



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



RENATA CORTES FERREIRA

MODELAGEM E ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE UM  
PAVIMENTO FERROVIÁRIO COM O EMPREGO DE ASFALTO

UBERLÂNDIA

2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

**RENATA CORTES FERREIRA**

**MODELAGEM E ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE UM  
PAVIMENTO FERROVIÁRIO COM O EMPREGO DE ASFALTO**

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.<sup>a</sup> Lorayne Cristina da Silva Alves

UBERLÂNDIA

2019

RENATA CORTES FERREIRA

MODELAGEM E ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE UM  
PAVIMENTO FERROVIÁRIO COM O EMPREGO DE ASFALTO

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.

Uberlândia, 09 de dezembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof.<sup>a</sup> Lorayne Cristina Da Silva Alves

Orientadora

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Raquel Naiara Fernandes Silva

Membro da Banca

---

Prof. Dr. Paulo Roberto Cabana Guterres

Membro da Banca

Uberlândia – MG

2019

## **Agradecimento**

Agradeço à minha família e amigos, especialmente à minha irmã Marcela, por acreditarem em mim e sempre me incentivarem.

À minha professora orientadora Lorayne Cristina Da Silva Alves que se prontificou a sanar minhas dúvidas sempre que necessário.

## RESUMO

Atualmente, a participação do transporte ferroviário na matriz do transporte de cargas brasileira é de 14,9%, ao passo que, em países com dimensões continentais, essa parcela consiste, em média, de 48%, ou seja, é três vezes maior que a brasileira (BNDS, 2018). Uma rede ferroviária ampla e interligada beneficiaria todo o processo produtivo e o escoamento das exportações nacionais. Sendo assim, é de grande importância o estudo dos gargalos logísticos brasileiros e a apresentação de propostas para melhorias. Nesse sentido, este trabalho trata da Ferrovia do Cerrado, uma proposta de traçado apresentada pelo Núcleo de Estudos de Logística e Transporte (NELT) da Universidade Federal do Mato Grosso, no trecho de Alto Araguaia (MT) até Uberlândia (MG), que visa interligar o vazio logístico entre os estados do Mato Grosso, Goiás e Minas Gerais, proporcionando o escoamento da produção de grãos agrícolas pelos portos de Vitória, Açu, Santos e Paranaguá. Para isso, o presente trabalho é composto por duas etapas, sendo a primeira um dimensionamento manual da via permanente e a segunda, uma análise da variação de tensões no pavimento ferroviário através do *software* Kentrack, considerando o *layer* betuminoso como uma alternativa ao material tradicional utilizado em ferrovias. Assim, a análise consiste na verificação do comportamento das camadas de uma ferrovia ao variar parâmetros da camada de asfalto, tais como espessura da camada, tipo de ligante do asfalto e teor de ligante.

**Palavras-chave:** Transporte ferroviário. Kentrack. *Layer* betuminoso. Análise numérica.

## ABSTRACT

Currently, the participation of rail transportation in the Brazilian cargo transport matrix is 14.9%, whereas in countries with continental dimensions, this share is composed, on average, 48%, that is, three times bigger what it is the Brazilian (BNDS, 2018). A large and interconnected rail network benefits the entire production process and the flow of national exports. Therefore, it is of great importance to study Brazilian logistical bottlenecks and to present proposals for improvements. In this sense, this work deals with the Cerrado Railway, a tracking proposal sent by the NELT (Center for Logistics and Transport Studies) of Universidade Federal do Mato Grosso, on the stretch from Alto Araguaia (MT) to Uberlândia (MG), which aims to interconnected the logistic void between the states of Mato Grosso, Goiás and Minas Gerais, provinding the flow of agricultural bulk production through the ports of Vitória, Açu, Santos and Paranaguá. For this, the present work is composed of two steps, the first one is a manual sizing of the trackbed and the second, an analysis of the stress variation in the railway pavement through the Kentrack software, considering the bituminous layer as an alternative to the traditional material used in railways. Thus, an analysis consists of verifying the behavior of the railway layers when varying parameters of the asphalt layer, such as the layer thickness, the type of asphalt binder and the binder content.

**Keywords:** Rail transport. Kentrack. Bituminous layer. Numerical analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes da via permanente .....	12
Figura 2 - Componentes do trilho.....	12
Figura 3 - Bitola.....	13
Figura 4 - Dormentes de madeira .....	14
Figura 5 - Estrutura ferroviária granular.....	16
Figura 6 - Estrutura com asfalto .....	17
Figura 7 - Estrutura combinada .....	18
Figura 8 - Princípio de superposição de camadas.....	21
Figura 9 - Distribuição de carga de uma roda .....	21
Figura 10 - Dormente de madeira serrada .....	28
Figura 11 - Distância entre eixos dos trilhos .....	31
Figura 12 - Faixa de socaria .....	33
Figura 13 - Número de ciclos dos eixos .....	34
Figura 14 - CAP 50/70 .....	36
Figura 15 - AMP 65/90.....	36
Figura 16 - Composição granulométrica da mistura .....	37
Figura 17 - Variação da tensão de compressão ao alterar a espessura para o AMP 65/90.....	39
Figura 18 - Variação de tensão de tração ao alterar a espessura para o AMP 65/90.....	39
Figura 19 - Variação da tensão de compressão ao alterar a espessura para o CAP 50/70 .....	41
Figura 20 - Variação da tensão de tração ao alterar a espessura para o CAP 50/70.....	42
Figura 21 - Variação da tensão de compressão ao alterar o teor de ligante do CAP 50/70.....	44
Figura 22 - Variação de tensão de tração ao alterar o teor de ligante do CAP 50/70.....	45
Figura 23 - Variação da tensão de compressão ao alterar o teor de ligante do AMP 65/90.....	46
Figura 24 - Variação da tensão de tração ao alterar o teor de ligante do AMP 65/90.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do vagão .....	26
Tabela 2 - Dados do Trilho.....	27
Tabela 3 - Dados da locomotiva.....	27
Tabela 4 - Variação das tensões ao alterar a espessura para o AMP 65/90.....	38
Tabela 5 - Variação percentual das tensões para o AMP 65/90 .....	40
Tabela 6 - Variação da tensão de compressão ao alterar a espessura para o CAP 50/70 .....	40
Tabela 7 – Variação percentual das tensões para o CAP 50/70 .....	42
Tabela 8 - Variação das tensões ao alterar a porcentagem de ligante para o CAP 50/70.....	43



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
<b>3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1 Via permanente.....</b>	<b>11</b>
<b>3.2 Superestrutura .....</b>	<b>12</b>
<b>3.2.1 Trilhos.....</b>	<b>12</b>
<b>3.2.2 Dormente .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2.3 Lastro.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2.4 Sublastro.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2.5 Subleito .....</b>	<b>15</b>
<b>3.3 Tipos de Superestrutura .....</b>	<b>16</b>
<b>3.3.1 Estrutura granular .....</b>	<b>16</b>
<b>3.3.2 Estrutura com camada de asfalto.....</b>	<b>16</b>
<b>3.3.3 Estrutura combinada .....</b>	<b>17</b>
<b>3.4 Kentrack 4.1.1 .....</b>	<b>18</b>
<b>3.4.1 Método dos elementos finitos.....</b>	<b>19</b>
<b>3.4.2 Sistema multicamada .....</b>	<b>19</b>
<b>3.4.3 Superposição de camadas .....</b>	<b>20</b>
<b>3.5 Fatores que influenciam na análise.....</b>	<b>21</b>
<b>3.5.1 Tamanho do trilho .....</b>	<b>22</b>
<b>3.5.2 Propriedade do asfalto .....</b>	<b>22</b>
<b>3.5.3 Espessura da camada de asfalto .....</b>	<b>23</b>
<b>3.5.4 Módulo do subleito .....</b>	<b>23</b>
<b>3.5.5 Módulo do lastro.....</b>	<b>24</b>

<b>3.5.6 Carga axial .....</b>	<b>25</b>
<b>3.5.7 Espessura do lastro.....</b>	<b>25</b>
<b>3.5.8 Tipo de dormente.....</b>	<b>25</b>
<b>4. DIMENSIONAMENTO DA SUPERESTRUTURA .....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 Dados .....</b>	<b>26</b>
<b>4.2 Dimensionamento dos trilhos .....</b>	<b>27</b>
<b>4.3 Dimensionamento dos dormentes .....</b>	<b>30</b>
<b>4.4 Dimensionamento do Lastro.....</b>	<b>32</b>
<b>4.5 Dimensionamento do Sublastro.....</b>	<b>34</b>
<b>5. MATERIAIS DA MISTURA ASFÁLTICA .....</b>	<b>36</b>
<b>6. APLICAÇÃO DO KENTRACK.....</b>	<b>37</b>
<b>6.1 Espessura da camada de asfalto .....</b>	<b>37</b>
<b>6.2 Teor de ligante na mistura.....</b>	<b>43</b>
<b>6.3 Comparação entre superestrutura combinada e superestrutura granular .....</b>	<b>48</b>
<b>7.0 CONCLUSÃO.....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>50</b>
<b>ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DO VAGÃO HOOPER HFS .....</b>	<b>52</b>
<b>ANEXO B – CARACTERÍSTICAS DA LOCOMOTIVA DASH C44-9W.....</b>	<b>53</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil tem sua economia baseada principalmente na produção agropecuária e na extração de recursos naturais, como o minério de ferro. Esses produtos circulam entre as indústrias brasileiras, porém, em grande parte, são exportados, sendo, para isso, necessário um modal eficiente e que comporte volumes grandes a um custo de operação reduzido. É nesse ponto que a malha ferroviária do Brasil tem um papel essencial, sendo uma modalidade vantajosa no transporte de cargas a médias e longas distâncias. (MIRANDA E TREVISOL, 2014)

As ferrovias visam garantir a diversificação e a segmentação dos serviços aos clientes através da multimodalidade, além da revitalização da indústria ferroviária nacional, promovendo redução de custos, o que beneficiaria toda a sociedade e traria sustentabilidade aos setores produtivos. (MIRANDA E TREVISOL, 2014)

No entanto, falta continuidade nos projetos de planejamento logístico do país, ocasionando em um cenário dominado pelo transporte rodoviário que influi em diversos aspectos econômicos e ambientais tais como: aumento do tempo de viagem, dano à carga, dano ao veículo e manutenção veicular, acidentes e poluição por gases e sonora.

Em 1975, o Deputado Federal do Mato Grosso apresentou uma proposta para interligar a Amazônia, o Centro-Oeste, o sul e o sudeste com 5.000 km de linhas ferroviárias. O projeto é complexo e extenso e está sendo construído em etapas, sendo uma delas um ramal interligando as cidades de Alto Araguaia (MT) e Uberlândia (MG) que visa interligar o vazio logístico entre os estados do Mato Grosso, Goiás e Minas Gerais, proporcionando o escoamento da produção de grãos agrícolas pelos portos de Vitória, Açu, Santos e Paranaguá. (MIRANDA E TREVISOL, 2014)

O presente trabalho refere-se ao trecho de Alto Araguaia até Uberlândia a partir de uma proposta de traçado apresentada pelo Núcleo de Estudos de Logística e Transporte (NELT) da Universidade Federal do Mato Grosso. (GARCIA; MIRANDA; TUPINAMBÁ, 2019)

A primeira etapa deste trabalho consiste em um dimensionamento das camadas constituintes da ferrovia, na escolha de materiais e características operacionais, levando em conta a região em

que se encontra a ferrovia. Já na segunda etapa, será feita uma análise mecanicista no pavimento ferroviário através do *software* Kentrack, avaliando a influência da adição de uma camada de asfalto e de parâmetros da mesma tais como tipo de ligante, espessura e teor de betume, nas tensões das camadas de lastro, sublastro e subleito.

## 2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estão descritos a seguir:

- Realizar um pré-dimensionamento da superestrutura ferroviária da Ferrovia do Cerrado para que este sirva de auxílio para um futuro dimensionamento desta ferrovia.
- Analisar a influência da inserção de uma camada de asfalto e da variação de seus parâmetros na superestrutura ferroviária.
- Comparar a eficiência de uma estrutura combinada com asfalto em relação a uma estrutura granular comum.

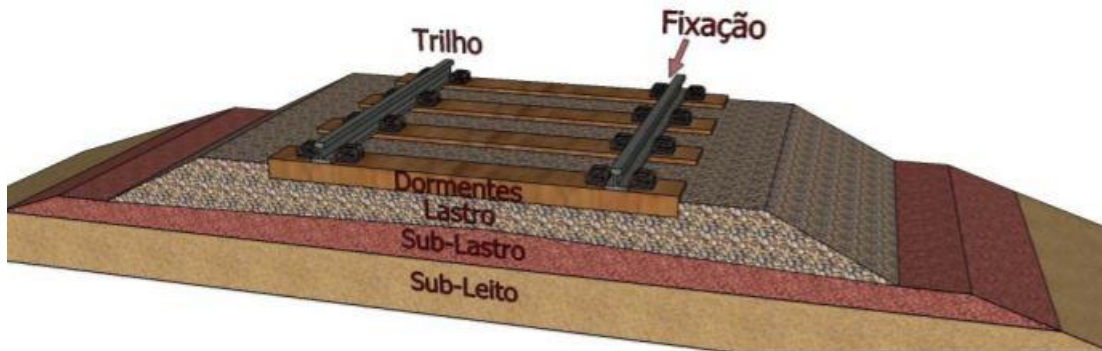
## 3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir estão apresentados os componentes constituintes de uma via permanente, os tipos de superestruturas ferroviárias, uma breve explicação sobre o *software* utilizado na análise mecanicista e os principais fatores que influenciam esta análise.

### 3.1 Via permanente

A via permanente é o conjunto de elementos e camadas que formam a estrutura necessária para suportar e transmitir cargas ferroviárias, permitindo a passagem de trens com segurança. Esta via está dividida entre infraestrutura, composta pelo conjunto de obras de terraplanagem (subleito) e de arte (túneis e viadutos) e pela superestrutura, cujos principais elementos são os trilhos, dormentes, lastro e sublastro, sendo responsável por captar as cargas transmitidas pelas rodas ferroviárias e dissipá-las de maneira uniforme na plataforma ferroviária. Os componentes da via permanente estão apresentados na Figura 1. (RUMO ALL, 2016)

Figura 1 - Componentes da via permanente



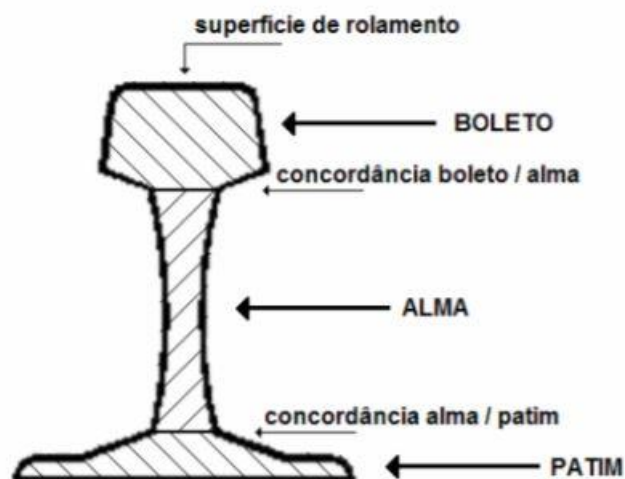
Fonte: KLINCEVICIUS (2011)

## 3.2 Superestrutura

### 3.2.1 Trilhos

Os trilhos são componentes de aço formados por boleto, alma e patim que orientam e dão sustentação ao veículo no trajeto, funcionando como viga contínua, transferindo e distribuindo as solicitações das rodas para os dormentes. Na Figura 2 estão representados os componentes de um trilho. (DNIT, 2015)

Figura 2 - Componentes do trilho



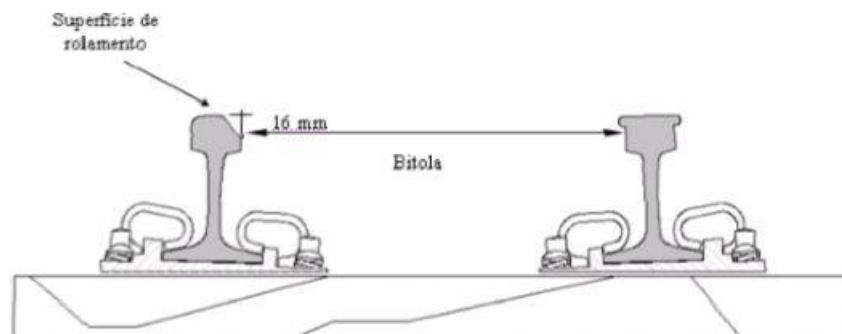
Fonte: COIMBRA (2008)

Para exercer a sua função é necessário que o trilho tenha dureza, tenacidade, elasticidade e resistência à flexão. Além disso, requer uma série de cuidados quanto ao seu dimensionamento e manutenção a fim de se evitar ondulações, fraturas e defeitos superficiais. Defeitos ou descontinuidade nos trilhos podem causar efeitos dinâmicos prejudiciais à via permanente e vibração nos veículos. (KLINCEVICIUS, 2011)

A maioria dos trilhos fabricados no mundo é de aço-carbono, no entanto existem países que produzem de “aço-liga”, que possuem uma maior vida útil. Os trilhos podem ainda ser tratados termicamente para aumentar a dureza superficial. (DNIT, 2015)

Dá-se o nome de bitola para a distância entre faces internas dos trilhos, como mostra a Figura 3. No Brasil são utilizadas a bitola métrica (1,0 m), a larga (1,6 m) e a mista, na qual circulam simultaneamente duas bitolas de trem.

Figura 3 - Bitola



Fonte: RUMO ALL (2016)

### 3.2.2 Dormente

Os dormentes são componentes transversais à via cujas funções são a de receber e transmitir ao lastro, da maneira mais uniforme possível, os esforços produzidos pelas cargas dos veículos ferroviários, servindo de suporte aos trilhos, permitindo a sua fixação, mantendo a bitola e garantindo a estabilidade vertical, lateral e longitudinal da via. O dormente deve ser de fácil manuseio, assentamento e substituição, além de possuir longa vida útil. Na escolha entre os

tipos de dormente, deve-se levar em conta as exigências ambientais e o custo, sendo os materiais mais utilizados em dormentes, a madeira, o concreto e o aço. (DNIT, 2015)

Apesar de serem mais duráveis e resistentes, existem algumas restrições quanto à implantação de dormentes de concreto. O peso elevado desses dormentes faz com que para sua utilização seja necessário reforço de plataforma, o que resulta em um alto investimento e dificulta operações de construção e manutenção da via. Outra restrição é o alto nível de manutenção necessário uma vez que qualquer impacto além do normal no trilho afeta demasiadamente a estrutura do concreto, reduzindo sua vida útil, ou elevando a necessidade de intervenção. (RUMO ALL, 2016)

Os dormentes de aço apresentam boa vida útil e facilidade na manutenção, porém possuem um elevado custo de implantação e seu peso leve podem causar problemas relativos à estabilidade das vias operantes com cargas elevadas. (KLINCEVICIUS, 2011)

Já os dormentes de madeira possuem custo de implantação baixo, fácil instalação e manutenção e são capazes de suportar as pressões e forças mecânicas do trilho / placa de fixação e fornecer resistência aos pregos, para que fiquem firmes e não afrouxem. A vida útil dos dormentes de madeira é de cerca de 20 anos sob tráfego intenso. A Figura 4 ilustra os dormentes de madeira com área de apoio dos trilhos definida. (LIU, 2013)

Figura 4 - Dormentes de madeira



Fonte: PREMA (2019)

### 3.2.3 Lastro

Lastro é a camada de material granular situada acima do sublastro e entre os dormentes e a plataforma, geralmente composta de pedra britada, com uma espessura que varia entre 250mm a 350mm. As principais funções do lastro, de acordo com o DNIT, são:

- Distribuir de forma uniforme sobre a plataforma os esforços resultantes das cargas dos veículos;
- Impedir os deslocamentos vertical e horizontal dos dormentes;
- Formar um suporte, até certo limite de forma elástica, atenuando as trepidações resultantes da passagem dos veículos rodantes;
- Sobrepor-se a plataforma, suprimir suas irregularidades, formando uma superfície contínua e uniforme para os dormentes e trilhos;
- Facilitar a drenagem da superestrutura.

### 3.2.4 Sublastro

Segundo o DNIT, sublastro é a camada de material granular, bem graduado, que completa a plataforma ferroviária e que recebe o lastro. As principais funções do sublastro são:

- Absorver os esforços advindos do lastro e transferi-los para o terreno subjacente, na taxa adequada à capacidade de suporte do referido terreno;
- Evitar o fenômeno do bombeamento de finos do subleito, fenômeno no qual a mistura do solo fino com a água é bombeada, pela ação do tráfego, para a camada de lastro, alterando suas propriedades;
- Diminuir a altura necessária de lastro, uma vez que seu custo é menor.

Os materiais a ser empregados no sublastro poderão ser obtidos "in natura" ou pela mistura de dois ou mais materiais em usina ou na pista.

### 3.2.5 Subleito

De acordo com Selig e Waters (1994) apud KLINCEVICIUS, 2011, p 17, o subleito pode ser constituído pelo solo natural ou por uma camada de solo selecionado tendo como funções garantir a estabilidade da fundação, evitando recalques excessivos e exercer papel mecânico, influenciando a resiliência da estrutura e contribuindo para a deflexão elástica da via.

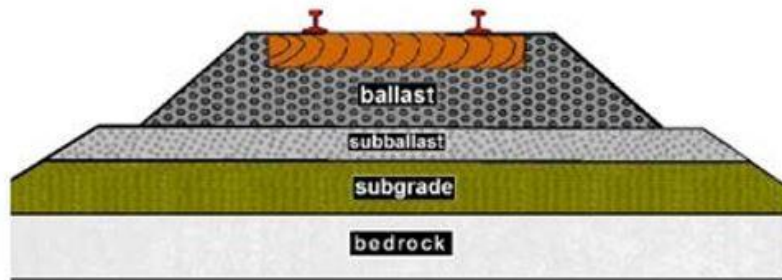


### 3.3 Tipos de Superestrutura

#### 3.3.1 Estrutura granular

É a estrutura ferroviária tradicional composta de lastro, sublastro granular, subleito e rocha, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Estrutura ferroviária granular

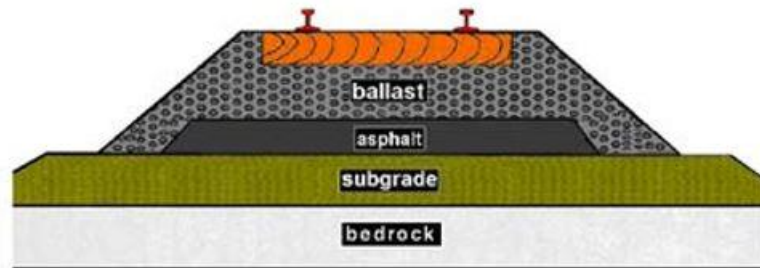


Fonte: LIU (2013)

#### 3.3.2 Estrutura com camada de asfalto

Segundo Anderson e Rose (2008); Rose e Lees (2008) e Rose e Bryson (2009), nesse tipo de estrutura, uma camada de asfalto é usada no lugar da camada de sublastro presente na estrutura granular, sendo amplamente aceita, já que reduz as tensões do subleito, fornece uma camada de impermeabilização para controlar o teor de umidade do subleito e promove um alto nível de confinamento para o lastro, aumentando sua resistência ao cisalhamento (apud LIU, 2013, p 25). A Figura 6 representa essa estrutura.

Figura 6 - Estrutura com asfalto



Fonte: LIU (2013)

### 3.3.3 Estrutura combinada

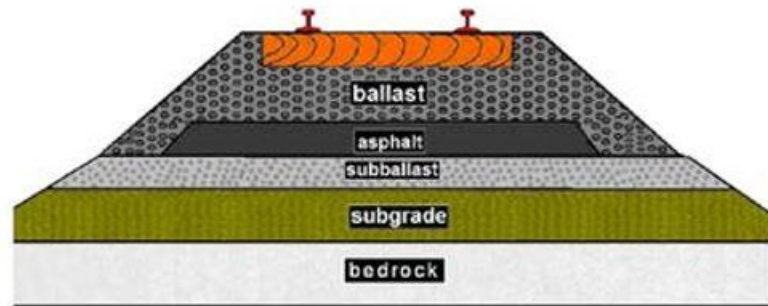
Tipo de estrutura que possui tanto uma camada de asfalto quanto um sublastro, sendo composta, portanto, de lastro, asfalto, sublastro, subleito e rocha. O sublastro é considerado um incremento do subleito.

De acordo com Asphalt Institute (1998) e Rose et al (2004) apud LIU, 2013, p 3, após inúmeros testes variando a espessura da camada de asfalto, foi demonstrado que as estruturas com asfalto e sublastro proporcionam os seguintes benefícios à estrutura da ferrovia:

- Uma camada de suporte de reforço abaixo do lastro para distribuir uniformemente tensões para o subleito;
- Uma camada de impermeabilização e confinamento que fornece capacidade consistente de transporte de carga para estruturas de via e elimina o excesso de umidade no subleito;
- Um nível de confinamento consistentemente alto para o lastro, para que ele possa desenvolver alta resistência ao cisalhamento e fornecer distribuição uniforme de pressão;
- A necessidade de uma camada resiliente entre lastro e o leito da estrada para reduzir a probabilidade de bombeamento do subleito sem aumentar, substancialmente, a rigidez da via;
- Superfície resistente às condições climáticas e uniformemente estável para a colocação da lastro e da superestrutura.

A Figura 7 mostra uma representação da superestrutura quando utilizado as camadas combinadas de asfalto e sublastro.

Figura 7 - Estrutura combinada



Fonte: LIU (2013)

### 3.4 Kentrack 4.1.1

O KENTRACK é baseado no método dos elementos finitos, na teoria de multi-camadas e na superposição de camadas para realizar uma análise de desempenho e previsão de vida útil dos leitos de ferrovia. Os efeitos de uma série de variáveis da superestrutura da ferrovia são calculados e analisados pelo programa, sendo as variáveis de efeito mais significativo na vida de serviço da ferrovia, o módulo do subleito e a carga axial. (LIU, 2013)

Todas as análises de danos para o subleito e asfalto na estrutura da ferrovia são baseadas em equações de danos desenvolvidas para pavimentos rodoviários. As saídas críticas são a tensão de compressão vertical no subleito e a tensão de tração horizontal na parte inferior da camada de asfalto. No entanto, o ambiente de serviço real para o asfalto e o subleito em ferrovias será menos severo do que os pavimentos de rodovias, devido às menores magnitudes de carga do subleito, menos exposição à luz solar e variações mínimas de temperatura no ambiente isolado dos trilhos. As vidas previstas para aplicações ferroviárias seriam, portanto, conservadoras. (LIU, 2013)

O software oferece duas opções de sistemas de unidades, o sistema inglês e o sistema internacional, além disso, possibilita a escolha entre três tipos de estrutura ferroviária: combinada, granular e com asfalto substituindo o subleito. Existem 5 abas para a entrada de dados sendo essas: trilho, dormente, carga, camada e análise de danos. Na aba de trilhos são inseridos dados como o tipo de trilho e seu momento de inércia, na aba dormente é definido o material e algumas características tais como dimensões e espaçamento, já na aba das camadas o programa exige dados como espessura, granulometria e módulo de Young.

### 3.4.1 Método dos elementos finitos

Houve muitas abordagens de sistema em camadas com base na teoria da elasticidade para resolver o problema do tensão e deslocamento no pavimento. No entanto, devido à complexidade da matemática envolvida, é bastante difícil obter uma solução exata das equações diferenciais. A vantagem do método dos elementos finitos é que ele pode ser formulado geralmente em relação a geometria e propriedades do material. Este método é particularmente útil para resolver problemas em pavimentos em camadas compostas de materiais diferentes. (HAN, 1973)

O Método dos Elementos Finitos é uma análise matemática que consiste na discretização, ou seja, divisão de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos. (LOTTI et al., 2006)

Esse método se aplica a vários problemas referentes aos diversos fenômenos físicos que estão sujeitos a uma grande variedade de interações com a vizinhança em que ocorrem. Além disso, o método foi muito estudado e é solidamente amparado em teorias matemáticas, o que justifica o seu largo emprego como ferramenta para análise em vários campos da ciência e da engenharia. (SCREMIN, 2017)

### 3.4.2 Sistema multicamada

Cada camada da superestrutura de uma ferrovia possui características únicas e não podem ser representadas por uma massa homogênea na análise. Dessa forma, Burmister desenvolveu soluções para um sistema de duas e três camadas, considerando o pavimento como uma camada elástica sobre uma camada semi-infinita de subleito. De acordo com Huang (1968) apud LIU, 2013, p 21, somente após o advento dos computadores digitais de alta velocidade é que a teoria ganhou grande importância e foi estendida a sistemas multicamadas.

A teoria para o sistema de duas camadas tem como objetivo promover uma base para entender melhor as condições reais do fenômeno e fornecer relações fundamentais entre os fatores que o controlam. A solução geral para o problema requer que sejam assumidas premissas da teoria da

elasticidade e que condições de fronteira e continuidade sejam satisfeitas (BURMISTER, 1943).

Assim, as suposições, segundo Burmister (1943), para o sistema de duas camadas são:

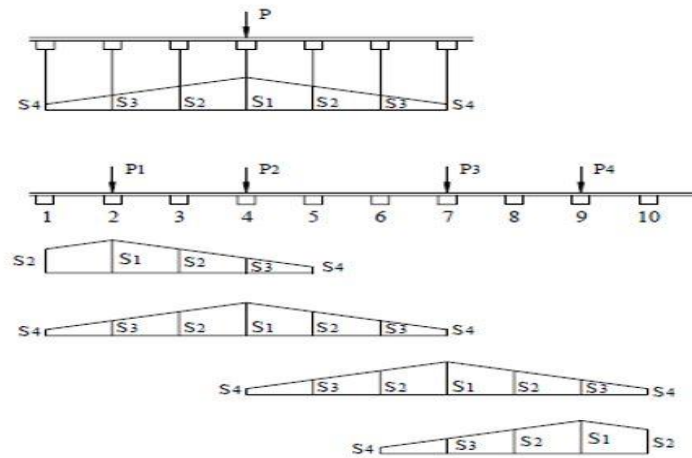
1. Cada camada é homogênea, isotrópica e linearmente elástica;
2. O material da camada superior é leve e infinito na direção horizontal, porém finito em espessura e a camada inferior é infinita em ambas as direções (horizontal e vertical);
3. A solução do problema satisfaz a condição de continuidade de tensão e deslocamento através da interface entre as camadas superior e inferior, ou seja, as tensões normais, de cisalhamento e os deslocamentos verticais e horizontais são iguais nas duas camadas;
4. A superfície da camada superior é livre de tensão normal e de cisalhamento fora do limite da área de carga;
5. Em profundidade infinita, as tensões e deslocamentos no subleito são iguais a zero.

Cada camada é descrita por seu módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e distância da superfície superior à sua interface. (LIU, 2013)

### 3.4.3 Superposição de camadas

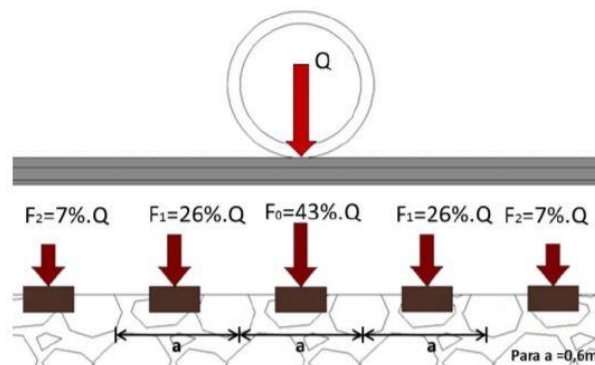
O princípio da superposição, mostrado na Figura 8, pode ser aplicado devido ao modelo elástico linear de Burmister, no qual as camadas são consideradas infinitas na direção horizontal. Considera-se que a carga  $P$  de uma roda está distribuída em mais de um dormente, como mostra a Figura 9. Dessa forma, tensões, deformações e deflexões no sistema de trilhos devido a várias cargas de roda são obtidas sobrepondo os resultados da carga de uma única roda. (LIU, 2013)

Figura 8 - Princípio de superposição de camadas



Fonte: LIU (2013)

Figura 9 - Distribuição de carga de uma roda



Fonte: KLINCEVICIUS (2011)

### 3.5 Fatores que influenciam na análise

Para desenvolver um design coerente de uma estrutura ferroviária, é necessário analisar os efeitos de diversos parâmetros que atuam na performance da estrutura. Assim, dois aspectos são de interesse primordial: a variação de parâmetros tais como tamanho do trilho, carga axial, módulo do subleito, propriedades do asfalto, tipo de dormente, espessura e módulo do lastro, o outro aspecto é avaliar quais desses parâmetros afetam de forma significativa a performance da estrutura. Os parâmetros que podem afetar significativamente o desempenho ferroviário devem ser enfatizados quando um projeto estrutural é avaliado (LIU, 2013).

A análise sensitiva feita por LIU (2013) através do Kentrack mostra os seguintes resultados e conclusões a partir da variação dos parâmetros mencionados.

### 3.5.1 Tamanho do trilho

Para essa análise foram considerados os três tipos de estrutura com um módulo de subleito constante, variando o tipo de trilho usado e a carga axial. Os resultados mostram que uma carga axial maior resulta no aumento das tensões de compressão no subleito e aumento das tensões de tração na camada de asfalto. A solução para esse problema é o aumento do tamanho do trilho que revelou reduzir as tensões de compressão do subleito em todos os tipos de superestrutura e as tensões de tração no asfalto na superestrutura combinada. Isso se deve ao fato que trilhos de tamanho maior são mais rígidos, produzindo tensões menores de flexão quando as cargas são aplicadas.

Além disso, o efeito de cargas axiais pesadas aplicadas nos trilhos de tamanho maior é equivalente ao efeito de cargas leves aplicadas nos trilhos de tamanho menor. Portanto, para uma linha principal com tráfego intenso, é desejável o uso de trilhos de grande porte. O trilho de tamanho pequeno é apropriado para as filiais com pouco tráfego.

### 3.5.2 Propriedade do asfalto

Um importante parâmetro para analisar as propriedades do asfalto é o módulo dinâmico<sup>1</sup> ( $E^*$ ), para isso, essas propriedades são incorporadas no modelo Witczak  $E^*$ . Um valor mais alto para  $E^*$  produzirá menos tensão de tração no asfalto devido à maior rigidez e aumentará a vida útil do asfalto conforme o esperado.

As propriedades físicas de um ligante de asfalto ditam como ele se comportará como constituinte em uma mistura de asfalto. Essas propriedades são diretamente relacionadas com a alta e a baixa temperatura de serviço, sendo que a principal preocupação para o desempenho do asfalto em alta temperatura é a formação de bacias deflectométricas, que normalmente levam tempo para se desenvolver.

---

1

O módulo complexo dinâmico ( $E^*$ ) é uma medida da rigidez dos materiais viscoelásticos. É uma das propriedades de asfalto mais importantes usadas para examinar respostas de camadas de asfalto como tensões e deformações.

À alta temperatura, os módulos dinâmicos são estáveis à medida que a porcentagem passante de agregado na peneira nº 200 aumenta. Além disso, o módulo dinâmico aumenta com diminuições na porcentagem de agregado retido nas peneiras de 4 e 3/4 de polegada (4,75 e 19 mm de abertura, respectivamente) e um aumento na porcentagem de agregado retido na peneira de 3/8 de polegada (9,5 mm de abertura).

Por fim, a viscosidade tem um efeito direto no módulo dinâmico do asfalto. O módulo dinâmico diminui à medida que aumenta a porcentagem de betume devido ao aumento da viscoelasticidade do asfalto, ou seja, diminuição da rigidez da mistura. Já o aumento da viscosidade aumentará o módulo dinâmico do asfalto.

Assim, o módulo dinâmico é o mais alto no inverno e o mais baixo no verão. Deve-se, portanto, trabalhar a classificação do ligante do asfalto para aquelas áreas severas do clima, conforme necessário, melhorando o desempenho das estruturas com asfalto.

### **3.5.3 Espessura da camada de asfalto**

É primordial projetar uma camada de asfalto com a espessura apropriada já que uma camada de asfalto melhora o desempenho da estrutura, mas representa um alto investimento. Então, deve haver um equilíbrio entre o custo adicionado e as melhorias de desempenho.

Ao aumentar a espessura da camada de asfalto de 2 polegadas (50.8 mm) para 8 polegadas (203.2 mm), mantendo constante a espessura do lastro, reduz-se a tensão de compressão do subleito em 38% na estrutura com camada de asfalto e em 35% na estrutura combinada. Já as deformações à tração do asfalto são reduzidas em 26% na estrutura com camada de asfalto e em 10% na estrutura combinada.

### **3.5.4 Módulo do subleito**

Ao aumentar o módulo do subleito, a tensão de compressão do subleito aumenta levemente, já a previsão de vida de serviço para o subleito aumenta consideravelmente pois o subleito com



módulo mais alto tem grande capacidade de suportar tensões. Portanto, embora o nível de tensão compressiva do subleito aumente, a capacidade de suporte aumenta muito mais que o nível de tensão.

Enquanto isso, as deformações à tração do asfalto são reduzidas à medida que o módulo do subleito aumenta uma vez que o subleito se torna mais rígido, a camada de asfalto flexiona menos, assim as tensões de tração do asfalto diminuem, prolongando a vida de fadiga da camada de asfalto. É importante notar que ao comparar os efeitos do módulo na vida de serviço dos três tipos de estrutura, há um aumento de 100% na vida útil para uma estrutura com asfalto em comparação com a estrutura granular.

Assim, é crucial ter uma estrutura com a base mais rígida e alto módulo. Um subleito flexível pode ter problemas na manutenção da geometria da via, como deflexão e desgaste de componentes.

### **3.5.5 Módulo do lastro**

O módulo do lastro varia ao longo de sua vida útil. Quando o lastro é recém-construído, está pouco denso, possui alta porosidade e, portanto, módulo baixo. Após receber restrições de cargas, o lastro é compactado, obtendo um módulo mais alto. Depois de anos, o lastro se degrada devido à carga cíclica. Portanto, o módulo de lastro diminui.

O aumento do módulo de lastro tem um efeito mínimo nas tensões de compressão do subleito e nas tensões de tração no asfalto, especialmente com o subleito fraco. Se o módulo do subleito for alto, o módulo de lastro pode afetar, com mais intensidade, a vida útil e as tensões de compressão do subleito.

Enquanto isso, um lastro bem compactado de alto módulo, reduz a vida útil do asfalto que precisa suportar mais deformações devido o aumento da área de contato do lastro para distribuir a carga. No entanto, isso não implica que o lastro solto seja preferido para a estrutura pois este resultará em grandes deformações verticais da via por não fornecer resistência suficiente para impedir o movimento dos painéis da via.

### 3.5.6 Carga axial

O aumento da carga no eixo aumentará as tensões de compressão do subleito e as tensões de tração no asfalto devido à grande deformação de camadas de asfalto, logo a vida útil do subleito e da camada de asfalto diminui.

Considerando a estrutura com camada de asfalto e um trilho RE 132, o aumento de uma carga axial de 33 para 39 toneladas faz com que a tensão de compressão no subleito e a tensão de tração no asfalto aumentem em 16%, enquanto a vida útil é reduzida em cerca de 40%. Assim, as linhas de transporte pesado exigem um forte suporte da base da estrutura e o controle da magnitude da carga por eixo.

### 3.5.7 Espessura do lastro

A espessura do lastro afeta a capacidade de drenagem e a distribuição de tensões. Com o aumento da espessura, reduz-se as tensões de compressão do subleito para todos os tipos de estruturas o que resulta em uma maior vida útil. As deformações à tração do asfalto também diminuem enquanto que o aumento na vida de serviço do asfalto é muito pronunciado, sendo tipicamente três vezes maior para as seções de lastro mais espessas.

### 3.5.8 Tipo de dormente

A substituição de dormentes de madeira por dormentes de concreto proporciona uma redução nas tensões de compressão do subleito e na tensão de tração do asfalto. A tensão de compressão do subleito é reduzida em cerca de 10% e a tensão do asfalto é reduzida em 25%. Como resultado, a vida útil do subleito e do asfalto aumenta significativamente usando dormentes de concreto já que esses possuem uma rigidez maior. O módulo de Young dos dormentes de concreto é três vezes maior que o dos dormentes de madeira, portanto, o que faz com que sua capacidade de suportar cargas e deformar menos seja mais expressiva.

#### 4. DIMENSIONAMENTO DA SUPERESTRUTURA

Consiste na primeira etapa do trabalho no qual é feito um dimensionamento manual. São definidas as características operacionais, materiais constituintes das camadas, definição do veículos ferroviários (vagão e locomotiva) e cálculo das espessuras das camadas.

##### 4.1 Dados

Foram determinados o vagão, o trilho e a locomotiva a serem usados na ferrovia com base no tipo de carga e quantidade a ser transportada, além disso, considerou-se uma estrutura com bitola larga, ou seja, com distância interna entre boletos dos trilhos igual a 1,60 metros. Como a carga é majoritariamente de granéis, foi escolhido um vagão Hooper fechado HFS, que possui uma lotação nominal exprevissa, visto que o volume de carga é grande (KUESTER, 2010). Já o tipo de trilho foi definido com base em testes de verificação de tensões no seu dimensionamento e aquele que demonstrou ser o mais adequado foi o do tipo TR-45. Por fim, optou-se por uma locomotiva que estivesse presente no cenário ferroviário brasileiro, sendo adotada a locomotiva Dash 9-44C (CAVALCANTI, 2015). As Tabelas 1, 2 e 3 expõem os dados de cada um dos itens mencionados e nos anexos A e B estão apresentadas as fichas técnicas do vagão e da locomotiva, respectivamente.

Tabela 1 - Dados do vagão

<b>Dados do vagão</b>	
Hooper HFS	
Bitola (m)	1,6
Tara nominal (kg)	23000
Lotação nominal (kg)	77000
Peso bruto máximo (kg)	100000
Peso da roda mais pesada (kg)	12500
Capacidade volumétrica nominal (m <sup>3</sup> )	100

Fonte: KUESTER (2010)

Tabela 2 – Dados do Trilho

<b>Dados do trilho</b>	
TR- 45	
Área (cm <sup>2</sup> )	56,9
Momento de inércia (cm <sup>4</sup> )	1610,81
Módulo de resistência – Boleto (cm <sup>3</sup> )	205,82
Módulo de resistência – Patim (cm <sup>3</sup> )	249,58
Altura (mm)	142,8
Base (mm)	130,17
Boleto (mm)	65,09
Alma (mm)	14,29
Módulo de elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	2100000
Bitola (cm)	160

Fonte: DNIT (2015)

Tabela 3 - Dados da locomotiva

<b>Dados da locomotiva</b>	
Dash 9-44C	
Fabricante	GE (USA)
Peso total abastecida (kg)	176461
Peso por eixo abastecida (kg)	29410,16
Peso da roda mais pesada (kg)	14705,08
Distância entre eixos do truque (cm)	201,99

Fonte: CAVALCANTI (2015)

#### 4.2 Dimensionamento dos trilhos

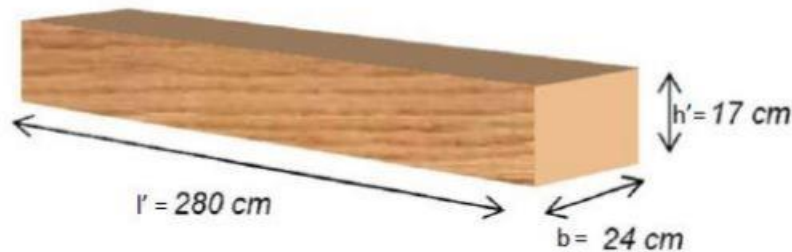
O dimensionamento dos trilhos foi feito através do método de Zimmermann, que considera duas hipóteses, sendo a primeira na qual a linha é flexível e a segunda em que a plataforma é elástica. Para a realização dos cálculos, foram consideradas as seguintes condições:

- Dormente de madeira serrada, com dimensões padronizadas de 280cm de comprimento x 24cm de largura x 17cm de altura, mostrado na Figura 10, estando de acordo com a norma ABNT NBR 7511 (2013);
- Taxa de dormentação igual a 1820 dormentes/km (valor padrão para linhas tronco em bitola larga);
- Velocidade de operação: 70 km/h (adotando valor médio de acordo com recomendações de Brina (1979));
- Coeficiente do lastro (C): 9 kgf/cm<sup>3</sup> (considerando linhas de padrão médio);
- Carga estática por roda (P): 12500 kgf (valor retirado da Tabela 1);
- Espaçamento entre dormentes (a).

$$a = \frac{1000 \text{ m}}{t} = \frac{1000}{1820} = 0,55\text{m} \quad (I)$$

Sendo t a taxa de dormentação.

Figura 10 - Dormente de madeira serrada



Fonte: RUMO ALL (2016)

- Coeficiente dinâmico (C<sub>d</sub>):

$$C_d = 1 + \frac{V^2}{30000} = 1,16 \quad (II)$$

Brina (1979) considera, como coeficiente dinâmico mínimo o valor de 1,4. O autor explica que, considerando a possibilidade de defeitos na via férrea, o impacto causado pelas vibrações dos veículos ferroviários aumentariam consideravelmente, justificando

a adoção de um valor mínimo. Portanto, adota-se, para fins de cálculo, o coeficiente dinâmico com valor igual a 1,4

Após a definição dos dados necessários foram realizadas as duas hipóteses de cálculo para o trilho TR-45:

- 1ª Hipótese: considerando a flexibilidade da linha

➤ Determinação do coeficiente de superestrutura:

$$D = 0,9 \times C \times b \times a = 0,9 \times 9 \times 24 \times 55 = 10692 \quad (III)$$

$$\gamma = \frac{6 \times E \times I}{D \times a^3} = \frac{6 \times 2100000 \times 1610,81}{10692 \times 55^3} = 11,41 \quad (IV)$$

Sendo :

E – Módulo de elasticidade, em kgf/cm<sup>2</sup>

I – Momento de inércia do trilho TR-45, em cm<sup>4</sup>

a – Espaçamento entre dormentes, em cm

b – Largura do dormente, em cm

C – Coeficiente do lastro

➤ Cálculo do momento fletor máximo, em kgf.cm:

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{7 + 8 \times \gamma}{8 \times (5 + 2 \times \gamma)} \times P \times C_d \times a = \frac{7 + 8 \times 11,41}{8 \times (5 + 2 \times 11,41)} \times 12500 \times 1,4 \times 55 = 425027,3 \text{ kgf.cm} \quad (V)$$

Em que:

Y – coeficiente de superestrutura

P – carga estática por roda, em kgf

C<sub>d</sub> – Coeficiente dinâmico

a – Espaçamento entre dormentes, em cm

- 2ª Hipótese: considerando a plataforma elástica

- Determinação do momento fletor máximo, em kgf.cm, sendo o coeficiente de superestrutura já calculado na 1ª hipótese:

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{\gamma}{(2 + 3 \times \gamma)} \times P \times C_d \times a = \frac{11,41}{(2 + 3 \times 11,41)} \times 12500 \times 1,4 \times 55 = 303121,7 \text{ kgf.cm} \quad (VI)$$

Em que:

Y – coeficiente de superestrutura

P – carga estática por roda, em kgf

C<sub>d</sub> – Coeficiente dinâmico

a – Espaçamento entre dormentes, em cm

Após o cálculo dos momentos fletores para as duas hipóteses, a tensão de trabalho no trilho é determinada para o momento crítico, ou seja, o maior valor de momento.

- Cálculo da tensão de trabalho no trilho, em kgf/cm<sup>2</sup>, e verificação:

$$\sigma = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W} = \frac{425027,3}{249,58} = 1702,97 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad (VII)$$

Sendo:

M<sub>máx</sub> – Momento fletor máximo, em kgf.cm

W – Módulo de resistência do trilho TR-45, em cm<sup>3</sup>

A tensão admissível, conforme o American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA), deve estar entre 1500 e 1750 kgf/cm<sup>2</sup> e, portanto, o trilho TR-45 se mostra de acordo.

#### 4.3 Dimensionamento dos dormentes

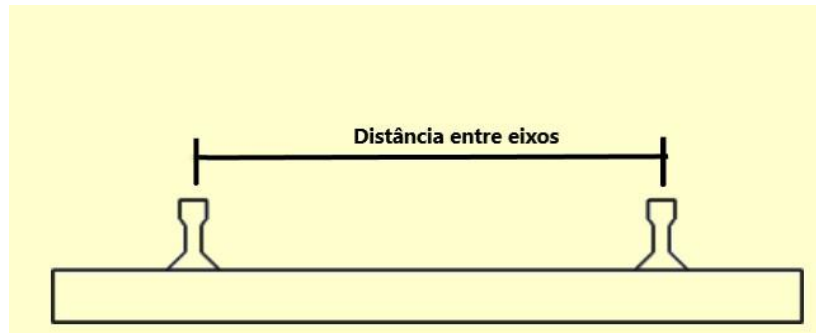
Para o dimensionamento dos dormentes, foram considerados os seguintes dados:

- Coeficiente dinâmico calculado no item 3.2 (C<sub>d</sub>): 1,4;
- Peso da roda mais pesada da locomotiva, mostrada na Tabela 3 (P<sub>r</sub>): 14705,08 kgf;

- Largura da placa de apoio que recebe o trilho (y): 25 cm (conforme dimensões do elemento de fixação).

Além disso, fez-se necessária a determinação da distância de eixo a eixo entre os trilhos (B) que está representada na figura 11 e é dada pela equação VIII.

Figura 11 - Distância entre eixos dos trilhos



Fonte: Autor (2019)

$$B = \text{bitola} + \left( \frac{\text{largura do boleto}}{2} \right) \times 2 = 160 + 6,509 = 166,509 \text{ cm} \quad (\text{VIII})$$

A partir dos dados anteriores, foram efetuados os seguintes cálculos:

- Cálculo da carga a ser considerada sobre o dormente, em kgf

$$P = \frac{P_r}{d/a} \times C_d = \frac{14705,08}{201,99/55} \times 1,4 = 5605,679 \text{ kgf} \quad (\text{IX})$$

Sendo:

$P_r$  – Peso da roda mais pesada, em kgf

d – Distância entre eixos do truque da locomotiva, em cm, apresentado na Tabela 3

a – Espaçamento entre dormentes, em cm (calculado no item 3.2)

$C_d$  – Coeficiente dinâmico (calculado no item 3.2)

- Cálculo do momento máximo, em kgf.cm

$$M_{\text{máx}} = \frac{P}{8} \times (L - B - y) = \frac{5605,679}{8} \times (280 - 166,509 - 25) = 62006,52 \text{ kgf.cm} \quad (\text{X})$$



Em que:

P – Carga a ser considerada sobre o dormente, em kgf

L – Comprimento do dormente, em cm (adotado no item 3.2)

B – Distância de eixo a eixo entre trilhos, em cm

y – Largura da placa de apoio que recebe o trilho, em cm

- Determinação do módulo resistente do dormente, em  $\text{cm}^3$

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

Sendo:

b – Largura do dormente, em cm (adotado no item 3.2)

t – Espessura do dormente, em cm (adotado no item 3.2)

- Cálculo da tensão de trabalho do dormente, em  $\text{kgf/cm}^2$

$$\sigma = \frac{M_{\text{máx}}}{W} = \frac{62006,52}{1156} = 53,64 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} < \sigma_{\text{adm}} \quad (XII)$$

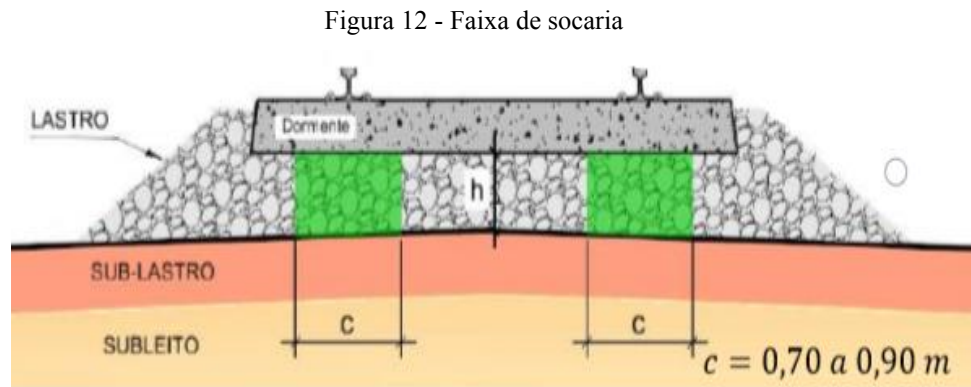
Assim, o dormente satisfaz as condições apresentadas uma vez que a tensão de trabalho é menor que a tensão admissível do dormente de madeira à flexão de  $77 \text{ kgf/cm}^2$ .

#### 4.4 Dimensionamento do Lastro

No dimensionamento do lastro são necessários alguns valores que são obtidos experimentalmente através de estudos de campo. Como não é o objetivo deste trabalho realizar este tipo de análise, foram admitidos valores de acordo com a revisão bibliográfica, sendo os seguintes dados considerados no dimensionamento:

- CBR do sublastro: 18%; (de acordo com Silva (2019));
- CBR do subleito: 8%; (de acordo com Silva (2019));
- Faixa de socaria (c): 80 cm;
- Coeficiente de segurança para resistência do sublastro: 5,5;
- Classe de projeto: III.

Na Figura 12 é possível observar o que é a faixa de socaria e qual o intervalo de valores que essa incógnita pode assumir.



Fonte: ALVES (2018)

Para o cálculo da altura do lastro e do sublastro, foi empregado as fórmulas e conceitos desenvolvidos por Talbot (1920), presente na obra de Brina (1979).

- Cálculo da tensão média na face inferior, em  $\text{kgf/cm}^2$

$$\sigma_0 = \frac{P}{b \times c} = \frac{5605,68}{24 \times 80} = 2,92 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad (\text{XIII})$$

Em que:

P – Carga a ser considerada sobre o dormente, em  $\text{kgf}$  (calculado no item 3.3)

c – Largura da faixa de socaria, em  $\text{cm}$

b – Largura do dormente, em  $\text{cm}$  (adotado no item 3.2)

- Cálculo da tensão na base do lastro, em  $\text{kgf/cm}^2$

$$\sigma = \frac{70 \times CBR_{\text{sublastro}}}{100} = \frac{70 \times 18}{100} = 12,6 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad (\text{XIV})$$

Em que:

$CBR_{\text{sublastro}}$  - CBR do sublastro, em %

- Cálculo da tensão admissível na base do lastro, em kgf/cm<sup>2</sup>

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma}{n} = \frac{12,6}{5,5} = 2,2909 \frac{kgf}{cm^2} \quad (XV)$$

Sendo:

$\sigma$  – Tensão na base do lastro, em kgf/cm<sup>2</sup>

$n$  – Coeficiente de segurança para resistência do sublastro

- Cálculo da altura do lastro

$$h = \left( \frac{53,87 \times \sigma_0}{\sigma_{adm}} \right)^{\frac{4}{5}} = \left( \frac{53,87 \times 2,92}{2,2909} \right)^{\frac{4}{5}} \cong 30 \text{ cm} \quad (XVI)$$

Sendo:

$\sigma_0$  – Tensão média na face inferior, em kgf/cm<sup>2</sup>

$\sigma_{adm}$  – Tensão admissível na base do lastro, em kgf/cm<sup>2</sup>

Segundo o ISF 212 do DNIT (2016), a altura mínima para lastro de Classe III é de 25 cm. Portanto, a altura calculada respeita o mínimo recomendado de acordo com a classe de projeto escolhida.

#### 4.5 Dimensionamento do Sublastro

Além dos dados já utilizados, para o dimensionamento do sublastro é preciso conhecer o número de ciclos ou repetições de eixos, mostrado na Figura 13, que é dado através da classe de projeto, e que, nesse projeto foi definida como classe III.

Figura 13 - Número de ciclos dos eixos

Classe	Grupo	N (número de ciclos)
I	1	$2,2 \times 10^6$
II	2 e 3	$1,6 \times 10^6$
III	4, 5 e 6	$1,0 \times 10^6$
Extra	7, 8 e 9	$0,6 \times 10^6$

Fonte: ALVES (2018)

- Cálculo do módulo de elasticidade do solo

$$E_d = 100 \times CBR_{subleito} = 100 \times 8 = 800 \quad (XVII)$$

Em que:

$CBR_{subleito}$  – CBR do subleito, em %

- Cálculo da tensão na base do sublastro, em kgf/cm<sup>2</sup>

$$\sigma_{adm} = \frac{0,006 \times E_d}{1 + 0,7 \times \log N} = \frac{0,006 \times 800}{1 + 0,7 \times \log 10^6} = 0,923 \frac{kgf}{cm^2} \quad (XVIII)$$

Sendo:

$E_d$  – Módulo de elasticidade do solo

$N$  – Número de ciclos para a classe de projeto III

- Cálculo da tensão média na face inferior, em kgf/cm<sup>2</sup>

$$\sigma_0 = \frac{P}{c \times b} = \frac{5605,68}{80 \times 24} = 2,92 \frac{kgf}{cm^2} \quad (XIX)$$

Em que:

$P$  – Carga a ser considerada sobre o dormente, em kgf

$c$  – Largura da faixa de socaria, em cm (adotado no item 3.4)

$b$  – Largura do dormente, em cm (adotado no item 3.2)

- Altura total de lastro e sublastro

$$h_{total} = \left( \frac{53,87 \times \sigma_0}{\sigma_{adm}} \right)^{\frac{4}{5}} \cong 60,97 \text{ cm} \quad (XX)$$

- Altura do sublastro

$$h_{sublastro} = h_{total} - h_{lastro} = 60,97 - 30 \cong 31 \text{ cm} \quad (XXI)$$

## 5. MATERIAIS DA MISTURA ASFÁLTICA

O material considerado para o lastro foi o basalto e para o sublastro e o subleito, solo laterítico, que é o tipo de solo predominante na região. Além disso, foram comparados dois tipos de asfaltos diferentes de acordo com material utilizado por Santana (2019), tendo suas espessuras e peso específicos variados.

De acordo com Santana (2019), o CAP 50/70 trata-se de um ligante convencional produzido pela refinaria Landulpho Alves – RLAM (São Francisco do Conde - BA). Já o AMP 65/70, um ligante modificado por polímero elastomérico (SBS) foi fabricado pela empresa Greca Asfaltos. As Figuras 14 e 15 mostram as especificações do CAP 50/70 e do AMP 65/70, respectivamente.

Figura 14 - CAP 50/70

Característica	Método	Resultado
Penetração	D 5	53
Ponto de amolecimento - °C	D 36	53,0
Viscosidade Brookfield, a 135°C - cP	D 4402	434
Viscosidade Brookfield, a 150°C - cP	D 4402	222
Viscosidade Brookfield, a 177°C - cP	D 4402	96
Ductibilidade a 25°C - cm	D 113	84
Ponto de fulgor - °C	D 92	350
Densidade relativa a 20°C	D 70	0,997

Fonte: SANTANA, 2019

Figura 15 - AMP 65/90

Característica	Método	Resultado
Penetração a 25°C, 100g, 5s, 0,1mm	NBR 6576	45
Ponto de amolecimento - °C	NBR 6560	81,5
Viscosidade Brookfield, a 135°C - cP	NBR 15184	1883
Viscosidade Brookfield, a 155°C - cP	NBR 15184	566
Viscosidade Brookfield, a 175°C - cP	NBR 15184	220
Ductibilidade a 25°C - cm	NBR 15086	93,3
Ponto de fulgor - °C	NBR 11341	338
Densidade relativa a 25°C	NBR 6296	1,006

Fonte: SANTANA, 2019

Os agregados utilizados para a produção das misturas asfálticas foram pó de pedra, brita 0 e 1, oriundas de rocha basáltica, provenientes da cidade de Uberlândia – MG. Optou-se pela utilização de uma mistura de agregados que se enquadrasse no Centro da Faixa C do DNIT (2006) que é amplamente utilizada nas obras de pavimentação rodoviária brasileiras. Na Figura 16 estão representados os valores da composição granulométrica e a densidade aparente ( $G_{sb,od}$ ) da mistura. (SANTANA, 2019)

Figura 16 - Composição granulométrica da mistura

Peneira Nº	% Retida / Peneira	$G_{sb,od}$	Absorção %
1/2"	10,00	2,846	1,3
3/8"	10,00	2,842	1,3
1/4"	14,82	2,817	1,3
Nº 4	7,18	2,804	1,3
Nº 8 - Nº 200	52,00	2,846	1,2
Fundo	6,00	2,846	1,2
Mistura de agregados		2,838	1,2

Fonte: SANTANA (2019)

## 6. APLICAÇÃO DO KENTRACK

A partir do dimensionamento prévio, foi realizada a análise no *Kentrack* com o objetivo de se comparar uma superestrutura granular com uma superestrutura combinada, além de definir a solução mais otimizada possível para a camada de asfalto, analisando a influência de parâmetros, tais como a espessura da camada, o teor de ligante na mistura e o tipo de ligante, na tensão de compressão das camadas de lastro, sublastro e subleito como também na tensão de tração no asfalto.

### 6.1 Espessura da camada de asfalto

A espessura da camada de asfalto foi variada entre 125 mm e 200 mm para os dois tipos de ligantes, mantendo um teor de betume de 4%. Os resultados estão apresentados nas Figuras 17 a 20 e nas Tabelas 4 a 7, sendo que as tabelas 5 e 7 mostram a variação percentual, de aumento

ou diminuição da tensão em cada camada, relativa à espessura anterior e também a variação total do intervalo.

Tabela 4 - Variação das tensões ao alterar a espessura para o AMP 65/90

Espessura (mm)	Camada	tensão de compressão (Mpa)	tensão de tração (Mpa)
125	lastro	-0,27088	-
	asfalto	-	5,96E-05
	sublastro	-0,064919	-
	subleito	-0,038204	-
145	lastro	-0,23119446	-
	asfalto	-	5,90E-05
	sublastro	-0,0600287	-
	subleito	-0,036529	-
165	lastro	-0,209719	-
	asfalto	-	5,58E-05
	sublastro	-0,053652	-
	subleito	-0,03438	-
185	lastro	-0,3210577	-
	asfalto	-	5,38E-05
	sublastro	-0,048874	-
	subleito	-0,032669	-
200	lastro	-0,321228	-
	asfalto	-	5,22E-05
	sublastro	-0,045757	-
	subleito	-0,0314337	-

Fonte: Autor(2019)

Figura 17 - Variação da tensão de compressão ao alterar a espessura para o AMP 65/90

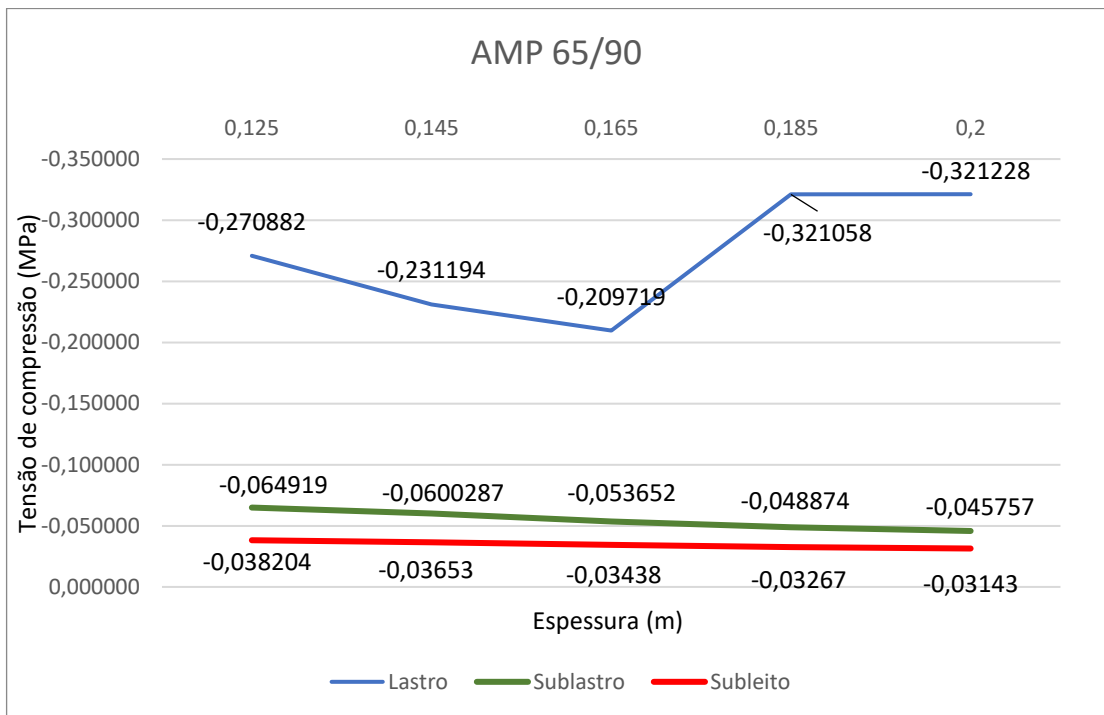


Figura 18 - Variação de tensão de tração ao alterar a espessura para o AMP 65/90

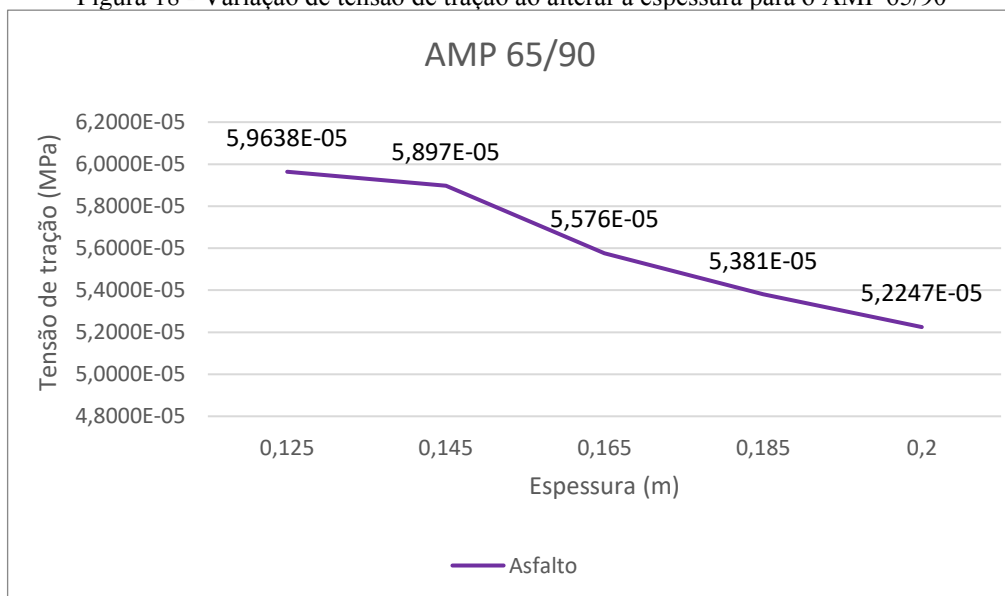




Tabela 5 - Variação percentual das tensões para o AMP 65/90

AMP 65/90				
	Variação da tensão (%)			
espessura (m)	Lastro	Sublastro	Subleito	Asfalto
0,125	0,00	0,00	0,00	0,00
0,145	-17,17	-8,15	-4,59	-1,14
0,165	-10,24	-11,89	-6,25	-5,75
0,185	34,68	-9,78	-5,24	-3,63
0,200	0,05	-6,81	-3,93	-2,99
Total	15,67	-41,88	-21,54	-14,15

Fonte: Autor (2019)

É possível notar, a partir dos resultados obtidos, que a camada granular de lastro apresenta um comportamento peculiar no qual as tensões de compressão diminuem até a camada de asfalto atingir 165 mm e, após esse valor, elas crescem consideravelmente, com um aumento de 34,68% para a espessura de 185 mm. Já as camadas de sublastro e subleito, como esperado, têm suas tensões de compressão abrandadas com o aumento da camada de asfalto, pois esta absorve de maneira efetiva os esforços. Observa-se que essas camadas possuem as maiores variações, principalmente o sublastro, camada localizada imediatamente abaixo do asfalto, com uma diminuição de 41,88% após o aumento do layer betuminoso. Por fim, a própria camada de asfalto também apresenta diminuição expressiva, de 14,15%, das tensões de tração atuantes nela com o aumento de sua espessura, o que também era esperado uma vez que espessuras maiores tendem a suportar mais esforços.

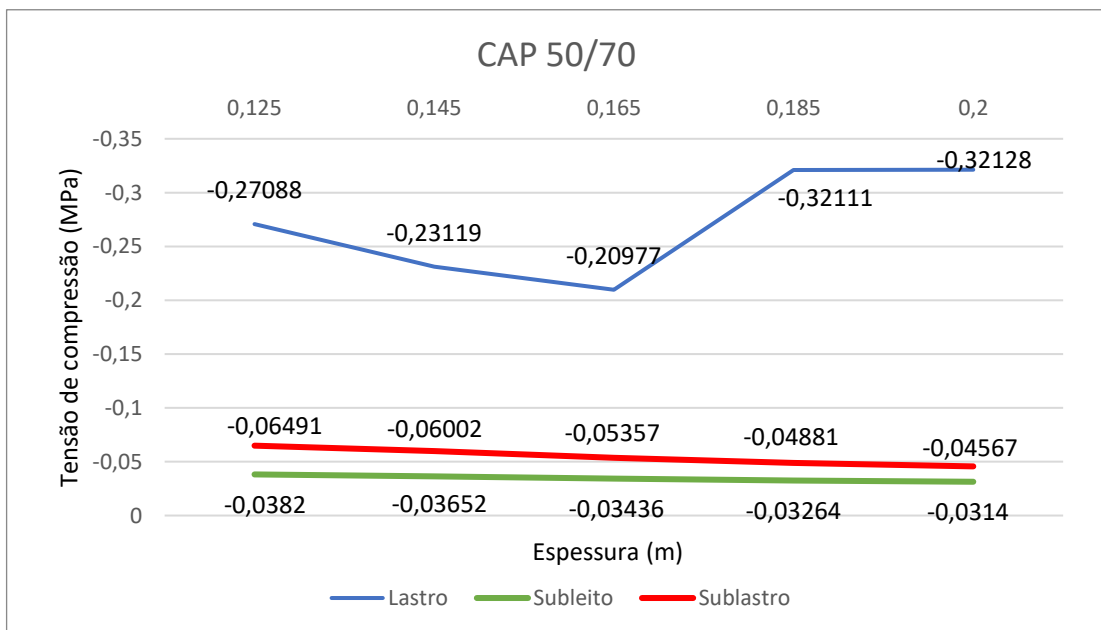
Tabela 6 - Variação da tensão de compressão ao alterar a espessura para o CAP 50/70

Espessura (mm)	Camada	tensão de compressão (Mpa)	tensão de tração (Mpa)
125	lastro	-0,27088	-
	asfalto	-	5,96E-05
	sublastro	-0,064919	-
	subleito	-0,038203	-

145	lastro	-0,23119	-
	asfalto	-	5,90E-05
	sublastro	-0,06002	-
	subleito	-0,03652	-
165	lastro	-0,20977	-
	asfalto	-	5,56E-05
	sublastro	-0,05357	-
	subleito	-0,03436	-
185	lastro	-0,321108	-
	asfalto	-	5,37E-05
	sublastro	-0,04881	-
	subleito	-0,03264	-
200	lastro	-0,32128	-
	asfalto	-	5,21E-05
	sublastro	-0,04567	-
	subleito	-0,031404	-

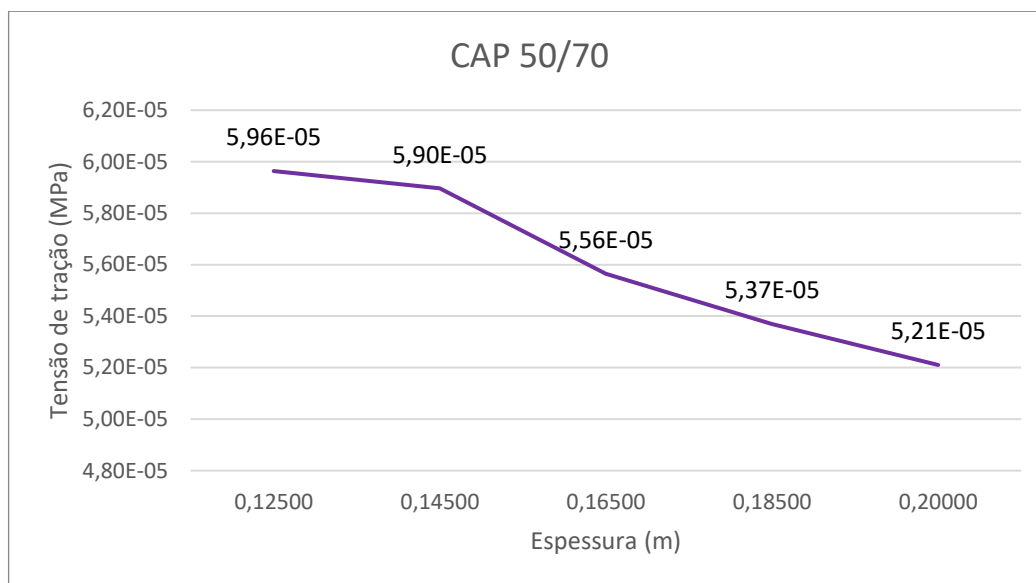
Fonte: Autor (2019)

Figura 19 - Variação da tensão de compressão ao alterar a espessura para o CAP 50/70



Fonte: Autor (2019)

Figura 20 - Variação da tensão de tração ao alterar a espessura para o CAP 50/70



Fonte: Autor (2019)

Tabela 7 – Variação percentual das tensões para o CAP 50/70

CAP 50/70				
espessura (m)	Variação da tensão (%)			
	Lastro	Sublastro	Subleito	Asfalto
0,125	0,00	0,00	0,00	0,00
0,145	-17,17	-8,15	-4,61	-1,15
0,165	-10,21	-12,04	-6,29	-5,97
0,185	34,67	-9,75	-5,27	-3,63
0,200	0,05	-6,88	-3,94	-3,05
Total	15,69	-42,13	-21,65	-14,46

Fonte: Autor (2019)

O CAP 50/70 apresenta valores e comportamento semelhantes ao AMP 65/90, assim, a camada granular de lastro apresenta o mesmo comportamento no qual as tensões de compressão diminuem até a camada de asfalto atingir 165 mm e, após esse valor, crescem consideravelmente, com um aumento de 34,67% para a espessura de 185 mm. Já as camadas de sublastro, subleito e asfalto, novamente têm suas tensões reduzidas com o aumento da camada de asfalto. Também se observa que o subleito e o sublastro têm uma variação mais expressiva, de 21,65% e 41,88%, respectivamente, após o aumento do layer betuminoso.

Porém, é interessante notar que as tensões na camada de asfalto, sublastro e subleito, são relativamente menores no asfalto com CAP 50/70 do que com AMP 65/90. Esse comportamento está ligado à viscosidade do material, sendo maior no AMP 65/90 o que não é ideal para localidades com temperaturas elevadas como os estados de Mato Grosso, Goiás e Minas Gerais.

Além disso, a partir dos dados e dos gráficos, nota-se que a espessura ótima para o asfalto é de 165 mm uma vez que após essa espessura o lastro tem sua tensão aumentada. Como o asfalto promove uma atenuação de tensão nas camadas granulares, isso permite que essas camadas sejam dimensionadas com espessuras menores. No entanto, deve-se verificar a viabilidade econômica quanto à utilização e espessura do asfalto uma vez que este material é caro em relação aos materiais utilizados nas outras camadas.

## 6.2 Teor de ligante na mistura

A análise de influência da quantidade de betume na tensão de compressão das camadas da ferrovia foi feita considerando uma espessura constante de 165 mm para a camada de asfalto e variando o teor de ligante entre 4 e 6%. Os resultados encontrados estão expressos nas Tabelas 8 e 9 e nas Figuras 21 a 24.

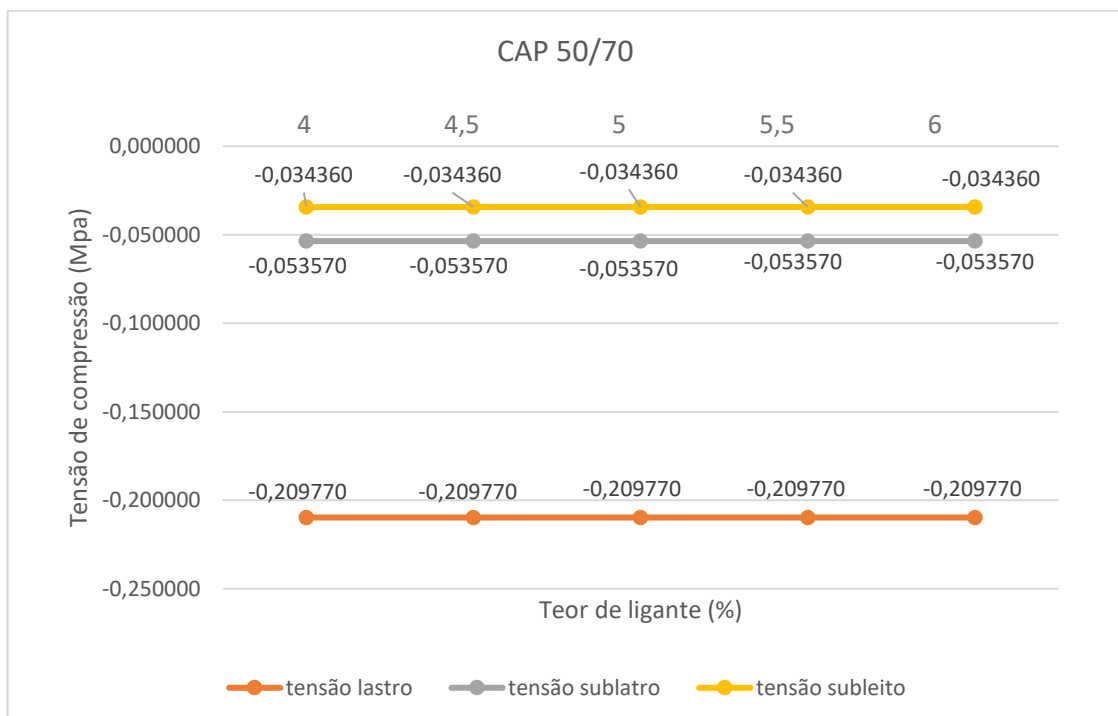
Tabela 8 - Variação das tensões ao alterar a porcentagem de ligante para o CAP 50/70

CAP 50/70			
teor (%)	camada	tensão de compressão (Mpa)	tensão de tração (Mpa)
4	lastro	-0,20977	-
	asfalto	-	5,546E-05
	sublastro	-0,053570	-
	subleito	-0,03436	-
4,5	lastro	-0,20977	-
	asfalto	-	5,564E-05
	sublastro	-0,053570	-
	subleito	-0,03436	-

5	lastro	-0,20977	-
	asfalto	-	5,564E-05
	sublastro	-0,053570	-
	subleito	-0,034360	-
5,5	lastro	-0,20977	-
	asfalto	-	5,564E-05
	sublastro	-0,053570	-
	subleito	-0,034360	-
6	lastro	-0,20977	-
	asfalto	-	5,564E-05
	sublastro	-0,053570	-
	subleito	-0,034360	-

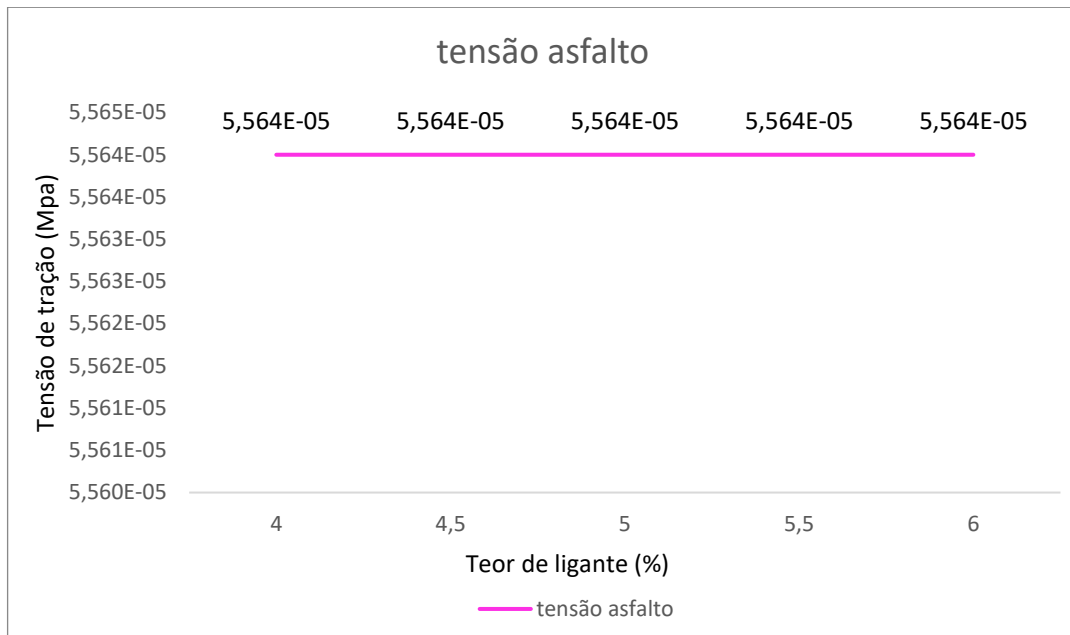
Fonte: Autor (2019)

Figura 21 - Variação da tensão de compressão ao alterar o teor de ligante do CAP 50/70



Fonte: Autor (2019)

Figura 22 - Variação de tensão de tração ao alterar o teor de ligante do CAP 50/70



Fonte: Autor (2019)

Nota-se, a partir da análise feita pelo programa que, para o CAP 50/70, o teor de ligante não causa alterações nas tensões de compressão das camadas granulares e nem na tensão de tração do asfalto.

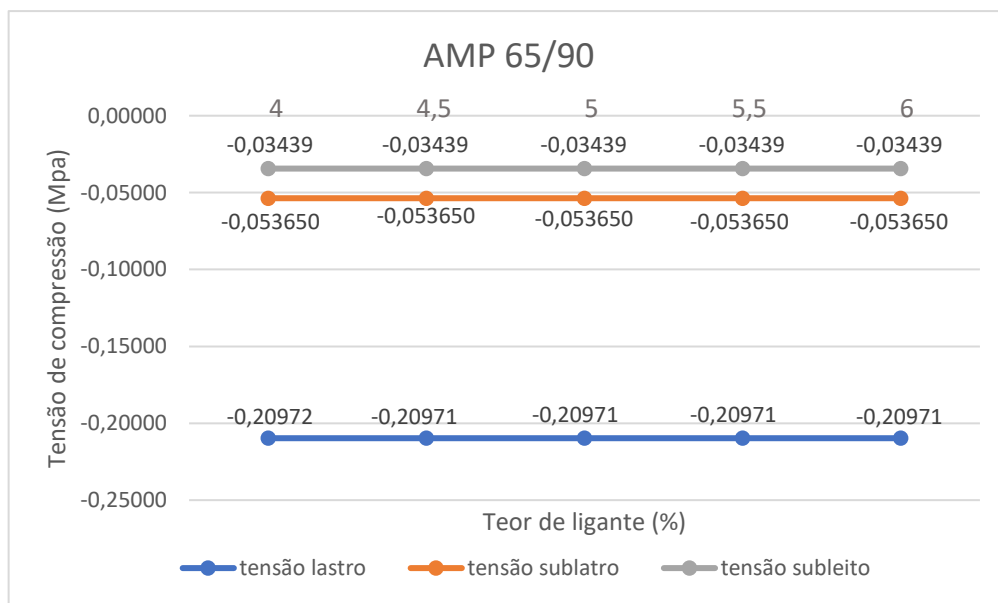
Tabela 9 - Variação das tensões ao alterar o teor de ligante do AMP 65/90

AMP 65/90			
Teor (%)	Camada	Tensão de compressão (Mpa)	Tensão de tração (Mpa)
4	lastro	-0,20032	-
	asfalto	-	7,803E-05
	sublastro	-0,067384	-
	subleito	-0,038176	-
4,5	lastro	-0,20032	-
	asfalto	-	7,80E-05
	sublastro	-0,067384	-
	subleito	-0,0381756	-
5	lastro	-0,20032	-
	asfalto	-	7,80E-05
	sublastro	-0,067384	-
	subleito	-0,038176	-

5,5	lastro	-0,20032	-
	asfalto	-	7,80E-05
	sublastro	-0,067384	-
	subleito	-0,038176	-
6	lastro	-0,20032	-
	asfalto	-	7,80E-05
	sublastro	-0,067384	-
	subleito	-0,038176	-

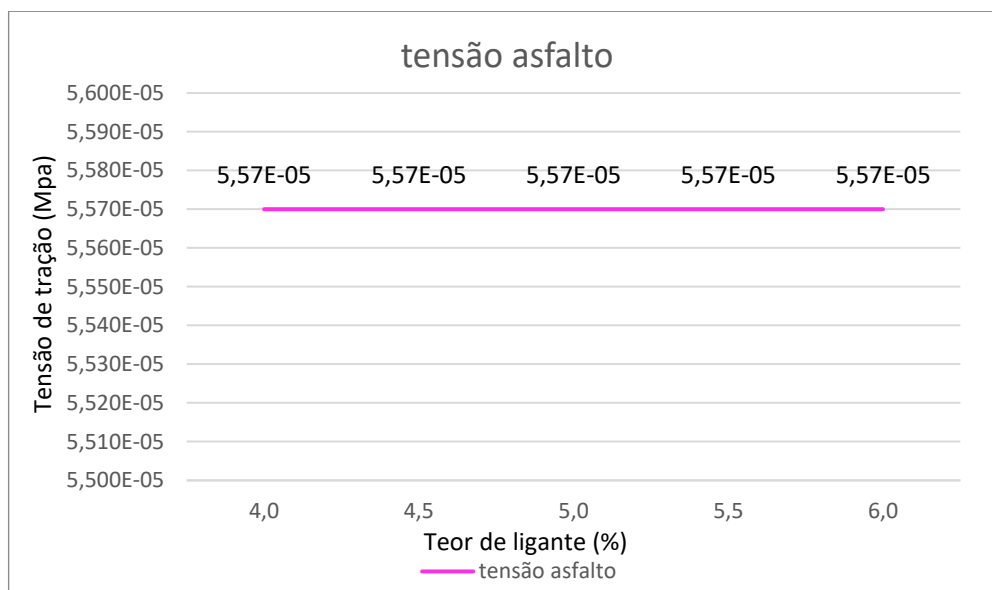
Fonte: Autor (2019)

Figura 23 - Variação da tensão de compressão ao alterar o teor de ligante do AMP 65/90



Fonte: Autor (2019)

Figura 24 - Variação da tensão de tração ao alterar o teor de ligante do AMP 65/90



Fonte: Autor (2019)

No asfalto com AMP 65/90, as tensões também não apresentaram nenhuma mudança em todas as camadas. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que o teor de ligante afeta uma estrutura tornando-a mais ou menos elástica, assim, em uma rodovia que recebe diretamente a carga das rodas dos veículos e está localizada em local de clima quente, o ideal é que o teor de ligante seja mais baixo, pois quanto mais ligante, mais elástica é a mistura, o que nesse caso a torna mais suscetível a deformações permanentes. Já para uma rodovia localizada em uma região de baixas temperaturas, o ideal é um teor de ligante mais alto, pois as baixas temperaturas aliadas à rigidez e propriedades do asfalto, tornam-no suscetível à trincamento devido à fadiga.

Assim, como em uma ferrovia o asfalto não recebe diretamente as cargas do vagão, estando localizado abaixo de uma camada de 30 cm de lastro britado, a elasticidade da mistura não interfere na forma que ele trabalha dentro da estrutura.

Dessa forma, em vista dos resultados apresentados, o melhor tipo de ligante a ser utilizado é o de teor 4% já que ao aumentar esse teor não ocorrem mudanças significativas nas tensões e quanto menor o teor de ligante menor o custo da mistura asfáltica.



### 6.3 Comparação entre superestrutura combinada e superestrutura granular

A comparação entre os tipos de superestrutura foi feita considerando os mesmos parâmetros para as camadas granulares e fixando a espessura da camada de asfalto em 165 mm. Os resultados fornecidos pelo programa estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Comparação entre superestrutura granular e combinada

Tipo de superestrutura	Camada	tensão de compressão (Mpa)
Granular	lastro	-0,38757
	sublastro	-0,13125
	subleito	-0,05203
Combinada com CAP 50/70	lastro	-0,20977
	sublastro	-0,05357
	subleito	-0,03436
Combinada com AMP 65/90	lastro	-0,209719
	sublastro	-0,053652
	subleito	-0,03438

Fonte: Autor (2019)

A partir dos dados obtidos é possível observar uma diminuição significativa de tensão em todas as camadas de uma estrutura combinada em comparação com a estrutura granular. Ao comparar a estrutura combinada com CAP 50/70 com a estrutura granular, há uma diminuição de 84,76% na tensão do lastro, 145% na tensão do sublastro e 51,42% na tensão do subleito, o que reafirma o fato de que uma camada de asfalto promove uma expressiva melhoria de desempenho em uma ferrovia.

## 7.0 CONCLUSÃO

Pode-se observar, com as análises feitas através do *Kentrack* que a superestrutura combinada é uma alternativa válida, principalmente no cenário brasileiro, já que o país possui uma grande extensão com diversidade de solos e necessidade de vagões com grande capacidade devido ao expressivo volume de carga. Portanto, o uso de uma camada de asfalto é interessante e viável em locais que o solo de suporte da estrutura ferroviária possui capacidade de suporte reduzida. Os dados obtidos ao variar a espessura da camada de asfalto mostram que o aumento da espessura causa redução significativa nas tensões das camadas. No entanto, o asfalto é um material que possui um custo elevado, por isso é necessário haver um equilíbrio entre a espessura e a diminuição de tensão pretendida. Como houve um aumento de tensão no lastro a partir da espessura de 165mm, é possível concluir que a espessura ideal da camada de asfalto para a linha ferroviária em questão é de 165 mm.

Além disso, as análises referentes às propriedades do asfalto como tipo e teor de ligante demonstram que o CAP 50/70 é mais apropriado por possuir uma viscosidade menor o que garante uma melhor adaptação ao clima do local, produzindo tensões menores nas camadas adjacentes.

Por fim, o teor de ligante não influencia no trabalho da estrutura ferroviária já que em uma ferrovia, o asfalto não recebe diretamente as cargas, estando abaixo de uma camada de lastro. Portanto, o ideal é um teor de 4%, pois teores maiores tendem a encarecer a mistura asfáltica.

## REFERÊNCIAS

- ALL, RUMO. **Programa de exploração ferroviária (PEF) parecer técnico - modernização de via permanente corredor rondonópolis - santos**. Curitiba, 2016
- ALVES, L.C.S. **Infraestrutura de Ferrovias** (Notas de Aula) Uberlândia, UFU, 2015.
- BNDS. **As ferrovias no transporte de carga brasileiro**. 2018. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/ferrovias>. Acesso em: 17 jun. 2019
- BRINA, H.L. **Estradas de ferro**, v.1. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.
- BURMISTER, D.M., (1943) **The Theory of Stresses and Displacements in Layered System and Applications to the Design of Airport Runways**. In: 1943 twenty-third annual meeting of the highway research board held, 23., 1943, Illinois. **Anais...** Illinois: Edgewater Beach Hotel.1943
- CAVALCANTI, FLÁVIO R. **Locomotiva Dash 9-44C**. 2015. Disponível em: <<http://vfco.brazilia.jor.br/diesel/ALL/locomotivas-C44-9W-Dash-9-44C-ALL-planta.shtml>>. Acesso em: 10 set. 2019
- COIMBRA, Marcelo do Vale. **Modos de falha dos componentes da via permanente ferroviária e seus efeitos no meio ambiente**. 2008. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.
- COMERCIO, PREMA TECNOLOGIA E. **Dormentes em madeira tradada**. Disponível em: <<http://www.prema.com.br/dormentes/>>. Acesso em: 02 nov. 2019.
- DNIT (2013). **Dormentes de madeira – Requisitos e métodos** Publicação PIM – 14. Ministério dos transportes. Departamento nacional de infraestrutura de transportes, Diretoria de infraestrutura ferroviária.
- DNIT (2015). **Projeto de superestrutura da via permanente – lastro e sublastro**. Publicação ISF – 212. Ministério dos transportes. Departamento nacional de infraestrutura de transportes, Diretoria de infraestrutura ferroviária.
- DNIT (2015). **Projeto de superestrutura da via permanente – trilhos e dormentes**. Publicação ISF – 213. Ministério dos transportes. Departamento nacional de infraestrutura de transportes, Diretoria de infraestrutura ferroviária.
- DNIT (2015). **Trilho para linha férrea**. Publicação PIM – 01. Ministério dos transportes. Departamento nacional de infraestrutura de transportes, Diretoria de infraestrutura ferroviária.
- GARCIA, C.; MIRANDA, L.; TUPINAMBÁ, S. **Ferrovia do cerrado: Trecho Alto Araguaia – Uberlândia**. 2019. 41 slides.

HAN, Humphrey Chishao. **Application of layered system analysis to the design of flexible pavements**. 1973. 99 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Lehigh University, Bethlehem, 1973.

KLINCEVICIUS, Mary Gisele. **Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários**. 2011. 28 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Cap. 2.

KUESTER, JEAN C. **Planta do vagão hopper fechado HFS Imcopa / ferrovia ALL - América Latina Logística: desenho, medidas e características**. Disponível em: <http://vfco.brazilia.jor.br/vag/vagALL/hfs.shtml> . Acesso em: 10 set. 2019

LIU, SHUSHU. **Kentrack 4.0: A railway trackbed structural design program**. 2013. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, University Of Kentucky, Kentucky, 2013.

LOTTI, RAQUEL S. et al. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial**, [s.l.], v. 11, n. 2, p.35-43, abr. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-54192006000200006>.

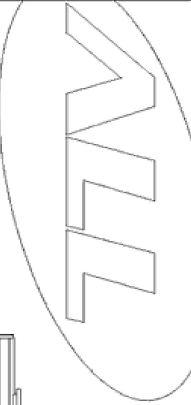
SILVA, Lucas Pereira. **Dimensionamento de ferrovia - Análise paramétrica do comportamento mecânico de um pavimento ferroviário**. 2019. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

MIRANDA, L.; TREVISOL, F. **Demanda de Transporte Ferroviário no Trecho Cuiabá-Rondonópolis/ MT**. 2014. Disponível em: <http://www.periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/1600/1234>. Acesso em: 17 jun. 2019

SANTANA, Andher Paulo Capanema. **Aplicação do ensaio ideal-ct para avaliação da resistência à fadiga de misturas asfálticas densas com CAP convencional e modificado por polímero**. 2019. 14 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

SCREMIN.A. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos** (Notas de aula) Curitiba, UFPR, 2017.

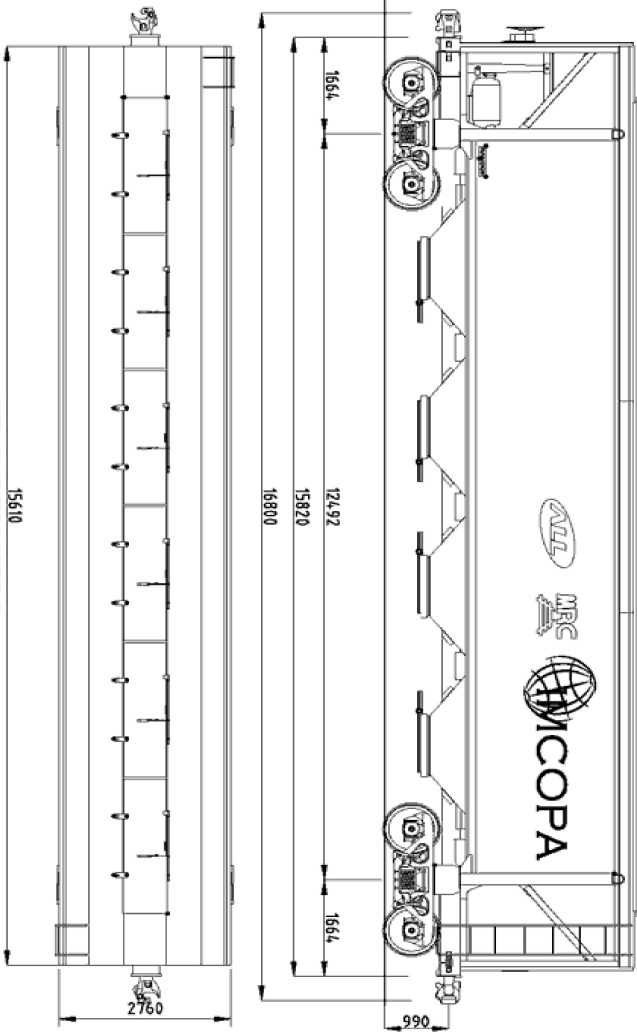
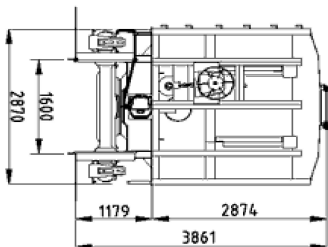
ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DO VAGÃO HOOPER HFS



**CARACTERÍSTICAS DE VAGÕES**

**HOPPER**

**HFS 01**

**DADOS GERAIS**

SÉRIE \_\_\_\_\_ HFS  
 NÚMERO \_\_\_\_\_ VER NO VERSO  
 QUANT. \_\_\_\_\_ 130  
 TIPO \_\_\_\_\_ HOPPER FECHADO  
 FABRICANTE \_\_\_\_\_ RANDON  
 ANO DE FABRICAÇÃO \_\_\_\_\_ 2005  
 DATA ENTREGA/SERV. \_\_\_\_\_ 2005  
 PESO BRUTO MÁX. \_\_\_\_\_ 100000 KG  
 TARA \_\_\_\_\_ 23000 KG  
 LOTAÇÃO LÍMITE \_\_\_\_\_ 77000 KG  
 LOTAÇÃO NOMINAL \_\_\_\_\_ 77000 KG  
 CAPACIDADE VOLUMÉTRICA \_\_\_\_\_ 100m<sup>3</sup>

**DADOS TÉCNICOS**

CAIXA \_\_\_\_\_ ESTRUTURA DE AÇO  
 ESTRADO \_\_\_\_\_ METÁLICO  
 ENGATE \_\_\_\_\_ ROTATIVA  
 OPERAÇÃO \_\_\_\_\_ E (600CE)  
 AP. CH. TR. \_\_\_\_\_ Y40 AAR M-21E  
 BRAC/DEPERA \_\_\_\_\_ DB40 /ABDX  
 VALVULA \_\_\_\_\_ 10" X12"  
 Ø CL. X CURSO \_\_\_\_\_  
 FREIO \_\_\_\_\_ "NON-SPIN"  
 AJUST. AUT. FOLGA \_\_\_\_\_ "SAB" DRV-2AU-19-DJ  
 DISP. VÁCUO CARRIÓ \_\_\_\_\_ NÃO TEM  
 SAPATA \_\_\_\_\_ COMPOSIÇÃO NÃO METÁLICA

TRUQUE \_\_\_\_\_ TIPO \_\_\_\_\_ RIDE CONTROL-MAXION  
 BASE RÍGIDA \_\_\_\_\_ 1,772mm (5" x 8")  
 EIXO \_\_\_\_\_ PANÇA \_\_\_\_\_ 6" x 11"  
 DIST. CAD \_\_\_\_\_  
 RODAS \_\_\_\_\_  
 MANEJAS \_\_\_\_\_  
 FRIÇÃO \_\_\_\_\_  
 CAPTURO C/ ADAPT. LARGO \_\_\_\_\_  
 ADAPT. ESTREITO \_\_\_\_\_  
 CAIXA DE ROLAMENTO \_\_\_\_\_

**DIAGRAMA :**

DES. Nº \_\_\_\_\_ HFS 01  
 ESCALA \_\_\_\_\_ 1:100  
 DATA \_\_\_\_\_ 20 OUT 07  
 OBSERVAÇÕES \_\_\_\_\_

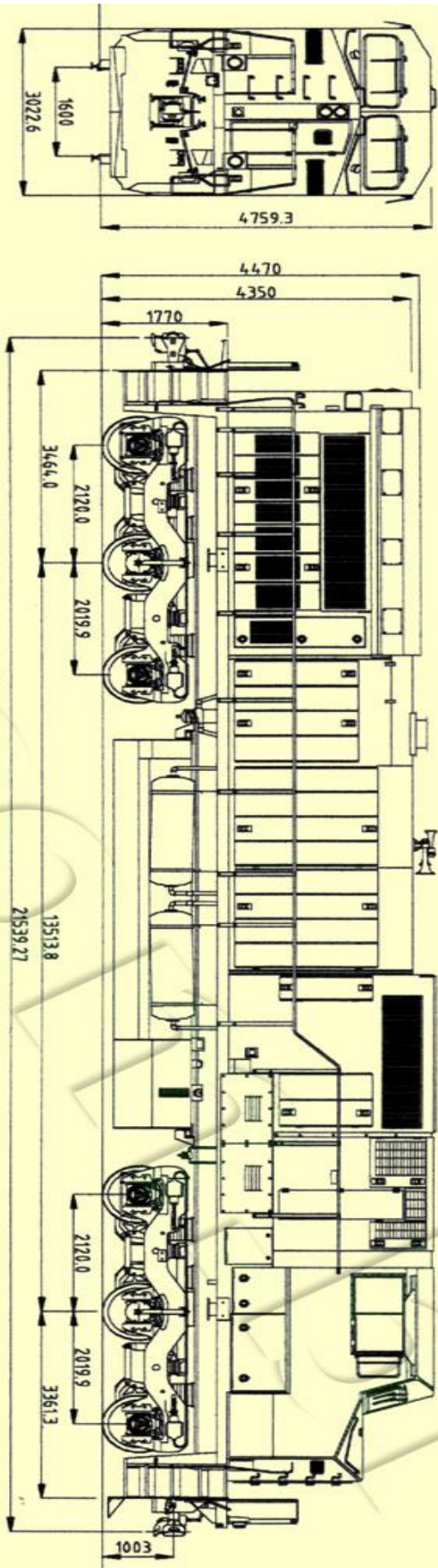


ANEXO B – CARACTERÍSTICAS DA LOCOMOTIVA DASH C44-9W

CARACTERÍSTICAS DE LOCOMOTIVAS

C44-9W

33



**DADOS GERAIS** GE (USA)

FABRICANTE: \_\_\_\_\_

ANO DE FABRICAÇÃO: \_\_\_\_\_

ANO DO NÍCIO DE TRAFEGO: \_\_\_\_\_

QUANTIDADE DE LOCOMOTIVAS: 27

NUMERAÇÃO DA: 9024, 9025, 9026, 9027, 9028, 9029, 9030, 9031, 9032, 9033, 9034, 9035, 9037, 9038, 9039, 9040, 9041, 9042, 9043, 9044, 9045, 9046, 9047, 9048, 9049, 9050

MODELO: C44-9W

POTÊNCIA BRUTA: 4400 hp

POTÊNCIA DISPONÍVEL P/TRACÇÃO: 4000 hp

PESO TOTAL (MÁSTECADA): 176.661 kg

PESO POR EIXO (MÁSTECADA): 29.10.156 kg

ESFORÇO DE TRACÇÃO MÁX.: 50.315 kNf

ESFORÇO DE TRACÇÃO CONTÍNUO: 32.400 kNf

VELOCIDADE MÁXIMA: 112 km/h

VELOCIDADE MÍNIMA: \_\_\_\_\_

TPO DE EQUIPAMENTO DE FREIO: \_\_\_\_\_

FREIO DINÂMICO | ESFORÇO MÁX. I: 35.204 kNf a 33.5 km/h

RAIO MÍNIMO DE INSCRIÇÃO: \_\_\_\_\_

TPO DE TRANSCRIÇÃO: \_\_\_\_\_

DIESEL ELÉTRICA

CAPACIDADE TANQUE DE ÓLEO DIESEL: 18.925 L

CAPACIDADE ÓLEO LUBRIFICANTE DO CARTER: \_\_\_\_\_

CAPACIDADE CIRCUITO ÁGUA REFRIGERAÇÃO: \_\_\_\_\_

ENGAITES: \_\_\_\_\_

TIPO "C"

APARELHO DE CHOQUE E TRACÇÃO: MS-285-7A

**DADOS DOS TRUQUES** GE (USA)

TPO: GE (FUNDO) CLASSE: (6660) C-C

AJUSTADOR AUTOM. FOLGA: F-40

TPO DE RODAS: F-40

MANGA DOS EIXOS: DIÁMETRO: 1016mm (40 pol)

TPO DE MANCAIS: \_\_\_\_\_

RELAÇÃO DE ENGRANAGENS: 83:28

CAPACIDADE ABERROS: SAPATAS: \_\_\_\_\_

CLINDROS DE FREIO: FENOLICA

**DADOS DO MOTOR DIESEL** GE (USA)

FABRICANTE: \_\_\_\_\_

Nº DE CATÁLOGO: \_\_\_\_\_

MODELO: 7FDL

Nº DE CLINDROS: 16

DISPOSIÇÃO DOS CLINDROS: 45° - "V"

DIÁMETRO DOS CLINDROS: \_\_\_\_\_

CURSO DOS ÊMBOLOS: \_\_\_\_\_

REGIME MÁXIMO: \_\_\_\_\_

MARCA EN VAZO: \_\_\_\_\_

POTÊNCIA MÁXIMA: \_\_\_\_\_

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO: \_\_\_\_\_

SOBREALIMENTAÇÃO: \_\_\_\_\_

REFRIGERAÇÃO: \_\_\_\_\_

MECÃO: \_\_\_\_\_

**DADOS DO MOTOR DE TRACÇÃO** GE (USA)

FABRICANTE: \_\_\_\_\_

Nº DE CATÁLOGO: \_\_\_\_\_

MODELO: SGE752AH

TPO: C.C.

INTENSIDADE MÁXIMA / Sinal: \_\_\_\_\_

CONTÍNUA: \_\_\_\_\_

QUANTIDADE POR LOCOMOTIVA: 6

**DADOS DO COMPRESSOR**

FABRICANTE: \_\_\_\_\_

Nº DE CATÁLOGO: \_\_\_\_\_

MODELO: \_\_\_\_\_

TPO: \_\_\_\_\_

CAPACIDADE: \_\_\_\_\_

SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO: \_\_\_\_\_

**DADOS DO GERADOR APLICADO** GE (USA)

FABRICANTE: \_\_\_\_\_

Nº DE CATÁLOGO: \_\_\_\_\_

MODELO: \_\_\_\_\_

TENSÃO: \_\_\_\_\_

**DADOS DO GERADOR AUXILIAR**

FABRICANTE: GE (USA)

Nº DE CATÁLOGO: \_\_\_\_\_

MODELO: \_\_\_\_\_

TENSÃO NOMINAL (C.C.): \_\_\_\_\_

POTÊNCIA: \_\_\_\_\_

**DADOS DO TURBO ALIMENTADOR** GE (USA)

FABRICANTE: \_\_\_\_\_

MODELO: 7S1716

**DADOS DO EXCITADOR** GE (USA)

FABRICANTE: \_\_\_\_\_

MODELO: \_\_\_\_\_

TENSÃO: \_\_\_\_\_

CORRENTE: \_\_\_\_\_

DESENHO Nº: C44-9W

DESENHISTA: GODIVHO

ESCALA: 1:100

DATA: 24. AÇO 2006

VISTO: \_\_\_\_\_

REVISÕES: \_\_\_\_\_