

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Gustavo César de Lima e Silva

**DIMENSIONAMENTO DA VIA PERMANENTE E AVALIAÇÃO DAS TENSÕES
NAS CAMADAS DO PAVIMENTO FERROVIÁRIO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO
DOS TRILHOS E DORMENTES**

UBERLÂNDIA – MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Gustavo César de Lima e Silva

**DIMENSIONAMENTO DA VIA PERMANENTE E AVALIAÇÃO DAS TENSÕES
NAS CAMADAS DO PAVIMENTO FERROVIÁRIO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO
DOS TRILHOS E DORMENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof. Lorayne Cristina da Silva Alves

Dezembro de 2019

Gustavo César de Lima e Silva

**DIMENSIONAMENTO DA VIA PERMANENTE E AVALIAÇÃO DAS TENSÕES
NAS CAMADAS DO PAVIMENTO FERROVIÁRIO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO
DOS TRILHOS E DORMENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção de grau de Engenheiro
Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lorayne Cristina da Silva Alves
Orientador

Prof. Dr. Carlos Eugênio Pereira
Membro da Banca

Prof. Dr. Nassau de Nogueira Nardez
Membro da Banca

Uberlândia – MG
2019

RESUMO

O Brasil, devido às suas proporções territoriais, tem um enorme potencial para o desenvolvimento do modal ferroviário, já que, dentre aqueles existentes, a ferrovia é o meio de transporte ideal para o transporte de longas distâncias com maior volume de carga. Apesar disso, o investimento de governos anteriores foi focado no transporte rodoviário, como pode ser notado na matriz de transportes brasileira, em que a participação do modal rodoviário é predominante. Apesar do crescente investimento do Brasil em ferrovias, ainda há muito a ser explorado nesse quesito. Um novo traçado de ferrovia está sendo estudado, a Ferrovia do Cerrado, com trecho estabelecido entre Alto Araguaia-MT e Uberlândia-MG, com um total de 671 Km. Esse trabalho faz um dimensionamento da via permanente desse trecho por meio de fórmulas apresentadas na literatura. Posteriormente, analisou-se o comportamento do pavimento ferroviário, por meio de valores de tensões nas camadas de lastro, sublastro e subleito que foram gerados no *software Kentrack 4.0*, com a mudança de parâmetros de projeto, tais como a classe dos trilhos, o material e espaçamento dos dormentes. Todos os resultados do *software* foram condizentes com a realidade e com a bibliografia estudada. Para a variação do tipo de trilho, concluiu-se que quanto mais pesado o trilho, menores são as tensões de compressão que passam para as camadas inferiores. Com a variação do tipo de material do dormente, verificou-se que, no dormente de concreto, em comparação com o dormente de madeira prismática, houve uma variação considerável nas tensões, com uma redução média nos valores das tensões de 39% para o lastro, 27% para o sublastro e 12% para o subleito. A variação do espaçamento dos dormentes possibilitou perceber que, quanto mais espaçados os dormentes, maiores as tensões nas demais camadas, tanto para dormentes de concreto quanto de madeira. Outra análise possível foi que a variação das tensões com todos os parâmetros que foram variados se deram em faixas percentuais parecidas para os dormentes de madeira e concreto, sendo que os de concreto tiveram uma variação menor em torno de 2% em média.

Palavras-chave: ferrovia; dimensionamento; Kentrack; comportamento.

ABSTRACT

Due to its territorial proportions, Brazil has enormous potential for the development of the railway, since, among those existing, the railroad is the ideal means of transport for long distances with larger cargo volumes. Nevertheless, the investment of previous governments was focused on road transport, as can be seen in the Brazilian transport matrix, where the participation of road transport is predominant. Despite Brazil's increasing investment in railways, much remains to be explored in this regard. A new railroad track is being studied, the Cerrado Railway, with a stretch between Alto Araguaia-MT and Uberlândia-MG, with a total of 671 kilometers. This work makes a sizing of this stretch through formulas presented in the literature. Subsequently, the behavior of the railway pavement was analyzed by means of stress values in the ballast, subgrade and subgrade layers that were generated in the *Kentrack 4.0 software*, with the change of design parameters, such as the rail class, the material and spacing of the ties. All *software* results were consistent with the reality and the bibliography studied. For the variation of the rail type, it was concluded that the heavier the rail, the lower the compression stresses that pass to the lower layers. With the variation of the type of material of the sleeper, it was found that in the concrete sleeper, compared to the prismatic wood sleeper, there was a considerable variation in the tensions, with an average reduction in the stress values of 39% for the ballast. 27% for sub-ballast and 12% for subgrade. The variation in the spacing of the ties made it possible to realize that the more spaced the ties, the higher the stresses in the other layers, both for concrete and wooden ties. Another possible analysis was that the variation of the stresses with all the parameters that were varied occurred in very similar percentage ranges for the wooden and concrete ties, while the concrete ones had a smaller variation around 2% on average.

Keywords: railroad; sizing; Kentrack; behavior.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	12
3 ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 Conceitos de ferrovia.....	12
3.1.1 Geometria	12
3.1.2 Bitola.....	12
3.1.3 Superelevação	14
3.1.4 Superlargura.....	14
3.1.5 Nivelamento.....	15
3.2 Via permanente.....	15
3.3 Componentes da superestrutura.....	16
3.3.1 Trilhos.....	16
3.3.2 Acessórios de fixação de trilhos	17
3.3.3 Dormentes.....	18
3.3.5 Sublastro	23
3.4 Esforços que atuam na via.....	24
3.4.1 Esforços verticais.....	24
3.4.2 Esforços longitudinais	25
3.4.3 Esforços transversais	25
3.4.4 Contato roda-trilho.....	25
3.4.5 Coeficiente dinâmico	26
4 METODOLOGIA	26
4.1 Análise das tensões na via	26
4.1.1 Método de Zimmermann	26
4.2 Critérios de dimensionamento.....	28
4.2.1 Módulo de via	28
4.2.2 Pré-Dimensionamento do Trilho	29
4.2.3 Tensões no Trilho	30
4.2.4 Tensões na interface dormente-lastro	31
4.2.5 Tensões no lastro	31
4.2.6. Tensões no sublastro.....	32
4.3 Software Kentrack 4.0.....	32

4.3.1 Princípio da superposição	34
5 RESULTADOS.....	34
5.1 Resultados do dimensionamento da via permanente.....	35
5.1.1 Dimensionamento do trilho	35
5.2.1 Dimensionamento dos dormentes.....	38
5.3.1 Altura de lastro e sublastro	39
5.2 Resultados do Kentrack 4.0 e análises feitas.....	41
5.2.1 Variação do tipo de trilho e material do dormente	41
5.2.2 Variação do espaçamento dos dormentes	48
6 CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS.....	55
ANEXO A: VAGÃO HOPPER HFS.....	58
ANEXO B: LOCOMOTIVA C44-9W	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bitola da via ferroviária.....	13
Figura 2 - Superelevação da via férrea.....	14
Figura 3 - Superlargura de uma via férrea	15
Figura 4 - Traçado em planta (planimétrico)	15
Figura 5 - Traçado em perfil (altimétrico)	15
Figura 6 - Via permanente	16
Figura 7 – Trilho ferroviário	16
Figura 8 - Evolução do perfil dos trilhos - Perfil de Aço "Chato" para apoio contínuo	17
Figura 9 - Evolução do perfil dos trilhos - Perfil para "apoios contínuos"	17
Figura 10 - Pregação cruzada.....	18
Figura 11 - Tirefond.....	18
Figura 12 - Dimensões dos dormentes de madeira	19
Figura 13 - Dormente de aço.....	20
Figura 14 - Dormente monobloco.....	20
Figura 15 - Dormente bi-bloco.....	20
Figura 16 - Dormente de plástico.....	21
Figura 17 - Dimensões do dormente	28
Figura 18 - Distribuição hipotética das tensões no contato dormente-lastro	31
Figura 19 - Tipo de estruturas que o <i>Kentrack</i> analisa	32
Figura 20 - Interface do <i>Kentrack</i> 4.0	33
Figura 21 - Sobreposição por múltiplas cargas	34
Figura 22 - Dimensões do dormente adotadas	37
Figura 23 - Estrutura da via férrea detalhada	41
Figura 24 - Variação das tensões de compressão com variação dos trilhos para dormentes de madeira.....	42
Figura 25 - Variação percentual dos valores das tensões de compressão no lastro com a variação dos trilhos para dormentes de madeira	44
Figura 26 - Variação percentual dos valores das tensões de compressão no sublastro com a variação dos trilhos para dormentes de madeira	44
Figura 27- Variação percentual dos valores das tensões de compressão no subleito com a variação dos trilhos para dormentes de madeira	44

Figura 28 - Variação das tensões de compressão com variação dos trilhos para dormentes de concreto.....	45
Figura 29 - Variação percentual dos valores das tensões de compressão no lastro com a variação dos trilhos para dormentes de concreto	46
Figura 30 - Variação percentual dos valores das tensões de compressão no sublastro com a variação dos trilhos para dormentes de concreto	47
Figura 31- Variação percentual dos valores das tensões de compressão no subleito com a variação dos trilhos para dormentes de concreto	47
Figura 32 - Variação das tensões de compressão variando o material do dormente para o trilho TR45.....	48
Figura 33 - Variação das tensões de compressão para variação do espaçamento do dormente de madeira com trilho TR45	49
Figura 34 - Variação percentual das tensões das camadas em função da variação do espaçamento dos dormentes de madeira para o trilho TR45	50
Figura 35 - Variação das tensões de compressão para variação do espaçamento do dormente de madeira com trilho TR50	50
Figura 36 - Variação das tensões de compressão para variação do espaçamento do dormente de madeira com trilho TR50	51
Figura 37- Variação das tensões de compressão para variação do espaçamento do dormente de concreto para o trilho TR45	51
Figura 38 - Variação percentual das tensões das camadas em função da variação do espaçamento dos dormentes de concreto para o trilho TR45.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Bitolas ferroviárias no Brasil	13
Tabela 2 - Especificações do lastro.....	22
Tabela 3 - Características do sublastro	23
Tabela 4 - Granulometria do sublastro.....	24
Tabela 5 - Coeficientes do lastro.....	27
Tabela 6 - HFS Vagão Hopper (ALL)	35
Tabela 7 - Locomotiva C44-9W	35
Tabela 8 - Características dos trilhos	35
Tabela 9 - Tensão admissível dos trilhos	36
Tabela 10 - Trilho TR45	36
Tabela 11 - Taxa de dormentação para bitola larga (1,6m)	37
Tabela 12 - Dados para o dimensionamento dos dormentes.....	38
Tabela 13 - Variação percentual das tensões variando o tipo de trilho com dormentes de madeira.....	43
Tabela 14 - Variação percentual das tensões variando o tipo de trilho com dormentes de concreto.....	45
Tabela 15 - Variação percentual das tensões de compressão usando o dormente de concreto para o trilho TR45.....	48
Tabela 16 - Variação percentual das tensões de compressão ao variar o espaçamento dos dormentes de madeira para o trilho TR45.....	49
Tabela 17 - Variação percentual das tensões de compressão ao variar o espaçamento dos dormentes de concreto para o trilho TR45.....	52

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, durante o período imperial, as primeiras ferrovias tiveram como objetivo fazer a integração das regiões e escoar a produção do interior até os mercados consumidores e os portos. Entre 1930 e 1960, nos governos de Getúlio Vargas (1930-1945) e Juscelino Kubitschek (1956-1961) focaram os investimentos nas rodovias e no setor automobilístico, estratégia que se mantém até hoje. (SANTOMAURO, 2012).

Apesar do investimento em ferrovias estar cada vez mais crescente, o Brasil, se comparado a países com extensão territorial como Rússia, Estados Unidos e Canadá, ainda tem uma participação reduzida quando o assunto é este modal na matriz de transporte de cargas e pessoas.

A qualidade da vida urbana está diretamente associada à qualidade dos meios de locomoção. Nesse contexto, as ferrovias desempenham papel fundamental, porque trazem diversos benefícios para as comunidades por onde passam e para o país como um todo (VALE, 2017).

Como sugestão de ampliação da malha ferroviária, a Política Nacional de Transportes (BRASIL, 2018a) propõe, como estratégia governamental, a priorização de projetos ferroviários voltados ao desenvolvimento logístico e a integração da rede de transportes. Nesse contexto, surge a Ferrovia do Cerrado, com trecho estabelecido entre Alto Araguaia-MT e Uberlândia-MG (BRASIL, 2018b), que visa suprir o transporte de grãos e dar um maior apoio ao agronegócio e agroindústria na região centro-oeste. Com extensão aproximada de 671 Km, a concepção será em linha singela e com o emprego de bitola larga (1,6 metros). O trecho em questão está em fase de avaliação para consequente análise técnica pelo governo federal, o que mostra a potencialidade de estudo de novas linhas ferroviárias.

Assim, pretende-se neste trabalho primeiramente realizar o dimensionamento da via permanente da Ferrovia do Cerrado com dados presentes na literatura para os trilhos, dormentes, lastro, sublastro e subleito. Para essas camadas inferiores, serão usados dados de solos próximos da região de estudo. Após feito esse dimensionamento, serão feitas diversas simulações computacionais no *software Kentrack 4.0* para obter os valores de tensões de compressão nas camadas de lastro, sublastro e subleito com a variação de alguns parâmetros, como a classe do trilho, o material e o espaçamento dos dormentes, para que se possa fazer a análise do comportamento dessas tensões através de gráficos e tabelas.

2 OBJETIVOS

Esse trabalho é dividido em duas etapas e tem como objetivo primeiramente fazer o dimensionamento da via permanente da ferrovia do Cerrado com dados presentes na bibliografia e após isso, com a utilização do *software Kentrack 4.0* serão gerados diversos valores de tensões de compressão nas camadas de lastro, sublastro e subleito com a variação de alguns parâmetros, como a classe dos trilhos, os materiais dos dormentes e os espaçamentos dos dormentes. Com isso, será possível fazer a análise do comportamento que os valores dessas tensões tiveram por meio de gráficos e tabelas.

3 ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

3.1 Conceitos de ferrovia

Neste tópico serão abordados conceitos relacionados ao dimensionamento de uma linha férrea, abordando todos os parâmetros necessários para que se possa ter a melhor estabilidade possível para os veículos ferroviários que nela trafegarem. Diversos conceitos consolidados por meio de livros, dissertações e teses serão abordados.

3.1.1 Geometria

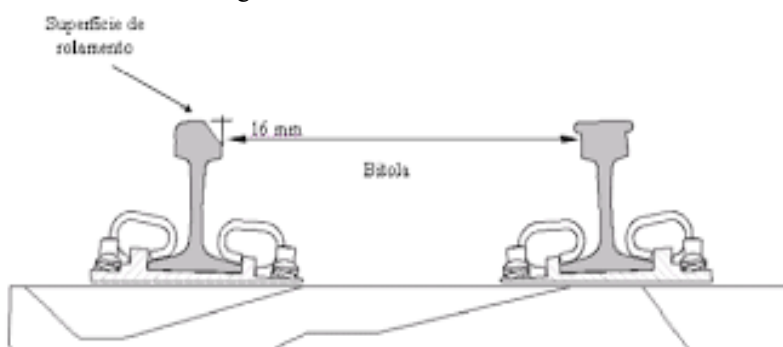
A geometria da via férrea tem a função de garantir segurança no rolamento e na inscrição dos veículos ferroviários nas velocidades que foram determinadas. Uma boa geometria traz menores desgastes aos trilhos e às rodas do veículo, o domínio desses conceitos é de grande importância para a análise das tensões e deformações que eventualmente irão aparecer no pavimento ferroviário, o que leva a custos de manutenção e níveis de desgastes menores.

O termo geometria refere-se à posição que cada fila de trilho ocupa no espaço, variando no sentido longitudinal por meio dos greides e concordâncias verticais, formando o perfil altimétrico da linha. Os trilhos também variam no sentido transversal, o que formam o perfil planimétrico da via (FILHO, 2013). A geometria depende da planimetria, uma vez que a altimetria fica menos sujeita a manutenção, já que está materializada na construção de rampas e curvas verticais nas plataformas. Serão abordados na sequência os principais conceitos referentes ao estudo da geometria de uma linha férrea.

3.1.2 Bitola

Por definição, bitola é a largura determinada pela distância medidas entre as faces interiores das cabeças de dois trilhos em uma via férrea. No padrão americano, deve ser medida 16 mm abaixo do plano de rolamento e 10 mm no padrão espanhol. A Figura 1 mostra como é medida a bitola ferroviária.

Figura 1 - Bitola da via ferroviária



Fonte: ANTT, 2013

No Brasil, a bitola mais recorrente é a bitola métrica (1 metro), que está presente em mais de 23.000 km de trilhos em todo o país. Também é comum no Brasil o uso da bitola larga (1,6 metros) que foi adotada para as novas ferrovias de carga pelo país, já que sua capacidade de transporte é maior. A bitola larga está presente em aproximadamente 4.000 km de trilhos no Brasil. A Tabela 1 apresenta as bitolas ferroviárias no Brasil.

Tabela 1 - Bitolas ferroviárias no Brasil

Extensão da Malha Ferroviária – 2015					
Extensões em km					
Operadoras Reguladas pela ANTT	Origem	Bitola			Total
		1,6	1	Mista	
ALLMN - América Latina Logística Malha Norte	-	735	-	-	735
ALLMO – América Latina Logística Malha Oeste	RFFSA	-	1.953	-	1.953
ALLMP - América Latina Logística Malha Paulista	RFFSA	1.533	305	269	2.107
ALLMS – América Latina Logística Malha Sul	RFFSA	-	7.223	-	7.223
EFC – Estrada de Ferro Carajás	-	997	-	-	997
EFVM – Estrada de Ferro Vitória a Minas	-	-	888	-	888
FCA – Ferrovia Centro-Atlântica	RFFSA	-	7.085	130	7.215
FNS S/A -Ferrovia Norte-Sul TRAMO NORTE (VALEC-Subconcessão)	-	745	-	-	745
FERROESTE – Estrada de Ferro Paraná Oeste	-	-	248	-	248
FTC – Ferrovia Tereza Cristina	RFFSA	-	163	-	163
MRS – MRS Logística	RFFSA	1.708	-	91	1.799
FTL S/A - Ferrovia Transnordestina Logística	RFFSA	-	4.257	20	4.277
VALEC/Subconcessão: Ferrovia Norte-Sul TRAMO CENTRAL	-	815	-	-	815
Subtotal	-	6.533	22.122	510	29.165
Demais Operadoras	Origem	Bitola			Total
		1,6	1	Mista	
Comp. Bras. de Trens Urbanos – CBTU – Passageiros	-	57	149	-	206
Supervia/CPTM/Trensurb/METRO-SP RJ – Passageiros	-	832	22	-	854

Trombetas/Jari/Amapá – Carga	-	70	230	-	300
Corcovado/Campos do Jordão	-	-	51	-	51
Subtotal	-	959	452	-	1.411
TOTAL	-	7.492	23.027	510	30.576

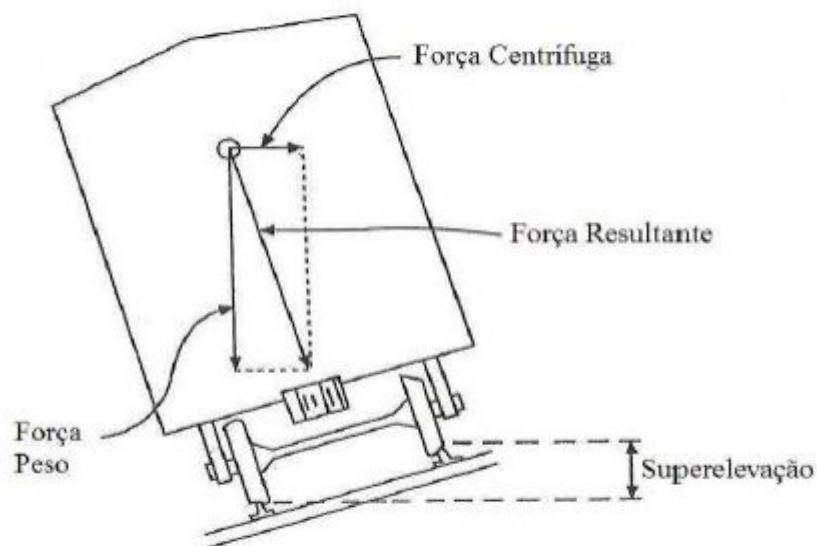
Fonte: ANTT, 2015

3.1.3 Superelevação

É a elevação do nível do trilho externo de uma curva. O nível dos boletos é alterado na seção transversal da linha na parte externa do trilho para que a ação da força centrífuga seja compensada. Também é conhecida como superelevação teórica, e depende de fatores como a velocidade máxima de projeto e do raio da curva para evitar o risco de tombamento para o lado interno da curva. Além disso, a superelevação possibilita um menor desconforto, menor desgaste no contato metal-metal.

Para cada valor especificado de velocidade e raio da curva, o valor da superelevação é diferente. Entretanto, os trens não operam em velocidade constante e, por isso, de acordo com o estudo de Garcia et. al. (1952), deve ser indicado um percentual de redução para a determinação da superelevação prática em 2/3 do valor teórico de acordo com a segurança e conforto do usuário. (FILHO, 2013). A Figura 2 mostra as forças da superelevação da via férrea.

Figura 2 - Superelevação da via férrea

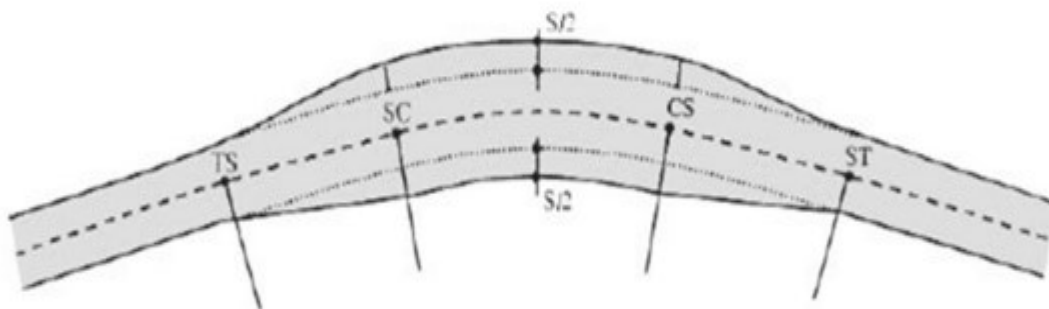


3.1.4 Superlargura

É o alargamento da bitola nas curvas para facilitar a inscrição do truque ou reduzir o escorregamento das rodas. A distribuição geralmente se dá antes da curva circular ou durante a curva de transição, podendo variar de 1 a 2 cm, com o deslocamento do trilho interno. A superlargura está caindo em desuso devido à fixação e placas de apoio robustas. Além disso,

curvas com raios superiores a 100 metros, é desaconselhável o uso da superlargura devido ao descarrilamento que pode ser causado. A Figura 3 mostra a superlargura da via férrea

Figura 3 - Superlargura de uma via férrea

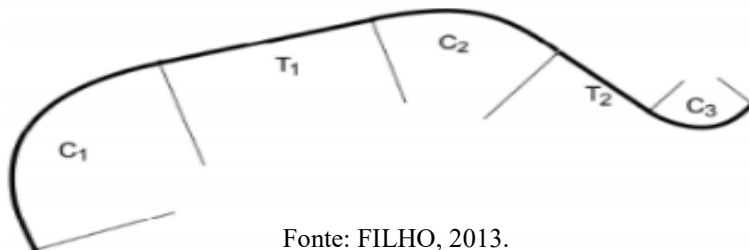


Fonte: FILHO, 2013.

3.1.5 Nivelamento

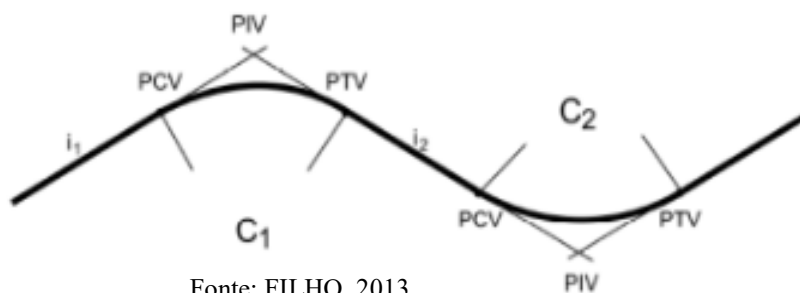
Para que a geometria da via tenha os custos de manutenção reduzidos, é necessário que haja alinhamento horizontal e transversal (nivelamento da via), que pode ser altimétrico e planimétrico. Ambos são compostos por tangentes e curvas dispostas de forma contínua, porém, no último caso citado, dois greides retos definidos por suas declividades devem concordar entre si por intermédio de uma curva, como mostram as Figuras 4 e 5. (FILHO, 2013).

Figura 4 - Traçado em planta (planimétrico)



Fonte: FILHO, 2013.

Figura 5 - Traçado em perfil (altimétrico)

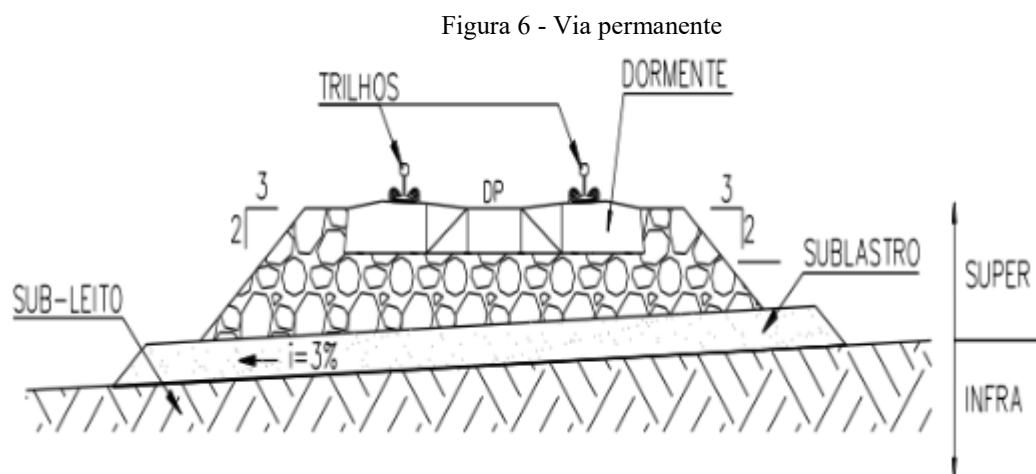


Fonte: FILHO, 2013.

3.2 Via permanente

A via permanente é dividida em superestrutura e infraestrutura. A superestrutura ferroviária é o segmento da via permanente responsável por receber os impactos diretos da carga. Seus principais componentes são os trilhos, os acessórios de fixação, os aparelhos de

mudança de via, os dormentes, o lastro e o sublastro, como mostrado na Figura 6, onde esses elementos são aqueles que se encontram sujeitos às ações de degradação provocadas pela circulação dos veículos e de deterioração por ataque do meio ambiente. A infraestrutura ferroviária é o conjunto de obras que formam a plataforma da estrada e suporta a superestrutura, sendo composta por terraplenagem (cortes e aterros), sistemas de drenagem superficial e profundo, obras de arte correntes e especiais (pontilhões, pontes e viadutos) e túneis (FILHO, 2018).



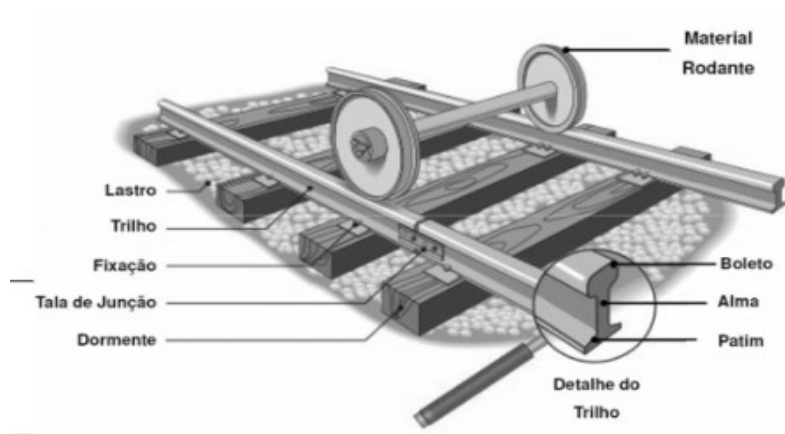
Fonte: FILHO, 2013.

3.3 Componentes da superestrutura

3.3.1 Trilhos

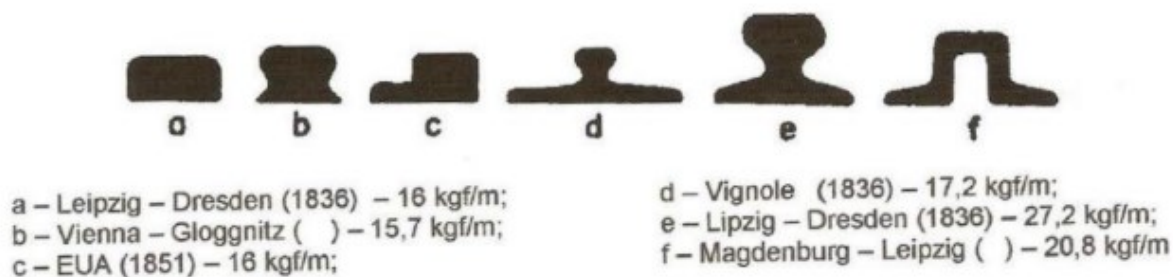
São componentes de aço, posicionados longitudinalmente na via. É o elemento da superestrutura que funciona como guia dos veículos ferroviários, além de transmitir e distribuir as cargas provenientes da passagem dos veículos nos dormentes, fornecer uma superfície de rolamento adequada e distribuir as forças de aceleração e frenagem e de conduzir corrente elétrica para os circuitos de segurança da via. A Figura 7 mostra o esquema de um trilho ferroviário.

Figura 7 – Trilho ferroviário



Ao longo dos anos, os trilhos foram sofrendo diversas otimizações devido ao desenvolvimento da tecnologia do aço, conforme a Figura 8. A forma e comprimento evoluíram até garantirem seções modernas e pesos por metro, com grande capacidade de suporte de cargas por eixo, que será apresentada na Figura 9 (FILHO, 2013).

Figura 8 - Evolução do perfil dos trilhos - Perfil de Aço "Chato" para apoio contínuo



Fonte: FORTUNATO, 1999

Figura 9 - Evolução do perfil dos trilhos - Perfil para "apoios contínuos"



Fonte: FORTUNATO, 1999.

Existem diversas entidades ao redor do mundo que trata das características e ensaios específicos para a implementação na via de trilhos (FILHO, 2013).

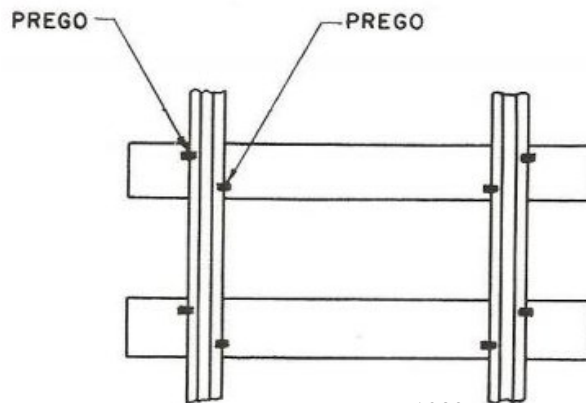
3.3.2 Acessórios de fixação de trilhos

Os trilhos recebem as cargas dos veículos ferroviários e transmitem os esforços para os dormentes. Com isso, os trilhos precisam de fixações para que possa garantir a conexão entre trilho e dormente, além de terem outras funções, como: transmitir pressão uniforme ao patim; garantir a bitola da via; transmitir os esforços para o dormente sem sofrer danos; apresentar elevada resistência ao deslocamento longitudinal; apresentar vida útil duradoura e possibilitar a inclinação nos trilhos de forma permanente. As fixações dos trilhos são classificadas como rígidas ou flexíveis. As fixações rígidas promovem a compressão do trilho no apoio, com a função de impedir o escorregamento. As principais fixações rígidas são os pregos e Tirefond (CAVA, 2018).

Os pregos são cravados com golpes de marreta em locais de pré furo. Geralmente é feita a “pregação cruzada”, que consiste em pregos deslocados do centro do dormente em posição

diagonal, em lados opostos do eixo do trilho. Quando ocorrer o afrouxamento dos pregos, a pregação é facilitada. A Figura 10 mostra como é a pregação cruzada

Figura 10 - Pregação cruzada



Fonte: BRINA, 1983.

O tirefond é uma espécie de parafuso, que é ligado aos dormentes por meio de uma tirefonadeira. É uma fixação de melhor qualidade que o parafuso, porque não danifica tanto o dormente e garante melhor resistência ao arrancamento. O formato da cabeça do tirefond permite um total isolamento do furo, o que impede a penetração de água que poderia gerar danos à estrutura. (CAVA, 2018).

Figura 11 - Tirefond



As fixações elásticas geram compressão na fixação, mas com articulações que permitem um movimento mínimo nos trilhos. As principais fixações elásticas são: grampo elástico, placa de apoio, placa amortecedora, fixação pandrol e fixação Deenik.

3.3.3 Dormentes

São elementos estruturais localizados na direção transversal ao eixo da via permanente, onde estão localizados os trilhos ferroviários. Os dormentes possuem as seguintes finalidades:

- Transmitir as cargas provenientes dos trilhos o mais uniformemente possível para o lastro;

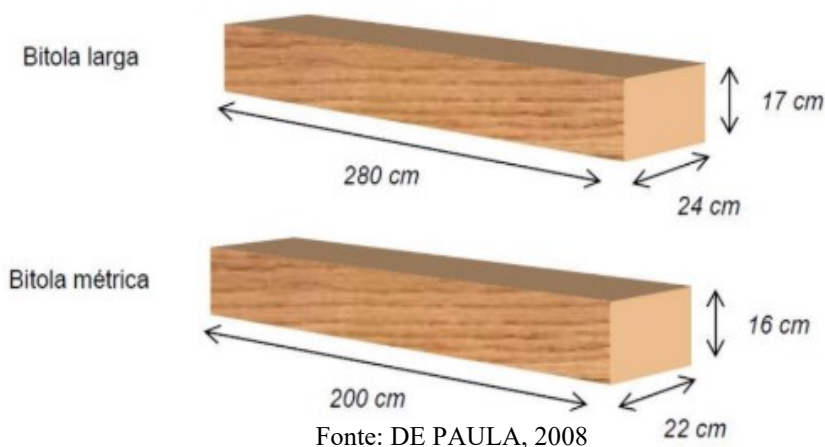
- Manter a bitola e a estabilidade vertical, lateral e longitudinal da via;
- Garantir suporte adequado e seguro ao trilho;
- Amortecer as vibrações;

Os dormentes devem apresentar algumas características indispensáveis, como rigidez (permitindo alguma elasticidade); suficiente resistência aos esforços solicitantes; permitir uma boa fixação ao trilho; durabilidade e fácil manuseio; dimensões que forneçam superfície de apoio para que a taxa de trabalho no lastro não ultrapasse os limites relativos a este material.

Existem quatro materiais para fabricação dos dormentes, sendo: madeira, aço, concreto e plástico. A escolha depende do desenvolvimento da indústria de fabricação, do custo de cada um, e do tipo de dormente que já é utilizado pela concessionária.

Os dormentes de madeira possuem várias qualidades, como: bom isolamento térmico quando não saturados em umidade; pode ser reutilizado; possui custo inicial baixo; absorve bem os impactos da roda descarrilada sem se partir; permite correção da bitola e é de fácil instalação e manutenção. Eles devem receber tratamento químico para que possa ser protegido de ataques de fungos e insetos. As dimensões tradicionais de dormentes de madeira prismáticos estão especificadas na Figura 12.

Figura 12 - Dimensões dos dormentes de madeira



Fonte: DE PAULA, 2008

Os dormentes de aço são de fácil assentamento, por serem leves, o que também os torna desaconselhável para linhas de tráfego pesado. Eles possuem algumas qualidades, como: vida útil elevada; baixo custo de instalação e transporte simples e serem incombustíveis. Porém, apresentam algumas desvantagens, tais como o custo inicial alto, o fato de não ser isolante natural e não se prestar à correção da bitola. A Figura 13 mostra a utilização do dormente de aço em uma ferrovia.

Figura 13 - Dormente de aço



Os dormentes de concreto apresentam vida útil e resistência lateral elevada, além de grande resistência mecânica e ancoragem adequada. Porém, proporcionam uma rigidez a linha, que, dependendo das condições do lastro, ocasionam uma alteração no comportamento da via, devido a não amortização das cargas. Também são de difícil trabalhabilidade devido ao seu peso, demandando grande investimento para seu manuseio (FILHO, 2013). Além disso, possuem custo inicial alto, não suportam o descarrilamento, não são isolantes naturais e são pesados e quebradiços. Podem ser do tipo monobloco (Figura 14) e bi-bloco (Figura 15).

Figura 14 - Dormente monobloco



Figura 15 - Dormente bi-bloco



Os dormentes de plástico possuem características favoráveis pois consiste em um material com bom isolamento elétrico, são de fácil instalação e manutenção, e podem ser usados em conjunto com a madeira. Apesar disso, possui algumas desvantagens, como o seu tempo de experiência que é pequeno em relação aos outros materiais e o seu preço elevado. A Figura 16 mostra um exemplo de dormente de plástico.

Figura 16 - Dormente de plástico



Fonte: MRS (2007).

A configuração da dormentação na via permanente depende das características físicas da via, devendo ser realizado uma série de estudos para ver qual o melhor custo benefício possível. A NB-476 (1979) determina o espaçamento máximo entre dormentes de acordo com a classe da via e da velocidade, apesar de não apresentar nenhuma justificativa técnica ou cálculos que corroborem a informação (FILHO, 2013).

3.3.4. Lastro

O lastro é o elemento da superestrutura situado entre os dormentes e o sublastro e tem a função de distribuir de forma uniforme para a plataforma da infraestrutura os esforços que são resultantes das cargas do material rodante, para que possa garantir a via permanente elasticidade, além de facilitar a drenagem da água da chuva e impedir o deslocamento dos dormentes (COIMBRA, 2008).

Essa camada deve apresentar algumas características que são indispensáveis para que se tenha o melhor custo benefício da via férrea, como:

- Possuir elasticidade limitada, para abrandar os choques;
- Ter dimensões que permitam sua interposição entre os dormentes e abaixo dos mesmos;
- Ter suficiente resistência aos esforços transmitidos pelos dormentes;
- Não produzir pó;
- Ser resistente aos agentes atmosféricos;
- Deve ser francamente permeável;

O lastro é a camada do pavimento ferroviário que tem o dimensionamento mais passível de discussão por parte de projetistas, já que as formulações utilizadas para projetos nacionais

consideram apenas dados estrangeiros, sem investigações e estudos específicos de nossas britas e sem embasamento técnico mecanístico (FILHO, 2013). Alguns dados são adotados no Brasil por meio de normas técnicas, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Especificações do lastro

Forma média das partículas (ABNT NBR 5564:2011)	Cúbica
Massa específica aparente mínima (ABNT NBR 5564:2011)	2500 kg/m ³
Partículas máximas não cúbicas (ABNT NBR 5564:2011)	15%
Absorção máxima de água (ABNT NBR 5564:2011)	0,8%
Porosidade aparente mínima (ABNT NBR 5564:2011)	1,5%
Pureza/sulfato de sódio (ASTM-C 88)	5%
Resistência ao desgaste – abrasão Los Angeles (ABNT NBR NM 51:2001)	30%
Resistência ao choque – índice de tenacidade Treton máxima (ABNT NBR NM 51:2001)	25%
Resistência mínima à compressão axial (ABNT NBR 5564:2011)	100 MPa
Materiais pulverulentos (ABNT NBR NM 46:2003)	1%
Torrões de argila (ABNT NBR 7218:2010)	0,5%
Fragmento macios e friáveis	5%

Fonte: AREMA, 2015

Outro parâmetro de grande importância para o estudo do lastro é a altura. Como esta camada é a mais elástica, quanto maior a altura, melhor é a distribuição de cargas, fazendo com que as tensões que chegam no sublastro e subleito sejam reduzidas (FILHO, 2013).

Os materiais dessa camada podem ser:

- Terra: material mais barato, porém o pior que pode ser usado, devido a frequente saturação pela água, o que gera desnivelamento na linha;
- Areia: material pouco compressível e pouco permeável que é facilmente levada pela água e produz uma poeira de grãos duros;
- Cascalho: ótimo material para o lastro. Em linhas de maior tráfego, deve ser lavado para separação da terra e das impurezas;
- Escórias: algumas tem dureza e resistência suficiente para que possam ser empregadas como lastro;

- Pedra britada: melhor tipo de lastro. É resistente, inalterável aos agentes atmosféricos, permeável e permite um ótimo nivelamento, além de ser limitadamente elástico e não produzir poeira.

3.3.5 Sublastro

É uma camada localizada entre o lastro e o subleito, geralmente constituída por material granular, bem graduado. Tem a finalidade de aumentar a capacidade de suporte da plataforma, evitar a penetração do lastro na plataforma, aumentar a resistência do leito à erosão e a penetração de água e permitir relativa elasticidade ao apoio do lastro.

Diferente do lastro, que o material é mais caro e de grande consumo, o sublastro pode ser feito com material mais barato e encontrado nas proximidades, já que é uma camada mais profunda. A sua espessura deve ser tal que a distribuição das pressões acarrete, na sua base, uma taxa de trabalho compatível com a capacidade de suporte da mesma, variando geralmente entre 20 a 30 cm.

Assim como o lastro, para o sublastro também há a definição de propriedades dos materiais para que a camada seja feita. A Tabela 3 mostra as propriedades mínimas do material que será empregado como lastro e a Tabela 4 a faixa granulometria deste material.

Tabela 3 - Características do sublastro

Granulometria (DNER-M 80-64)	Enquadrar nas faixas A, B,C D e/ou F da AASHO
Índice de suporte Califórnia (DNER-ME-49-94)	20%
Material retido na peneira n° 10	Partículas duras, duráveis, isentas de fragmentos moles, alongados ou achatados, isentos de material vegetal ou outra substância prejudicial
Material passante na peneira n° 200	Menor que 2/3 da passante na peneira n° 40
Material passante na peneira n° 40	Limite de liquidez inferior ou igual a 25% e índice de plasticidade inferior ou igual a 6%
Expansão máxima	1%
Índice de grupo	0

Para solo laterítico	Expansão máxima de 0,5%; Fração que passa da peneira n° 40 com limite de liquidez inferior ou igual a 40% e índice de plasticidade inferior ou igual a 15%.
----------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: DNIT, 2015

Tabela 4 - Granulometria do sublastro

Peneira	A	B	C	D
	% em peso passando pelas peneiras			
2"	100	100	-	-
1"	-	75-90	100	100
n° 4	25-55	20-60	35-65	50-85
n° 10	15-40	20-60	25-50	40-70
n° 40	8-20	15-30	15-30	25-45
n° 200	2-8	5-15	5-15	5-20

Fonte: AASHTO

3.4 Esforços que atuam na via

A via férrea deve suportar todas as solicitações da composição, incluindo a força centrífuga quando as composições se deslocam em curvas. Porém, essas solicitações são diretamente afetadas pelos defeitos que a própria via apresenta (FILHO, 2013), como defeitos de fabricação, defeitos originados pelo serviço e nos parâmetros geométricos. Os esforços são divididos em normais (cargas verticais e força centrífuga) e anormais (defeitos na via e material rodante).

3.4.1 Esforços verticais

- Carga estática: é a carga que é originada diretamente do peso dos veículos. É considerada estática quando a locomotiva e vagões estiverem parados sobre a via.
- Força centrífuga vertical: é a força resultante dos movimentos em curvas, que causam choques no contato roda-trilho.
- Movimento de galope: resultante das irregularidades da via, como juntas ou defeitos. É um movimento em um plano vertical paralelo aos trilhos, que causa a sobrecarga dos eixos dianteiro e traseiro (FILHO, 2013).
- Movimento de trepidação: também é causado pelas irregularidades, porém com compressão das molas do truque dianteiro e traseiro ao mesmo tempo.
- Movimento de balanço: movimento que é causado por irregularidades de forma perpendicular à via, o que causa a sobrecarga alternada dos lados dos veículos.
- Repartição desigual do peso das curvas: ocorre com veículos que operam em velocidade superior a projetada na superelevação, o que ocasiona sobrecarga no trilho.
- Defeitos da linha: gera sobrecarga na distribuição das cargas verticais.

- Defeitos no material rodante aumenta a carga estática.

3.4.2 Esforços longitudinais

- Dilatação e retração: causam compressão e tração paralelas ao eixo dos trilhos.
- Golpes de rodas no topo do trilho: ocorrem nas juntas defeituosas e podem gerar forças que deslocam o trilho para frente.
- Esforço trator: é a força de atrito que é contrária ao deslocamento. Rompe a inércia e permite o movimento do veículo.
- Frenagem: é a força de atrito no sentido do movimento.
- Atrito dos frisos das rodas nos trilhos: também é uma força de atrito no sentido do movimento. Gera uma componente de força longitudinal a via

3.4.3 Esforços transversais

- Força centrífuga: é o esforço que é gerado pela força centrífuga que não foi compensada pela superelevação.
- Movimento Lacet: também conhecido como Movimento Hunting. É causado por irregularidades do alinhamento, que causa o alargamento da bitola.
- Vento: o material rodante contém uma superfície exposta considerável, podendo o vento causar um esforço dos frisos das rodas. (FILHO, 2013).

3.4.4 Contato roda-trilho

É a interação entre os trilhos e o material rodante. O contato entre os aços provoca um desgaste considerável dessas partes devido à força que essas cargas são aplicadas, podendo ser os itens de maior custo de manutenção da via (FILHO, 2013).

Desde o início do século passado, o estudo do contato roda-trilho vem crescendo à medida que a ferrovia busca sempre aumentar a eficiência do transporte de carga. Isto se torna muito claro com os diversos desenvolvimentos que têm levado ao constante aumento da carga por eixo (aumento da capacidade de transporte) e a velocidades de tráfego cada vez mais elevadas (SISDELLI, 2006). Segundo Barbosa (1999), estes dois fatores possuem aspectos negativos. O aumento da velocidade faz com que aumentem as oscilações laterais instáveis ao veículo e o aumento de carga agrava os danos provocados pelas solicitações de contato entre a roda e o trilho. Qualquer desenvolvimento que leve em conta o aumento da velocidade ou da carga deve considerar a segurança, conforto, redução de custo de manutenção e consumo de combustível (SISDELLI, 2006).

Com isso, novas tecnologias vão surgindo para que se possa obter o maior custo benefício possível com as vias, como novos materiais para rodas e trilhos, com truques de

inscrição radial, com baixa resistência rotacional, com perfis modificados de rodas e o esmerilhamento dos trilhos.

O comportamento das rodas quanto ao perfil não é o mesmo em todas as ferrovias, muitas têm particularidades que exigem o desenvolvimento de um perfil próprio.

A Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA) estabeleceu por norma em 1990 que este desgaste máximo não pode ultrapassar 25% da área do boleto, percentual também indicado por Brina (1979) e Stopatto (1987), e que o desgaste lateral não poderá atingir a superfície inferior do boleto. As bitolas largas e métricas não poderão exceder 1,620 m e 1,020 m respectivamente. (FILHO, 2013).

3.4.5 Coeficiente dinâmico

Segundo Hay (1982), as composições ferroviárias, ao se locomoverem, produzem impactos dinâmicos devido ao próprio rolamento, como deslizamentos, guinadas, choques ao torque aplicado nos rodeiros, transferência de cargas, vibrações e distribuição desigual ao carregamento. Esses fatores são aplicados à carga de roda estática, para que os níveis de carregamento de projeto possam ser representados para as respostas dos componentes da superestrutura e tensões no subleito (FILHO, 2013). A carga dinâmica pode ser obtida por meio da equação:

$$P_d = C_d \cdot P \quad (1)$$

Em que:

P_d = carga de roda vertical dinâmica

P = carga de roda estática

C_d = fator de carga dinâmica

O fator de carga depende da velocidade da via férrea, tendo diversos estudos como os de Brina (1979), Clark (1957), Thambiratnam (1996), além dos métodos americano e indiano que formulam o fator em questão. A adoção do fator de carga ainda é um assunto de grande discussão, em função dos diversos parâmetros que influenciam essa análise, já que a variação do coeficiente é extremamente influenciada pela qualidade da via.

4 METODOLOGIA

4.1 Análise das tensões na via

4.1.1 Método de Zimmermann

O método de Zimmermann considera inicialmente os dormentes como apoios elásticos e depois adota uma hipótese em que existe elasticidade na via.

Essa metodologia considera para cálculo dos esforços da via trilhos de comprimento infinito apoiados continuamente sobre molas de módulos constantes com reações de apoio proporcionais as suas deflexões (FILHO, 2013).

As hipóteses consideradas são: linha flexível e plataforma elástica.

1ª hipótese: considerando-se a flexibilidade da linha:

Para o cálculo do momento máximo, tem-se a equação (2):

$$M_{Máx} = \frac{7+8.\gamma}{8.(5+2.\gamma)} \cdot P \cdot C_d \cdot a \quad (2)$$

Em que:

$M_{Máx}$ = momento fletor máximo [kgf.m]

P = carga estática por roda [kgf]

C_d = coeficiente dinâmico

a = distância entre eixo dos dormentes (m)

γ = coeficiente de superestrutura

Sendo o coeficiente da estrutura dado por:

$$\gamma = \frac{6.E.I}{(D.a^3)} \quad (3)$$

Em que:

E = módulo de elasticidade do trilho [kgf/cm²]

I = momento de inércia do trilho [cm⁴]

D = coeficiente do dormente [kgf/cm]

Sendo o coeficiente do dormente dado por:

$$D = 0,9.C.b.a \quad (4)$$

Em que:

b = largura do dormente [cm]

C = coeficiente do lastro [kgf/cm³]

Na Tabela 5 observa-se os valores do coeficiente do lastro.

Tabela 5 - Coeficientes do lastro

Infraestrutura	Coeficiente de lastro (kgf/cm ³)
Ruim	2
Boa	5
Muito boa	10

Fonte: EISENMANN, 1977

A Figura 17 mostra as dimensões que são consideradas nos dormentes para os cálculos.

Figura 17 - Dimensões do dormente



2ª hipótese: considerando-se a plataforma elástica

Para o cálculo do momento máximo, tem-se a equação (5):

$$M_{Máx} = \frac{\gamma}{(2+3.\gamma)} \cdot P \cdot C_d \cdot a \quad (5)$$

Em que:

$M_{Máx}$ = momento fletor máximo [kgf.m]

P = carga estática por roda [kgf]

C_d = coeficiente dinâmico

a = distância entre eixo dos dormentes [m]

γ = coeficiente de superestrutura

4.2 Critérios de dimensionamento

4.2.1 Módulo de via

O módulo de via é um modelo-base de previsão de desempenho da via permanente pois, por meio do mesmo, é possível analisar a interação entre os componentes da superestrutura e da subestrutura da via provocada pela carga do material rodante e pelas deformações (SELIG E WATERS, 1994).

Muitos fatores podem influenciar no valor do módulo de via e, dentre os mais significativos têm-se: o tipo e as dimensões do dormente; o tipo, a espessura e a capacidade de suporte do lastro; e o tipo e a capacidade de suporte do subleito (LUNDGREN E HAY, 1970).

Durante os anos, vários pesquisadores realizaram testes para fazer a análise de tensões e comportamento mecânico da via permanente, por meio do módulo de via. Entretanto, cada estudo tem condição e parâmetros de via particularizada como: tipo de vagão, carga aplicada e velocidade empregada nos testes; uso de diferentes dispositivos na medição da deflexão vertical, com posicionamento em locais distintos e metodologia específica de cálculo do módulo de via. (COSTA, et al; 2015);

Segundo Selig e Li (1994), o principal fator que influencia o módulo de via é o módulo de resiliência do subleito, de tal forma que, a mudança do módulo de via no campo, é inicialmente uma indicação de mudança das condições do subleito. Da mesma forma a

espessura do lastro e a rigidez da fixação também afetam significativamente o módulo de via. Tanto que o aumento da espessura do lastro aumenta proporcionalmente o valor do módulo (FILHO, 2013).

Devido aos diversos estudos elaborados a respeito do assunto, o módulo de via pode ser calculado por meio da seguinte equação:

$$S = \frac{P_f - P_0}{y_f - y_0} \quad (6)$$

Em que:

S = índice de rigidez ou assentamento;

P_f = força aplicada no final do intervalo de assentamento;

P_0 = força aplicada no início do intervalo de assentamento;

Y_f = deflexão correspondente a P_f ;

Y_0 = deflexão correspondente a P_0 ;

O módulo de via de assentamento e de contato é dado por:

$$u = \sqrt[3]{\frac{S^4}{64.E.I}} \quad (7)$$

Sendo:

E = módulo de elasticidade do trilho [kgf/cm²]

I = momento de inércia do trilho [cm⁴]

4.2.2 Pré-Dimensionamento do Trilho

O trilho pode ser pré-dimensionado de acordo com algumas formulações:

- Fórmula do Congresso de Cairo:

$$Pt = 2,5Q_e \quad (8)$$

Em que:

P_t = peso do trilho (kgf/m);

Q_e = carga por eixo do veículo mais pesado (tf);

- Fórmula de Yershov

$$Pt = \frac{V_{Máx}}{2,2} \quad (9)$$

Em que:

$V_{Máx}$ = velocidade máxima admitida (km/h);

- Fórmula de Shulga

$$Pt = 31,046T^{0,203} \quad (10)$$

Em que:

T = carga transportada anualmente (MTB);

- Fórmula de Schramm

$$Pt = KQ_e \quad (11)$$

Em que:

K = 2 para tráfego leve ou de velocidade reduzida;

K = 2,8 para tráfego pesado ou de alta velocidade;

- Fórmula de Zimmermann

$$Pt = \frac{2 \cdot P_{M\acute{a}x} \cdot d}{K_v} \quad (12)$$

Em que:

$P_{M\acute{a}x}$ = esforço máximo cortante no trilho (tf);

d = espaçamento dos dormentes [m];

K_v = coeficiente devido à velocidade, que varia de 13 a 15 para altas velocidades e 15 a 17 para baixas velocidades;

- Fórmula de Shajunianz

$$Pt = a(1 + \sqrt[4]{T}) \cdot (1 + 0,012 \cdot V_{M\acute{a}x})^{0,667} \cdot Q_e^{0,667} \quad (13)$$

Em que:

a = 1,2 para vagões e 1,13 para locomotivas;

T = cargas transportadas anualmente (MTB);

$V_{M\acute{a}x}$ = velocidade máxima admitida (km/h);

Q_e = carga por eixo do veículo mais pesado (tf);

4.2.3 Tensões no Trilho

As tensões de tração do trilho dependem do momento fletor máximo. A tensão é calculada por:

$$\sigma = \frac{M_0 \cdot c}{I} \quad (14)$$

Em que:

M_0 = momento fletor máximo [kfg.m];

c = distância da base do trilho à linha neutra; [m]

I = momento de inércia do trilho; [m⁴]

4.2.4 Tensões na interface dormente-laastro

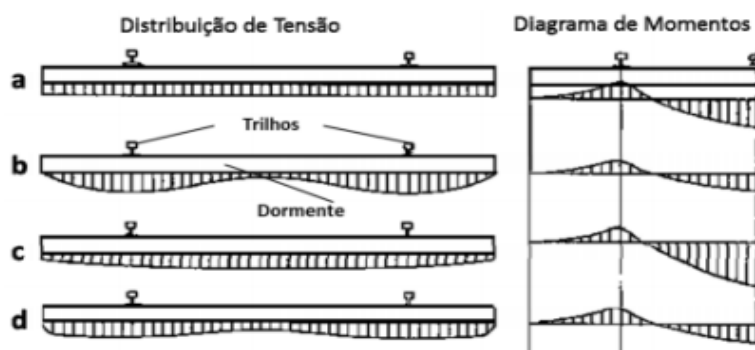
Os estudos existentes atualmente acerca das tensões na interface dormente-laastro ainda não conseguem explicar inteiramente como se dão as solicitações. É conhecido que a distribuição varia de acordo com o peso do veículo ferroviário (KLINCEVICIUS, 2011).

A Figura 19 mostra quatro tipos de distribuição hipotéticas de tensões no contato do dormente com o lastro. Na situação (a), a distribuição da tensão é feita de forma linear, o que não é visto na prática, já que o próprio dormente quando se flexiona causa uma variação na tensão. Após a socaria ser feita, o contato do trilho com o dormente ocorre em maior grau debaixo do trilho, especificado em (b) (SILVA, 2019).

A situação em (c), ocorre com maior frequência em pavimentos ferroviários com dormentação de aço ou concreto com pouca manutenção. Neste caso, os dormentes não possuem sustentação adequada apresentando oscilação transversal à via na passagem das cargas de roda (SILVA, 2019).

A medida que vão ocorrendo as passagens dos veículos, a estrutura se reacomoda com a distribuição das tensões tendendo a serem mais uniformes devido aos vazios criados entre a superfície do lastro e os dormentes, como demonstrado na situação (d) da Figura 18 (SILVA, 2019).

Figura 18 - Distribuição hipotética das tensões no contato dormente-laastro



Fonte: KLINCEVICIUS, 2011

4.2.5 Tensões no lastro

A AREA (American Railway Engineering Association), por meio de estudos feitos em laboratório, simulou lastros com alturas variadas, o que permitiu desenvolver uma formulação que é válida para determinação da tensão vertical sob a linha de centro do dormente, com alturas variando de 10 a 70 cm e dormente com 20 cm de largura, conhecida como fórmula de Talbot (FILHO, 2013).

$$\sigma_c = \frac{16,8\sigma_m}{h^{1,25}} \quad (15)$$

Em que:

σ_c = tensão na linha de centro do dormente; [kgf/m²]

σ_m = tensão média na base do dormente; [kgf/m²]

h = profundidade embaixo da base do dormente; [m]

4.2.6. Tensões no sublastro

A formulação mais usada para calcular tensões no sublastro é a de Heukelom e Klomp (1962).

$$\sigma_{adm} = \frac{0,006.Mr}{1+0,7.\log N} \quad (16)$$

Sendo que:

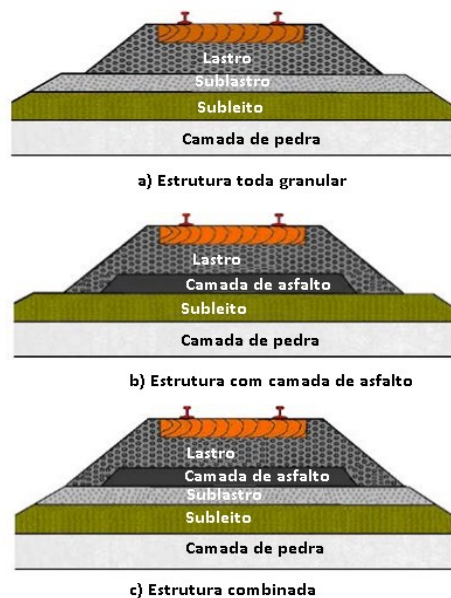
- N = 2,2.10⁶ para Grupo 1;
- N = 1,6.10⁶ para Grupo 2 e 3;
- N = 1,0.10⁶ para Grupo 4, 5 e 6;
- N = 0,6.10⁶ para Grupo 7, 8 e 9;

Mr = 100 x CBR_{subleito}

4.3 Software Kentrack 4.0

Kentrack 4.0 é um *software* desenvolvido pela faculdade de Kentucky nos Estados Unidos, cuja função é de gerar os valores das tensões de compressão nas camadas que compõem a via férrea, podendo ser utilizadas as camadas totalmente granulares e também camadas com asfalto. São três os tipos de estruturas de camadas que o *software* utiliza, conforme a Figura 19.

Figura 19 - Tipo de estruturas que o *Kentrack* analisa



Fonte: SHUSHU, 2013

A Figura 19 (a), contém camadas apenas granulares, como o lastro, sublastro e subleito. A Figura 19 (b) possui uma plataforma de asfalto, além do lastro e do subleito. Na Figura 19 (c), há a combinação dos dois tipos de camada, contendo o lastro, a camada asfáltica, sublastro e subleito. Os elementos usam camada de asfalto porque ela proporciona uma redução nas tensões que passam para o subleito, serve como uma camada de impermeabilização controlando a umidade e aumenta a resistência ao cisalhamento (SHUSHU, 2013).

O método utilizado pelo *Kentrack* é o método dos elementos finitos, que contém técnicas numéricas para encontrar aproximações de soluções de problemas matemáticos. Em situações complicadas de geometria, cargas e propriedades do material, não é possível resolver os problemas de forma analítica.

Para que o *Kentrack 4.0* gere os valores das tensões de maneira correta, primeiramente é necessário colocar os dados iniciais de acordo com a tela, conforme mostra a Figura 20. Após os dados iniciais, deve-se colocar todos os dados dos trilhos, dormentes, carregamentos e das camadas que compõem a via férrea.

Figura 20 - Interface do *Kentrack 4.0*

The image shows two overlapping windows from the Kentrack 4.0 software. The left window, titled 'INITIAL PROJECT SPECIFICATION', contains the following fields and options:

- Project Title: Text input field containing 'Test'.
- Unit System: Radio buttons for 'SI' (selected) and 'English'.
- Model Type: Radio buttons for 'Layer' (selected) and 'All-Granular'.
- Damage Analysis: Radio buttons for 'Yes' (selected) and 'No'.
- Trackbed: Radio buttons for 'Asphalt', 'All-Granular' (selected), and 'Combination'.
- A 'Submit' button is located at the bottom right of this window.

The right window, titled 'Kentrack Input', has a tabbed interface with 'Rail' selected. It contains the following input fields:

- Select Rail type: Dropdown menu showing 'RE 136'.
- Rail Section Modulus: Text input field containing '0.60706' with '(m)' next to it.
- Rail Youngs Modulus: Text input field containing '206842.7187' with '(MPa)' next to it.
- Rail Moment of Inertia: Text input field containing '3.9500362289' with '(m^4)' next to it.
- Rail Tie Spring Constant: Text input field containing '125005669.29' with '(kg/m)' next to it.
- A 'Next >>' button is located at the bottom right.
- Below the input fields, there is a red 'INSTRUCTIONS:' section with the text: '1. Select Rail Type, click "Next".'

Fonte: Autor, 2019

Apesar da interface simples do programa como mostrado na Figura 20, o *Kentrack 4.0* apresentou alguns problemas para gerar os resultados da maneira correta devido principalmente ao erro de unidades que há no próprio programa. Aliado a isso, algumas dificuldades como a falta de instruções para a inserção desses dados no programa fizeram com que a experiência no *software* fosse bastante dificultada.

4.3.1 Princípio da superposição

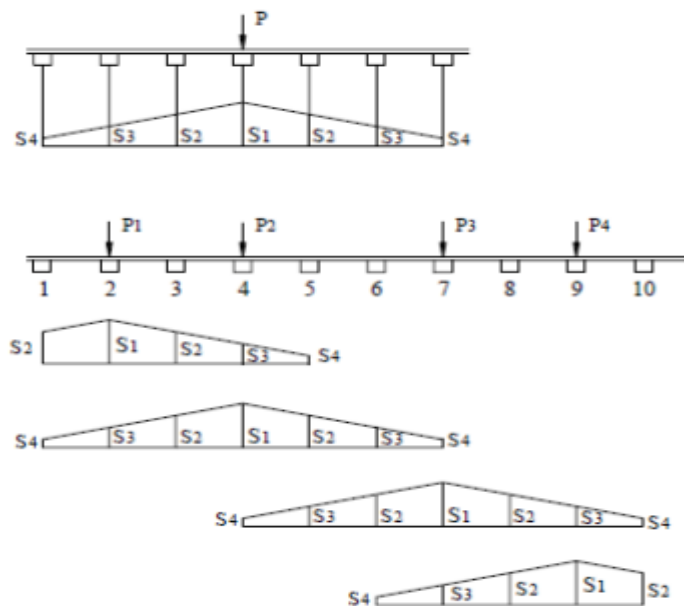
Como o *Kentrack* é um programa baseado no modelo elástico linear com as camadas infinitas na horizontal, pode ser aplicado o princípio da superposição. Primeiramente pode ser analisado uma única carga P sendo aplicada, podendo obter as tensões, deformações e deflexões por meio desse princípio devido a superposição de várias cargas de rodas em uma única roda, como mostrado na Figura 21.

A variável S_i é a deflexão no i -ésimo dormente devido à carga P e, as deflexões devido às cargas de P_1 a P_4 são mostradas na Figura 21. Após a sobreposição, a deflexão no primeiro dormente pode ser calculada na equação 17.

$$SS_1 = S_2 \cdot \frac{P_1}{P} + S_4 \cdot \frac{P_2}{P} \quad (17)$$

A Figura 21 mostra que a carga P pode ser distribuída sobre 4 dormentes, mas é razoável afirmar que ela pode ser distribuída sobre 6 dormentes (SHUSHU, 2013).

Figura 21 - Sobreposição por múltiplas cargas



Fonte: SHUSHU, 2013

5 RESULTADOS

A primeira etapa de resultados consiste no dimensionamento da via permanente da via férrea através de dados presentes na bibliografia. Após essa etapa, por meio do *software Kentrack 4.0*, diversos valores de tensões serão gerados com a variação de alguns parâmetros e posteriormente serão organizados em tabelas e gráficos a fim de analisar os comportamentos dessas tensões. A via permanente analisada será do trecho de Alto Araguaia-MT até a cidade de Uberlândia-MG, com um total de 671 Km. Os parâmetros que serão variados serão o tipo de trilho, o material do dormente e o espaçamento entre os dormentes. Para os cálculos, será

utilizado o vagão Hopper HFS da empresa Rumo ALL e a locomotiva C44-9W da mesma empresa. Nas Tabelas 6 e 7 serão especificadas as características do vagão e da locomotiva que foram citados. No Anexo A esta a ficha completa com todas as dimensões e desenhos.

Tabela 6 - HFS Vagão Hopper (ALL)

Tara nominal (kg)	23000
Lotação Nominal (kg)	77000
Peso bruto máximo (kg)	100000
Capacidade Volumétrica nominal (m ³)	100
Bitola (m)	1,6
Comprimento entre centros de truques (mm)	12492

Fonte: Rumo ALL, 2010

Tabela 7 - Locomotiva C44-9W

Peso total (abastecida) (kg)	176461
Peso por eixo (kg)	29410,16
Bitola (m)	1,6
Distância entre centro de eixos do truque (m)	2,02

Fonte: Rumo ALL, 2010

Os trilhos usados no *software* são: TR25, TR32, TR37, TR45, TR50, TR57 e TR68. A

Tabela 8 mostra as principais características desses trilhos:

Tabela 8 - Características dos trilhos

TRILHO/CARACTERÍSTICAS	Peso teórico (kg/m)	Área (cm ²)	Momento de inércia (cm ⁴)	Módulo de resistência do boleto (cm ³)
TR25	24,8	31,8	439,1	81,6
TR32	32	41,58	656,51	120,8
TR37	37,11	47,98	757,53	149,1
TR45	44,64	56,9	1610,81	205,82
TR50	50,35	64,19	2039,53	247,45
TR57	56,89	72,65	2730,48	303,65
TR68	67,41	86,52	3920,9	388,37

Fonte: Brasil Trilhos, 2019.

Os materiais utilizados na variação do tipo de dormente foram a madeira e o concreto.

5.1 Resultados do dimensionamento da via permanente

5.1.1 Dimensionamento do trilho

Para que o trilho seja devidamente dimensionado, alguns parâmetros são necessários, como a bitola, a velocidade diretriz, a carga por roda, a tensão admissível e o coeficiente do

lastro. A determinação dos dois últimos parâmetros citados depende do padrão da infraestrutura da via férrea. O coeficiente do lastro pode ser obtido por meio da Tabela 5 e a tensão admissível dos trilhos por meio da Tabela 9.

Tabela 9 - Tensão admissível dos trilhos

Padrão da linha férrea	Tensão admissível (kgf/cm³)
Linhas de primeira categoria	1500
Linhas de segunda categoria com trilhos pesados	1600
Linhas de segunda categoria com trilhos leves	1800
Linhas de terceira categoria e linhas auxiliares	2000

Fonte: SCHRAMM, 1977

Para o dimensionamento do trilho, será adotado um coeficiente de lastro de 9 kgf/cm³ e a tensão admissível de 1800 kgf/cm³. A bitola adotada é de 1,6 metros e a velocidade diretriz de 70 km/h.

O trilho foi testado primeiramente para o dimensionamento é o TR-45, cujos dados estão especificados na Tabela 10.

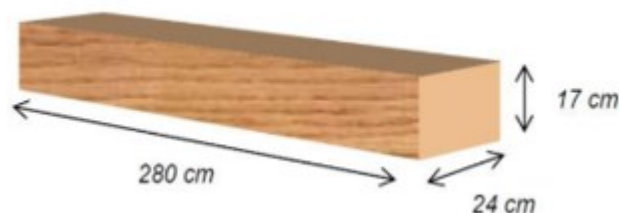
Tabela 10 - Trilho TR45

Peso Teórico (kg/m)	44,65
Área (cm ²)	56,9
Momento de inércia (cm ⁴)	1610,81
Módulo de resistência boleto (cm ³)	205,81
Módulo de resistência patim (cm ³)	249,58
Modulo de elasticidade (kgf/cm ²)	2100000
Altura (mm)	142,8
Base (mm)	130,17
Boleto (mm)	65,09
Alma (mm)	14,29

Fonte: SHRAMM, 1977

Além disso, é necessário conhecer as propriedades dos dormentes que serão utilizados na via férrea, como as suas características, dimensões, taxas de dormentação e espaçamento. Foram empregados dormentes de madeira serrada, cujas dimensões podem ser obtidas na Figura 22.

Figura 22 - Dimensões do dormente adotadas



Fonte: Autor (2019)

A taxa de dormentação e espaçamento foram obtidos por meio da Tabela 12.

Tabela 11 - Taxa de dormentação para bitola larga (1,6m)

Linhas		Quantidade por km	espaçamento (cm)
Tronco	Valores	1820	55
	Limites	1667	60
Subsidiárias	Valores	1540	65
	Limites	1430	70

Fonte: SHRAMM,1977

Foram adotados os valores de 1820 dormentes por quilômetro, dando um espaçamento de 55 centímetros entre eles.

5.1.1.1 Determinação do momento fletor máximo

- Carga estática sobre a roda: para o cálculo em questão, pode-se utilizar o vagão, que nesse caso é o vagão Hopper HFS, com 100000 kg de peso bruto máximo. Com isso, tem-se:

$$P = \frac{Pe}{8} = \frac{100000}{8} = 12.500Kgf$$

- Coeficiente dinâmico (C_d): $1 + \frac{v^2}{30000} = 1 + \frac{70^2}{30000} = 1,16$

O coeficiente dinâmico adotado será de 1,4, que é o mínimo a ser usado de acordo com Brina (1979).

- Coeficiente do dormente: o coeficiente do dormente é calculado de acordo com a equação (5). As dimensões estão especificadas na Figura 22 e a taxa de dormentação foi definida em 5.1.1. Com todos os dados, tem-se que o coeficiente do dormente é:

$$D = 10692 \text{ kgf/cm}$$

- Coeficiente da superestrutura: é dado pela equação (4). Tem-se que:

$$\gamma = 11,41$$

- Momento fletor: o cálculo do momento fletor será feito por meio do Método de Zimmermann, considerando a linha férrea sendo flexível e a plataforma da via elástica.

A primeira hipótese está explicitada no item 4.1.1, com a equação (2). Tem-se que $P = 12500 \text{ kgf}$; $\gamma = 11,41$; $Cd = 1,4$ e $a = 55 \text{ cm}$. A partir disso é possível obter o valor do momento fletor:

$$M_{M\acute{a}x} = 425027,3 \text{ kgf.cm}$$

A segunda hipótese está conforme a equação (5). Com os mesmos dados do item anterior, tem-se que:

$$M_{M\acute{a}x} = 303121,7 \text{ kgf.cm}$$

- Verificação do trilho à flexão:

$$\sigma = \frac{M_{M\acute{a}x}}{\text{Módulo de resistência}} = \frac{425027,3}{249,1} = 1703 \text{ kgf/cm}^2$$

O valor de tensão a ser comparado é de 1800 kgf/cm^2 (item 5.1.1). Como o valor da tensão solicitante do trilho à flexão é um valor menor que o resistente, o trilho TR-45 será o utilizado nessa via férrea.

5.2.1 Dimensionamento dos dormentes

Os dormentes também precisam ser verificados quanto às tensões. Para isso, alguns dados são necessários, como a distância de eixo a eixo entre trilhos, distância de eixo a eixo da locomotiva a largura da placa de apoio que recebe o trilho e o peso da roda mais pesada. Como a locomotiva é mais pesada que todos os vagões que serão analisados, o peso que será utilizado para o estudo será o que está explicitado na Tabela 7. Portanto:

$$P = \frac{\text{Peso por eixo}}{2} = \frac{29410,16}{2} = 14705,08 \text{ Kgf}$$

Os demais dados estão na Tabela 12.

Tabela 12 - Dados para o dimensionamento dos dormentes

Distância de eixo a eixo entre trilhos (B), em cm	166,5
Distância de eixo a eixo da locomotiva (d), em m	2,02
Largura da placa de apoio que recebe o trilho (y), em cm	25

Fonte: Autor, 2019.

- Determinação da carga sobre os dormentes:

$$P = \frac{Pr \times Cd}{\left(\frac{d}{a}\right)} = \frac{14705,08 \times 1,4}{\frac{2,02}{0,55}} = 5605,4 \text{ Kgf}$$

Em que 'd' é a distância de eixo a eixo do truque da locomotiva e 'a' é o espaçamento entre os dormentes.

- Cálculo do momento máximo:

$$M_{Máx} = \frac{P}{8} \times (L - B - y) = \frac{5605,4}{8} \times (280 - 166,09 - 25) = 62003,45 \text{ kgf.cm}$$

Em que:

L = comprimento do dormente [cm]

B = distância de eixo a eixo entre trilhos [cm]

y = largura da placa de apoio que recebe o trilho [cm]

- Módulo resistente do dormente:

$$W = \frac{b \times t^2}{6} = \frac{24 \times 17^2}{6} = 1156 \text{ cm}^3$$

Em que:

b = largura do dormente [cm]

t = espessura do dormente [cm]

- Máxima tensão de flexão do dormente:

$$\sigma = \frac{M_{Máx}}{W} = \frac{62003,45}{1156} = 53,64 \text{ kgf/cm}^2$$

Tem-se que a tensão trabalho do dormente é de 77 kgf/cm² e, portanto, o dormente está devidamente dimensionado já que apresenta tensão menor que a admissível.

5.3.1 Altura de lastro e sublastro

É necessário que se tenha primeiramente a carga sobre os dormentes, dado que foi calculado no item 3.2 (5605,4 kgf).

- Tensão média no topo do lastro:

$$\sigma_o = \frac{P}{b \times c} = \frac{5605,4}{24 \times 80} = 2,92 \text{ kgf/cm}^2$$

Em que:

c = faixa de socaria adotada em função da bitola da via [cm]

- Tensão na base do lastro: com o valor da tensão média no topo do lastro calculada no item anterior, é possível calcular a pressão sobre o subleito. A altura do lastro será fixada em 30 centímetros para o cálculo.

$$\sigma = \frac{53,87 \times 2,92}{30^{1,25}} = 2,24 \text{ kgf/cm}^2$$

Para o cálculo da tensão admissível, deve-se dividir o valor da tensão na base do lastro por um coeficiente de segurança, que varia entre 5 e 6. Será adotado um valor intermediário de 5,5. Portanto:

$$\sigma_{adm} = \frac{2,24}{5,5} = 0,41 \text{ kgf/cm}^2$$

- Cálculo da tensão na base do sublastro: primeiramente o módulo de elasticidade do solo deve ser calculado. Esse parâmetro depende do CBR do sublastro, valor estabelecido em 8%, correspondente ao valor que se aproxima das características do solo da região de estudo.

$$Ed = 100 \times CBR_{Subleito} = 100 \times 8 = 800 \text{ MPa}$$

Como a classe adotada para via férrea é a III, tem-se que o número de ciclos $N = 1 \times 10^6$. Usando a equação 17 do item 2.6.6, é possível calcular a tensão na base do sublastro. Com todos os dados disponíveis, tem-se que esse valor é de $\sigma_{adm} = 0,92 \text{ kgf/cm}^2$.

- Altura do sublastro: para que a altura do sublastro seja determinada, será feito o cálculo da altura total das camadas de lastro e sublastro por meio da seguinte fórmula:

$$h = \left(\frac{53,87 \times \sigma \sigma}{\sigma_{adm}} \right)^{0,8} = \left(\frac{53,87 \times 2,92}{0,92} \right)^{0,8} = 61 \text{ cm}$$

Com isso:

$$h_{total} = h_{lastro} + h_{sublastro}$$

$$61 = 30 + h_{sublastro}$$

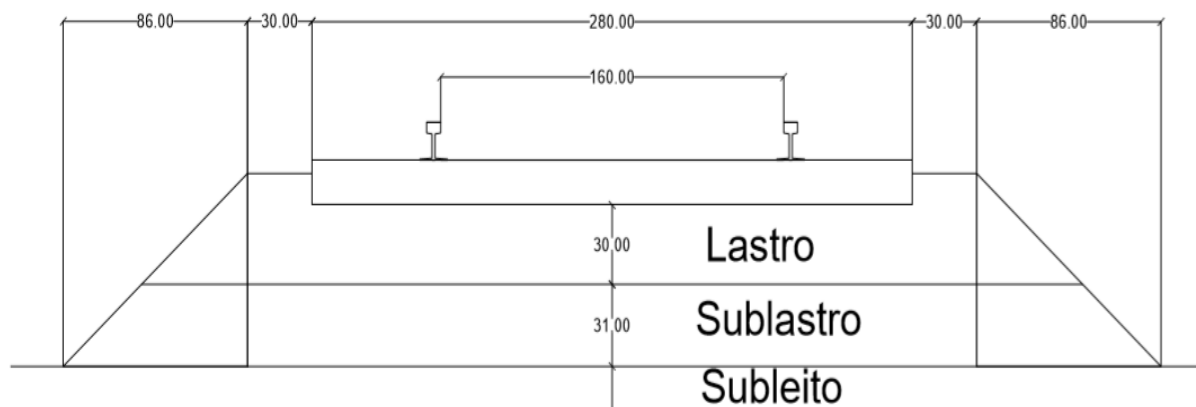
$$h_{sublastro} = 31 \text{ cm}$$

- CBR do sublastro: O CBR do sublastro pode ser calculado por meio da seguinte fórmula:

$$CBR = \frac{\sigma \times 100}{70} = \frac{10,35 \times 100}{70} = 15\%$$

- Ombro do lastro: será adotado 30 cm.
- Volume de lastro: com todos os parâmetros de cálculo já determinados, é possível que seja feito o cálculo do volume de lastro necessário para a via férrea em questão. Como a extensão de todo o traçado é de 675 km do trecho de Alto Araguaia-MT à Uberlândia-MG, chegou-se a um volume de lastro de aproximadamente 877500 m³. A Figura 23 a seguir mostra a estrutura detalhada.

Figura 23 - Estrutura da via férrea detalhada



Fonte: Autor, 2019.

*Cotas em cm

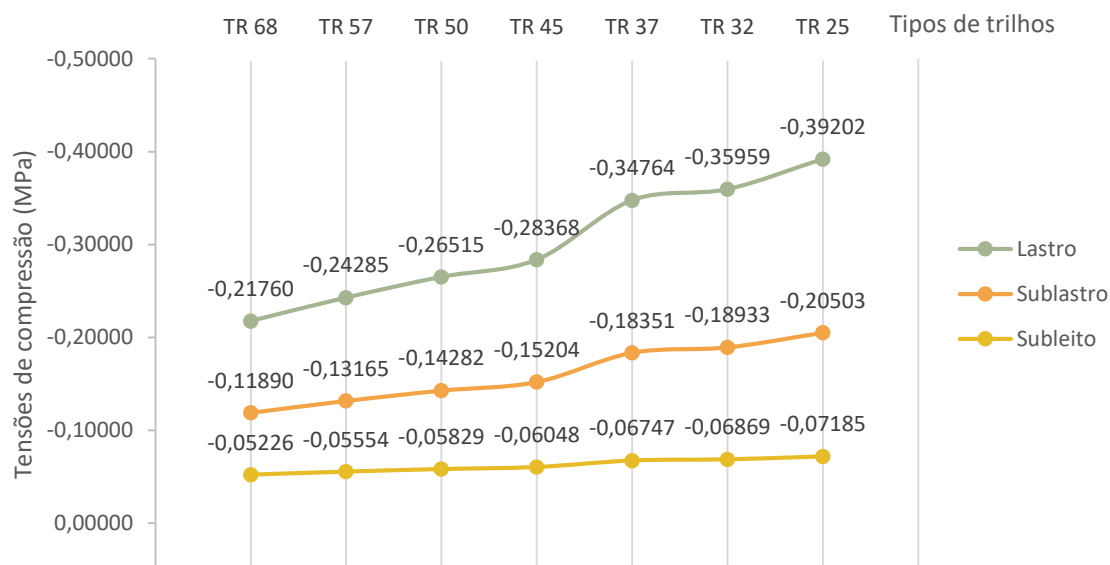
5.2 Resultados do Kentrack 4.0 e análises feitas

Neste tópico, serão abordados os resultados referentes ao programa *Kentrack 4.0* com o objetivo de analisar os valores das tensões de compressão e o comportamento do lastro, sublastro e subleito por meio da variação do tipo de trilho, do material e do espaçamento dos dormentes. Os dados de entrada do programa exigem que se especifique todas as características do trilho, dos dormentes, do carregamento e das camadas da via férrea. A camada de lastro definida para o trabalho em questão é de basalto e a do sublastro e do subleito é de solo laterítico, que é o solo mais comum na região analisada da via férrea.

5.2.1 Variação do tipo de trilho e material do dormente

Conforme explicado no item 3.1, o dimensionamento dos trilhos foi feito com o trilho TR45. Com isso, para que a análise seja feita, foram escolhidos três trilhos acima do TR45 (TR50, TR57 e TR58) e três trilhos abaixo (TR37, TR32 e TR25) para que a análise do comportamento das tensões seja feita através dos valores das tensões que foram geradas no *Kentrack 4.0* com a variação das características desses trilhos especificados. A Figura 24 mostra esse comportamento, primeiramente para dormentes de madeira.

Figura 24 - Variação das tensões de compressão com variação dos trilhos para dormentes de madeira



Percebe-se que, à medida que a classe do trilho diminui, as tensões de compressão nas camadas de lastro, sublastro e subleito aumentaram. Além disso, quando a classe aumenta, as tensões diminuem. Esse resultado é coerente, já que a medida que a classe do trilho aumenta, o peso dele é maior, o que faz com que ele consiga absorver mais tensões e, conseqüentemente, passe menos tensões de compressão para as demais camadas da via férrea. Para os trilhos com menor peso, o processo é o contrário, já que ele irá absorver menos tensões recebidas das locomotivas e vagões.

Cada vez mais as frotas estão com vagões e locomotivas mais modernas e pesados, o que faz com que as solicitações nas camadas das vias sejam maiores. Com isso, para trilhos que não suportam muita tensão e passam altos valores para as camadas de baixo, é necessário que haja diversos processos de manutenção, o que a longo prazo pode se tornar insustentável financeiramente. Geralmente a solução para esse tipo de problema é aumentar as camadas de lastro, sublastro e subleito para absorver melhor as tensões. Porém, uma outra solução poderia ser a mudança do tipo de trilho da via férrea para um que absorva mais as solicitações. Para que essa mudança ocorra, devem ser feitos diversos estudos da viabilidade financeira, já que normalmente, o preço do trilho por metro é maior que o preço do material de lastro e sublastro. A Tabela 13 mostra a variação percentual das tensões de compressão em relação ao trilho TR45, já que este foi o trilho usado no dimensionamento.

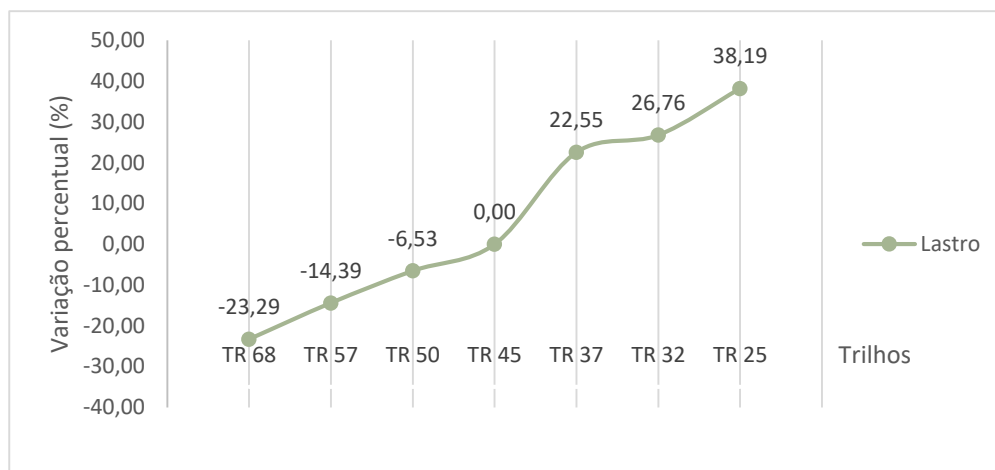
Tabela 13 - Variação percentual das tensões variando o tipo de trilho com dormentes de madeira

Trilho	Camada	Tensão (MPa)	Variação percentual (%)
TR 68	Lastro	-0,21760	-23,29
	Sublastro	-0,11890	-21,80
	Subleito	-0,05226	-13,59
TR 57	Lastro	-0,24285	-14,39
	Sublastro	-0,13165	-13,41
	Subleito	-0,05554	-8,16
TR 50	Lastro	-0,26515	-6,53
	Sublastro	-0,14282	-6,06
	Subleito	-0,05829	-3,62
TR 45	Lastro	-0,28368	0
	Sublastro	-0,15204	0
	Subleito	-0,06048	0
TR 37	Lastro	-0,34764	22,55
	Sublastro	-0,18351	20,70
	Subleito	-0,06747	11,56
TR 32	Lastro	-0,35959	26,76
	Sublastro	-0,18933	24,53
	Subleito	-0,06869	13,57
TR 25	Lastro	-0,39202	38,19
	Sublastro	-0,20503	34,86
	Subleito	-0,07185	18,80

Fonte: Autor, 2019

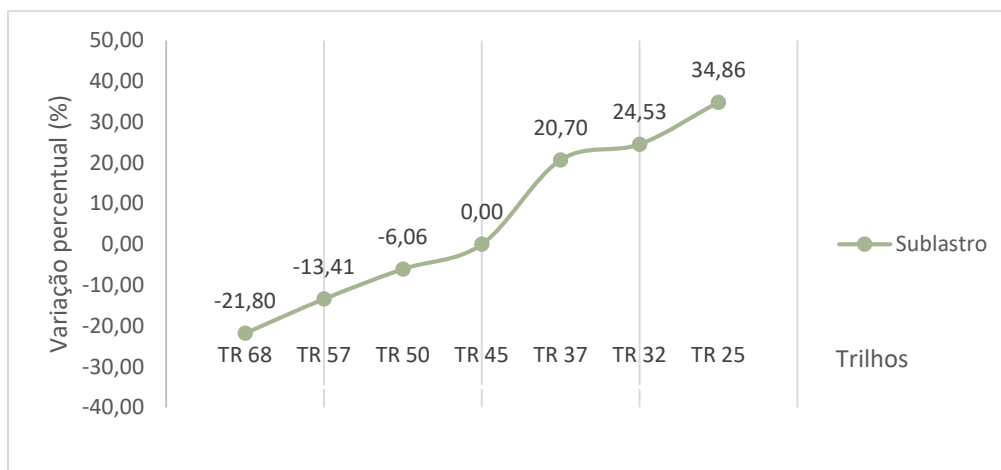
Para que haja uma visualização melhor acerca dos valores explicitados na Tabela 13, os dados percentuais de variação explicitados foram organizados em três tabelas, sendo um gráfico para cada camada que foi analisada (lastro, sublastro e subleito). Com isso, o trilho TR45 também foi tomado como sendo o de referência para a análise desses valores. As Figuras 25, 26 e 27 mostram esses gráficos.

Figura 25 - Variação percentual dos valores das tensões de compressão no lastro com a variação dos trilhos para dormentes de madeira



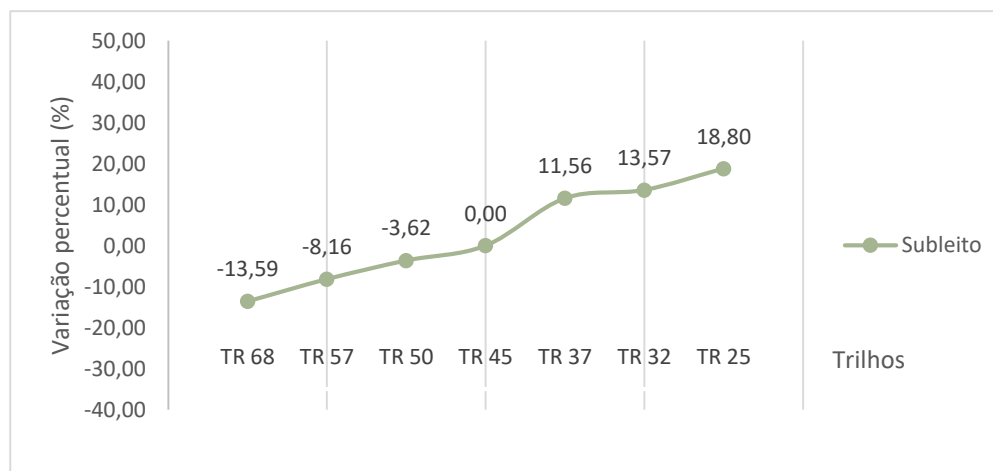
Fonte: Autor, 2019

Figura 26 - Variação percentual dos valores das tensões de compressão no sublastro com a variação dos trilhos para dormentes de madeira



Fonte: Autor, 2019

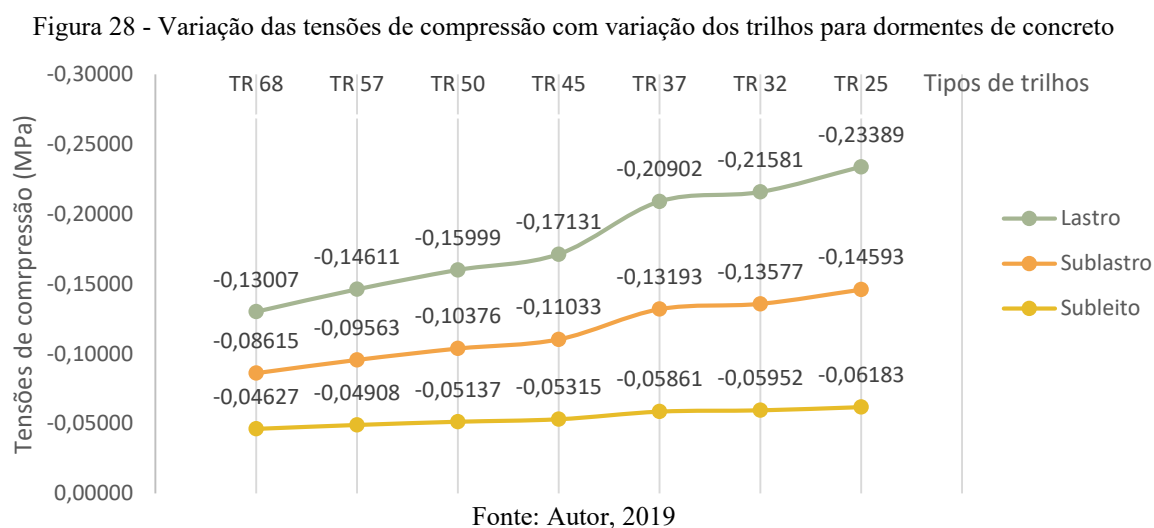
Figura 27- Variação percentual dos valores das tensões de compressão no subleito com a variação dos trilhos para dormentes de madeira



Fonte: Autor, 2019

É possível perceber pelas Figuras que a camada que mais variou nos valores das tensões foi a de lastro, depois a de sublastro e depois a de subleito. Foi notado também que os valores de variação percentual das tensões para o lastro e sublastro foram parecidos, sendo a do sublastro ligeiramente menor que o lastro em uma média de 2%. O subleito, em comparação com as outras camadas, variou pouco, porém se for analisada somente a camada individual, as variações explicitadas podem ser consideradas altas.

Outra análise feita pelo autor acerca do comportamento das tensões de compressão que foram gerados no programa, foi da variação da classe do trilho utilizando dormentes de concreto. A Figura 28 mostra esses valores gerados.



Por meio dos valores da Figura 28, nota-se que o comportamento das tensões das camadas abaixo da superestrutura para dormentes de concreto é semelhante àqueles de dormente de madeira. Porém os dormentes de concreto conseguem absorver mais as tensões, fazendo com que os valores das tensões de compressão nas camadas sejam bem menores. Isso ocorre porque como dito no item 2.3.3, as características do concreto são melhores nesse quesito, por possuir uma maior resistência mecânica, ancoragem e vida útil se comparado aos dormentes de madeira.

A variação das tensões em relação ao trilho é semelhante à variação das tensões dos dormentes de madeira, como mostra a Tabela 14.

Tabela 14 - Variação percentual das tensões variando o tipo de trilho com dormentes de concreto

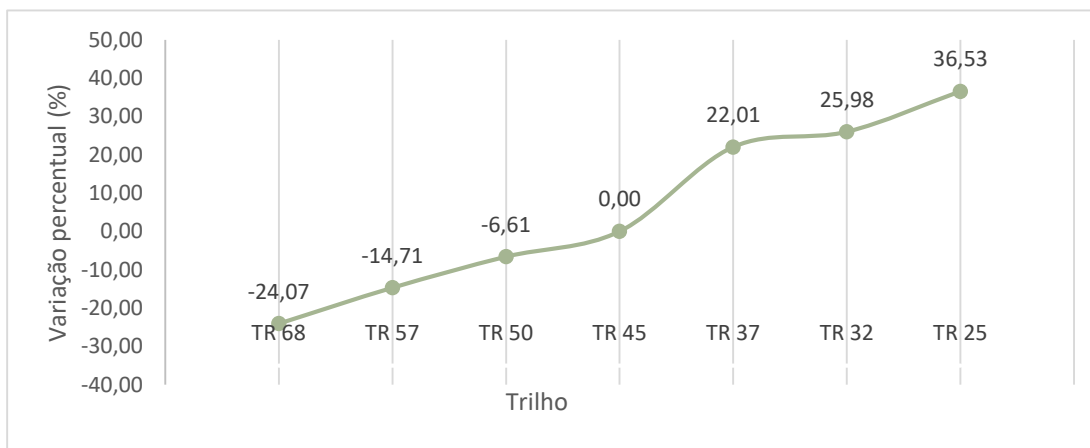
Trilho	Camada	Tensão (MPa)	Variação percentual (%)
TR68	Lastro	-0,13007	-24,07
	Sublastro	-0,08615	-21,92
	Subleito	-0,04627	-12,95

TR 57	Lastro	-0,14611	-14,71
	Sublastro	-0,09563	-13,32
	Subleito	-0,04908	-7,66
TR 50	Lastro	-0,15999	-6,61
	Sublastro	-0,10376	-5,96
	Subleito	-0,05137	-3,35
TR 45	Lastro	-0,17131	0
	Sublastro	-0,11033	0
	Subleito	-0,05315	0
TR 37	Lastro	-0,20902	22,01
	Sublastro	-0,13193	19,58
	Subleito	-0,05861	10,28
TR 32	Lastro	-0,21581	25,98
	Sublastro	-0,13577	23,06
	Subleito	-0,05952	11,99
TR 25	Lastro	-0,23389	36,53
	Sublastro	-0,14593	32,26
	Subleito	-0,06183	16,33

Fonte: Autor, 2019

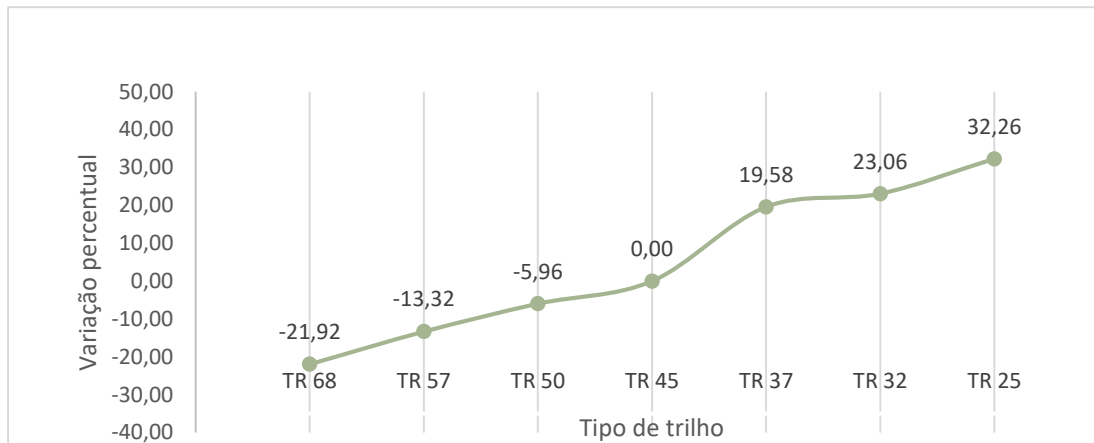
Para que haja também uma melhor visualização acerca dos valores percentuais de variação explicitados na Tabela 14, foram organizados três gráficos (um para cada camada analisada) nas Figuras 29, 30 e 31. O trilho de base para os valores também foi o TR45.

Figura 29 - Variação percentual dos valores das tensões de compressão no lastro com a variação dos trilhos para dormentes de concreto



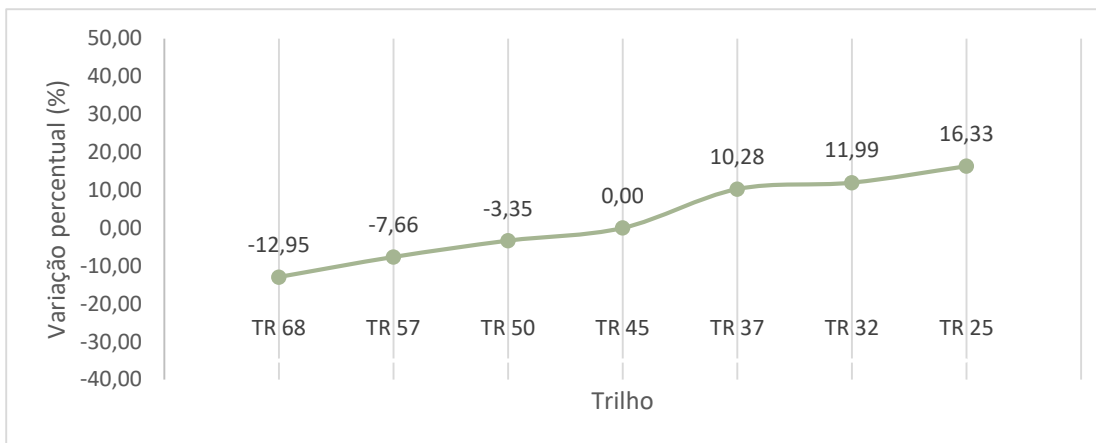
Fonte: Autor, 2019

Figura 30 - Variação percentual dos valores das tensões de compressão no sublastro com a variação dos trilhos para dormentes de concreto



Fonte: Autor, 2019

Figura 31- Variação percentual dos valores das tensões de compressão no subleito com a variação dos trilhos para dormentes de concreto

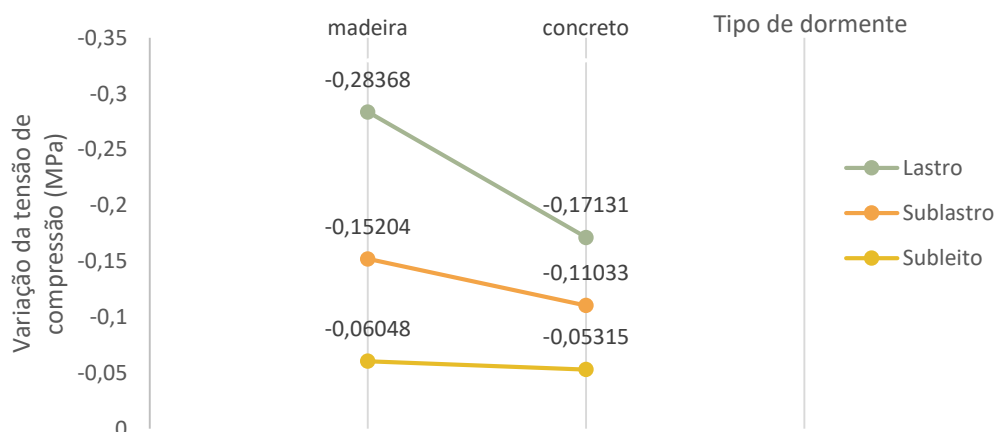


Fonte: Autor, 2019

Como pode ser observado nos gráficos, o comportamento dos valores das tensões com a variação dos trilhos para os dormentes de concreto, foi similar com os dormentes de madeira, tendo uma variação média menor em torno de 2%.

A comparação dos materiais dos dormentes de madeira e de concreto é feito através da Figura 32. Como base de análise, será utilizado os valores de tensões das camadas do trilho TR45, já que as tensões em outros trilhos se deram com variação percentual parecidas.

Figura 32 - Variação das tensões de compressão variando o material do dormente para o trilho TR45



Fonte: Autor, 2019

Para que se tenha uma visão mais numérica acerca da diminuição das tensões usando dormente de concreto, a Tabela 15. mostra a variação percentual que cada camada teve, fixando os valores das camadas dos dormentes de madeira em 0, já que foi o material usado para o dimensionamento.

Tabela 15 - Variação percentual das tensões de compressão usando o dormente de concreto para o trilho TR45

Material do dormente	Camada	Tensão (MPa)	Variação percentual (%)
Madeira	Lastro	-0,28368	0
	Sublastro	-0,15204	0
	Subleito	-0,06048	0
Concreto	Lastro	-0,17131	-39,61
	Sublastro	-0,11033	-27,43
	Subleito	-0,05315	-12,11

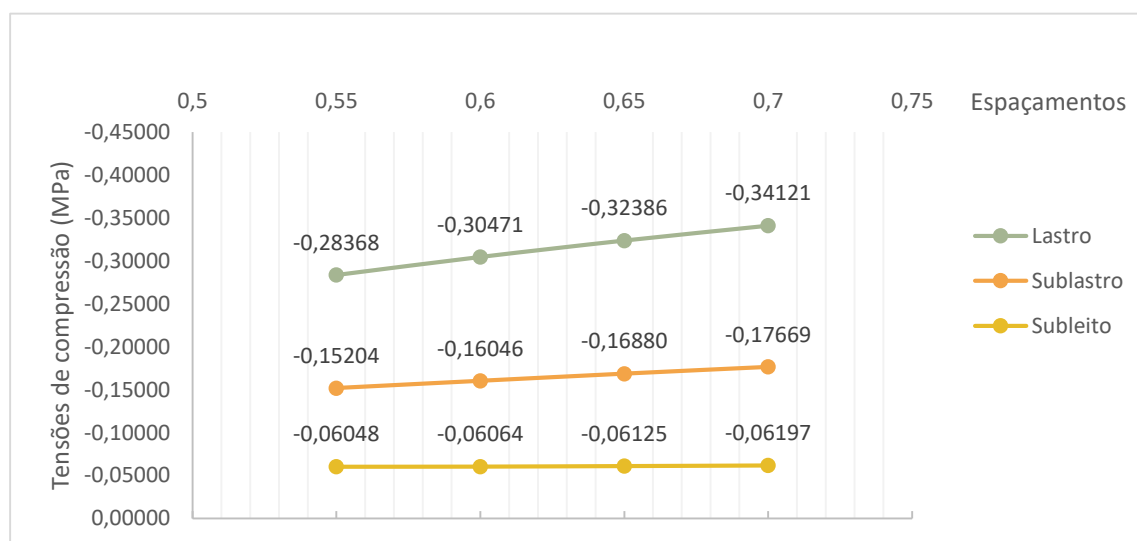
Fonte: Autor, 2019

Por meio dos resultados da Tabela 15, percebe-se que a variação dos valores é alta, principalmente na camada de lastro, que é a camada mais próxima da superfície. A camada do subleito, apesar de ser uma camada mais profunda, também apresenta uma variação significativa no valor.

5.2.2 Variação do espaçamento dos dormentes

Os espaçamentos usados serão os conforme a Tabela 11 (0,55; 0,60; 0,65 e 0,70m) para os dormentes de madeira e concreto. A Figura 33 mostra a variação dessas tensões conforme a variação do espaçamento para o trilho TR45.

Figura 33 - Variação das tensões de compressão para variação do espaçamento do dormente de madeira com trilho TR45



Fonte: Autor, 2019

Percebe-se que, à medida que o espaçamento dos dormentes aumenta, as tensões de compressão também aumentam, fazendo com que as camadas da via férrea fiquem mais sobrecarregadas. Esse resultado é coerente, já que, com um maior espaçamento, há menos dormentes, fazendo com que a absorção das tensões seja menor e que o descarregamento seja maior nas camadas inferiores. Nota-se também que as tensões nas camadas de subleito sofrem uma variação muito pequena. O percentual das variações de todas as camadas pode ser visto na Tabela 16.

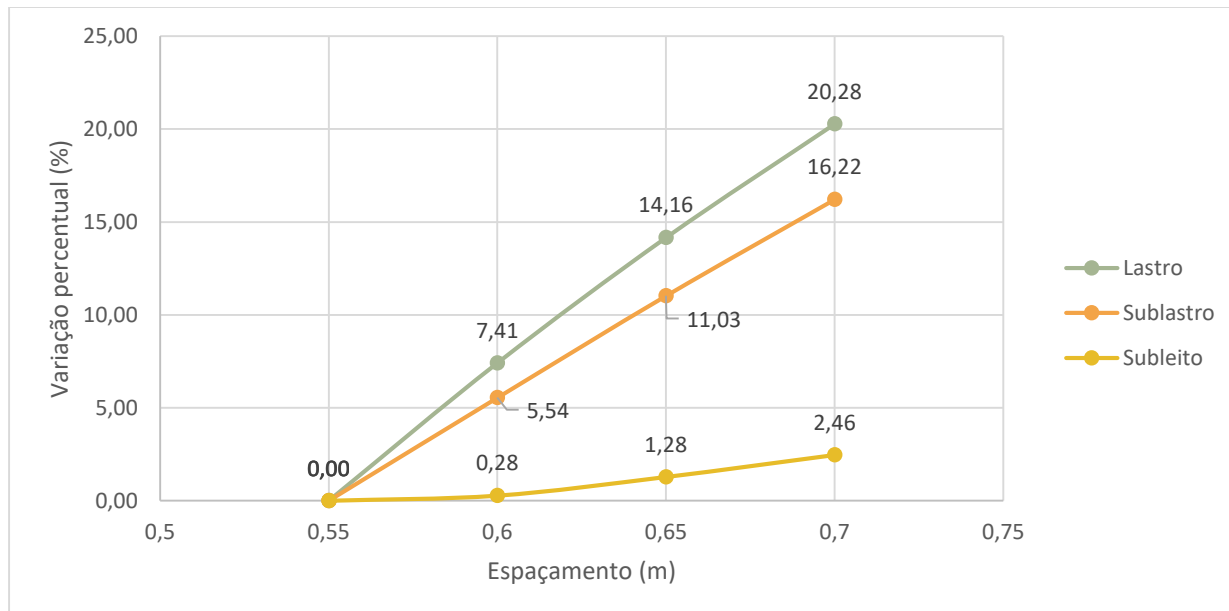
Tabela 16 - Variação percentual das tensões de compressão ao variar o espaçamento dos dormentes de madeira para o trilho TR45

Espaçamento (m)	Camada	Tensão (MPa)	Variação percentual (%)
0,55	Lastro	-0,28368	0
	Sublastro	-0,15204	0
	Subleito	-0,06048	0
0,6	Lastro	-0,30471	7,41
	Sublastro	-0,16046	5,54
	Subleito	-0,06064	0,27
0,65	Lastro	-0,32386	14,16
	Sublastro	-0,16880	11,02
	Subleito	-0,06125	1,28
0,7	Lastro	-0,34121	20,28
	Sublastro	-0,17669	16,21
	Subleito	-0,06197	2,46

Fonte: Autor, 2019.

Esses dados percentuais também foram organizados em um gráfico para uma melhor visualização, conforme Figura 34. A variação foi com base no espaçamento de 55 centímetros, que foi o espaçamento usado para o dimensionamento da via permanente.

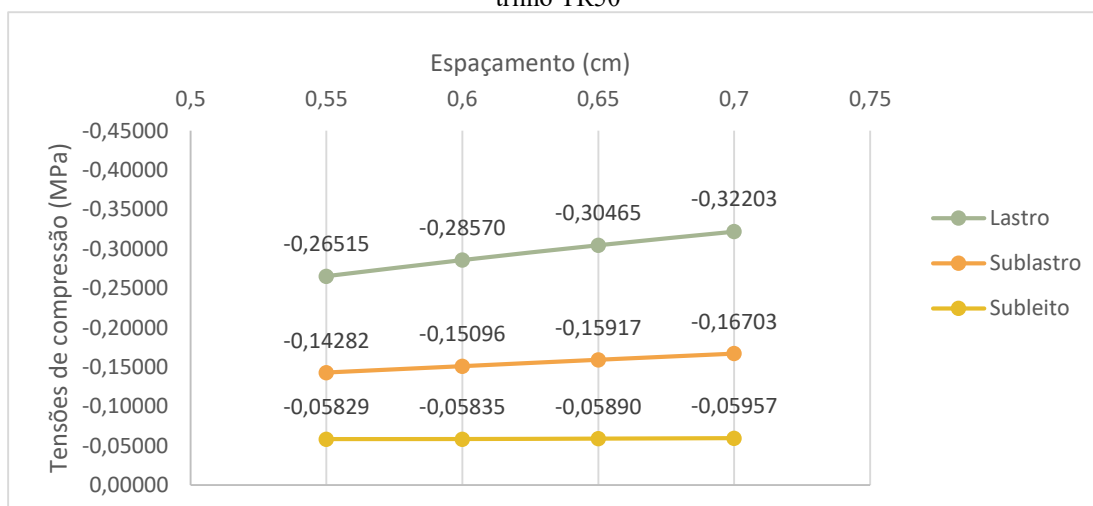
Figura 34 - Variação percentual das tensões das camadas em função da variação do espaçamento dos dormentes de madeira para o trilho TR45



Fonte: Autor, 2019

As variações das tensões para os demais trilhos se comportam semelhante ao padrão apresentado para o trilho TR45, como mostrado nas Figuras 35 e 36.

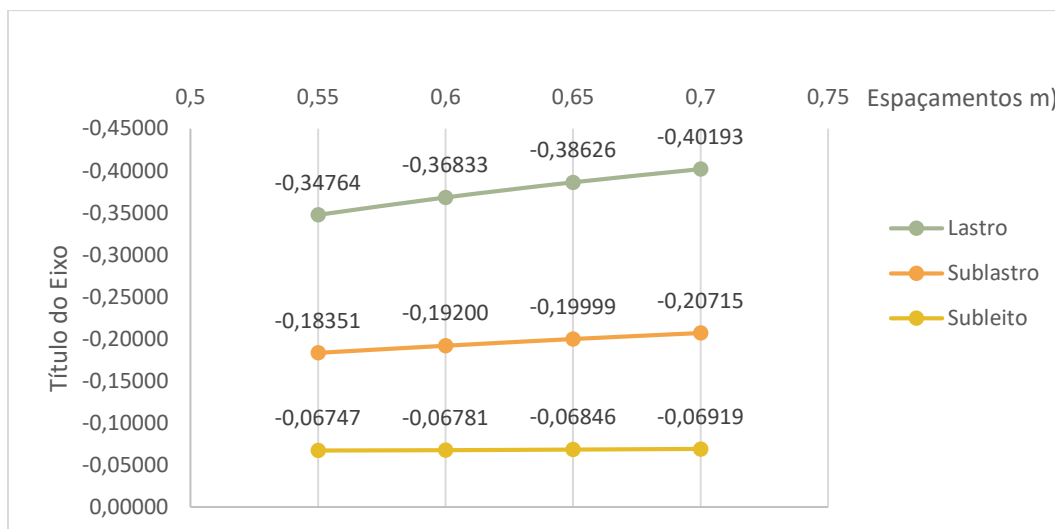
Figura 35 - Variação das tensões de compressão para variação do espaçamento do dormente de madeira com trilho TR50



Fonte: Autor, 2019

Confirmando o item 4.1, a Figura 36 mostra que, para um trilho de maior peso, as tensões de compressão são menores, e quando o espaçamento aumenta, as tensões também aumentam.

Figura 36 - Variação das tensões de compressão para variação do espaçamento do dormente de madeira com trilho TR50

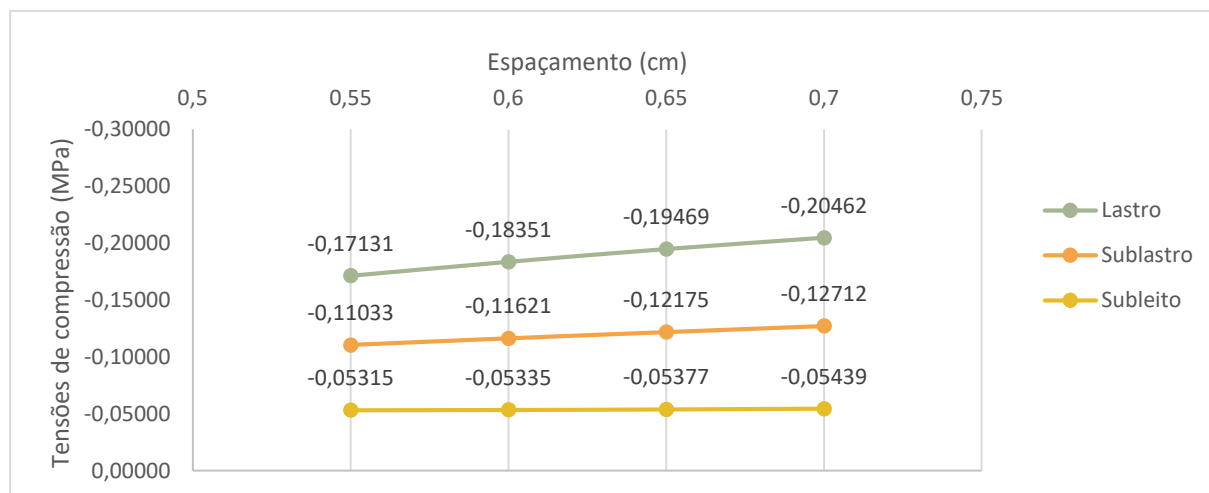


Fonte: Autor, 2019

Também conforme o item 4.1, percebe-se na Figura 36 que, para um trilho de menor peso, as tensões de compressão são maiores e com maior espaçamento entre os dormentes há o aumento das tensões.

O mesmo comportamento ocorre para o trilho TR45 com os dormentes de concreto, como observado na Figura 37.

Figura 37- Variação das tensões de compressão para variação do espaçamento do dormente de concreto para o trilho TR45



Fonte: Autor, 2019

A variação percentual ao modificar o espaçamento para dormentes de concreto com trilho TR45 também se assemelha a variação dos dormentes de madeira, sendo a variação percentual das tensões ligeiramente menores, como pode ser observado na Tabela 17.

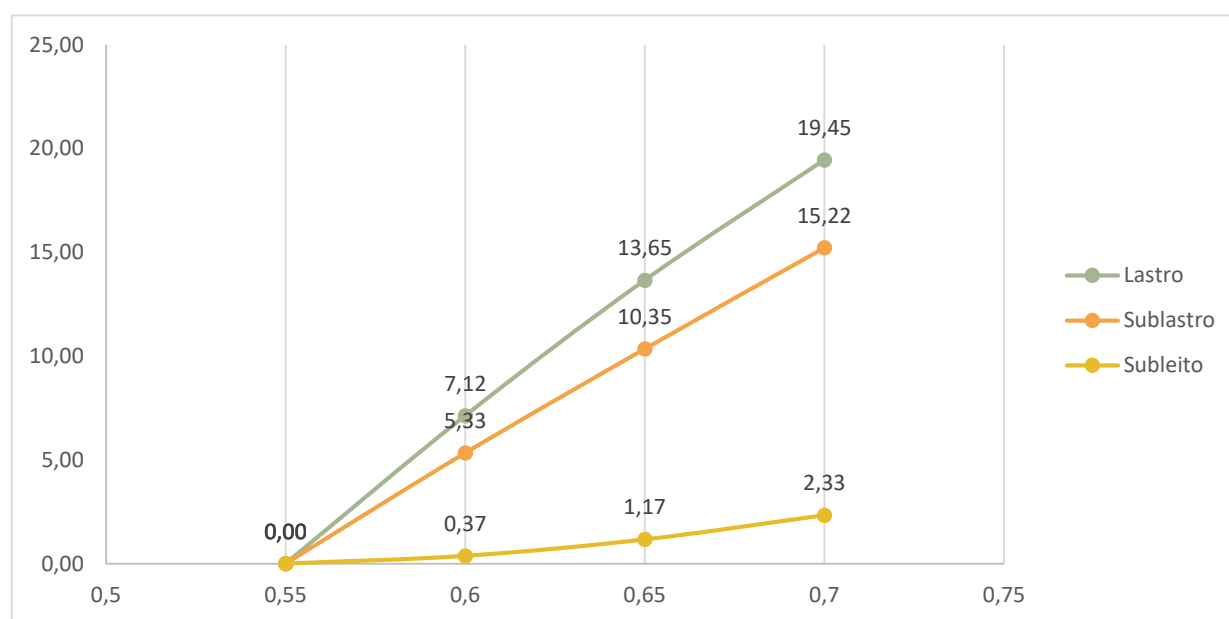
Tabela 17 - Variação percentual das tensões de compressão ao variar o espaçamento dos dormentes de concreto para o trilho TR45

Espaçamento (m)	Camada	Tensão (MPa)	Variação percentual (%)
0,55	Lastro	-0,17131	0
	Sublastro	-0,11033	0
	Subleito	-0,05315	0
0,6	Lastro	-0,18351	7,12
	Sublastro	-0,11621	5,33
	Subleito	-0,05335	0,37
0,65	Lastro	-0,19469	13,65
	Sublastro	-0,12175	10,35
	Subleito	-0,05377	1,167
0,7	Lastro	-0,20462	19,44
	Sublastro	-0,12712	15,22
	Subleito	-0,05439	2,33

Fonte: Autor, 2019

Os dados da Tabela 17 também foram organizados em um gráfico, conforme Figura 38.

Figura 38 - Variação percentual das tensões das camadas em função da variação do espaçamento dos dormentes de concreto para o trilho TR45



Fonte: Autor, 2019

Por meio da análise feita nesse tópico, conclui-se que, quanto menor a quantidade de dormentes, maiores terão que ser as camadas de lastro, sublastro e subleito para que as tensões nessas camadas não sejam grandes. Com isso, um outro estudo que poderia ser feito acerca da modernização ou construção de novas linhas férreas prevendo aumento de carga, para que estas não sofram com tensões elevadas, poderia ser a do aumento da taxa de dormentação dessa via. Entretanto, deveria ser feita uma análise de custo benefício para averiguar se seria vantajoso, já

que, com mais dormentes implantados o custo total da construção da linha férrea tende a aumentar e deve-se analisar se isso seria mais barato do que realizar o aumento das camadas de lastro, sublastro e subleito, que são materiais normalmente mais baratos.

6 CONCLUSÃO

Todas as análises paramétricas feitas pelo autor utilizando os valores de tensões gerados pelo *Kentrack 4.0* foram coerentes com a bibliografia existente sobre o assunto.

Primeiramente, notou-se que, à medida que a classe do trilho varia, o peso é determinante para saber se as tensões de compressão nas camadas inferiores vão aumentar ou diminuir. Ademais, à medida que o peso do trilho aumenta, ele consegue absorver mais tensões e, conseqüentemente, as tensões nas camadas subsequentes diminuem. Se o peso do trilho for menor, este absorve menos, fazendo com que as tensões sejam maiores nas camadas inferiores. Também foi observado que as variações no subleito são menores, o que já era esperado, por ser a camada mais profunda e longe da aplicação da carga.

Após isso, foi feita uma comparação das tensões nas camadas inferiores analisando as tensões de compressão para dormentes de concreto e madeira. Notou-se que o dormente de concreto consegue absorver melhor as tensões das locomotivas e vagões do que o de madeira, tendo uma diminuição percentual média de 39,6% para o lastro, 27,4% para o sublastro e 12,1% para o subleito. Isso comprova que o dormente de concreto é melhor para uso nas vias férreas de alta carga por eixo, por ter melhor custo benefício.

Para a análise feita acerca da variação do espaçamento dos dormentes, concluiu-se que, à medida que o espaçamento dos dormentes aumenta, a via férrea absorve menos tensões, o que faz com que as tensões das camadas abaixo aumentem. Esse resultado também é coerente, já que, com maior espaçamento, há menos dormentes na via férrea para absorver as tensões de compressão oriundas do material rodante, que serão conseqüentemente absorvidas por camadas inferiores mais robustas.

Este trabalho também poderia ser aplicado em casos de modernização das frotas ferroviárias, já que, cada vez mais, o mercado exige a utilização vagões mais pesados, com maior capacidade de carga, fazendo com que as ferrovias existentes precisem passar por um processo de manutenção e ampliação. Com isso, algumas soluções para que a capacidade da via seja aumentada sem que seja necessário mexer na base foram propostas.

Uma das propostas é trocar o tipo de trilho da via férrea para que absorva mais tensões. Caso a via férrea possua dormentes de madeira, uma alternativa seria a troca por dormentes de concreto, já que esses também conseguem absorver mais. Entretanto, essa alternativa seria inviável, já que é um processo oneroso devido ao peso dos dormentes que exige equipamentos complexos para transporte e fixação. Ademais, as propostas exigiriam um estudo acerca do custo benefício de cada mudança, para ver qual é a mais vantajosa.

REFERÊNCIAS

- ANTT. **Extensão da Malha Ferroviária - 2015**. 2012. Disponível em: <<http://portal.antt.gov.br/index.php/content/view/4751/Ferroviaria.html>>. Acesso em: 07 out. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7964. “**Plataforma para via férrea**”. Rio de Janeiro, 1983 ____NB 476/79 – Dormente – procedimento. Rio de Janeiro, 1979.
- BRASIL, M, Portos e Aviação Civil (MTPA). Política Nacional de Transportes. **Resumo executivo / Livro de Estado e Caderno das Estratégias Governamentais**. Brasília, DF, 2018a.
- BRASIL, Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. **Ofício nº 15/2018/DP – GPI/SFP - Processo SEI-MTPA nº 50000.028363/2018-15**. Brasília, DF: MTPA, 21 Ago 2018b. Disponível em: <https://www.ferrovias.eng.br/uploads/ef262/oficio-aceite-pmi-MT.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2019
- BRINA, H. L. **ESTRADAS DE FERRO** – Vol. 1 e 2. Livros Técnicos e Científicos Editora S/A – Rio de Janeiro, 1983.
- BRINA, H.L. “**Estrada de Ferro 1 – Via Permanente**”. Rio de Janeiro. Livro Técnico e Científico S.A. 1979.
- CAVA, F. **ENGENHARIA FERROVIÁRIA – “SISTEMA DE FIXAÇÃO DOS TRILHOS”** 2018. Disponível em: <https://alemdainercia.wordpress.com/2018/11/19/engenharia-ferroviaria-sistema-de-fixacao-dos-trilhos/>. Acesso em: 7 ago. 2019.
- CLARK, C.W. **Track Loading Fundamentals – Parts 1-7**. Railway Gazette, 106, 1957
- COIMBRA, M. **Modos de falhas dos componentes da via permanente ferroviária e seus efeitos no meio ambiente**. 2008. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia, 2008.
- COSTA, Robson et al. **Dispositivo de medição de deslocamentos em via permanente para determinação do módulo de via**, São Paulo, p. 1-7, 2016.
- EISENMANN, J. **Deflection and Settlement Behavior of Ballast**. The Fifth Engenharia Ferroviária, São Luis, 2008.
- FILHO, J. **Análise numérica do comportamento mecânico de um pavimento ferroviário para diferentes tipos de veículos de via**. 2013. 188 p. Dissertação (PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.
- FILHO, L. **Novo Sistema de Custos Referenciais de Obras – SICRO Principais Inovações e Alterações Metodológicas**. 2018. 116 slides. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/sicro/comunicados/seminario-sicro.pdf>>. Acesso em: 07 out. 2019.

GARCÍA et al., JOSÉ M.A., **Tratado de explotación de ferrocarriles**. Publicaciones de La Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madri, 1952.

GARCIA, Carlos et al. **Ferrovia do Cerrado trecho Alto Araguaia-Uberlândia**. 2019. 41 slides. Disponível em: <<https://www.ferrovias.eng.br/site/ef262>>. Acesso em: 07 out. 2019.

HAY, W.W. **“Railroad Engineering”**. 2. ed. New York. John Wiley & Sons, 1982.
International Heavy Haul Railway Conference Annals. Beijing, China (1993).

KLINCEVICIUS, M. G. Y. **Estudo De Propriedades, de Tensões e do Comportamento mecânico de Lastros Ferroviários**. Dissertação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

LUNDGREN, J. R., M, G. C., Hay, W. W. **A Simulation Model of Ballast Support and the Modulus of Track Elasticity**. **Transportation Series N° 4**. University of Illinois Urbana, Illinois, September, 1970, 111p.

PAULA, E. **Via Permanente**. Curso de Pós-graduação em Engenharia Ferroviária, São Luís 2008.

SANTOMAURO, B. **Qual a importância das ferrovias para o Brasil?** 2012. Disponível em: <<https://novaescola.org.br/conteudo/2066/qual-a-importancia-das-ferrovias-para-o-brasil>>. Acesso em: 22 nov. 2019.

SELIG, E.T e LI, D. **Track Modulus: Its Meaning and Factors Influencing It**.
SHUSHU, Liu. **Kentrack 4.0: a railway track bed structural design program**. 2013. 92 p. Dissertation (Mastering in Civil Engineering) - University of Kentucky, United States, 2013.

SILVA FILHO, J. C. **Análise numérica do comportamento mecânico de um pavimento ferroviário para diferentes tipos de veículos de via**. 2013. 107 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

SILVA, A. O. M. e. **Metodologia de estabilização química de coproduto siderúrgico para uso em lastro de ferrovias**. 2013. 138 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

SILVA, L. **Dimensionamento de ferrovia – Análise paramétrica do comportamento mecânico de um pavimento ferroviário**. 2019. 66 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

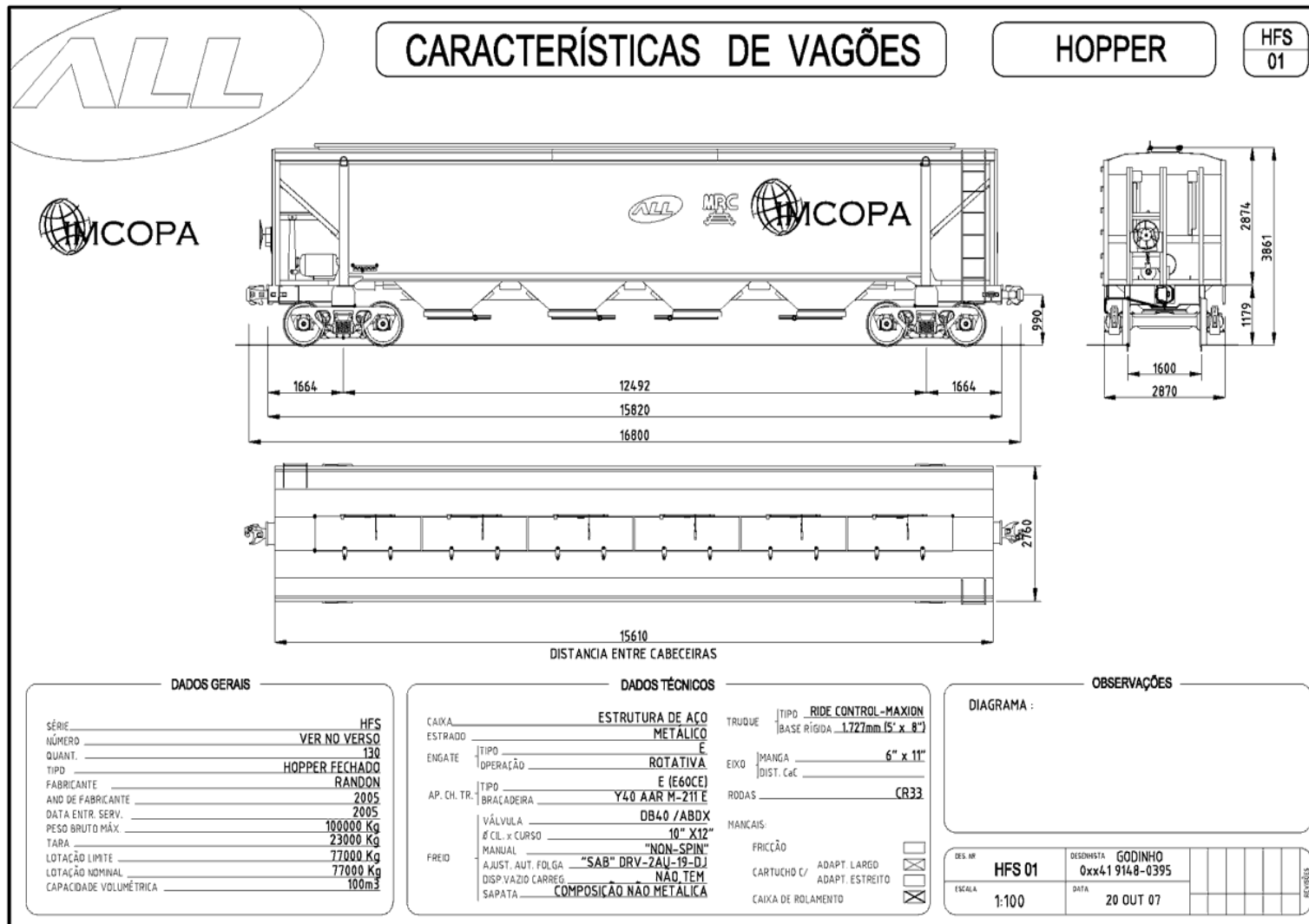
SISDELLI, A. **Estudo de desgaste de rodas e suas consequências no no material rodante e na via permanente**. 2006. 124 p. Dissertação (Especialização em Transporte Ferroviário de Carga) - Instituto Militar de Engenharia, 2006.

STOPATTO, S. **Via permanente ferroviária: conceitos e aplicações**. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo, 1987.

THAMBIRATNAM, D. & ZHUGE, Y. **Dynamic Analysis of Beams on an Elastic Foundation Subjected to Moving Loads**. *Journal of Sound and Vibration* 198 (2), p. 149-169, 1996.

VALE. Qual a importância das ferrovias para o desenvolvimento socioeconômico?, 22 nov. 2017. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/qual-a-importancia-das-ferrovias-para-o-desenvolvimento-socioeconomico-de-um-pais.aspx>. Acesso em: 15 nov. 2019.

ANEXO A: VAGÃO HOPPER HFS



ANEXO B: LOCOMOTIVA C44-9W

CARACTERÍSTICAS DE LOCOMOTIVAS		C44-9W	33
DADOS GERAIS FABRICANTE: GE (USA) ANO DE FABRICAÇÃO: ANO DO INÍCIO DE TRÁFEGO: QUANTIDADE DE LOCOMOTIVAS: 27 NUMERAÇÃO ALL: 9024, 9025, 9026, 9027, 9028, 9029, 9030, 9031, 9032, 9033, 9034, 9035, 9036, 9037, 9038, 9039, 9040, 9041, 9042, 9043, 9044, 9045, 9046, 9047, 9048, 9049, 9050 MODELO: C44-9W POTÊNCIA BRUTA: 4.400 hp POTÊNCIA DISPONÍVEL P/TRAÇÃO: 4.000 hp PESO TOTAL (ABASTECIDA): 176.461 kg PESO POR EIXO (ABASTECIDA): 294.10,16 kg ESFORÇO DE TRAÇÃO MÁX.: 50.315 kgf ESFORÇO DE TRAÇÃO CONTÍNUO: 32.400 kgf VELOCIDADE MÁXIMA: 112 km/h VELOCIDADE MÍNIMA: TIPO DE EQUIPAMENTO DE FREIO: FREIO DINÂMICO (ESFORÇO MÁX.): 35.204 kgf a 33,5 km/h RAIO MÍNIMO DE INSCRIÇÃO: TIPO DE TRANSMISSÃO: DIESEL ELÉTRICA CAPACIDADE TANQUE ÓLEO DIESEL: 18.925 L CAPACIDADE ÓLEO LUBRIFICANTE DO CÂRTER: CAPACIDADE CIRCUITO ÁGUA REFRIGERAÇÃO: ENGATES: TIPO "E" APARELHO DE CHOQUE E TRAÇÃO: MS-285-7A		DADOS DOS TRUQUES TIPO: G.E. (FUNDIDO) CLASSE: 106601 C-C AJUSTADOR AUTOM. FOLGA: TIPO DE RODAS: F-40 DIÂMETRO: 1.016mm (40 pol.) MANGA DOS EIXOS: TIPO DE MANCAIS: RELAÇÃO DE ENGRENAGENS: 83:20 CAPACIDADE AREIROS: SAPATAS: FENÓLICA CILINDROS DE FREIO:	
DADOS DO MOTOR DIESEL FABRICANTE: GE (USA) Nº DE CATÁLOGO: MODELO: 7FDL Nº DE CILINDROS: 16 DISPOSIÇÃO DOS CILINDROS: 45° - "V" DIÂMETRO DOS CILINDROS: CURSO DOS ÊMBOS: REGIME MÁXIMO: MARCHA EM VAZIO: POTÊNCIA MÁXIMA: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO: SOBREALIMENTAÇÃO: REFRIGERAÇÃO: INJEÇÃO:		DADOS DOS ACUMULADORES FABRICANTE: TIPO: MODELO: TENSÃO: CAPACIDADE: DADOS DO GERADOR AUXILIAR FABRICANTE: GE (USA) MODELO: Nº DE CATÁLOGO: ROTAÇÃO: TENSÃO NOMINAL (CC): POTÊNCIA: DADOS DO MOTOR DE TRAÇÃO FABRICANTE: GE (USA) Nº DE CATÁLOGO: MODELO: 5GET52AH TIPO: CC INTENSIDADE MÁXIMA / 15min.: CONTÍNUA: QUANTIDADE POR LOCOMOTIVA: 6 DADOS DO COMPRESSOR FABRICANTE: Nº DE CATÁLOGO: MODELO: TIPO: CAPACIDADE: SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO:	
DADOS DO GERADOR PRINCIPAL FABRICANTE: GE (USA) Nº DE CATÁLOGO: MODELO: Nº DE POLOS: TENSÃO NOMINAL (C.C.): INTENSIDADE MÁXIMA:		DADOS DO TURBO ALIMENTADOR FABRICANTE: GE (USA) MODELO: 7S1716 DADOS DO EXCITADOR FABRICANTE: GE (USA) MODELO: TENSÃO: CORRENTE:	
DESENHO Nº C44-9W		DESENHISTA CODINHO	
ESCALA 1:100		VISTO DATA 24 AGO 2006	
REVISÕES		REVISÕES	