm.

$$h \leq \frac{b}{2 \cdot \operatorname{tg} \epsilon} \quad (18)$$

$$P_0 = \frac{R}{e \cdot b} \quad (19)$$

Schramm (1977) admitiu que a faixa carregada atinge a extremidade do dormente, de modo que o parâmetro e pode ser estabelecido como o dobro da semi-largura da faixa carregada do lastro, identificada por u (Figura 3). Esta, por sua vez, é calculada por meio da equação 21 em função do comprimento do dormente (l) e da distância entre trilhos (S).

$$e = 2u \quad (20)$$

$$u = \frac{l - S}{2} \quad (21)$$

Nesse contexto, é possível determinar a faixa sem carregamento do lastro, expressa por f (equação 22). A norma ABNT NBR 7914:1990 estabelece os valores mínimos de f segundo a bitola da via, apresentados no Quadro 9. Dessa forma, é recomendado que o valor de f seja tomado como o máximo entre o obtido pela equação 22 e o indicado pela norma. Por fim, a tensão máxima que chega na interface lastro-plataforma é obtida pela equação 23, correspondendo à tensão na face inferior do dormente em contato com o lastro.

$$f = 4u - l \quad (22)$$

Quadro 9 - Largura mínima da faixa sem carregamento do lastro

Bitola da via	f (cm)
Métrica	30
Normal	40
Larga	40

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7914:1990

$$P_0 = \frac{R}{(l - S)b} \quad (23)$$

Contudo, caso objetive-se obter uma distribuição de tensão que chegue à plataforma com intensidade menor do que na face de apoio do dormente, é necessário que a altura de lastro esteja no intervalo indicado na equação 24, correspondendo a segunda abordagem determinada por Schramm (1977), denominada grandes alturas. Para esta, a máxima tensão na interface lastro-plataforma P_h é obtida pela equação 25, desenvolvida pelo autor, no qual R refere-se à reação do material rodante transmitida aos dormentes pelos trilhos, l ao comprimento do dormente, S ao espaçamento entre trilhos, medido eixo a eixo, b à largura do dormente, h à altura de lastro medido sob a face inferior do dormente e ϵ ao ângulo da distribuição de tensão com a vertical.

$$h > \frac{b}{2 \cdot \operatorname{tg} \epsilon} \quad (24)$$

$$P_h = \frac{1,5R}{[3 \cdot (l - s) + b] \cdot h \cdot \operatorname{tg} \epsilon} \quad (25)$$

Assim, segundo Schramm (1977), a tensão na camada de lastro é influenciada tanto pelo comprimento l dos dormentes quanto pela qualidade do material empregado como lastro, expressa pelo ângulo de distribuição da tensão (ϵ). Nesse sentido, o autor calculou as máximas pressões de lastro, mantendo fixos os valores de R , b e h , e variando somente os parâmetros l e ϵ . Os resultados obtidos indicaram que a qualidade do lastro exerce maior influência na tensão do lastro do que o comprimento dos dormentes.

No sentido longitudinal da via, por sua vez, a largura b do dormente e o espaçamento d possuem grande relevância. Isso porque é essencial garantir a existência de pressão de lastro entre os dormentes, evitando que o solo da plataforma adentre para o lastro e cause o problema de laqueado, sobretudo em trechos de linha assentados sobre solos de baixa consistência. Schramm (1977) estabeleceu que a mínima altura

de lastro, portanto, seja tomada com valor superior à calculada pela equação 26, a qual fornece a altura em que ocorre tal fenômeno.

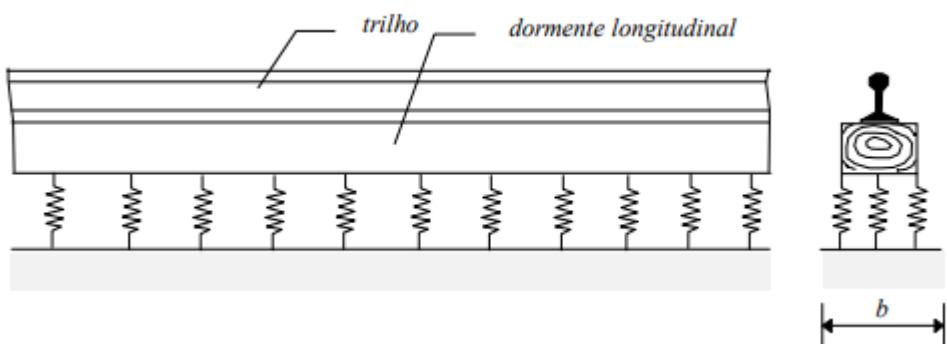
$$h = \frac{d - b}{2 \cdot \operatorname{tg} \epsilon} \quad (26)$$

De modo geral, Schramm (1977, p. 118) apontou como sendo vantajoso “grandes comprimentos l e larguras b para os dormentes, pequeno espaçamento dos dormentes e amplo ângulo ϵ de dispersão de pressão”.

2.2.4 Método de Eisenmann

O método de Eisenmann reúne diversas metodologias, dentre elas o emprego das curvas de deformação do método de Zimmermann para a determinação das tensões atuantes sob os dormentes. O modelo teórico de Zimmermann trata o trilho apoiado sobre dormentes como uma sapata infinita sobre um suporte elástico, assumindo que o lastro e as demais camadas subjacentes se comportam como molas (PAIVA, 2016). A Figura 13 contém o esquema considerado.

Figura 13 - Modelo teórico de Zimmermann

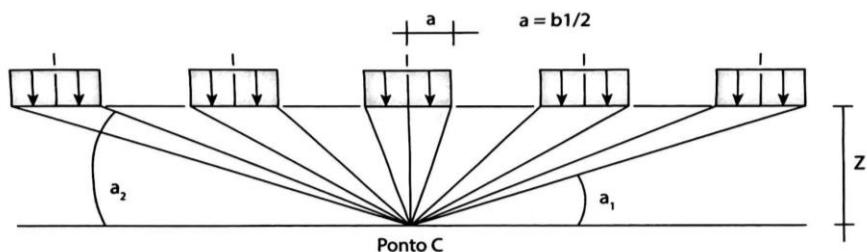


Fonte: GUIMARÃES (1999, p. 27)

Para o cálculo da tensão na interface lastro-plataforma em uma profundidade h , Eisenmann partiu da determinação da tensão sob um dormente carregado utilizando os conceitos desenvolvidos por Zimmermann. Já as tensões na plataforma foram determinadas por meio da teoria da meia área, baseada na ideia de que, ao aplicar uma carga na superfície de contato do dormente, as tensões não são uniformemente distribuídas, mas se concentram em uma área efetiva equivalente à metade da área total da superfície de contato (EISENMANN, s.d.).

Tendo em vista o formato bastante estreito da superfície de apoio dos dormentes, Eisenmann admitiu uma carga de faixa em vez de uma superfície retangular de carga. O desenvolvimento dos cálculos foi realizado em um laboratório para grandes cálculos, de modo que o método desenvolvido por Eisenmann é aplicado do seguinte modo: inicialmente, as cargas são distribuídas pelos dormentes e o conjunto dos cinco dormentes mais solicitados é escolhido para a determinação da tensão atuante; empregam-se, então, equações de distribuição de tensões a fim de determinar a tensão acumulada na plataforma no ponto C, localizado sob o dormente central do conjunto dos cinco dormentes, conforme Figura 14 (WATANABE, 2013).

Figura 14 - Conjunto dos cinco dormentes mais carregados e a distribuição das suas pressões na plataforma



Fonte: PAIVA (2016, p. 287)

A determinação da tensão atuante sob o dormente central, no ponto C e à profundidade h é efetuada pela equação 27, enquanto a tensão exercida pelos dormentes adjacentes no ponto C é determinada pela equação 28. Os parâmetros P_0 , d e h referem-se, respectivamente, à tensão na interface dormente-lastro, ao espaçamento entre dormentes e a profundidade do lastro, medida sob a face inferior do dormente. Já α_1 e α_2 são os ângulos entre as extremidades do dormente, com origem no ponto C. Ambas as equações são baseadas nas hipóteses de Boussinesq que consideram o semiespaço infinito, homogêneo e isotrópico, sendo conhecida como fórmula de Carothers-Terzaghi.

$$P_h = \frac{2P_0}{\pi} \left(\arctan \frac{d}{h} + \frac{dh}{d^2 + h^2} \right) \quad (27)$$

$$P_h = -\frac{P_0}{\pi} \left(\alpha_2 - \alpha_1 - \frac{1}{2} (\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1) \right) \quad (28)$$

O maciço onde ocorre a distribuição de tensões, no entanto, pode ser formado mais de uma camada, podendo ou não ter a camada de sublastro. Diante disso, Eisenmann empregou a fórmula de equivalência de camada de Odemark (equação 29) que

permite a transformação das camadas originais da via permanente em camadas equivalentes, convertendo suas espessuras.

$$h_{eq} = 0,9 \times h_1 \times \sqrt[3]{\frac{M_{r1}}{M_{r3}}} \quad (29)$$

O parâmetro h_{eq} refere-se à espessura equivalente da camada original transformada em plataforma, h_1 à espessura da camada original, M_{r1} ao módulo de resiliência da camada original e M_{r3} ao módulo de resiliência da plataforma (PAIVA, 2016; WATANABE, 2013). Paiva (2016) utilizou a equação 30 de Balbo (2007, apud Paiva, 2016) para determinar o módulo de resiliência da plataforma.

$$M_r = 18 CBR_{pl}^{0,64} \quad (30)$$

O cálculo da pressão na face inferior dos dormentes (P_0) é realizado pela equação 31, na qual P_d corresponde à carga dinâmica, x à distância entre o dormente adjacente e o dormente central e F à área da superfície de apoio do dormente. O parâmetro L será abordado nos parágrafos seguintes. Vale ressaltar que, na análise do dormente central, a razão x/L deve ser considerada igual a 1. Por fim, para determinação de P_d , a equação 32 considera a segurança estatística, o estado da via e o efeito da velocidade. Os parâmetros δ e t são tabelados e estão relacionados no Quadro 10.

$$P_0 = \frac{P_d x}{LF} \quad (31)$$

$$P_d = P_r(1 + t\bar{s}) \quad (32)$$

$$\bar{s} = \delta\varphi \quad (33)$$

$$\varphi = \begin{cases} 1 & \text{para } V \leq 60 \text{ km/h} \\ 1 + \frac{V - 60}{140} & \text{para } 60 < V < 200 \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \end{cases} \quad (34)$$

Onde:

- P_d : carga dinâmica por roda;
- P_r : carga nominal por roda;
- t : fator de segurança estatística;
- δ : fator de majoração pelo estado da via
- φ : fator de majoração pelo efeito da velocidade.

Quadro 10 - Parâmetros para o cálculo de P_0 pelo método de Eisenmann

Parâmetro	Valor
δ	0,1 para via em muito bom estado
	0,2 para via em bom estado
	0,3 para via em mal estado
t	3 para a solicitação do trilho e do dormente (segurança de 99,7%)
	1 para a solicitação máxima na plataforma, com o que a influência dos dormentes adjacentes estará considerada (segurança de 68,3%)

Fonte: Queiroz (1990).

Segundo Paiva (2016), o posicionamento das cargas do material rodante que resulta na pior situação de carregamento ocorre no primeiro truque da locomotiva e no último truque do vagão. O autor, então, forneceu duas sugestões: adotar uma grade composta por 35 dormentes; e posicionar uma carga sobre o centro de um dormente e a outra em função da distância entre eixos do truque.

Para o cálculo da tensão sob os dormentes adjacentes não carregados, Eisenmann utilizou a linha de influência da distância de eixos de Zimmermann, representada pelo coeficiente η (equação 35), em que x é a distância horizontal entre o ponto considerado e o ponto de aplicação da carga e L é o comprimento elástico, calculado pela equação 36 em função dos parâmetros: módulo de elasticidade do trilho (E); momento de inércia do trilho (I), largura da sapata corrida admitida (b); e coeficiente de lastro ou módulo de Winkler (c).

$$\eta = \frac{\sin(x/L) + \cos(x/L)}{e^{x/L}} \quad (35)$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bc}} \quad (36)$$

A largura da sapata corrida admitida, b , é determinada pela equação 37 onde o parâmetro u representa a semi-largura da faixa carregada de lastro, b_l a largura do dormente e d o espaçamento entre dormentes.

$$b = \frac{2ub_l}{d} \quad (37)$$

Dessa forma, realiza-se o estudo da distribuição das cargas nos dormentes considerando separadamente cada carga e a soma das duas, possibilitando a identificação dos cinco dormentes mais carregados. Paiva (2016) apresentou um exemplo de cálculo cuja análise foi conduzida por meio de tabelas, conforme a configuração apresentada no Quadro 11, avaliando a distribuição das cargas em um conjunto de 15 dormentes para cada carga.

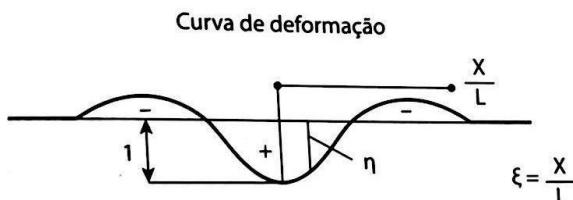
Quadro 11 - Exemplo de tabela para estudo da distribuição das cargas nos dormentes

Dormente nº	Distância x (cm)	x/L	η	$S_i = S_0\eta$
Soma				

Fonte: Adaptado de Paiva (2016), p. 294

O parâmetro S_0 refere-se à pressão exercida pelo trilho sobre o dormente situado diretamente sob a carga isolada e é determinado pela razão entre a carga dinâmica por roda (P_d) e o somatório de η . Já S_i reflete a pressão que o trilho exerce sobre os dormentes, proporcional ao coeficiente η . Essa metodologia é proveniente da curva de deformação desenvolvida por Zimermann, a qual está apresentada na Figura 15 (PAIVA, 2016).

Figura 15 - Curva de deformação de Zimermann



Fonte: Paiva (2016), p. 269

2.2.5 Tensão admissível da plataforma

Além da tensão atuante, é necessário conhecer a tensão admissível da plataforma para efetuar o dimensionamento da altura da camada de lastro ferroviário. Nesse sentido, Stopatto (1986) apresentou a fórmula de Heukelon (equação 38), adotada por Eisenmann em 1969 para ferrovias. Nela, a tensão admissível σ_{adm} é função do módulo de elasticidade do solo E_d e do número de ciclos ou repetições de carga,

denominado número N . Eisenmann relacionou o módulo de elasticidade do solo ao seu Índice de Suporte Califórnia (ISC), relação apresentada na equação 39.

$$\sigma_{adm} = \frac{0,006E_d}{1 + 0,7\log N} \quad (38)$$

$$E_d = 100 \cdot ISC \quad (39)$$

O número de ciclos N em ferrovias representa a quantidade de vezes que uma determinada seção da via férrea será submetida a carregamentos repetidos ao longo do tempo devido à passagem de trens. Dessa forma, pode ser obtido pela equação 40 que considera o período de projeto, a quantidade de eixos do trem, incluindo locomotivas e vagões, o número de trens por dia e a quantidade de dias trabalhados por ano.

$$N = [(L \times e_l) + (V \times e_v)] \times C \times D \times A \quad (40)$$

Onde:

- L : número de locomotivas por trem;
- e_l : número de eixos por locomotiva;
- V : número de vagões por trem;
- e_v : número de eixos por vagão;
- C : número de trens por dia, carregados e descarregados;
- D : número de dias trabalhados por ano;
- A : período de projeto.

Paiva (2016) indicou que o número máximo de solicitações empregado por Eisenmann foi de $2,0 \times 10^6$. Já Stopatto (1986) apresentou os valores do número N em função da classe da ferrovia, determinada pelos grupos da Rede Ferroviária Federal Sociedade Anônima (RFFSA), os quais estão listados no Quadro 12.

Quadro 12 - Valores de N em função dos nove grupos da RFFSA

Classe da ferrovia	Grupo da RFFSA	Número N
A	1	$2,2 \times 10^6$
B	2 e 3	$1,6 \times 10^6$
C	4, 5 e 6	$1,0 \times 10^6$
D	7, 8 e 9	$0,6 \times 10^6$

Fonte: Adaptado de Stopatto (1986, p. 18)

O critério para classificar a ferrovia nos nove grupos da RFFSA é descrito nas Normas e Instruções Gerais de Via Permanente (1986) da RFFSA, com base em valores fictícios representativos da tonelada/dia, expressos pelo parâmetro T (Quadro 13). O cálculo de T é realizado pelas equações 41, 42 e 43, em que: K é o coeficiente de proporcionalidade entre as toneladas-quilômetro brutas e as toneladas-quilômetro úteis por dia; Δ representa as toneladas-quilômetro por quilômetro de linha; $tkmu$ corresponde às toneladas-quilômetro brutas; $tkmb$ é a soma das toneladas-quilômetro brutas anuais de carga e de passageiros, considerando um passageiro equivalente a uma tonelada bruta para fins de cálculo; e D é a quilometragem total da linha a ser classificada.

Quadro 13 - Grupos da RFFSA segundo o valor de T

Grupo da RFFSA	T (tonelada/dia)
1	$T > 120.000$
2	$120.000 > T > 70.000$
3	$70.000 > T > 40.000$
4	$40.000 > T > 25.000$
5	$25.000 > T > 12.500$
6	$12.500 > T > 6.000$
7	$6.000 > T > 3.000$
8	$3.000 > T > 1.500$
9	$T < 1.500$

Fonte: Adaptado de RFFSA (1986, p. 51-52)

$$T = K \times \Delta \quad (41)$$

$$K = \frac{tkmb}{tkmu \times 365} \quad (42)$$

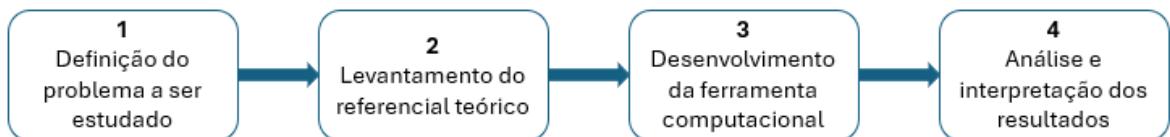
$$\Delta = \frac{tkmu}{D} \quad (43)$$

A RFFSA, responsável pela definição dos critérios de classificação descritos acima, foi extinta em 2007 como parte do processo de reestruturação e privatização do setor ferroviário no Brasil. Apesar disso, as normas e instruções por ela estabelecidas continuam sendo uma importante referência técnica para estudos relacionados à infraestrutura ferroviária.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento da presente pesquisa se deu por meio de quatro etapas sequenciadas, apresentadas na Figura 16.

Figura 16 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Autora (2025)

A primeira etapa consistiu na definição do dimensionamento da camada de lastro ferroviário como objeto de estudo (1). Essa escolha é justificada pela lacuna existente nas normas brasileiras, que apresentam a altura mínima do lastro em função de três classes de via férrea (I, II e III), porém sem especificar os critérios para essa classificação. Além disso, tais normas não indicam o método de cálculo empregado para determinar essas alturas nem sugerem métodos de cálculo alternativos.

O levantamento do referencial teórico (2) envolveu a busca e seleção de materiais relacionados ao objeto de estudo. Nesse sentido, foram consultadas normas técnicas e instruções de serviço brasileiras, artigos em endereço eletrônico e livros. Na busca dos artigos, foi utilizada, principalmente, a palavra-chave “Dimensionamento de lastro”, a qual permitiu identificar os principais métodos abordados e definir quais seriam os três métodos a serem estudados e, posteriormente, adotados na ferramenta computacional de cálculo.

O desenvolvimento da ferramenta computacional (3) tem como premissa o entendimento dos três métodos de cálculo escolhidos para que sejam aplicados em condições quaisquer fornecidas pelo usuário. Nesse sentido, foi utilizado o software de planilhas eletrônicas Microsoft Office Excel, versão 2021, e suas funções inerentes de cálculo.

A planilha eletrônica foi organizada em três abas, que serão detalhadas no capítulo 4: “Dados de entrada”, “Memória de cálculo” e “Resumo”. A aba “Dados de entrada” é onde o usuário deve inserir as informações necessárias ao dimensionamento da camada de lastro da via férrea estudada. A “Memória de cálculo” apresenta, de forma

detalhada, os resultados obtidos em cada etapa de cálculo e as fórmulas utilizadas. A aba “Resumo” condensa os resultados obtidos pelos métodos de Talbot, Schramm e Eisenmann.

Para avaliar os resultados fornecidos pela planilha eletrônica, foram testados diferentes dados de entrada cujos resultados eram previamente conhecidos, a fim de verificar se os resultados gerados pela planilha coincidiam com os valores esperados. Assim, em posse da ferramenta computacional desenvolvida e verificada, foi possível efetuar a análise dos resultados obtidos a partir dos métodos de Talbot, Schramm e Eisenmann e discutir suas diferenças, as quais serão detalhadas no capítulo 5.

4 FERRAMENTA COMPUTACIONAL

A ferramenta computacional adotada foi a planilha eletrônica, sendo desenvolvida e automatizada utilizando recursos inerentes ao *software* Microsoft Office Excel, versão 2021. A planilha foi organizada em três abas, nomeadas “Dados de entrada”, “Memória de cálculo” e “Resumo”, que serão detalhadas no presente capítulo.

4.1 DADOS DE ENTRADA

A aba “Dados de entrada” é onde o usuário deve inserir as informações necessárias ao dimensionamento da altura de lastro ferroviário, de modo que apresenta três colunas principais: sigla, parâmetro e valor adotado. A primeira corresponde a sigla utilizada para se referir ao respectivo parâmetro nas demais abas, servindo como legenda para o entendimento dos cálculos realizados na “Memória de cálculo”. Já a coluna “valor adotado” contém as células que deverão ser preenchidas.

Nesse contexto, existem alguns parâmetros que possuem valores previamente definidos partindo de uma informação qualitativa, como a qualidade da infraestrutura e o estado da via férrea. Assim, foram inseridas caixas de combinação com o objetivo de tornar o preenchimento intuitivo e minimizar possíveis erros.

Os parâmetros, ainda, foram segmentados levando em consideração ao que se referem. Tem-se, nesta ordem: características da via, trem-tipo ferroviário, propriedades do trilho, propriedades do dormente, lastro e plataforma. Buscou-se, assim, definir uma sequência lógica, de modo que o usuário insere as informações partindo das propriedades da via férrea e do material rodante, passando pelos elementos da superestrutura (trilho, dormente e lastro) e finalizando na plataforma.

A Figura 17 contém a interface da aba “Dados de entrada”. As células sem preenchimento indicam o local de inserção das informações.

Figura 17 - Interface da aba "Dados de entrada"

 UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL PLANILHA ELETRÔNICA DE DIMENSIONAMENTO DA CAMADA DE LASTRO FERROVIÁRIO PELOS MÉTODOS DE TALBOT, SCHRAMM E EISENMANN Amanda Babilon Andrade Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa	
DADOS DE ENTRADA		
SIGLA	PARÂMETRO	VALOR ADOTADO
Características da via		
FS	Fator de segurança	
Pe	Carga por eixo, kg	
V	Máxima velocidade da via, km/h	
S	Bitola	<input type="button" value="▼"/>
c	Infraestrutura	<input type="button" value="▼"/>
δ	Estado da via	<input type="button" value="▼"/>
Trem-tipo ferroviário		
L	Número de locomotivas por trem, un	
el	Número de eixos por locomotiva, un	
V	Número de vagões por trem, un	
ev	Número de eixos por vagão, un	
C	Número de trens por dia (carregados e descarregados), un	
D	Número de dias trabalhados por ano, dias	
A	Período de projeto, anos	
D	Distância entre centros de roda do truque, cm	
Dr	Diâmetro da roda, pol	
Propriedades do trilho		
Etr	Módulo de elasticidade do trilho, kgf/cm ²	
ltr	Inércia do trilho, cm ⁴	
Propriedades do dormente		
l	Comprimento do dormente, cm	
bl	Largura do dormente, cm	
d	Espaçamento entre dormentes eixo-eixo, cm	
u	Faixa de socaria, cm	
Lastro		
ε	Ângulo de espraiamento das tensões no lastro, graus*	<input type="button" value="▼"/>
* Admite-se o limite inferior em 33° para lastros finos, lisos e úmidos e limite superior de 45° para lastros grossos, ásperos e secos		
Plataforma		
CBRpl	CBR da plataforma, %	<input type="button" value="▼"/>

Fonte: Autora (2025)

4.2 MEMÓRIA DE CÁLCULO

A aba “Memória de cálculo” reúne todos os cálculos necessários para o dimensionamento da camada de lastro ferroviário. Com base nas informações

inseridas em “Dados de entrada”, ela gera um memorial de cálculo que inclui o parâmetro calculado, sua sigla e a equação utilizada. Além disso, são apresentados gráficos de tensão *versus* altura de lastro, permitindo a visualização do comportamento do lastro em relação às tensões solicitantes à medida que a altura da camada aumenta.

É dividida em quatro seções principais: a primeira corresponde à determinação da tensão admissível da plataforma, enquanto as demais são dedicadas aos cálculos específicos de cada método de dimensionamento – Talbot, Schramm e Eisenmann. Para facilitar a apresentação da memória de cálculo, foram arbitrados dados de entrada (Figura 18). O trem-tipo ferroviário adotado é composto por duas locomotivas *Dash9* e 86 vagões do tipo GDE, cujas características foram embasadas na planta do vagão da Centro-Oeste (2025). Quanto ao trilho, considerou-se o modelo TR-68 do Grupo Siderbras (2025).

Figura 18 - Dados de entrada

 UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL PLANILHA ELETRÔNICA DE DIMENSIONAMENTO DA CAMADA DE LASTRO FERROVIÁRIO PELOS MÉTODOS DE TALBOT, SCHRAMM E EISENMANN Amanda Babilon Andrade Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa	
DADOS DE ENTRADA			
SIGLA	PARÂMETRO	VALOR ADOTADO	
Características da via			
FS	Fator de segurança	5	
Pe	Carga por eixo, kg	27500	
V	Máxima velocidade da via, km/h	40	
S	Bitola	Métrica	
c	Infraestrutura	Boa	
δ	Estado da via	Bom estado	
Trem-tipo ferroviário			
L	Número de locomotivas por trem, un	2	
el	Número de eixos por locomotiva, un	8	
V	Número de vagões por trem, un	86	
ev	Número de eixos por vagão, un	4	
C	Número de trens por dia (carregados e descarregados), un	20	
D	Número de dias trabalhados por ano, dias	365	
A	Período de projeto, anos	30	
D	Distância entre centros de roda do truque, cm	172,7	
Dr	Diâmetro da roda, pol	29	
Propriedades do trilho			
Etr	Módulo de elasticidade do trilho, kgf/cm ²	2100000	
ltr	Inércia do trilho, cm ⁴	3920,9	
Propriedades do dormente			
l	Comprimento do dormente, cm	220	
bl	Largura do dormente, cm	26	
d	Espaçamento entre dormentes eixo-eixo, cm	50	
u	Faixa de socaria, cm	60	
Lastro			
ε	Ângulo de espraiamento das tensões no lastro, graus*	40	
* Admite-se o limite inferior em 33° para lastros finos, lisos e úmidos e limite superior de 45° para lastros grossos, ásperos e secos			
Plataforma			
CBRpl	CBR da plataforma, %	60	

Fonte: Autora (2025)

Para a primeira seção, são adotados os conceitos e diretrizes apresentados no item 2.2.5, calculando a tensão admissível por meio da equação 38, desenvolvida por

Heukelon, em função do módulo de elasticidade E_d e o número de ciclos ou repetições de carga N experimentados pela ferrovia durante a vida útil de projeto.

O último parâmetro, contudo, pode ser obtido por diferentes abordagens. Nesta pesquisa, foram consideradas três: a de Stopatto (1986), que segue a classificação da extinta RFFSA; a de Eisenmann, citada por Paiva (2016) como um valor constante recomendado; e a da quantidade de repetições de carga na vida útil do projeto. Diante disso, optou-se na planilha eletrônica por calcular o número N pelo método da quantidade de repetições de carga, utilizando a equação 40, tendo em vista que torna a estimativa mais precisa já que considera a operação da via e as propriedades do trem-tipo ferroviário.

A primeira seção finaliza com a consideração do fator de segurança a ser adotado no dimensionamento da via. Assim, a tensão admissível da plataforma obtida pela equação de Heukelon é dividida pelo fator de segurança adotado. Nas etapas seguintes, a tensão admissível considerada é esta minorada. A Figura 19 apresenta a seção abordada, de modo que a tensão admissível da plataforma para os dados de entrada da Figura 18 é de 1,10 kgf/cm².

Figura 19 - Memória de cálculo: determinação da tensão admissível da plataforma

 UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL PLANILHA ELETRÔNICA DE DIMENSIONAMENTO DA CAMADA DE LASTRO FERROVIÁRIO PELOS MÉTODOS DE TALBOT, SCHRAMM E EISENMANN Amanda Babilon Andrade Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa MEMÓRIA DE CÁLCULO
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

1) DETERMINAÇÃO DA TENSÃO ADMISSÍVEL DA PLATAFORMA POR HEUKELON

E_{dPL}	6000,00	$100CBR_{PL}$	Módulo de elasticidade da plataforma
N	78840000,00	$(Le_l + Ve_v)CDA$	Número de repetições de carga
σ_{admPL}	5,51 kgf/cm ²	$0,006E_{dPL}/(1 + \log N)$	Tensão admissível na plataforma
$\sigma_{admPLFS}$	1,10 kgf/cm ²	σ_{adm}/FS	Tensão admissível na plataforma com fator de segurança

Fonte: Autora (2025)

Em seguida, são apresentados os cálculos específicos para cada método. O método de Talbot é segmentado em duas seções: tensão na interface dormente-lastro e determinação da altura mínima da camada de lastro. A primeira refere-se ao cálculo da pressão média que atua na face inferior do dormente em contato com o lastro socado, denominada P_m , apresentada na Figura 20. Nesse sentido, são adotadas as abordagens de Driecsen e da AREMA, descritas no subcapítulo 2.2.2.

Figura 20 - Método de Talbot: seção de cálculo da tensão na interface dormente-lastro

2) **MÉTODO DE TALBOT**

P_r	13.750,00 kgf	$P_e/2$	Peso estático por roda do material rodante
A_b	1.560,00 cm^2	bc	Área de socaria

3.1) **Tensão na interface dormente-lastro**

3.1.1) Driecsen

N	3,45	D/d	
C	1,34	$1,237(V/D_r)^{0,243}$	Coeficiente de impacto da via
R	5324,61 kgf	$P_r C/N$	Reação sobre um apoio do dormente
P_m	3,41 kgf/cm^2	R/A_b	Tensão na interface dormente-lastro segundo Driecsen

3.1.2) AREMA

N	3,45	D/d	
C_d	1,05	$1 + V^2/30000$	Coeficiente dinâmico
R	4193,21 kgf	$P_r C_d/N$	Reação sobre um apoio do dormente
P_m	2,69 kgf/cm^2	R/A_b	Tensão na interface dormente-lastro segundo AREMA

3.1.3) Resumo

P_m (kgf/cm^2)	
Driecsen	AREMA
3,41	2,69

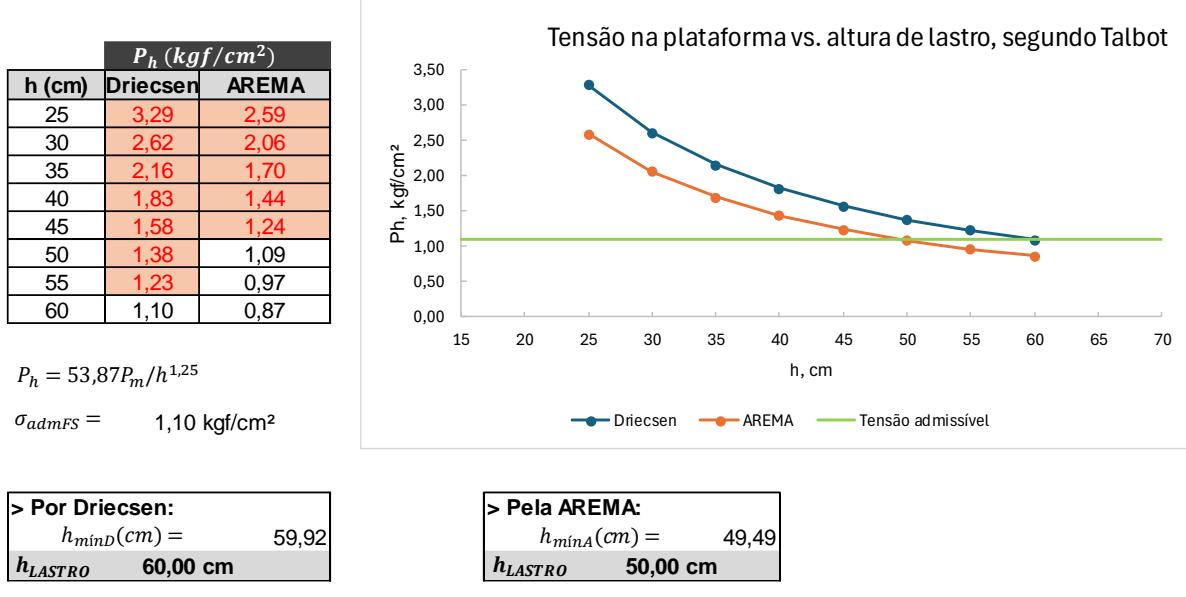
Fonte: Autora (2025)

A segunda seção contém as tensões atuantes na plataforma considerando diferentes alturas de lastro, determinadas pelo emprego da equação 1 desenvolvida por Talbot. Nesse sentido, são obtidos os resultados para o parâmetro P_h considerando os valores de P_m das abordagens de Driecsen e da AREMA, obtidos na seção anterior. As células com preenchimento e fonte na cor vermelha sinalizam tensões superiores à tensão admissível da plataforma.

Para melhor visualização da tensão atuante em função do aumento da altura de lastro, é gerado um gráfico com os resultados obtidos no intervalo compreendido entre a altura mínima de 25,00 cm (referente à altura mínima indicada na ABNT NBR 7914:1990) e máxima de 60,00 cm (adotada frente aos valores comumente encontrados na prática). Por fim, para as abordagens de Driecsen e da AREMA, é calculada a altura mínima de lastro para que a tensão recebida pela plataforma seja igual ou inferior à admissível. Caso o resultado da altura seja inferior a 25,00 cm, é adotada a altura de 25,00 cm. Os resultados para os dados de entrada da Figura 18 são apresentados na Figura 21.

Figura 21 - Método de Talbot: seção destinada à determinação da altura mínima de lastro

3.2) Determinação da altura mínima de lastro



Fonte: Autora (2025)

Observa-se que, com base na abordagem de Driecsen para a determinação de P_m e no método de Talbot para o cálculo de P_h , é necessária a espessura de, no mínimo, 60,00 cm para a camada de lastro. Considerando a abordagem da AREMA para determinação de P_m , esse valor é reduzido para 50,00 cm.

Em seguida, são realizados os cálculos para o método de Schramm seguindo as diretrizes descritas no subcapítulo 2.2.3. Assim como no método de Talbot, o procedimento adotado foi segmentado em duas seções principais: faixa de recalque de Zimmermann e determinação da altura mínima de lastro. A primeira seção é destinada à determinação da reação R do material rodante no dormente central (nº 3), utilizando a curva de flexão de Zimmermann e as considerações feitas por Schramm (1977).

Nesse sentido, para ajustar a curva de flexão aos dados de entrada fornecidos pelos usuários da planilha eletrônica, adotou-se o coeficiente básico da via permanente com dormentes longitudinais (L) igual a 70,00 cm, tendo em vista a recomendação de Schramm (1977). De igual modo, o deslocamento vertical do dormente central foi calculado pela equação 13, considerando ξ igual a 0,12 mm/Mgf, também seguindo a recomendação de Schramm (1977). A Figura 22 contém os resultados da seção para os dados de entrada da Figura 18.

Figura 22 - Método de Schramm: seção destinada ao cálculo da faixa de recalque de Zimmermann

4) MÉTODO DE SCHRAMM

P_r	13750,00 kgf	$P_e/2$	
L	70,00 cm		Coefficiente básico da via permanente
y_c	0,33 cm	$2 \times 0,000012 \times P_r$	Recalque do dormente
α	1,06	$1 + \frac{4,5V^2}{100000} - \frac{1,5V^3}{10000000}$	Coefficiente dinâmico

4.1) Faixa de recalque de Zimmermann

Localização	x (cm)	y da curva de recalque	y (cm)	Reação R (kgf)	Rα (kgf)
-2,33L	-163	0,00	0,0000	0,00	0,00
Dormente 1	-100	0,13	0,0429	744,79	791,27
Dormente 2	-50	0,57	0,1881	3265,63	3469,40
Dormente 3	0	1,00	0,3300	5729,17	6086,67
Dormente 4	50	0,57	0,1881	3265,63	3469,40
Dormente 5	100	0,13	0,0429	744,79	791,27
2,33L	163	0,00	0,0000	0,00	0,00
		SOMA	0,792		
		R_0 (kgf)	17361,11		

$$y = \text{Ordenada de Zimmermann} \times y_c$$

$$R_0 = P_r / \sum y$$

$$R = y \times R_0$$

Fonte: Autora (2025)

A última seção do método de Schramm trata da determinação da altura mínima de lastro. Assim como no método de Talbot, foi estabelecido um intervalo entre 25,00 e 60,00 cm de altura de lastro, no qual são apresentadas as tensões atuantes na superfície da plataforma para cada altura. Para melhor visualização, as células contendo tensões superiores à tensão admissível da plataforma são preenchidas e apresentam fonte do texto na cor vermelha.

Além do critério relacionado à capacidade de suporte da plataforma, calcula-se também a altura mínima de lastro para garantir que toda a região da plataforma entre os dormentes esteja submetida a tensões, evitando o laqueado. Os resultados obtidos na referida seção para os dados de entrada da Figura 18 são apresentados na Figura 23.

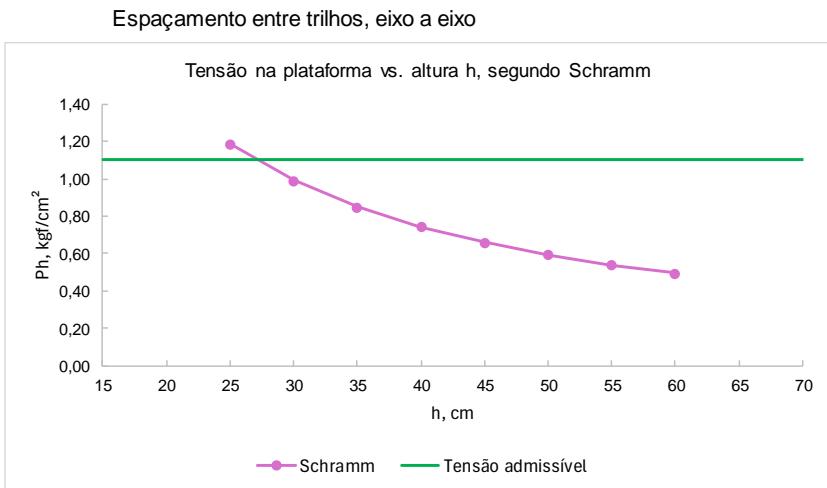
Figura 23 - Método de Schramm: seção destinada à determinação da altura mínima de lastro

4.2) Determinação da altura mínima de lastro

S 106,5 cm

h (cm)	$P_h (kgf/cm^2)$
25	1,19
30	0,99
35	0,85
40	0,74
45	0,66
50	0,59
55	0,54
60	0,49

$$P_h = \frac{1,5R_3}{[3(l-S) + b]h \tan \epsilon}$$



> Altura mínima de lastro quanto à tensão atuante, segundo Schramm:

$$h_{minS1} = 30 \text{ cm}$$

> Altura mínima de lastro para evitar laqueado, segundo Schramm:

$$h_{minS2} = 14,30 \text{ cm} \Rightarrow h_{minS2} = 15 \text{ cm}$$

$h_{LASTRO} = 30 \text{ cm}$

MÁXIMO(h_{minS1}; h_{minS2}) - h_{SL}

Fonte: Autora (2025)

Desse modo, para o caso em análise, nota-se que, considerando a capacidade de suporte da plataforma, a altura mínima da camada de lastro é de 30,00 cm. Já o critério de suscetibilidade ao laqueado apresenta a altura mínima de 15,00 cm. Adota-se, então, o valor máximo dentre as duas verificações, igual a 30,00 cm para o caso analisado.

O terceiro método de dimensionamento é o de Eisenmann. A metodologia de cálculo empregada segue os conceitos apresentados no subcapítulo 2.2.4 e foi dividido em três seções: determinação dos cinco dormentes mais carregados; tensão no ponto C; e resumo dos resultados. Esse método requer uma maior quantidade de parâmetros, os quais são inicialmente determinados e calculados para serem utilizados nas etapas subsequentes, conforme Figura 24.

Figura 24 - Método de Eisenmann: determinação e cálculo dos parâmetros iniciais

5) MÉTODO DE EISENMANN

P_r	13750 kgf	$P_e/2$	Carga estática por roda
φ	1,00	$\varphi = \begin{cases} 1 & \text{para } V \leq 60 \text{ km/h} \\ 1 + \frac{V - 60}{140} & \text{para } 60 < V < 200 \text{ km/h} \end{cases}$	Fator de majoração pelo efeito da velocidade
δ	0,20		Fator de majoração pelo estado da via
\bar{s}	0,20	$\delta\varphi$	
t	1		Fator de segurança estatística
P_d	16500,00 kgf	$P_r(1 + t\bar{s})$	Carga dinâmica por roda
c	5 kgf/cm ²		Tabelado em função da infraestrutura da via
S	106,5 cm		Tabelado em função da bitola da via
u	56,75 cm	$(l - S)/2$	Largura da faixa de lastro carregada
b	59,02 cm	$2ub_l/d$	Largura da sapata corrida admitida

Fonte: Autora (2025)

Na determinação dos cinco dormentes mais carregados, optou-se pelo estudo da grade composta por 35 dormentes, numerados de 1 a 35, levando em consideração a recomendação de Paiva (2016). Com isso, a carga 01 foi posicionada no eixo do dormente nº 17 e a carga 02 posicionada com base na distância entre eixos do truque, a partir do dormente nº 17. Com isso, as cargas geradas em cada cenário foram somadas, sendo possível obter o conjunto dos cinco dormentes mais carregados, conforme Figura 25 e Figura 26.

Figura 25 - Método de Eisenmann: posicionamento das cargas 01 e 02

5.1) Determinação dos cinco dormentes mais carregados

Carga	01
P_d	16500,00 kgf
d	50 cm
c	5 kgf/cm ²
L	102,78 cm

$$L = \sqrt[4]{4EI/bc}$$

Carga	02
P_d	16500,00 kgf
d	50 cm
c	5 kgf/cm ²
L	102,78 cm

Posição da carga,
com referencial no
dormente nº 17:
972,7 cm

Dormente nº	Distânci a x (cm)	x/L	η	$S_0\eta$ (kgf)
1	800	7,78334043	0,000444985	1,79
2	750	7,29688166	0,000933474	3,74
3	700	6,81042288	0,001507128	6,05
4	650	6,3239641	0,001864421	7,48
5	600	5,83750532	0,001374205	5,51
6	550	5,35104655	-0,000980789	-3,93
7	500	4,86458777	-0,006456136	-25,90
8	450	4,37812899	-0,015971173	-64,07
9	400	3,89167022	-0,028847829	-115,73
10	350	3,40521144	-0,040703929	-163,29
11	300	2,91875266	-0,040731523	-163,40
12	250	2,43229389	-0,009443764	-37,89
13	200	1,94583511	0,080603877	323,36
14	150	1,45937633	0,256778581	1030,11
15	100	0,97291755	0,525171848	2106,82
16	50	0,48645878	0,830897055	3333,30
17	0	0	1	4011,68
18	50	0,48645878	0,830897055	3333,30
19	100	0,97291755	0,525171848	2106,82
20	150	1,45937633	0,256778581	1030,11
21	200	1,94583511	0,080603877	323,36
22	250	2,43229389	-0,009443764	-37,89
23	300	2,91875266	-0,040731523	-163,40
24	350	3,40521144	-0,040703929	-163,29
25	400	3,89167022	-0,028847829	-115,73
26	450	4,37812899	-0,015971173	-64,07
27	500	4,86458777	-0,006456136	-25,90
28	550	5,35104655	-0,000980789	-3,93
29	600	5,83750532	0,001374205	5,51
30	650	6,3239641	0,001864421	7,48
31	700	6,81042288	0,001507128	6,05
32	750	7,29688166	0,000933474	3,74
33	800	7,78334043	0,000444985	1,79
34	850	8,26979921	0,000130847	0,52
35	900	8,75625799	-2,59696E-05	-0,10
SOMA		4,11299	16500,00	
S_0 (kgf)		4011,684227		

Dormente nº	Posição	Distância x (cm)	x/L	η	$S_0\eta$ (kgf)
1	0	972,7	9,46357	-8E-05	-0,32
2	50	922,7	8,97711	-6E-05	-0,24
3	100	872,7	8,49065	4,3E-05	0,17
4	150	822,7	8,00419	0,00028	1,13
5	200	772,7	7,51773	0,00069	2,78
6	250	722,7	7,03128	0,00125	5,01
7	300	672,7	6,54482	0,00176	7,07
8	350	622,7	6,05836	0,00176	7,06
9	400	572,7	5,5719	0,0004	1,60
10	450	522,7	5,08544	-0,0035	-14,08
11	500	472,7	4,59898	-0,0111	-44,71
12	550	422,7	4,11252	-0,0227	-91,33
13	600	372,7	3,62606	-0,036	-144,36
14	650	322,7	3,1396	-0,0432	-173,50
15	700	272,7	2,65315	-0,0291	-117,01
16	750	222,7	2,16669	0,03052	122,53
17	800	172,7	1,68023	0,16487	661,92
18	850	122,7	1,19377	0,39337	1579,33
19	900	72,7	0,70731	0,69504	2790,49
20	950	22,7	0,22085	0,95801	3846,29
21	1000	27,3	0,26561	0,94112	3778,48
22	1050	77,3	0,75207	0,66628	2675,03
23	1100	127,3	1,23852	0,36849	1479,46
24	1150	177,3	1,72498	0,1487	597,01
25	1200	227,3	2,21144	0,02235	89,72
26	1250	277,3	2,6979	-0,0319	-128,14
27	1300	327,3	3,18436	-0,0431	-173,19
28	1350	377,3	3,67082	-0,0348	-139,82
29	1400	427,3	4,15728	-0,0215	-86,51
30	1450	477,3	4,64374	-0,0103	-41,19
31	1500	527,3	5,13019	-0,003	-12,07
32	1550	577,3	5,61665	0,00061	2,45
33	1600	627,3	6,10311	0,0018	7,22
34	1650	677,3	6,58957	0,00173	6,93
35	1700	727,3	7,07603	0,0012	4,80
SOMA		4,10972	16500,00		
S_0 (kgf)		4014,88			

Fonte: Autora (2025)

Figura 26 - Método de Eisenmann: determinação do conjunto dos cinco dormentes mais carregados

Dormente nº	Carga 01	Carga 02	Soma das cargas (kgf)	Dormente de início	Dormente fim	Soma do intervalo (kgf)	Soma máxima (kgf)	Dormente de inicio	Dormente fim
1	1,78514	-0,3235236	1,46161587	1	5	28,0847	23461,78702	17	21
2	3,7448	-0,2375529	3,507249208	2	6	27,7031			
3	6,04612	0,1727967	6,218917278	3	7	5,36389			
4	7,47947	1,12539611	8,604864041	4	8	-57,8677			
5	5,51288	2,77915695	8,292033453	5	9	-180,602			
6	-3,9346	5,01465298	1,080037349	6	10	-366,262			
7	-25,9	7,06802356	-18,83195714	7	11	-575,454			
8	-64,071	7,05858467	-57,01271853	8	12	-685,84			
9	-115,73	1,59893705	-114,1294449	9	13	-449,827			
10	-163,29	-14,076474	-177,3677783	10	14	520,919			
11	-163,4	-44,710139	-208,1121491	11	15	2688,1			
12	-37,885	-91,332103	-129,2175025	12	16	6352,04			
13	323,357	-144,3575	178,9998016	13	17	11154,9			
14	1030,11	-173,49787	856,6167155	14	18	15888,5			
15	2106,82	-117,01046	1989,813159	15	19	19929,2			
16	3333,3	122,526414	3455,823025	16	20	22815,8			
17	4011,68	661,919838	4673,604066	17	21	23461,8			
18	3333,3	1579,32963	4912,626242	18	22	21425,3			
19	2106,82	2790,49015	4897,313766	19	23	17828,8			
20	1030,11	3846,29384	4876,408419	20	24	13365,2			
21	323,357	3778,47723	4101,834532	21	25	8462,74			
22	-37,885	2675,02656	2637,141163	22	26	4168,7			
23	-163,4	1479,45875	1316,056742	23	27	1332,46			
24	-163,29	597,007122	433,7158126	24	28	-127,345			
25	-115,73	89,7180546	-26,01032735	25	29	-642,061			
26	-64,071	-128,13616	-192,2074622	26	30	-649,76			
27	-25,9	-173,19018	-199,0901598	27	31	-463,577			
28	-3,9346	-139,81778	-143,7523961	28	32	-258,293			
29	5,51288	-86,513915	-81,00103836	29	33	-105,532			
30	7,47947	-41,188887	-33,70941873	30	34	-17,0794			
31	6,04612	-12,070192	-6,024071077	31	35	16,63			
32	3,7448	2,44872421	6,193526306						
33	1,78514	7,22393606	9,009075493						
34	0,52492	6,92655223	7,451469205						

Fonte: Autora (2025)

Por meio da Figura 26, observa-se que o conjunto dos cinco dormentes mais carregados é compreendido do dormente 17 ao 21, com uma carga total de 23.461,8 kgf. Assim, esses dormentes serão utilizados no dimensionamento da altura de lastro pois representam o cenário mais crítico de solicitação.

Em seguida, as tensões no ponto C são determinadas para cada altura de lastro, sendo inicialmente a altura de lastro convertida em camada equivalente de plataforma utilizando a equações de Balbo (2007 apud Paiva, 2016) e Odemark. As Figuras 27 a 34 contém os resultados das tensões atuantes na superfície da plataforma obtidos para as alturas de lastro compreendidas entre 25,00 e 60,00 cm.

Figura 27 - Método de Eisenmann: tensão no ponto C com altura de lastro de 25,00 cm

5.2) Tensão no ponto C

4.2.1) *Determinação das camadas equivalentes*

M_{rPL}

2473,37 kgf/cm²

$$18CBR_{pl}^{0,64}$$

M_r lastro 2200,00 kgf/cm²

4.2.2) *Determinação das tensões sob os dormentes e no ponto C*

$d =$	50,00 cm	Distância entre dormentes, eixo a eixo
$Ad/2 =$	2951,00 cm ²	Semi-área de contato de cada trilho
$bl/2 =$	13,00 cm	Meia-largura do dormente

> Altura de lastro = 25 cm

h_{eqL} 21,64 cm

Dormente	17	18	19	20	21
Carga (kgf)	4673,60	4912,63	4897,31	4876,41	4101,83
Pressão (kgf/cm ²)	1,58	1,66	1,66	1,65	1,39
Distância horiz. (cm)	100,00	50,00	0,00	50,00	100,00
Z (cm)	21,64	21,64	21,64	21,64	21,64
α_2	0,24377	0,52919		0,52919	0,24377
α_1	0,18920	0,33084		0,33084	0,18920
Pressão em z (kgf/cm ²)	0,00255	0,03698	1,03795	0,03671	0,00224
Soma em C (kgf/cm ²)				1,12	

Fonte: Autora (2025)

Figura 28 - Método de Eisenmann: tensão no ponto C com altura de lastro de 30,00 cm

> Altura de lastro = 30 cm

h_{eqL} 25,97 cm

Dormente	17	18	19	20	21
Carga (kgf)	4673,60	4912,63	4897,31	4876,41	4101,83
Pressão (kgf/cm ²)	1,58	1,66	1,66	1,65	1,39
Distância horiz. (cm)	100,00	50,00	0,00	50,00	100,00
Z (cm)	25,97	25,97	25,97	25,97	25,97
α_2	0,29005	0,61193		0,61193	0,29005
α_1	0,22587	0,39095		0,39095	0,22587
Pressão em z (kgf/cm ²)	0,00423	0,05462	0,91332	0,05422	0,00371
Soma em C (kgf/cm ²)				1,03	

Fonte: Autora (2025)

Figura 29 - Método de Eisenmann: tensão no ponto C com altura de lastro de 35,00 cm

> Altura de lastro = 35 cm

 h_{eqL} 30,29 cm

Dormente	17	18	19	20	21
Carga (kgf)	4673,60	4912,63	4897,31	4876,41	4101,83
Pressão (kgf/cm ²)	1,58	1,66	1,66	1,65	1,39
Distância horiz. (cm)	100,00	50,00	0,00	50,00	100,00
Z (cm)	30,29	30,29	30,29	30,29	30,29
α_2	0,33508	0,68607		0,68607	0,33508
α_1	0,26193	0,44821		0,44821	0,26193
Pressão em z (kgf/cm ²)	0,00641	0,07325	0,81113	0,07271	0,00562
Soma em C (kgf/cm ²)			0,97		

Fonte: Autora (2025)

Figura 30 - Método de Eisenmann: tensão no ponto C com altura de lastro de 40,00 cm

> Altura de lastro = 40 cm

 h_{eqL} 34,62 cm

Dormente	17	18	19	20	21
Carga (kgf)	4673,60	4912,63	4897,31	4876,41	4101,83
Pressão (kgf/cm ²)	1,58	1,66	1,66	1,65	1,39
Distância horiz. (cm)	100,00	50,00	0,00	50,00	100,00
Z (cm)	34,62	34,62	34,62	34,62	34,62
α_2	0,37874	0,75220		0,75220	0,37874
α_1	0,29730	0,50250		0,50250	0,29730
Pressão em z (kgf/cm ²)	0,00906	0,09161	0,72718	0,09094	0,00796
Soma em C (kgf/cm ²)			0,93		

Fonte: Autora (2025)

Figura 31 - Método de Eisenmann: tensão no ponto C com altura de lastro de 45,00 cm

> Altura de lastro = 45 cm

 h_{eqL} 38,95 cm

Dormente	17	18	19	20	21
Carga (kgf)	4673,60	4912,63	4897,31	4876,41	4101,83
Pressão (kgf/cm ²)	1,58	1,66	1,66	1,65	1,39
Distância horiz. (cm)	100,00	50,00	0,00	50,00	100,00
Z (cm)	38,95	38,95	38,95	38,95	38,95
α_2	0,42093	0,81106		0,81106	0,42093
α_1	0,33193	0,55373		0,55373	0,33193
Pressão em z (kgf/cm ²)	0,01217	0,10877	0,65762	0,10797	0,01068
Soma em C (kgf/cm ²)			0,90		

Fonte: Autora (2025)

Figura 32 - Método de Eisenmann: tensão no ponto C com altura de lastro de 50,00 cm

> Altura de lastro = 50 cm

 h_{eqL} 43,28 cm

Dormente	17	18	19	20	21
Carga (kgf)	4673,60	4912,63	4897,31	4876,41	4101,83
Pressão (kgf/cm ²)	1,58	1,66	1,66	1,65	1,39
Distância horiz. (cm)	100,00	50,00	0,00	50,00	100,00
Z (cm)	43,28	43,28	43,28	43,28	43,28
α_2	0,46159	0,86343		0,86343	0,46159
α_1	0,36575	0,60190		0,60190	0,36575
Pressão em z (kgf/cm ²)	0,01566	0,12416	0,59940	0,12325	0,01375
Soma em C (kgf/cm ²)			0,88		

Fonte: Autora (2025)

Figura 33 - Método de Eisenmann: tensão no ponto C com altura de lastro de 55,00 cm

> Altura de lastro = 55 cm

 h_{eqL} 47,60 cm

Dormente	17	18	19	20	21
Carga (kgf)	4673,60	4912,63	4897,31	4876,41	4101,83
Pressão (kgf/cm ²)	1,58	1,66	1,66	1,65	1,39
Distância horiz. (cm)	100,00	50,00	0,00	50,00	100,00
Z (cm)	47,60	47,60	47,60	47,60	47,60
α_2	0,50068	0,91009		0,91009	0,50068
α_1	0,39872	0,64709		0,64709	0,39872
Pressão em z (kgf/cm ²)	0,01948	0,13749	0,55013	0,13647	0,01710
Soma em C (kgf/cm ²)			0,86		

Fonte: Autora (2025)

Figura 34 - Método de Eisenmann: tensão no ponto C com altura de lastro de 60,00 cm

> Altura de lastro = 60 cm

 h_{eqL} 51,93 cm

Dormente	17	18	19	20	21
Carga (kgf)	4673,60	4912,63	4897,31	4876,41	4101,83
Pressão (kgf/cm ²)	1,58	1,66	1,66	1,65	1,39
Distância horiz. (cm)	100,00	50,00	0,00	50,00	100,00
Z (cm)	51,93	51,93	51,93	51,93	51,93
α_2	0,53815	0,95175		0,95175	0,53815
α_1	0,43079	0,68940		0,68940	0,43079
Pressão em z (kgf/cm ²)	0,02354	0,14868	0,50802	0,14759	0,02066
Soma em C (kgf/cm ²)			0,85		

Fonte: Autora (2025)

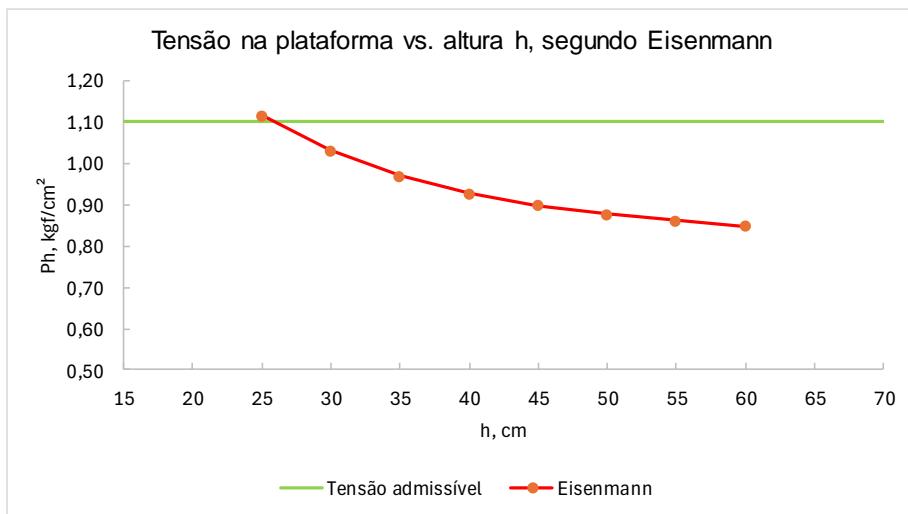
A seção de resumo condensa os resultados obtidos em cada altura, possibilitando o desenvolvimento de um gráfico de tensão *versus* altura da camada de lastro. Como nos métodos anteriores, as tensões atuantes na superfície da plataforma superiores à tensão admissível da plataforma são destacadas com preenchimento e fonte do texto na cor vermelha. A Figura 35 apresenta a seção de resumo do método de

Eisenmann para os dados de entrada da Figura 18, evidenciando a altura mínima de lastro de 30,00 cm.

Figura 35 - Método de Eisenmann: seção destinada ao resumo dos resultados

5.3) Resumo

Altura de lastro (cm)	P_z kgf/cm ²
25	1,12
30	1,03
35	0,97
40	0,93
45	0,90
50	0,88
55	0,86
60	0,85



$h_{LASTRO} = 30 \text{ cm}$

Fonte: Autora (2025)

4.3 RESUMO

A aba “Resumo” visa reunir e apresentar de modo objetivo os resultados encontrados em cada método. A Figura 36 contém o resumo dos resultados dos dados de entrada da Figura 18. A primeira tabela dessa aba contém as tensões atuantes na superfície da plataforma em função da altura de lastro, para os três métodos abordados. Nesse contexto, o resultado do método de Talbot é apresentado tanto para a abordagem de Driecsen quanto para a da AREMA. As tensões atuantes superiores à admissível da plataforma são destacadas com preenchimento e fonte na cor vermelha.

Logo abaixo da tabela de tensões atuantes, está localizado o quadro resumo contendo a altura mínima para cada método. Para os dados de entrada testados, nota-se que a mínima altura pelo método de Talbot, sob a abordagem de Driecsen, é de 60,00 cm. Pela abordagem da AREMA, esse valor é reduzido a 50,00 cm. Por fim, os métodos de Schramm e Eisenmann apresentaram a altura mínima de 30,00 cm.

Com os dados da tabela contendo as tensões atuantes em função da altura de lastro, é gerado um gráfico exibindo as curvas de cada método, bem como o limite determinado pela tensão admissível da plataforma (reta verde).

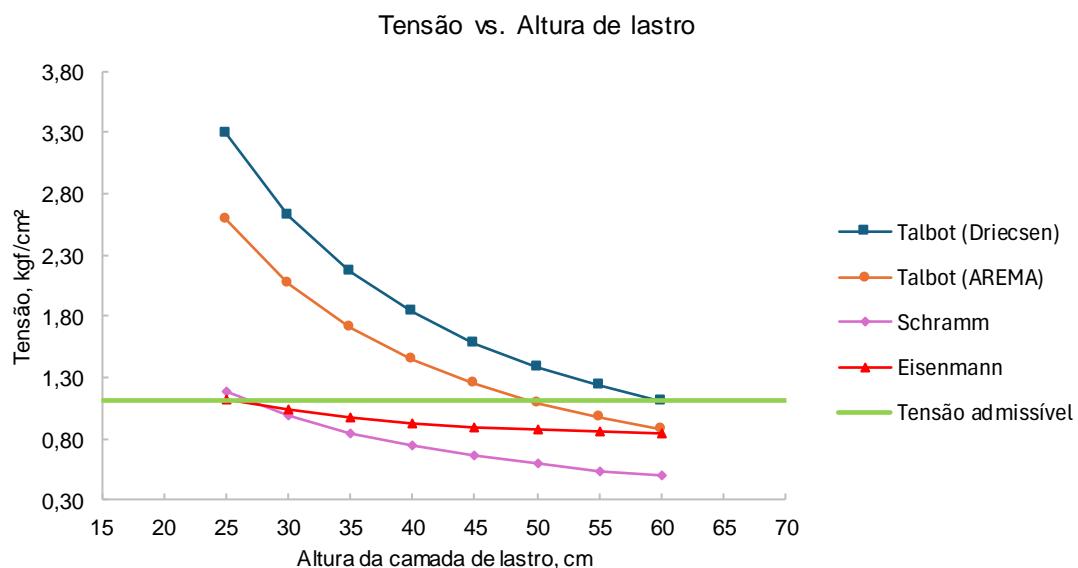
Figura 36 - Resumo dos resultados dos dados de entrada da Figura 18

 UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL PLANILHA ELETRÔNICA DE DIMENSIONAMENTO DA CAMADA DE LASTRO FERROVIÁRIO PELOS MÉTODOS DE TALBOT, SCHRAMM E EISENMANN Amanda Babilon Andrade Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
RESUMO DOS RESULTADOS	

- > **Tensão admissível na plataforma:** 1,10 kgf/cm²
- > **Tensão transmitida à plataforma conforme os métodos de Talbot, Schramm e Eisenmann em função da altura da camada de lastro:**

Altura de lastro (cm)	P_h (kgf/cm ²)			
	Talbot - Driecsen	Talbot - AREMA	Schramm	Eisenmann
25	3,29	2,59	1,19	1,12
30	2,62	2,06	0,99	1,03
35	2,16	1,70	0,85	0,97
40	1,83	1,44	0,74	0,93
45	1,58	1,24	0,66	0,90
50	1,38	1,09	0,59	0,88
55	1,23	0,97	0,54	0,86
60	1,10	0,87	0,49	0,85

Altura mínima da camada de lastro (cm)			
Talbot - Driecsen	Talbot - AREMA	Schramm	Eisenmann
60	50	30	30



Fonte: Autora (2025)

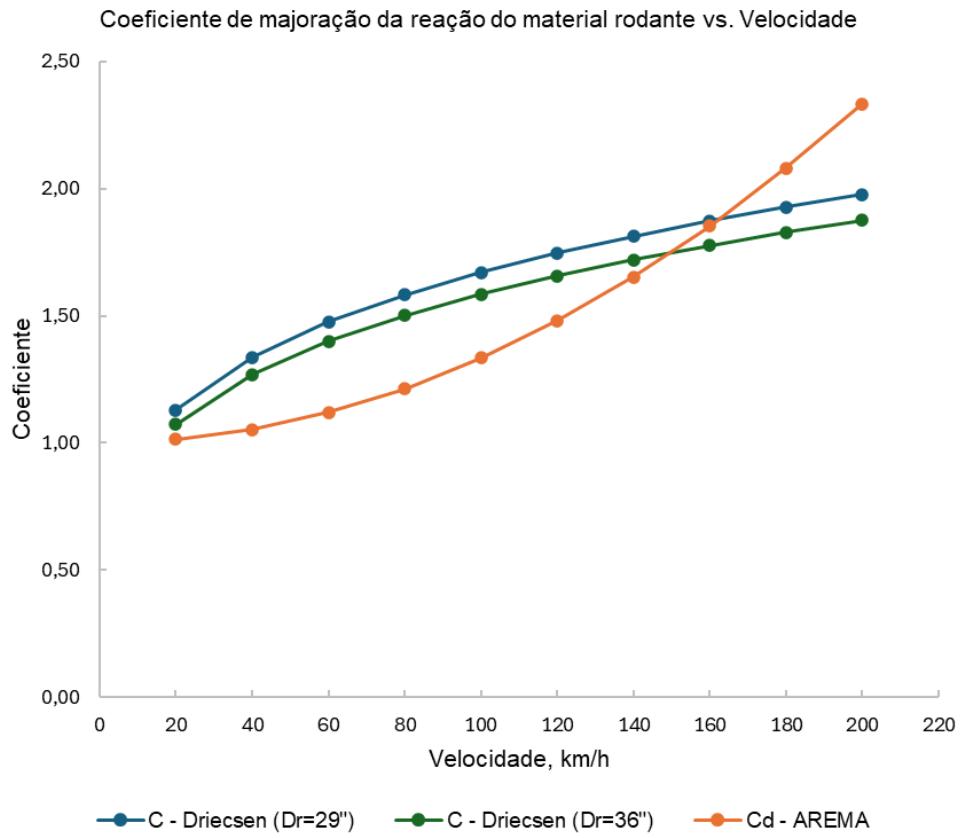
5 RESULTADOS E ANÁLISES

O método de Talbot, apresentado no subcapítulo 2.2.2, envolve a utilização da equação 1, sendo função do parâmetro P_m , correspondente à tensão na face inferior do dormente. Esta tensão é obtida pela razão entre a reação sobre um apoio do dormente e a área de socaria. Desse modo, quanto maior a área de socaria sob o dormente, menor será o valor de P_m .

Já a reação pode ser determinada sob diferentes abordagens, sendo descritas na presente pesquisa a de Driecsen e a da AREMA. Em todos os casos, nota-se que o valor da reação é diretamente proporcional ao peso por roda (P_r), ao espaçamento entre dormentes (d) e ao coeficiente de impacto da via, quanto utilizada a equação de Driecsen, ou ao coeficiente dinâmico, quando da AREMA. Ou seja, quanto maior o valor adotado para esses parâmetros, maior será a reação sobre um apoio do dormente e, consequentemente, maior o valor da tensão atuante na plataforma.

O coeficiente de impacto da via (C) e o coeficiente dinâmico (C_d) são calculados pelas equações 8 e 11, respectivamente. Ambos dependem da velocidade, sendo que, no caso de C , o diâmetro da roda também exerce influência de forma inversamente proporcional. Para analisar o comportamento desses parâmetros para diferentes velocidades, foi gerado o Gráfico 1 considerando dois diâmetros de roda para o coeficiente C : 29,00 e 36,00 polegadas.

Gráfico 1 - Coeficiente de majoração da reação do material rodante versus. Velocidade para as abordagens de Driecsen e da AREMA



Fonte: Autora (2025)

A partir do Gráfico 1, observa-se que a abordagem da AREMA resulta em valores inferiores aos de Driecsen até velocidades próximas de 160,00 km/h. Tendo em vista que os trens de carga no Brasil operam em velocidades inferiores a esse limite, conclui-se que os resultados obtidos pela AREMA tendem a ser inferiores aos de Driecsen.

Por outro lado, quanto maior a distância entre os eixos do truque (D), menor será o valor da reação. Essa relação é coerente, pois o aumento do espaçamento distribui as cargas sobre um maior número de dormentes, reduzindo a concentração de tensões em pontos específicos.

Já o método de Schramm contempla duas verificações: quanto à capacidade de suporte da plataforma e à suscetibilidade ao fenômeno de laqueado. A primeira é influenciada, principalmente, pelo comprimento dos dormentes e pela qualidade do lastro, expressa por seu ângulo de espraiamento das tensões, já que os demais parâmetros apresentam valores típicos. A verificação quanto à suscetibilidade ao

laqueado, por sua vez, é realizada pelo emprego da equação 26, na qual o resultado é diretamente proporcional ao espaçamento e à largura dos dormentes. Em todos os casos, o aumento da qualidade do lastro exerce influência positiva, reduzindo a altura mínima necessária.

Por fim, o método de Eisenmann considera diversos parâmetros, o que inclui as características e propriedades da via, do trem-tipo ferroviário, do trilho e do dormente. A pesquisa conduzida pelo professor Dr. Josef Eisenmann (s.d.) indicou que as tensões transmitidas à plataforma dependem tanto da superfície de apoio dos dormentes, como da largura, comprimento e espaçamento destes. Sob essa perspectiva, a redução da largura e proporcional aumento do comprimento geram condições mais favoráveis.

5.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS COM DIFERENTES DADOS DE ENTRADA NA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Com a ferramenta computacional desenvolvida e validada, foram testados quatro cenários para comparar os resultados dos três métodos abordados nesta pesquisa, sendo eles Talbot, Schramm e Eisenmann. Considerando as duas abordagens de determinação da reação do material rodante, propostas por Driecsen e pela AREMA e descritas no subcapítulo 2.2.2, o método de Talbot foi dividido em dois, totalizando 16 análises.

Para compor os quatro casos, foram arbitrados parâmetros comumente encontrados na prática com o objetivo de viabilizar o dimensionamento e possibilitar a determinação da altura necessária de lastro. O fator de segurança adotado foi 5, considerando que, segundo Rosa e Ribeiro (2020), esse valor geralmente varia entre 5 e 6. Além disso, foi determinada bitola larga, pois no Brasil todas as novas ferrovias devem ser construídas com essa configuração.

As dimensões do dormente foram estabelecidas com base na bitola, resultando em um comprimento de 280,00 cm e uma largura de 24,00 cm. Do mesmo modo, foi adotada a faixa de socaria de 40,00 cm para cada lado do eixo dos trilhos, totalizando 80,00 cm por trilho. Esse valor levou em consideração a especificação entre 80,00 e 90,00 cm de Rosa e Ribeiro (2020) para vias de bitola larga.

Já o vagão HFT (*Hopper graneleiro*) foi escolhido por ser o vagão mais utilizado no Brasil para o escoamento da safra de grãos. Suas características foram embasadas no catálogo disponível na *Greenbrier Maxion* (2025) e no Centro-Oeste (2025). Além disso, foi selecionado o trilho TR-68, apresentando módulo de elasticidade de 210.000 MPa e módulo de inércia de 3.920,90 cm^4 , conforme catálogo do Grupo Siderbras (2025).

As condições de infraestrutura e o estado da via, por sua vez, foram definidos com valores intermediários, representando uma infraestrutura de boa qualidade e um bom estado da via. Essa escolha teve o objetivo de evitar tanto uma abordagem excessivamente conservadora quanto uma demasiadamente otimista no método de Eisenmann. Pelo mesmo motivo, o ângulo de espraiamento das tensões no lastro foi mantido em 40,00°, valor médio recomendado por Schramm (1977). O Quadro 14 apresenta os valores atribuídos aos parâmetros, aplicáveis a todos os quatro casos analisados.

Quadro 14 - Parâmetros arbitrados para o desenvolvimento dos casos

Parâmetro	Valor	Unidade
Fator de segurança	5	
Vagão	HFT	
Peso bruto máximo do vagão	130.000,00	kg
Distância entre eixos do truque	182,80	cm
Diâmetro da roda	38,00	pol.
Bitola	1.600	mm
Estado da via	Bom	
Qualidade da infraestrutura	Boa	
Comprimento do dormente	280,00	cm
Largura do dormente	24,00	cm
Faixa de socaria por trilho	80,00	cm
Trilho	TR-68	
Módulo de elasticidade do trilho	210.000,00	Mpa
Módulo de inércia do trilho	3.920,90	cm^4
Número de locomotivas por trem	2	un
Número de eixos por locomotiva	8	un
Número de vagões por trem	86	un
Número de eixos por vagão	4	un
Número de trens por dia (carregados e descarregados)	20	un
Número de dias trabalhados por ano	365	dias

Parâmetro	Valor	Unidade
Período de projeto	30	anos
Ângulo de espraiamento das tensões	40,00º	
CBR da plataforma	60%	

Fonte: Autora (2025)

Optou-se, assim, por variar o espaçamento entre os dormentes e a velocidade da via, uma vez que são parâmetros comuns aos três métodos analisados. O espaçamento entre dormentes influencia diretamente na distribuição das tensões no lastro. Já a velocidade da via desempenha um papel fundamental na determinação do coeficiente que considera as cargas dinâmicas, sendo calculado de maneira distinta em cada método.

O Quadro 15 apresenta os valores das variáveis dos quatro casos, com uma codificação desenvolvida para identificar cada um deles. No total, serão analisados quatro casos, considerando dois espaçamentos entre dormentes, de 50,00 e 60,00 cm, e duas velocidades, de 40,00 e 80,00 km/h. Vale ressaltar que os demais parâmetros necessários ao dimensionamento estão especificados no Quadro 14.

Quadro 15 - Identificação e descrição dos parâmetros adotados em cada caso

Caso	Identificação	Espaçamento entre dormentes (cm)	Velocidade da via (km/h)
1	E50-V40	50,00	40,00
2	E50-V80	50,00	80,00
3	E60-V40	60,00	40,00
4	E60-V80	60,00	80,00

Fonte: Autora (2025)

Para efetuar os cálculos, foi utilizada a ferramenta computacional desenvolvida na presente pesquisa, detalhada no capítulo 4. Os parâmetros arbitrados para cada caso foram inseridos na aba “Dados de entrada”. Nesse sentido, considerando o vagão HFT escolhido, a carga por eixo inserida corresponde à razão entre o peso bruto máximo do vagão (130.000,00 kg) e seu número de eixos (4), que resultou em 32.500 kg/eixo.

A tensão admissível da plataforma foi calculada pela ferramenta computacional considerando os procedimentos e diretrizes descritos nos subcapítulos 2.2.5. Tais dados resultaram em $7,884 \times 10^7$ repetições de carga (número N), módulo de elasticidade da plataforma de 6000,00 kgf/cm² e tensão admissível de 5,51 kgf/cm².

Considerando o fator de segurança, esse valor foi reduzido para 1,38 kgf/cm². Como a velocidade e o espaçamento entre dormentes, parâmetros variáveis nos quatro casos, não influenciam na tensão admissível da plataforma, o valor obtido é comum aos quatro casos analisados.

Já o cálculo das tensões atuantes na plataforma para diferentes alturas de lastro foi realizado adotando as diretrizes específicas para os métodos de Talbot, Schramm e Eisenmann, abordados nos subcapítulos 2.2.2, 2.2.3 e 2.2.4, respectivamente. Como resultado, a ferramenta forneceu a menor altura de lastro cuja tensão atuante na plataforma é igual ou inferior à sua tensão admissível, considerando o limite inferior de 25,00 cm e superior de 60,00 cm. Além disso, para todos os casos foi gerado um gráfico com o objetivo de comparar o comportamento de cada método com o aumento da altura da camada de lastro.

5.1.1 Caso 1: E50-V40

O caso 1 refere-se ao cenário em que são considerados os dados arbitrados no Quadro 14, atribuindo-se o espaçamento entre dormentes de 50,00 cm e a velocidade da via de 40,00 km/h. Com isso, a ferramenta computacional gerou os resultados contidos na Tabela 1, referentes à tensão atuante na superfície da plataforma para diferentes alturas de lastro considerando os métodos de Talbot, Schramm e Eisenmann. Para todos os métodos abordados, houve a redução da tensão com o aumento da altura da camada de lastro, comportamento esperado conforme a literatura.

Tabela 1 - Resultados das tensões atuantes para o caso 1

Altura de lastro (cm)	Tensão atuante na superfície da plataforma (kgf/cm ²)			
	Talbot (Driecsen)	Talbot (AREMA)	Schramm	Eisenmann
25,00	2,79	2,35	1,42	1,29
30,00	2,22	1,87	1,19	1,18
35,00	1,83	1,54	1,02	1,11
40,00	1,55	1,31	0,89	1,06
45,00	1,34	1,13	0,79	1,02
50,00	1,17	0,99	0,71	1,00
55,00	1,04	0,88	0,65	0,98
60,00	0,94	0,79	0,59	0,96

Fonte: Autora (2025)

Para obter a mínima altura de lastro necessária, é feita a verificação da menor altura cuja tensão atuante na superfície da plataforma é inferior à sua tensão admissível, sendo esta igual à 1,38 kgf/cm² considerando o fator de segurança (conforme detalhado no subcapítulo 5.1). Assim, notou-se que por Talbot, utilizando a abordagem de Driecsen, a menor altura de lastro foi de 45,00 cm. Por outro lado, sob a abordagem da AREMA, o resultado é de 40,00 cm. Já o método de Schramm indicou a altura de 30,00 cm, enquanto pelo método de Eisenmann obteve-se a altura mínima de 25,00 cm.

O método de Schramm considera, ainda, a suscetibilidade da plataforma ao fenômeno do laqueado, conforme descrito no subcapítulo 2.2.3. Nesse sentido, aplicando os parâmetros arbitrados referentes ao presente caso na equação 26, a mínima altura de lastro segundo esse critério foi de 10,91 cm. Desse modo, foi adotada a maior altura fornecida pelas duas verificações, sendo igual a 30,00 cm. O Quadro 16 reúne os resultados encontrados para o caso 1.

Quadro 16 - Resumo dos resultados do caso 1

Método	Talbot (Driecsen)	Talbot (AREMA)	Schramm	Eisenmann
Altura mínima de lastro (cm)	45,00	40,00	30,00	25,00

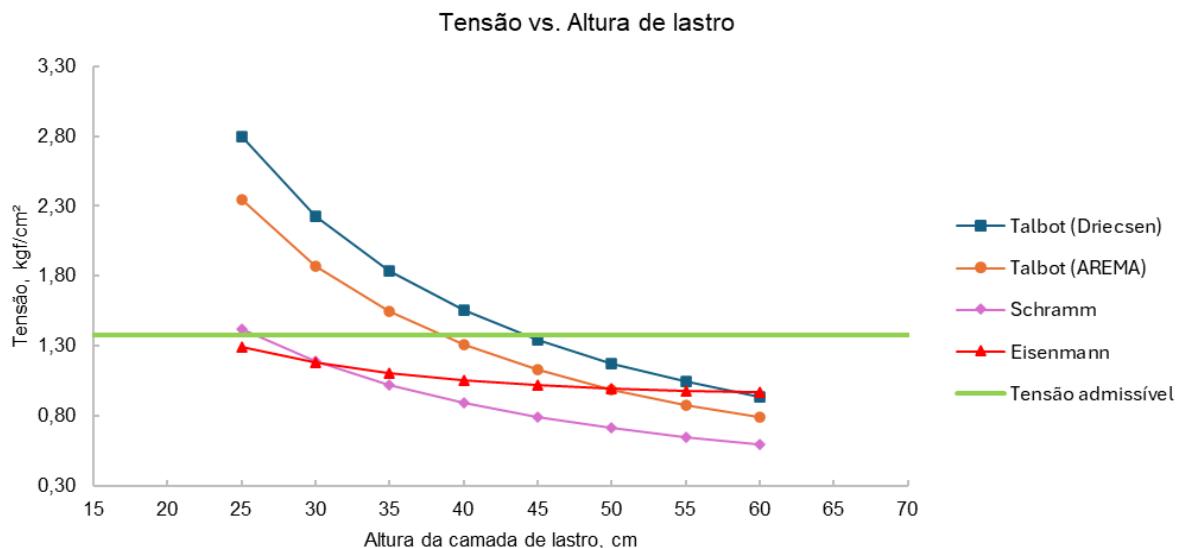
Fonte: Autora (2025)

Com os dados contidos na Tabela 1, foi desenvolvido o Gráfico 2 para avaliar o comportamento dos diferentes métodos em função da variação da altura de lastro. Observou-se que, pelo método de Talbot, a abordagem da AREMA forneceu valores menos conservadores em comparação à abordagem de Driecsen para todas as alturas de lastro consideradas. Além disso, as duas curvas de Talbot exibiram um padrão semelhante à curva do método de Schramm, sendo que a de Schramm resultou em valores inferiores. Em contrapartida, a curva do método de Eisenmann mostrou um comportamento mais linear, com menor sensibilidade ao aumento da altura de lastro em relação aos outros métodos.

Por meio do Gráfico 2 foi possível observar, também, o aumento da semelhança entre os valores obtidos pelos três métodos em função do aumento da altura da camada de lastro. Para a mínima altura considerada, referente a 25,00 cm, a diferença entre o maior e o menor valor obtido dentre os métodos abordados foi de 1,50 kgf/cm²,

conforme Tabela 1. No entanto, à altura máxima de 60,00 cm, esse valor passou para 0,37 kgf/cm², uma redução de 75,40%.

Gráfico 2 - Tensão versus altura de lastro para o caso 1 para os diferentes métodos



Fonte: Autora (2025)

5.1.2 Caso 2: E50-V80

O caso 2 refere-se ao cenário em que são considerados os dados arbitrados no Quadro 14, atribuindo-se o espaçamento entre dormentes de 50,00 cm e a velocidade da via de 80,00 km/h. Ou seja, difere-se do caso 1 analisado no subcapítulo 5.1.1 pelo aumento da velocidade. Com isso, a ferramenta computacional gerou os resultados contidos na Tabela 2, referentes à tensão atuante na superfície da plataforma para diferentes alturas de lastro considerando os métodos de Talbot, Schramm e Eisenmann. Para todos os métodos abordados, houve a redução da tensão com o aumento da altura da camada de lastro, comportamento esperado conforme a literatura.

Tabela 2 - Resultados das tensões atuantes para o caso 2

Altura de lastro (cm)	Tensão atuante na superfície da plataforma (kgf/cm ²)			
	Talbot (Driecsen)	Talbot (AREMA)	Schramm	Eisenmann
25,00	3,31	2,71	1,62	1,32
30,00	2,63	2,16	1,35	1,21
35,00	2,17	1,78	1,16	1,13
40,00	1,84	1,50	1,01	1,08
45,00	1,59	1,30	0,90	1,05
50,00	1,39	1,14	0,81	1,02
55,00	1,23	1,01	0,74	1,00
60,00	1,11	0,91	0,68	0,99

Fonte: Autora (2025)

Assim, notou-se que por Talbot, utilizando a abordagem de Driecsen, a menor altura de lastro cuja tensão atuante na superfície da plataforma foi inferior à sua tensão admissível foi de 55,00 cm. Por outro lado, sob a abordagem da AREMA, o resultado foi de 45,00 cm. Já o método de Schramm indicou a altura de 30,00 cm, enquanto pelo método de Eisenmann obteve-se a altura mínima de 25,00 cm.

A verificação quanto à suscetibilidade da plataforma ao fenômeno do laqueado, descrita no subcapítulo 2.2.3, é feita pela equação 26, a qual fornece a mínima altura de lastro segundo esse critério. Essa equação é função do espaçamento e largura dos dormentes e do ângulo de espraiamento das tensões. Desse modo, o aumento da velocidade não exerceu influência nesse critério e o valor obtido no caso 1 permaneceu inalterado, sendo igual a 10,91 cm. Por fim, foi adotada a maior altura fornecida pelas duas verificações, sendo igual a 30,00 cm. O Quadro 17 resume os resultados encontrados para o caso 2.

Quadro 17 - Resumo dos resultados do caso 2

Método	Talbot (Driecsen)	Talbot (AREMA)	Schramm	Eisenmann
Altura mínima de lastro (cm)	55,00	45,00	30,00	25,00

Fonte: Autora (2025)

Comparando os resultados dispostos no Quadro 16 e no Quadro 17 – referentes aos casos 1 e 2, respectivamente – observou-se que o método de Talbot, utilizando a abordagem de Driecsen, apresentou maior sensibilidade ao aumento da velocidade, tendo sua mínima altura de lastro necessária aumentado 10,00 cm em relação ao caso 1. Pela abordagem da AREMA, no entanto, houve um aumento menos significativo,

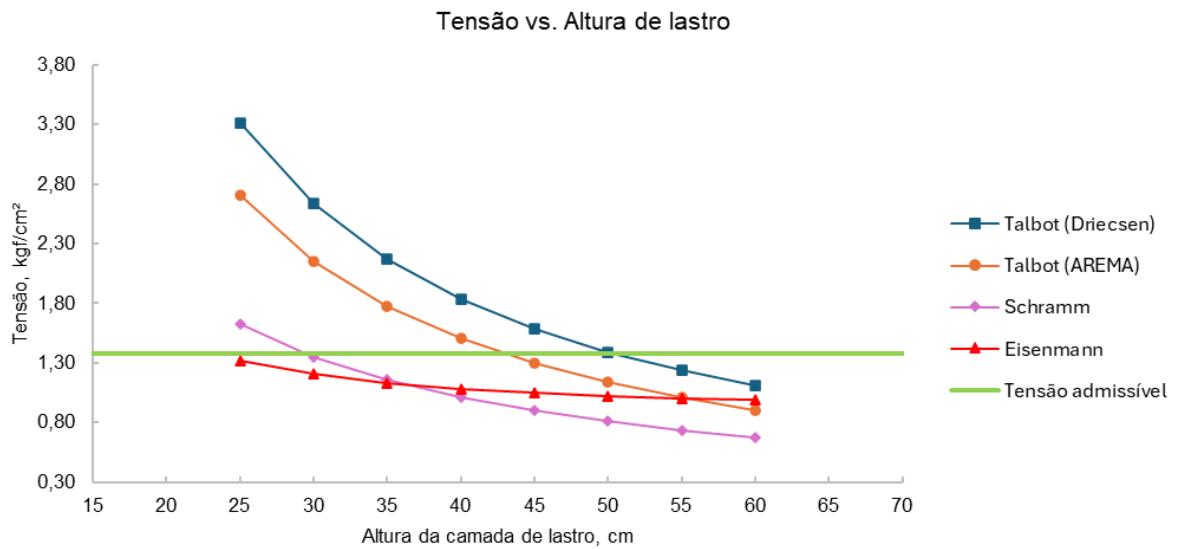
correspondente à 5,00 cm. Já os métodos de Schramm e de Eisenmann mantiveram os resultados de 30,00 e 25,00 cm, respectivamente.

Essa sensibilidade também foi evidenciada pela comparação entre os resultados apresentados na Tabela 1 e Tabela 2 – correspondentes aos casos 1 e 2, respectivamente. Notou-se que houve um incremento de, aproximadamente, 18,00% nos valores das tensões atuantes pelo método de Talbot sob a abordagem de Driecsen, enquanto na abordagem da AREMA e no método de Schramm esse aumento ficou em torno de 15,00%. Em contrapartida, os valores fornecidos por Eisenmann para o caso 2 sofreram um aumento de apenas 2,00%. Verificou-se, assim, que o aumento da velocidade exerceu maior influência nos métodos de Talbot e Schramm, enquanto no método de Eisenmann essa influência é significativamente menor.

Com os dados da Tabela 2, foi desenvolvido o Gráfico 3 para avaliar o comportamento dos diferentes métodos em função da variação da altura de lastro. Assim como no Gráfico 2, observou-se que, pelo método de Talbot, a abordagem da AREMA forneceu valores menos conservadores em comparação à abordagem de Driecsen para todas as alturas de lastro consideradas. Além disso, as duas curvas de Talbot exibiram um padrão semelhante à curva do método de Schramm, sendo que a de Schramm resultou em valores inferiores. Em contrapartida, a curva do método de Eisenmann mostrou um comportamento mais linear, com menor sensibilidade ao aumento da altura de lastro em relação aos outros métodos.

Por fim, pelo Gráfico 3, assim como no Gráfico 2 referente ao caso 1, foi possível observar o aumento da semelhança entre os valores obtidos pelos três métodos em função do aumento da altura da camada de lastro. Para a mínima altura de lastro considerada, referente a 25,00 cm, a diferença entre o maior e o menor valor obtido foi de 1,99 kgf/cm², conforme Tabela 2. No entanto, à altura máxima de 60,00 cm, esse valor passou para 0,43 kgf/cm², uma redução de 78,39%.

Gráfico 3 - Tensão versus altura de lastro para o caso 2 para os diferentes métodos



Fonte: Autora (2025)

5.1.3 Caso 3: E60-V40

O caso 3 refere-se ao cenário em que são considerados os dados arbitrados no Quadro 14, atribuindo-se o espaçamento entre dormentes de 60,00 cm e a velocidade da via de 40,00 km/h. Ou seja, difere-se do caso 1 analisado no subcapítulo 5.1.1 pelo aumento do espaçamento entre dormentes. Com isso, a ferramenta computacional gerou os resultados contidos na Tabela 3, referentes à tensão atuante na superfície da plataforma para diferentes alturas de lastro considerando os métodos de Talbot, Schramm e Eisenmann. Para todos os métodos abordados, houve a redução da tensão com o aumento da altura da camada de lastro, comportamento esperado conforme a literatura.

Tabela 3 - Resultados das tensões atuantes para o caso 3

Altura de lastro (cm)	Tensão atuante na superfície da plataforma (kgf/cm ²)			
	Talbot (Driecsen)	Talbot (AREMA)	Schramm	Eisenmann
25,00	3,35	2,82	1,42	1,49
30,00	2,67	2,25	1,19	1,34
35,00	2,20	1,85	1,02	1,23
40,00	1,86	1,57	0,89	1,15
45,00	1,61	1,35	0,79	1,09
50,00	1,41	1,19	0,71	1,04
55,00	1,25	1,05	0,65	1,01
60,00	1,12	0,94	0,59	0,99

Fonte: Autora (2025)

Notou-se que por Talbot, utilizando a abordagem de Driecsen, a menor altura de lastro cuja tensão atuante na superfície da plataforma foi inferior à sua tensão admissível foi de 55,00 cm. Por outro lado, sob a abordagem da AREMA, o resultado foi de 45,00 cm. Já os métodos de Schramm e Eisenmann indicaram a altura mínima de 30,00 cm.

Comparando os resultados dispostos na Tabela 1 e na Tabela 3 – referentes aos casos 1 e 3, respectivamente – observou-se que os métodos de Talbot e Eisenmann apresentaram sensibilidade ao aumento da distância entre dormentes, de modo que Schramm obteve no caso 3 as mesmas tensões atuantes do caso 1. De fato, a determinação da tensão atuante pelo método de Schramm, descrita no subcapítulo 2.2.3, não é influenciada por esse parâmetro.

Contudo, a equação 26 desenvolvida por Schramm (1977) fornece a menor altura de lastro necessária para evitar o fenômeno do laqueado, sendo diretamente influenciada pelo espaçamento entre dormentes. Desse modo, aplicou-se os valores dos parâmetros arbitrados para o presente caso, resultando na altura mínima de 21,45 cm para esse critério. Adotando a maior altura mínima dentre as duas verificações, a altura mínima de lastro por Schramm foi determinada em 30,00 cm. Assim, apesar da altura mínima permanecer com o mesmo valor do caso 1, notou-se que houve um aumento da altura mínima para o critério que objetiva evitar o laqueado na plataforma. O Quadro 18 resume os resultados encontrados para o caso 3.

Quadro 18 - Resumo dos resultados do caso 3

Método	Talbot (Driecsen)	Talbot (AREMA)	Schramm	Eisenmann
Altura mínima de lastro (cm)	55,00	45,00	30,00	30,00

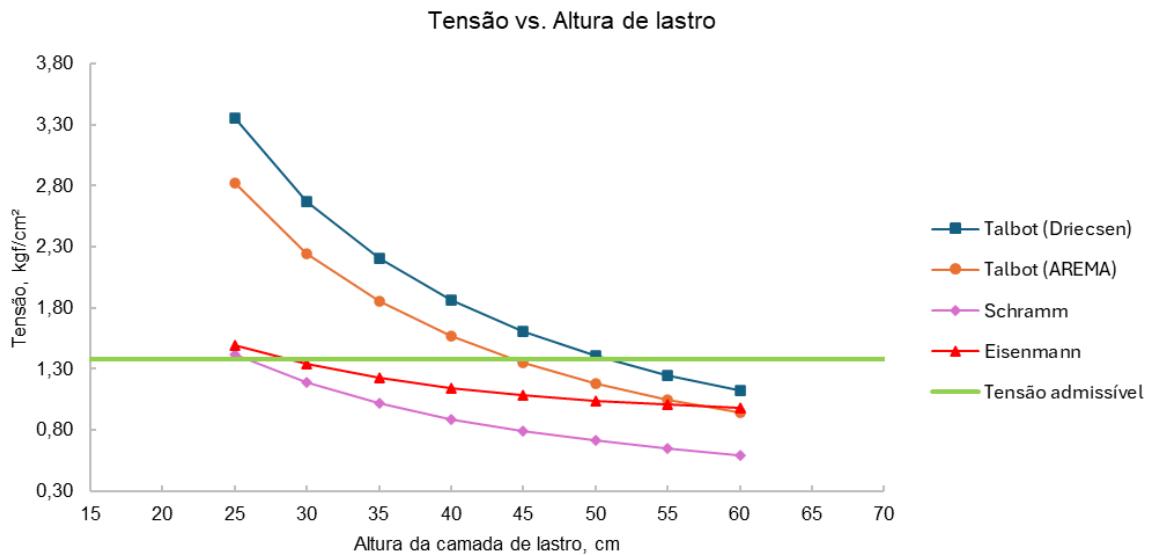
Fonte: Autora (2025)

A sensibilidade dos métodos de Talbot e Eisenmann ao aumento do espaçamento entre dormentes também foi evidenciada pela comparação entre os resultados apresentados na Tabela 1 e na Tabela 3 – correspondentes aos casos 1 e 3, respectivamente. Notou-se que no caso 3 houve um incremento de, aproximadamente, 20,00% no método de Talbot sob as duas abordagens, para todas as alturas consideradas, em relação ao caso 1. No entanto, o aumento das tensões atuantes para o método de Eisenmann variaram com o aumento da altura de lastro, de modo que à altura mínima houve um incremento de 15,50% em comparação ao caso 1, que decresceu até atingir 3,13% à altura máxima considerada. Observou-se, então, que a influência do espaçamento entre dormentes é maior em menores alturas de lastro para o método desenvolvido por Eisenmann.

Com os dados contidos na Tabela 3, foi desenvolvido o Gráfico 4 para avaliar o comportamento dos diferentes métodos em função da variação da altura de lastro. Assim como no Gráfico 2, observou-se que, pelo método de Talbot, a abordagem da AREMA forneceu valores menos conservadores em comparação à abordagem de Driecsen para todas as alturas de lastro consideradas, a qual forneceu os maiores valores de tensão dentre todos os métodos. Além disso, a curva do método de Eisenmann exibiu um comportamento mais estável, sem grandes variações da tensão em função da altura da camada de lastro.

Por fim, por meio do Gráfico 4, foi possível notar que com o aumento da altura de lastro, os resultados para os diferentes métodos tendem a convergir. Esse comportamento é evidenciado pela redução da diferença entre os valores máximos e mínimos obtidos para cada altura de lastro.

Gráfico 4 - Tensão *versus* altura de lastro para o caso 3 para os diferentes métodos



Fonte: Autora (2025)

5.1.4 Caso 4: E60-V80

O caso 4 refere-se ao cenário em que são considerados os dados arbitrados no Quadro 14, atribuindo-se o espaçamento entre dormentes de 60,00 cm e a velocidade da via de 80,00 km/h. Corresponde, portanto, ao cenário mais crítico de solicitação uma vez que considera, simultaneamente, o aumento do espaçamento entre dormentes e da velocidade. Para essa configuração, a ferramenta computacional gerou os resultados contidos na Tabela 4, referentes à tensão atuante na superfície da plataforma para diferentes alturas de lastro considerando os métodos de Talbot, Schramm e Eisenmann. Para todos os métodos abordados, houve a redução da tensão com o aumento da altura da camada de lastro, comportamento esperado conforme a literatura.

Tabela 4 - Resultados das tensões atuantes para o caso 4

Altura de lastro (cm)	Tensão atuante na superfície da plataforma (kgf/cm ²)			
	Talbot (Driecsen)	Talbot (AREMA)	Schramm	Eisenmann
25,00	3,97	3,25	1,62	1,53
30,00	3,16	2,59	1,35	1,37
35,00	2,61	2,13	1,16	1,26
40,00	2,21	1,81	1,01	1,17
45,00	1,90	1,56	0,90	1,11
50,00	1,67	1,37	0,81	1,07
55,00	1,48	1,21	0,74	1,03
60,00	1,33	1,09	0,68	1,01

Fonte: Autora (2025)

Notou-se que por Talbot, utilizando a abordagem de Driecsen, a menor altura de lastro cuja tensão atuante na superfície da plataforma foi inferior à sua tensão admissível foi de 60,00 cm. Por outro lado, sob a abordagem da AREMA, o resultado é de 50,00 cm. Já os métodos de Schramm e Eisenmann indicaram a altura mínima de 30,00 cm. Foram obtidas, assim, as maiores alturas de lastro dentre os quatro casos para o método de Talbot sob as duas abordagens.

Apesar da mínima altura de lastro determinada por Schramm e Eisenmann permanecerem inalteradas em relação ao caso 3, analisado no subcapítulo 5.1.3, as tensões atuantes de ambos os métodos foram superiores. Isso se deve pelo aumento da velocidade, que gerou um maior coeficiente dinâmico, majorando a tensão transmitida ao lastro. Por outro lado, o aumento do espaçamento entre dormentes em relação ao caso 2, discutido no subcapítulo 5.1.2, resultou numa maior altura pelo método de Eisenmann, enquanto a altura de lastro determinada por Schramm permaneceu inalterada.

A menor altura de lastro necessária para evitar o laqueado, calculada pela equação 26 desenvolvida por Schramm (1977), forneceu o resultado de 21,45 cm, igual ao obtido no caso 3 tendo em vista que os parâmetros que influenciam nessa verificação (espaçamento e largura dos dormentes e ângulo de espraiamento das tensões no lastro) permaneceram inalterados. Adotando a maior altura mínima dentre as duas verificações, a altura mínima de lastro por Schramm foi determinada em 30,00 cm. O **Quadro 18** resume os resultados encontrados para o caso 4.

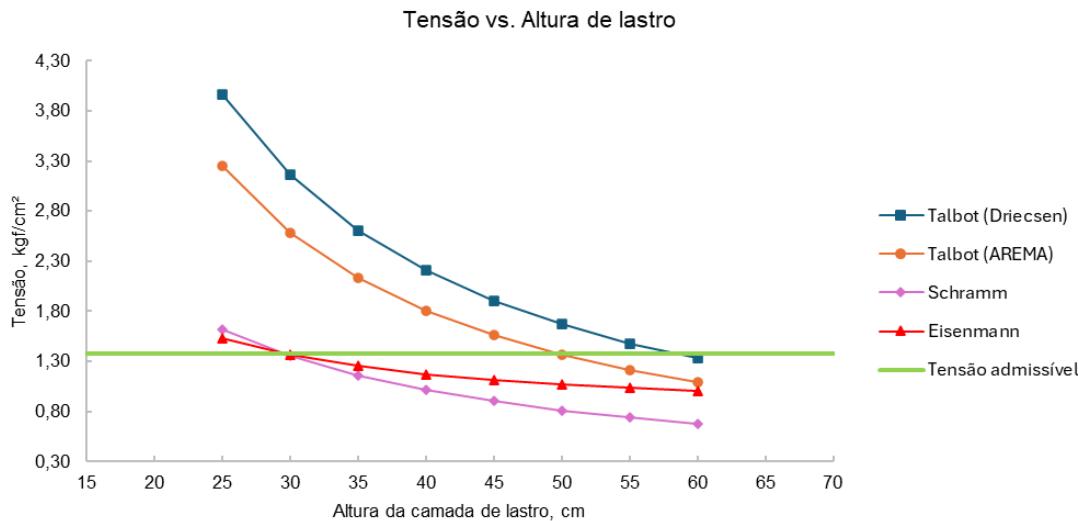
Quadro 19 - Resumo dos resultados do caso 4

Método	Talbot (Driecsen)	Talbot (AREMA)	Schramm	Eisenmann
Altura mínima de lastro (cm)	60,00	50,00	30,00	30,00

Fonte: Autora (2025)

A sensibilidade dos métodos de Talbot e Eisenmann ao aumento do espaçamento entre dormentes e da velocidade simultaneamente também foi evidenciada pela comparação entre os resultados apresentados na Tabela 1 e na Tabela 4 – correspondentes aos casos 1 e 4, respectivamente. Notou-se que no caso 4 houve um incremento de, aproximadamente, 42,00% nos valores das tensões atuantes no método de Talbot sob a abordagem de Driecsen, em relação ao caso 1. Quanto à abordagem da AREMA, por sua vez, houve o aumento de 38,00%. Já o método de Schramm apresentou o valor de 15,00%. Por fim, o método de Eisenmann obteve um aumento variável, de modo que à altura mínima de lastro considerada (25,00 cm), houve o aumento de 18,60%, enquanto à altura máxima (60,00) o aumento foi de 5,21%.

Com os dados contidos na Tabela 4, foi desenvolvido o Gráfico 5 para avaliar o comportamento dos diferentes métodos em função da variação da altura de lastro. Como nos três casos anteriores, observou-se que, pelo método de Talbot, a abordagem da AREMA forneceu valores menos conservadores em comparação à abordagem de Driecsen para todas as alturas de lastro consideradas. Além disso, as duas curvas de Talbot e a de Schramm exibiram um padrão semelhante. Por fim, o método de Eisenmann mostrou valores mais estáveis, sem grandes variações da tensão em função da altura da camada de lastro.

Gráfico 5 - Tensão versus altura de lastro para o caso 4

Fonte: Autora (2025)

5.1.5 Resumo dos resultados

O Quadro 20 apresenta as alturas mínimas de lastro para cada caso, considerando um valor mínimo de 25,00 cm. Observou-se, assim, a sensibilidade do método de Talbot à variação da velocidade e do espaçamento entre dormentes para as duas abordagens, com destaque para a variação da velocidade para a abordagem de Driecsen. O método de Schramm, por sua vez, apresentou o mesmo resultado para os quatro cenários testados. Já o método de Eisenmann sofreu maior influência da variação do espaçamento entre dormentes, tendo o aumento da velocidade pouca relevância.

Quadro 20 - Resumo dos resultados

Caso	Codificação	Altura mínima de lastro (cm)			
		Talbot - Driecsen	Talbot - AREMA	Schramm	Eisenmann
1	E50-V40	45,00	40,00	30,00	25,00
2	E50-V80	55,00	45,00	30,00	25,00
3	E60-V40	55,00	45,00	30,00	30,00
4	E60-V80	60,00	50,00	30,00	30,00

Fonte: Autora (2025)

A comparação entre os métodos de Talbot e Schramm, por sua vez, já foi realizada anteriormente pelo engenheiro Antônio L. de Melo (1975 apud Stopatto, 1986),

resultando em valores mais conservadores para a fórmula de Talbot. Esse comportamento é coerente com o observado nos quatro cenários da presente pesquisa, que indicou alturas maiores para o método de Talbot em relação ao método de Schramm.

Na prática, não são adotadas grandes alturas de lastro, ficando a camada de lastro comumente restrita à espessura de 50,00 cm. Nos cenários em que esse limite foi ultrapassado, portanto, pode-se recorrer a algumas soluções, dentre elas: considerar uma camada de sublastro, substituindo parte da altura do lastro calculada; executar um reforço da plataforma, aumentando a sua tensão admissível e, consequentemente, reduzindo a altura mínima necessária de lastro.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa teve como objetivo comparar três métodos de dimensionamento da altura de lastro ferroviário: Talbot, Schramm e Eisenmann. O método de Talbot, por sua vez, foi abordado sob duas metodologias para a determinação da tensão na face inferior do dormente, a de Driecsen e a da AREMA. Para automatizar os cálculos e possibilitar o teste de diferentes cenários, foi desenvolvida uma ferramenta computacional, a qual mostrou-se eficaz.

As análises foram feitas para quatro casos, os quais variaram a velocidade da via e o espaçamento entre dormentes, totalizando 16 resultados. Estes evidenciaram que o método de Talbot sob a abordagem de Driecsen, fornece resultados mais conservadores em relação à da AREMA. Além disso, ambas as abordagens apresentaram expressiva sensibilidade à variação da velocidade e ao espaçamento entre dormentes.

O método de Schramm, por sua vez, apresentou a mesma altura de lastro para os quatro casos analisados. Esse comportamento indicou que a variação da velocidade e do espaçamento entre dormentes não exerce grande influência neste método. De fato, o referencial teórico, descrito no subcapítulo 2.2.3, apontou que o comprimento do dormente e a qualidade do lastro geram maior impacto para a verificação quanto à capacidade de suporte da plataforma.

Já o método de Eisenmann exibiu valores mais estáveis, sem grandes variações da tensão atuante na superfície da plataforma com o aumento da altura do lastro. Dentre os casos analisados, esse método resultou nas menores alturas de lastro. O aumento da velocidade teve um impacto pouco significativo nos resultados, diferentemente da variação do espaçamento entre dormentes.

Como recomendação de trabalhos futuros, sugere-se a utilização de *softwares* de elementos finitos para simular o comportamento da via férrea sob diferentes condições de carregamento e espessuras de lastro e sublastro. Essa abordagem possibilitaria a comparação entre os resultados obtidos com os resultados dos métodos de Talbot, Schramm e Eisenmann. Além disso, propõe-se a incorporação de mais parâmetros na ferramenta desenvolvida, como verificações relacionadas à consideração da camada de sublastro.

7 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5564: Via férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- _____ **NBR 7641: Via permanente ferroviária.** Rio de Janeiro: ABNT, 1980.
- _____ **NBR 7914: Projeto de lastro para via férrea.** Rio de Janeiro: ABNT, 1990.
- _____ **NBR 16387: Via férrea – Classificação de vias.** Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** AMN, 2001.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ISF-212: Projeto de superestrutura da via permanente – Lastro e sublastro.** 2015.
- EISENMANN, J. **Influência das dimensões e espaçamento dos dormentes e das proporções do lastro em relação às solicitações na infraestrutura.** (s.d).
- ESVELD, C. **Modern Railway Track.** Germany. MRT-Productions, 2001.
- GREENBRIER MAXION. GDE Vagão Gôndola. Disponível em:
https://www.gbmx.com.br/wp-content/uploads/2017/10/GBM_013_laminas_gde-1.pdf. Acesso em: 13 mar. 2025.
- GREENBRIER MAXION. **HFT Vagão Hopper Fechado.** Disponível em:
https://www.gbmx.com.br/wp-content/uploads/2017/10/GBM_013_laminas_hft-1.pdf. Acesso em: 13 mar. 2025.
- GRUPO SIDERBRAS. **Trilho padrão TR 68.** Disponível em:
<https://gruposiderbras.com.br/tr-68/#>. Acesso em: 09 mar. 2025.
- GUIMARÃES, C. A. B. **Análise das solicitações dinâmicas na via férrea através da simulação da interação entre o veículo e a via.** 1999. 234 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica, área de concentração em Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
- KLINCEVICIUS, M. G. Y. **Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários.** 2011. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia, área de concentração em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- KUESTER, J. C. **Vagão HFT.** CENTRO-OESTE, 2020. Disponível em:
<http://vfco.brazilia.jor.br/vag/vagALL/hft.shtml>. Acesso em: 09 mar. 2025.
- PAIVA, C. E. L. **Super e infraestruturas de ferrovias: Critérios para projeto.** Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2016.

QUEIROZ, R. C. **Estudo experimental de tensões e deformações em camadas da infraestrutura e superestrutura ferroviária**. 1990. 223 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil, área de concentração em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

REDE FERROVIÁRIA FEDERAL SA. **Normas e instruções gerais de via permanente**. 2^a ed. Rio de Janeiro: RFFSA, 1986.

ROSA, R. A.; RIBEIRO; R. C. H. **Estradas de ferro: Projeto, Especificação & Construção**. 2^a ed. Vitória: EDUFES, 2020.

SCHRAMM, G. **Técnica e economia na via permanente**. Rio de Janeiro: [s. n.], 1977.

STOPATTO, S. **Via permanente ferroviária: Conceitos e aplicações**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1986.

SURFACE TRANSPORTATION BOARD. **Economic data**. Disponível em: <https://www.stb.gov/reports-data/economic-data/>. Acesso em: 09 mar. 2025.

WATANABE, J. S. **Estudo de via férrea lastreada sobre placa de concreto de cimento Portland**. 2013. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, área de concentração em Transportes) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.