



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DIMENSIONAMENTO DE UM PERFIL DE TRILHO PARA MESA DE  
GIRO DE UMA RECUPERADORA TIPO RODA DE CAÇAMBA**

**ÉRIKA CRISTINA DE MELO LOPES  
FELIPE SOARES SILVA**

**Tucuruí – PA  
2019**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DIMENSIONAMENTO DE UM PERFIL DE TRILHO PARA MESA DE GIRO DE  
UMA RECUPERADORA TIPO RODA DE CAÇAMBA**

**ÉRIKA CRISTINA DE MELO LOPES  
FELIPE SOARES SILVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título bacharel em Engenheiro Mecânico.

**Orientador:  
Profº Me. Maciel da Costa Furtado**

**Tucuruí – PA  
2019**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

L864d Lopes, Érika Cristina de Melo  
Dimensionamento de um perfil de trilho para mesa de giro de  
uma recuperadora roda de caçamba / Érika Cristina de Melo Lopes,  
Felipe Soares Silva . — 2019.  
lxxi,71 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Me. Maciel da Costa Furtado  
Coorientador(a): Prof. Me. Walter dos Santos Sousa  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de  
Engenharia Mecânica, Campus Universitário de Tucuruí,  
Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019.

1. Manutenção. 2. Recuperadora de minério. 3.  
Dimensionamento. 4. Trilho. 5. Método dos Elementos  
Finitos. I. Título.

CDD 620

---



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUI  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DIMENSIONAMENTO DE UM PERFIL DE TRILHO PARA MESA DE GIRO DE  
UMA RECUPERADORA TIPO RODA DE CAÇAMBA

ERIKA CRISTINA DE MELO LOPES  
FELIPE SOARES SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de  
Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA

*Maciel da Costa Furtado*

Orientador: Prof<sup>o</sup> Me. Maciel da Costa Furtado  
FEM/CAMTUC/UFPA

*Walter dos Santos Sousa*

Membro Interno: Prof<sup>o</sup> Me. Walter dos Santos Sousa  
FEM/CAMTUC/UFPA

*Ayrton José Taveira de Souza*

Membro Interno: Prof<sup>o</sup> Ayrton José Taveira Souza  
FEM/CAMTUC/UFPA

Conceito *Excelente*

Tucuruí, 10 de Julho de 2019.

*Dedico este trabalho, com todo amor e gratidão,  
a minha avó Luzia Telma (in memoriam),  
que foi a base da minha família.*

## AGRADECIMENTOS

*Érika Cristina de Melo Lopes*

A Deus por minha vida, família e amigos. Por me proporcionar força e sustento todos os dias.

Aos meus pais, pelo amor, dedicação, incentivo e apoio incondicional. Obrigada mãe por tudo que a senhora fez e faz por nós, pela sua batalha para nos proporcionar sempre o melhor, pelo amor e ensinamentos que me transformaram em uma cidadã de boa índole. Obrigada pai, pelo seu apoio e amor durante esses anos.

A minha vó Luzia Telma e minha tia Erika, obrigada pelo apoio e carinho. Vó a senhora sempre foi uma mulher guerreira e batalhadora, obrigada por ser ter sido meu porto seguro. Aos meus irmãos, Bárbara, Rebeca, Maria, Edvaldo e João, por serem irmãos maravilhosos que sempre me incentivam, amo vocês. Obrigada Bárbara, por sempre acreditar em mim, seu apoio, carinho e amor foi essencial para minha formação.

A minha amiga Daniele Rodrigues, que mesmo distante sempre me incentiva e acredita no meu potencial. Tenho orgulho da pessoa que você se tornou.

Ao meu namorado e amigo Artur, que me incentivou e apoiou durante o curso, obrigada pelas madrugadas estudando comigo, por me salvar diversas vezes na faculdade, pelo companheirismo, amor, carinho e paciência.

Aos meus amigos que fiz durante a faculdade, Valdir, Natalia, Michele, Ingrid, Rickelle e Lucas, obrigada por todo apoio, vocês são excelentes amigos.

Ao meu parceiro de TCC, Felipe Soares, pela dedicação e suporte nesse trabalho. Que seus passos sejam iluminados e tenha muito sucesso na sua vida.

A UFPA/CAMTUC, pela oportunidade de fazer o curso e pelo suporte acadêmico e estrutural durante minha faculdade.

À todos os professores do curso de engenharia mecânica, que compartilharam seus conhecimentos e foram fundamentais para minha formação. Sou grata principalmente aos professores Maciel Furtado, Walter Santos e Jessé Padilha pela orientação neste trabalho e por serem excelentes profissionais.

Aos amigos que fiz durante meus estágios supervisionados, que me deram suporte e compartilharam seus conhecimentos sobre minha profissão e demais áreas, sou grata por todo apoio e incentivo.

## **AGRADECIMENTOS**

*Felipe Soares Silva*

Primeiramente à Deus por ser a luz em minha vida.

À minha família, que sempre acreditou em mim, principalmente aos meus pais por terem dado tudo o que puderam para que este sonho se tornasse realidade.

À minha parceira neste trabalho Érika Lopes, sempre esforçada para conquistar seus objetivos, que Deus ilumine a tua vida e que a sua caminhada seja feita de sucesso.

Aos meus amigos de faculdade em especial, Walacy, Iury, Flávio, Romário, Jerison, Luiggy, Victor, Micaelisson, Renan, Danilton, Suene, Thomé, Arthur, Michelle, que tanto foram importantes na minha vida acadêmica e também pessoal.

Ao professor e amigo Maciel Furtado, pela orientação neste trabalho e por todo o seu empenho ao longo do curso.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Mecânica, aqui deixo meu total reconhecimento e agradecimento, em especial ao Professor Jessé Padilha que me deu a oportunidade de crescer tanto como aluno quanto pessoa ao longo do curso, e também ao meu parceiro no laboratório Rodimilson Rodrigues.

Aos amigos que fiz no meu estágio, sempre estiveram dispostos a me ajudar, me orientando, aconselhando, corrigindo, fazendo com que a experiência no estágio fosse a melhor possível e tornando este trabalho uma realidade.

E por todos que de alguma forma me ajudaram nesta caminhada.

## **DIMENSIONAMENTO DE UM PERFIL DE TRILHO PARA MESA DE GIRO DE UMA RECUPERADORA TIPO RODA DE CAÇAMBA**

### **RESUMO**

*Com o crescente aumento da produtividade, cada vez mais se exige dos equipamentos uma alta confiabilidade, para que as metas de produção sejam alcançadas. Este estudo tem como objetivo analisar as falhas no trilho de giro de uma recuperadora de minério de ferro e buscar soluções para os problemas encontrados. Por meio da ferramenta Análise de Falha Aplicada (AFA), foi possível encontrar o modo de falha que resultou nas falhas encontradas no trilho de giro. Essa ferramenta apontou falha no dimensionamento do trilho. Ao utilizar os conceitos de Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) através da ferramenta Análise de Modos de Falha e Efeito (FMEA – Failure mode and Effect Analysis), foi observado três problemas no dimensionamento do trilho que impactaram na disponibilidade física (DF) do equipamento ocasionando parada corretiva do mesmo por cinco dias, tendo em vista que este tipo de manutenção é indesejado, pois afeta diretamente a capacidade de produção do equipamento. Desse modo, este trabalho propõe o dimensionamento de um novo trilho pelo método numérico conforme as normas nacionais e internacionais e também de acordo com as especificações, condição estrutural e operacional do equipamento.*

**Palavras chaves:** *Máquinas de pátio, Recuperadora, Trilho, MEF.*

## **DIMENSIONING OF A RAIL PROFILE FOR A TURNING TABLE OF A RECUPERATOR BUCKET WHEEL**

### **ABSTRACT**

*The productivity growth, increasingly equipment demands high reliability, so that production halves are achieved. This study aims to analyze the failures in the turning rail of an iron ore recuperator and seek solutions to the found problems. By means of the Fault Analysis Applied (FAA) tool, it was possible to find the failure mode that resulted in the faults found in the turning rail, the tool pointed to a failure in the rail dimensioning. Using the concepts of Reliability Centered Maintenance (RCM) through the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) tool, three problems were observed in the rail sizing that impacted the Physical Availability (PA) of the equipment causing in it a corrective stop for five days, considering that this kind of maintenance is undesirable, because it directly affects the production capacity of the equipment. This work proposes the dimensioning of a new rail by the numerical method according to the national and international standards and also according to the specifications, structural and operational condition of the equipment.*

**Keywords:** *Patio Machines, Rail, MEF.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Recuperadora em operação no pátio de estocagem.....	16
Figura 2. Principais estruturas da recuperadora de minério. ....	17
Figura 3. Recuperadora de minério .....	24
Figura 4. Sistema de giro .....	25
Figura 5. Perfil do trilho. ....	26
Figura 6. Dimensões do trilho QU 120.....	26
Figura 7. Especificações para trilhos conforme norma UIC 860-0. ....	27
Figura 8. Trilho UIC 60.....	28
Figura 9. Norma ASTM -A-1 e AREA- Trilho .....	30
Figura 10. Trilho americano do tipo CR 104.....	31
Figura 11. Diagrama tensão- deformação esquemática para o alumínio e aço. ....	32
Figura 12. Tração uniaxial, seção transversal retangular. ....	33
Figura 13. Deformação de um elemento- tensão tridimensional.....	38
Figura 14. Recuperadora de minério. ....	40
Figura 15. Truque do sistema de giro e desgaste no trilho do sistema.....	41
Figura 16. Dimensões do trilho original da recuperadora. ....	41
Figura 17. Esmagamento no boleto. ....	42
Figura 18. Esmagamentos no boleto do trilho.....	42
Figura 19. Fissuras sobre boleto do trilho. ....	43
Figura 20. Trinca sobre boleto do trilho. ....	43
Figura 21. Largura da roda maior que boleto do trilho. ....	43
Figura 22. Desgaste do trilho.....	44
Figura 23. Peso do minério sobre correia .....	47
Figura 24. Modelo trilho-roda 3D .....	53
Figura 25. Malha numérica do modelo 3D.....	54
Figura 26. Região de interesse com malha refinada.....	54
Figura 27. Restrições de deslocamento. ....	55
Figura 28. Carregamento sobre modelo 3D .....	56
Figura 29. Malha triangular sobre perfil 2D.....	57
Figura 30. Condições de contorno sobre modelo 2D .....	58
Figura 31. Fluxograma de simulação. ....	59
Figura 32. Gráfico: Tensão x N° de Nós-Trilho original. ....	61

Figura 33. Trilho QU120 e roda 3D .....	61
Figura 34. Trilho original- pontos críticos.....	62
Figura 35. Seção em corte modelo 3D .....	62
Figura 36. Dimensões alteradas no perfil .....	63
Figura 37. Propriedades mecânicas NBR 7590. ....	64
Figura 38. Composição química segundo NBR 7590. ....	64
Figura 39. Trilho proposto e roda 3D. ....	65
Figura 40. Seção em corte modelo proposto 3D. ....	66
Figura 41. Proposta das dimensões do novo trilho. ....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. FMEA- Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos.....	22
Tabela 2. Plano de ação-FMEA.....	22
Tabela 3. Padrão de trilho- YB/ T5055 .....	27
Tabela 4. Trilhos conforme NBR 7590 .....	28
Tabela 5. Propriedades mecânica dos trilhos- NBR 7590.....	29
Tabela 6. Composição química dos trilhos- NBR 7590 .....	29
Tabela 7. Variação da composição química .....	30
Tabela 8. Trilhos tratados- Teores máximos de elementos residuais .....	30
Tabela 9. Dados da recuperadora .....	40
Tabela 10. Dados do trilho original do equipamento. ....	42
Tabela 11. Propriedades mecânica e composição química das rodas.....	44
Tabela 12. Massas das estruturas da recuperadora. ....	45
Tabela 12. Massas das estruturas da recuperadora. ....	46
Tabela 13. Coeficiente para correia.....	51
Tabela 14. Força de acionamento do tambor.....	51
Tabela 15. Carregamentos sobre o trilho.....	52
Tabela 16. Dados da mesa giratória.....	53
Tabela 17. Propriedades mecânicas.....	55
Tabela 18. Dados utilizados para a convergência de malha- trilho QU 120 .....	56
Tabela 19. Resultados das malhas geradas.....	60
Tabela 21. Perfis versus máxima tensão.....	63
Tabela 21. Propriedades mecânicas e composições químicas do material do trilho proposto. ....	65

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AFA – Análise de Falhas Aplicada

CMMS – Sistema de Administração da Manutenção Computadorizada

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre

FMEA – Análise do Modo e Efeito de Falha (*Failure Mode and Effect Analysis*)

HG – Horas totais do período

HT – Horas Trabalhadas

MBC – Manutenção Centrada na Condição

MCC – Manutenção Centrada na Confiabilidade

MEF – Método de Elementos Finitos

## LISTA DE SÍMBOLOS

% – Por cento

$\varepsilon$  – Deformação

$\sigma$  – Tensão

$\sigma_{adm}$  – Tensão Admissível

$\sigma_{esc}$  – Tensão de Escoamento

$cs$  – Coeficiente de segurança

$\varepsilon_x$  – Deformação no eixo x

$\varepsilon_z$  – Deformação no eixo z

$\varepsilon_y$  – Deformação no eixo y

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

$E$  – Módulo de elasticidade

$p$  – Peso total do equipamento

$m$  – Massa total do equipamento

$g$  – Gravidade

$Gm$  – Peso do minério no transportador

$cpt$  – Capacidade de trabalho

$ctr$  – Comprimento do transportador de correia

$vc$  – Velocidade da correia

$Qc$  – Peso do minério na roda de caçambas

$rpm$  – Velocidade da roda

$Nc$  – Número total de caçambas

$Mc$  – Massa de minério por caçamba

$Q$  – Capacidade da recuperadora

$Pm$  – Peso do minério na roda de caçambas

$Melev$  – momento de elevação do material

$Rex$  – raio externo da roda de caçambas

$Mmo$  – momento do motor

$Pmr$  – potência do motor

$\eta r$  – rendimento do motor

$rot$  – velocidade da roda

$Ces$  – carga de escavação

$Fes$  – Força de escavação

$Fl$  – Força de escavação lateral

$Ft$  – Força de tração

$Gb$  – Peso da correia transportadora

$mc$  – massa da correia

$Gr$  – peso do rolete

$mr$  – massa do rolete

$Fad$  – Forças adicionais

$Fra$  – Força para vencer atritos no raspador

$Ftp$  – Força de acionamento do tambor *tripper*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO .....	17
1.2 OBJETIVO .....	17
<b>1.2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>18</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
2.1 MANUTENÇÃO.....	19
2.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO .....	19
<b>2.2.1 Manutenção preventiva.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.2 Manutenção corretiva .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.3 Manutenção Preditiva .....</b>	<b>20</b>
2.3 GESTÃO ESTRATÉGICA DA MANUTENÇÃO.....	20
<b>2.3.1 Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC).....</b>	<b>21</b>
2.4 RECUPERADORA/ RETOMADORA DE MINÉRIO .....	24
<b>2.4.1 Sistema de giro da recuperadora .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.2 Trilhos.....</b>	<b>25</b>
2.5 ANÁLISE ESTRUTURAL .....	31
<b>2.5.1 Módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson .....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.2 Método numérico.....</b>	<b>33</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>40</b>
3.1 DETERMINAÇÃO DO CARREGAMENTO SOBRE OS TRILHOS .....	45
<b>3.1.1 Massa e peso do equipamento .....</b>	<b>45</b>
<b>3.1.2 Peso do minério no transportador de correia da lança.....</b>	<b>46</b>
<b>3.1.3 Peso do minério na roda de caçambas da lança.....</b>	<b>47</b>
<b>3.1.4 Carga de escavação.....</b>	<b>48</b>
<b>3.1.5 Força de tração no acionamento da correia.....</b>	<b>50</b>

<b>3.1.6 Incrustação na roda.....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.7 Carga por roda .....</b>	<b>52</b>
<b>3.2 SIMULAÇÃO ESTRUTURAL ESTÁTICA DO TRILHO ORIGINAL E RODA.....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.1 Simulação estrutural estática em 3D .....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.2 Simulação estrutural estática em 2D.....</b>	<b>56</b>
<b>3.3 SIMULAÇÃO ESTRUTURAL ESTÁTICA DO TRILHO PROPOSTO .....</b>	<b>58</b>
<b>3.3.1 Simulação estrutural estática em 2D .....</b>	<b>58</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>60</b>
<b>4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES: TRILHO ORIGINAL (QU120) .....</b>	<b>60</b>
<b>4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES: TRILHO PROPOSTO .....</b>	<b>63</b>
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>67</b>
<b>5.1 CONCLUSÕES .....</b>	<b>67</b>
<b>5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma importante fonte de renda no Brasil, sendo um dos setores básicos da economia do país. A alta dos preços de minério e os consecutivos recordes de produção favorece o aumento do valor das exportações.

As empresas do setor de mineração iniciaram uma corrida para antecipar ao máximo o aproveitamento de suas reservas criando um cenário propício para a busca pelo aumento de eficiência das operações já instaladas (GOLDSTEIN, 1999, apud, FARIA, 2014). Neste cenário, a confiabilidade dos equipamentos de mineração passou a ser de grande importância para a produção, gerando novos métodos de manutenção.

No beneficiamento do minério a armazenagem do produto é realizado nos pátios de estocagem através de pilhas. Para o processo de manuseio do minério são utilizadas as máquinas de pátio, sendo uma delas a recuperadora de minério. A recuperadora de minério tem como função deslocar-se ao longo do pátio e extrair das pilhas o minério por meio de caçambas acopladas numa roda no extremo da lança, conforme Figura 1, até as correias que abastecem os vagões.

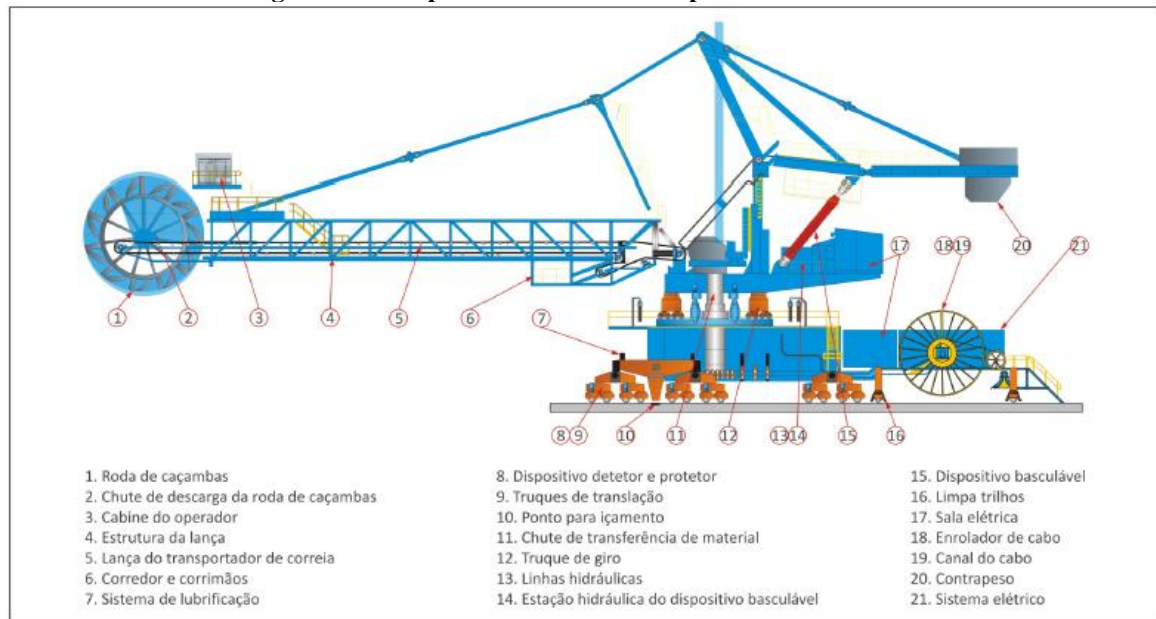
**Figura 1. Recuperadora em operação no pátio de estocagem.**



Fonte: Autoria própria.

A recuperadora possui cinco sistemas principais: ancoragem, translação, lança, deslocamento e giro. Conforme Figura 2, pode-se observar as principais estruturas da recuperadora. O sistema de giro é composto pela mesa de giro que tem como função trocar a posição da lança do transportador através dos trilhos.

**Figura 2. Principais estruturas da recuperadora de minério.**



Fonte: Vale.

Este trabalho tem como finalidade propor melhoria nos trilhos de giro da recuperadora de minério que apresentavam esmagamentos em suas estruturas em consequência dos desgastes prematuros ocasionados pelo mal dimensionamento dos trilhos. Devido a esses desgastes, a disponibilidade física da recuperadora era afetada, diminuindo o ritmo de produção de minério.

## 1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Devido aos grandes investimentos e rendimentos que a mineração gera, cada vez mais é almejado e realizado o uso de técnicas capazes aumentar a capacidade de produção, confiabilidade e disponibilidade física das máquinas e equipamentos. Para o suporte das equipes de manutenção e operação se torna essencial o estudo, aplicação de métodos de análise de falhas e melhorias realizadas nos equipamentos. Diante disso, a principal motivação para o desenvolvimento desse trabalho é propor melhoria nos trilhos do sistema de giro, que ocasiona o aumento da disponibilidade física e a confiabilidade da recuperadora de minério.

## 1.2 OBJETIVO

### 1.2.1 Objetivo Geral

Dimensionamento de um perfil de trilho para mesa de giro de uma máquina de pátio tipo retomadora/recuperadora roda de caçambas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Análise das evidências e identificação da causa raiz a partir da aplicação da ferramenta FMEA;
- Cálculo das cargas atuantes sobre mesa de giro da máquina;
- Análise estrutural estática, via método dos elementos finitos, do trilho existente;
- Modificações na geometria do trilho original, visando adequação estrutural do mesmo e proposta de material para o perfil modificado com base na norma NBR 7590.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo iremos abordar alguns conceitos básicos necessários para melhor entendimento do desenvolvimento deste trabalho. Estes conceitos são necessários pois tratam de temas relacionados ao dimensionamento do trilho e sobre o aumento da confiabilidade do equipamento, passando desde os conceitos de manutenção, dados do equipamento, normas regulamentadoras utilizadas para o dimensionamento, conceitos básicos de trilhos, análise estrutural e, por fim, a utilização do método de elementos finitos.

### 2.1 MANUTENÇÃO

Segundo a ABNT (NBR 5462/1994) o conceito de manutenção é “combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”.

A manutenção visa garantir o funcionamento e a disponibilidade dos equipamentos e maquinários, além de proporcionar uma melhor vida útil. Através das atividades de manutenção é possível ter o controle de falhas e o reabastecimento do ativo ao processo produtivo.

### 2.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO

Existem vários tipos de manutenção entre os quais podemos citar as três principais: manutenção preventiva, corretiva e preditiva. Estas manutenções tem como objetivo estudar e controlar o desempenho do equipamento. Sendo assim, podem ser consideradas um conjunto de cuidados técnicos indispensáveis para a confiabilidade do equipamento.

#### 2.2.1 Manutenção preventiva

A manutenção preventiva é uma manutenção planejada, onde estabelece paradas periódicas com intuito de realizar reparos nos equipamentos antes que ocorra defeitos, falhas ou danos não previstos.

Conforme ABNT NBR 5462 (1994), “a manutenção preventiva é a manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento do item.”

Segundo Moro e Auras (2007), as vantagens da manutenção preventiva são:

- Paradas programadas ao invés de paradas imprevistas;

- Maior vida útil do equipamento;
- Maior preço em uma eventual troca do equipamento;
- Maior qualidade do produto;
- Diminuição de horas extras.

### **2.2.2 Manutenção corretiva**

A manutenção corretiva é utilizada quando o item apresenta falha ou uma performance menor do que a planejada. Dessa forma, essa manutenção tem como objetivo restabelecer as condições de funcionamento dos itens. A manutenção corretiva pode ser dividida em dois tipos:

- Manutenção corretiva não programada, conhecida também como manutenção emergencial. Conforme Kardec e Nascif (2009), este tipo de manutenção é a correção da falha de maneira aleatória, onde não há tempo para preparação do serviço.
- Manutenção Corretiva Programada: Conforme Branco Filho (2000), este tipo de manutenção são tarefas de remoção de falhas em data posterior ao evento falha, ficando a máquina em estado de pane, até a data do reparo.

### **2.2.3 Manutenção Preditiva**

A manutenção preditiva deve ser realizada quando a sua utilização é viável economicamente. Esse tipo de manutenção tem como objetivo analisar e estabelecer o tempo que deverá ser executado a manutenção do equipamento antes da falha ou evitar desmontagens desnecessárias dos componentes dos equipamentos durante inspeções.

A manutenção preditiva permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva. (ABNT NBR 5462, 1994).

## **2.3 GESTÃO ESTRATÉGICA DA MANUTENÇÃO**

Segundo Oliveira (2017), a gestão da manutenção estabelece metas e objetivos por meio de normas e procedimentos de trabalho, de modo a obter-se um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis sejam eles pessoais, equipamentos ou materiais.

De acordo com Souza (2008), “a gestão deve estar relacionada a todo conjunto de ações, decisões e definições sobre tudo o que se tem que realizar, possuir, utilizar, coordenar e controlar para gerir os recursos fornecidos para a função manutenção e fornecer assim os serviços que são aguardados pela função manutenção”.

### **2.3.1 Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC)**

Confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo (ABNT NBR 5462 ,1994).

Segundo Branco Filho (2008), a MCC é mais bem aproveitada nos primeiros passos do projeto de uma instalação ou produto, entretanto, pode ser usada para avaliar programas de manutenção preventiva em sistemas e instalações já existentes, com o objetivo de obter melhorias contínuas, para tornar a manutenção mais eficiente, obter melhorias de confiabilidade, de disponibilidade e tornar a empresa mais competitiva.

Conforme com Pereira (2011), a manutenção centrada na confiabilidade é utilizada para assegurar que quaisquer componentes de um ativo ou um sistema operacional mantenham suas funções, sua condição de uso com segurança, qualidade, economia e ainda seu desempenho não degrade o meio ambiente.

Para Pereira (2011), MCC indica:

- Redução de manutenção preventiva por meio de tarefas mais eficazes;
- Análise de falhas: reduzir a possibilidade de ocorrência das falhas;
- Manutenção preventiva prevendo substituição de componentes (não consertar), como forma de redução da taxa de falhas;
- Garantia de que o equipamento execute suas funções a custos mínimos;
- Uso da metodologia FMEA aplicada à manutenção;
- Redução dos custos de manutenção por meio da redução de manutenção preventiva, peças de reposição, rastreamento das decisões etc.

Análise do Modo e Efeito de Falha (FMEA -*Failure Mode and Effect Analysis*), é uma abordagem que ajuda a identificar e priorizar falhas potenciais em equipamentos, sistemas ou processos. A FMEA é um sistema lógico que hierarquiza as falhas potenciais e fornece as recomendações para ações preventivas (KARDEC e NASCIF, 2009).

Conforme Viana (2002), a escolha do FMEA é devido a sua abordagem do problema a partir da causa para o efeito. Soma-se a esta característica a de documentar os passos das análises, com isso satisfazendo a necessidade de registros que a MCC requer.

De acordo com Dias (2018), a FMEA para o trilho de giro da recuperadora, conforme Tabela 1 e Tabela 2, os modos de falhas, causas e ações são:

**Tabela 1. FMEA- Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos**

<b>FMEA- Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos</b>		
<b>SUBSISTEMA</b>	<b>ANÁLISE DA FALHA</b>	
	<b>MODO DE FALHA</b>	<b>CAUSAS</b>
1. Mesa de giro.	1.1 Falha na cremalheira/ pinhão de giro	1.1.1 Desgaste no alojamento do pino da mesa de giro e/ou folga nos elementos de fixação de pino.
		1.1.2 Pinos de giro com desgaste acentuado e fora do padrão com superfície irregular.
		1.1.3 Pinhão com desgaste acentuado e fora do padrão.
	1.2 Quebra dos parafusos de fixação do colar da mesa de giro	1.2.1 Sobrecarga devido impacto lateral da lança.
	1.3 Falha no trilho de giro	1.3.1 Deformação/desgaste
1.3.2 Abertura e/ou desnível entre os segmentos.		

Fonte: Dias (p.84, 2018).

**Tabela 2. Plano de ação-FMEA**

<b>PLANO DE AÇÃO -FMEA</b>		
<b>Modo de Falha</b>	<b>Causa</b>	<b>Ação</b>
1.3 Falha no trilho de giro	1.3.1 Deformação/desgaste	Plano de inspeção e manutenção dos limpa trilho.
		Realizar inspeção de recebimento dos trilhos conferindo o material, dureza e dimensional.
		Realizar inspeção dimensional do perfil do trilho.
	1.3.2 Abertura e/ou desnível entre os segmentos.	Realizar topografia nos trilhos para avaliar a concentricidade e identificar desníveis.
Avaliar fixação dos segmentos dos trilhos e os níveis de desgaste.		

Fonte: Dias (p.94, 2018)

Para este trabalho foi realizado a análise de falha no trilho de giro, sendo um dos planos de ação a realização de inspeção de recebimento dos trilhos conferindo o material, dureza e as dimensões do perfil dos trilhos. Como principal plano de ação foi realizado uma análise

estrutural dos trilhos no *software* comercial *Ansys Workbench 18.1* e proposto um novo perfil de trilho.

### *2.3.2.1 Análise de Falhas Aplicadas*

A Análise de falha Aplicada (AFA), é um conjunto de ferramentas utilizada na manutenção centrada na confiabilidade (MCC). Esta ferramenta consiste em analisar uma eventual ocorrência para descobrir a sua causa raiz, para assim ser tratada e possíveis melhorias serem levantadas visando sempre o aumento de confiabilidade e segurança do equipamento. A AFA consiste em basicamente em registrar os fatos e utilizar ferramentas de confiabilidade para elaborar um plano de ação para tratá-las e realizar o levantamento de possíveis melhorias a serem aplicadas. Além do registro dos fatos e a análise dos mesmos, as ferramentas utilizadas para encontrar a causa raiz ou modo de falha deste trabalho foram:

#### 2.3.2.1.1 Diagrama de causa e efeito (Espinha de peixe/Diagrama de Ishikawa)

De acordo com SEBRAE (2005), o diagrama de causa e efeito (ou espinha de peixe) é uma técnica largamente utilizada, que mostra a relação entre um efeito e as possíveis causas que podem estar contribuindo para que ele ocorra. Essa ferramenta foi aplicada, pela primeira vez, em 1953, no Japão, pelo professor da Universidade de Tóquio, Kaoru Ishikawa, para sintetizar as opiniões de engenheiros de uma fábrica quando estes discutem problemas de qualidade.

Para Willians (1995), a ferramenta apresenta as causas de um problema em forma de espinha de peixe, chamado quatro M's, método, mão de obra, materiais e máquinas. Na área de prestação de serviços geralmente as categorias básicas utilizadas são: procedimentos, pessoas, ponto, políticas medição e meio ambiente. Com a utilização do diagrama de causa e efeito é possível determinar as causas dos problemas para atacá-los da melhor forma possível.

#### 2.3.2.1.2 Cinco por quês

O método dos cinco por quês é uma abordagem científica, utilizada no sistema Toyota de Produção, para se chegar à verdadeira causa raiz do problema, que geralmente está escondida através de sintomas óbvios (OHNO, 1997). O método consiste em perguntar o “por quê” de um problema sucessivas vezes, para se encontrar a sua causa raiz.

Terner (2008) defende que os cinco por quês é um método importante, pois permite que através de múltiplos questionamentos se separe a causa do efeito, contribuindo para a construção de hipóteses plausíveis para a causa raiz do problema. Através da abordagem dos cinco por quês é possível investigar mais a fundo o problema para que ao encontrar a sua raiz este possa ser corrigido.

#### 2.4 RECUPERADORA/ RETOMADORA DE MINÉRIO

A recuperadora/ retomadora (Figura 3), trabalha recuperando/ retomando minério de ferro dos pátios de estocagem, funcionando interligada com uma correia transportadora que conecta aos vagões. A recuperadora/ retomadora pode ser montada sobre esteiras ou trilhos.

**Figura 3. Recuperadora de minério**



Fonte: <http://www.dhhi.com.cn>

A recuperadora foco deste trabalho é do tipo “roda de caçambas” (Figura 3) e é um equipamento eletromecânico utilizado para a recuperação do minério a partir das pilhas de produtos. Esse equipamento desloca-se ao longo do pátio de produto e extraem o minério por meio das caçambas que estão acopladas numa roda no extremo da lança transportando o material até as esteiras que irão carregar os vagões. A recuperadora é ajustada para operar de forma contínua.

A recuperadora tem capacidade de projeto de 11.000 t/h, porém, nesse pátio de estocagem esse equipamento opera com a capacidade nominal de 8.000 t/h. A lança da recuperadora possui velocidade máxima de translação de 4,6 m/s e a correia transportadora tem 1.800 mm de largura. O material transportado pela recuperadora é minério e possui peso específico de 2500 kgf/ m<sup>3</sup>.

### 2.4.1 Sistema de giro da recuperadora

O sistema de giro da lança (Figura 4) tem como finalidade mover o equipamento em direção ao material a ser recuperado. Para executar o movimento de giro da recuperadora é utilizado a mesa de giro com trilhos. Desta forma, é de grande importância que os trilhos não sofram desgastes prematuros durante sua utilização.

**Figura 4. Sistema de giro**



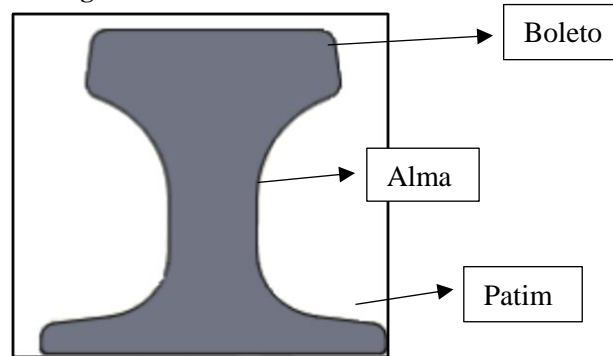
Fonte: Autoria própria.

### 2.4.2 Trilhos

Segundo Porto (2004), “a vida útil do trilho é limitada pelo desgaste do trilho ou pela ruptura por fadiga decorrente do carregamento cíclico. O desgaste é decorrente da ação mecânica entre a roda e o trilho, que podem ou não possuir a mesma dureza. Já a fadiga é o fenômeno que leva o trilho a ruptura mesmo quando solicitado com uma tensão menor que a de ruptura”.

Conforme Chiaverini (2008), os trilhos são materiais sujeitos a condições de serviço relativamente severas. As extremidades, estão sujeitas a um amassamento devido ao golpe produzido pelo choque das rodas das composições quando estas atravessam as juntas dos trilhos.

O perfil básico de trilho utilizado na ferrovia é do tipo Vignole, conforme a NBR 7590 este tipo de trilho é composto por alma, boleto e patim (Figura 5).

**Figura 5. Perfil do trilho.**

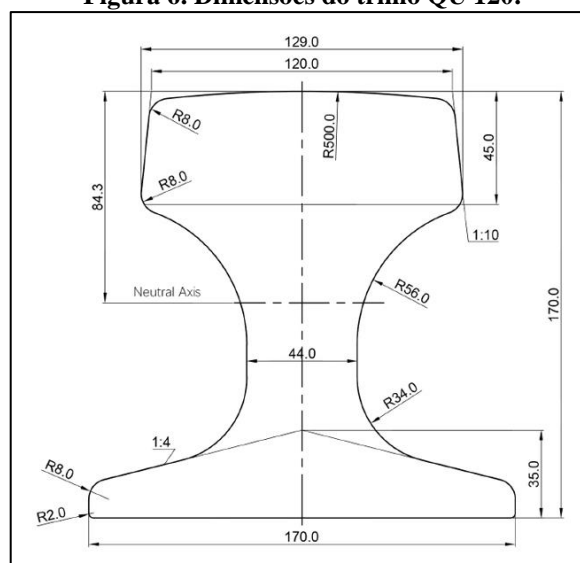
Fonte: Autoria própria.

O boleto é a parte do trilho destinada ao apoio e deslocamento da roda. A alma é a parte compreendida entre o boleto e o patim (base do trilho).

Existem normas que estabelecem padrões e diretrizes para modelos de trilhos utilizados na indústria, algumas dessas normas são: norma chinesa YB / T 5055 (2014), norma europeia UIC 860-0, norma NBR 7590 e norma americana ASTM-A-1 e AREA.

#### 2.4.2.1 Norma YB / T 5055(2014): Trilho para guindastes

A norma YB / T 5055 (2014) trata de modelos de trilhos para carrinhos de guindastes, como padrões de dimensões, pesos, requisitos técnicos, métodos de teste, regras de inspeção e certificados de qualidade. Esta norma é utilizada nos tipos de trilhos: QU 70, QU 80, QU 100 e QU 120. A Figura 6 exemplifica as dimensões do trilho QU 120 e a Tabela 3 fornece alguns parâmetros dos tipos de trilhos conforme a norma.

**Figura 6. Dimensões do trilho QU 120.**

Fonte: <https://portuguese.alibaba.com>

Tabela 3. Padrão de trilho- YB/ T5055

Tamanho	Cabeça (mm)	Altura (mm)	Parte inferior (mm)	Alma (mm)	Peso (kg/m)	Material	Compr.(m)
QU 70	70	120	120	28	52,8	U 71 Mn	12
QU 80	80	130	130	32	63,69	U 71 Mn	12
QU 100	100	150	150	38	88,96	U 71 Mn	12
QU 120	120	170	170	44	118,1	U 71 Mn	12

Fonte <http://portuguese.railwayfastenings.com>

#### 2.4.2.2 Norma europeia UIC 860-0

A norma UIC 860-0 elabora critérios e recomendações para aços de trilhos ferroviários e especificações técnicas. De acordo com DNIT (2015), a composição química e características mecânica são estabelecidas conforme Figura 7. A dureza Brinell do trilho UIC é de no mínimo 300HB.

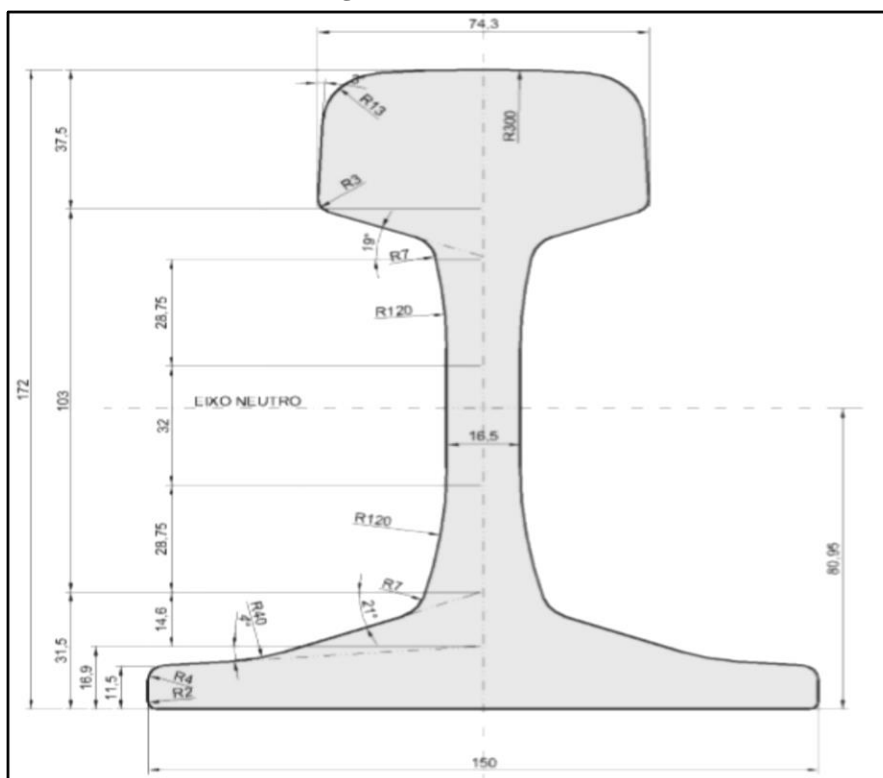
Figura 7. Especificações para trilhos conforme norma UIC 860-0.

Qualidade	Composição Química (%)					Característica Mecânica	
	C	Mn	Si	P (Máx.)	S (Máx.)	RT (Mín.)	A (%)
Normal	0,37 – 0,60	0,70 – 1,20	0,35 máx.	0,04 – 0,08	0,50 – 0,80	686 - 813	14
A	0,65 – 0,75	0,80 – 1,30	0,35 máx.	0,05 máx.	0,05 máx.	882	10
B	0,50 – 0,70	1,30 – 1,70	0,35 máx.	0,05 máx.	0,05 máx.	882	10
C	0,45 – 0,65	1,70 – 2,00	0,35 máx.	0,05 máx.	0,05 máx.	882	10

Fonte: DNIT (2015).

A Figura 8 apresenta o trilho tipo UIC 60. Conforme DNIT (2015) esse trilho possui 60,34 kg/m, módulo de resistência do boleto de 3055 cm<sup>3</sup> e módulo de resistência do patim de 377,4 cm<sup>3</sup>.

Figura 8. Trilho UIC 60



Fonte: DNIT (2015).

#### 2.4.2.3 Norma Brasileira 7590 (NBR 7590)

A NBR 7590 (2012) estabelece os requisitos para Trilhos Vignole. Conforme esta norma, a massa nominal por metro de trilho deve estar de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4. Trilhos conforme NBR 7590

Tipo de trilho	Massa nominal por metro de trilho (kg/m)
TR37	37,10
TR45	44,64
TR50	50,35
TR 57	56,90
UIC60	60,34
TR68	67,56

NOTA: O trilho é designado por TR. O trilho UIC60 corresponde ao TR60.

Fonte: NBR 7590.

Segundo a NBR 7590 (2012), as propriedades mecânicas e composição química dos trilhos devem seguir as especificações da Tabela 5 e Tabela 6.

**Tabela 5. Propriedades mecânica dos trilhos- NBR 7590**

Tipo de aço		Resistência à tração mínima (Mpa)	Alongamento mínimo (%)	Escoamento mínimo (Mpa)	Dureza Brinell (HB)
Aço-carbono (resistência mínima)	3	880	10	420	260 a 310
	4	980	10	510	280 a 320
Aço-liga (média resistência)	7	1.000	10	580	310 a 340
	8	1.190	8	770	340 a 370
Aço tratado (alta resistência)	10	1.200	10	840	370 a 420

Fonte: NBR 7590.

**Tabela 6. Composição química dos trilhos- NBR 7590**

		Aço-carbono		Aço-liga		
		3	4	7	8	10
Carbono	Máxima	0,80	0,82	0,80	0,92	0,92
	Mínima	0,60	0,72	0,70	0,72	0,72
Manganês	Máxima	1,30	1,10	1,40	0,79	1,25
	Mínima	0,80	0,80	1,00	0,60	1,11
Silício	Máxima	0,50	0,60	1,00	0,60	0,60
	Mínima	0,10	0,10	0,60	0,10	0,10
Fósforo	Máxima	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Enxofre	Máxima	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Níquel	Máxima	–	–	–	0,15	0,15
Cromo	Máxima	0,15	0,15	0,40	0,70	0,70
	Mínima	–	–	0,15	0,15	0,15
Molibdênio	Máxima	–	–	–	0,05	0,05
Vanádio	Máxima	–	–	–	0,01	0,01
Nióbio	Máxima	–	–	0,05	–	–
	Mínima	–	–	0,02	–	–

Fonte: NBR 7590(2012).

Ainda de acordo com a NBR 7590 (2012), a composição química pode ter uma variação como observado na Tabela 7. Para trilhos tratados, os teores máximos de elementos residuais são informados na Tabela 8.

**Tabela 7. Variação da composição química**

Elemento	Abaixo da mínima (%)	Acima da máxima %
Carbono	0,04	0,04
Manganês	0,06	0,06
Manganês	–	0,008
Enxofre	–	0,008
Silício	0,02	0,05

Nota: A variação da Tabela 7 só é considerada para análise química de amostra retirada do boleto de peça acabada.

Fonte: NBR 7590 (2012).

**Tabela 8. Trilhos tratados- Teores máximos de elementos residuais**

Classe	Individualizados % em massa											Combinados % em massa
	Cromo (Cr)	Molibdênio (Mo)	Níquel (Ni)	Cobre (Cu)	Estanho (Sn)	Antimônio (Sb)	Titânio (Ti)	Nióbio (Nb)	Vanádio (V)	Alumínio (Al)	Nitrogênio (N)	
<b>A</b>	–	0,02	0,10	0,15	0,04	0,02	0,025	0,01	0,03	0,004	0,009	Mo + Ni + V < 0,20
<b>B</b>	0,10	0,02	0,10	0,15	0,04	0,02	0,025	0,01	0,03	0,004	0,009	Cr + Mo + Ni < 0,25

Fonte: NBR 7590(2012).

#### 2.4.2.4 Norma Americana ASTM-A-1 e AREA

Conforme DNIT, a norma ASTM -A-1 e AREA estabelecem que a dureza Brinell do trilho é de no mínimo 240 HB (3.000 kgf) e a composição química e características mecânica devem estar conforme as especificações contidas na Figura 9.

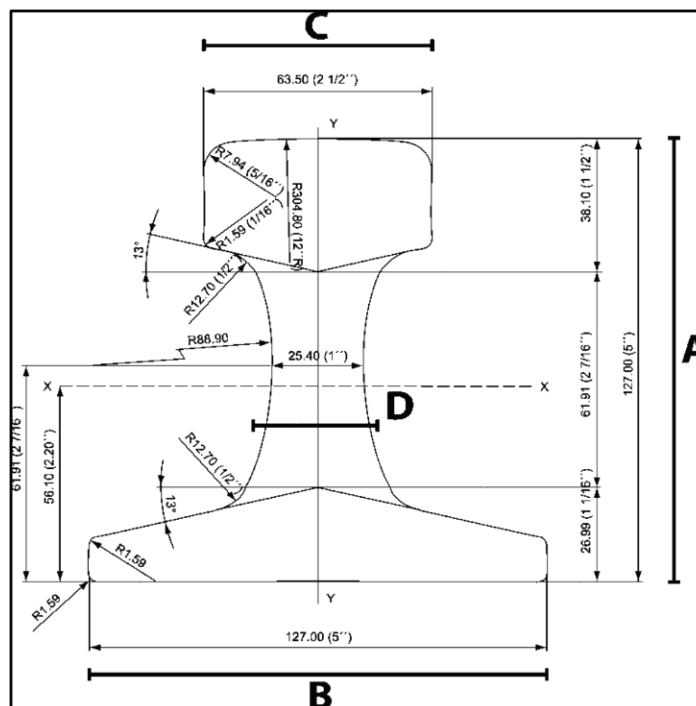
**Figura 9. Norma ASTM -A-1 e AREA- Trilho**

Qualidade	Composição Química (%)					Característica Mecânica	
	C	Mn	Si	P (Máx.)	S (Máx.)	RT (Min.)	A (%)
30 a 40 kg/m	0,55 - 0,68	0,60 - 0,90	0,10 - 0,25	0,04	0,05	833 - 980	12,5
40 a 45 kg/m	0,61 - 0,77	0,60 - 0,90	0,10 - 0,25	0,04	0,05	833 - 980	12,5
45 a 60 kg/m	0,67 - 0,80	0,70 - 1,00	0,10 - 0,25	0,04	0,05	833 - 980	12,5
Acima de 60 kg/m	0,69 - 0,82	0,70 - 1,00	0,10 - 0,25	0,04	0,05	833 - 980	12,5

Fonte: DNIT (2015).

A Figura 10 exemplifica um tipo de trilho americano com nomenclatura CR 104, no qual possui 104 lbs/ yd (51,59 kg/m), com alma de 25,4 mm e boleto de 63,5 mm.

**Figura 10. Trilho americano do tipo CR 104.**



Fonte: <https://www.trilhos.com.br>

## 2.5 ANÁLISE ESTRUTURAL

Conforme Martha (2010), “a análise estrutural é a fase do projeto estrutural em que é feita a idealização do comportamento da estrutura. Esse comportamento pode ser expresso por diversos parâmetros, tais como pelos campos de tensões, deformações e deslocamentos na estrutura”.

Ainda de acordo com Martha (2010), de uma maneira geral, a análise estrutural tem como objetivo a determinação de esforços internos e externos (cargas e reações de apoio), e das correspondentes tensões, bem como a determinação dos deslocamentos e correspondentes deformações da estrutura que está sendo projetada.

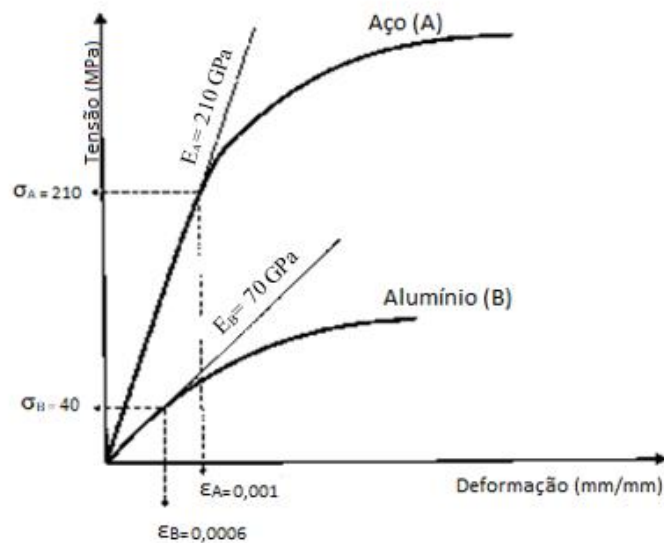
### 2.5.1 Módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson

Módulo de elasticidade é a relação entre a tensão aplicada e a deformação elástica resultante, este módulo está relacionado a rigidez do material. O módulo de elasticidade é utilizado nos cálculos de tensão do material representada pela lei de Hooke.

O módulo de elasticidade ( $E$ ) pode ser diretamente obtido da curva tensão ( $\sigma$ )-deformação ( $\varepsilon$ ), e é determinado pelo quociente da tensão convencional pela deformação convencional na região linear do diagrama tensão deformação (Figura 11) e é representada pela equação (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2012).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Figura 11. Diagrama tensão- deformação esquemática para o alumínio e aço.



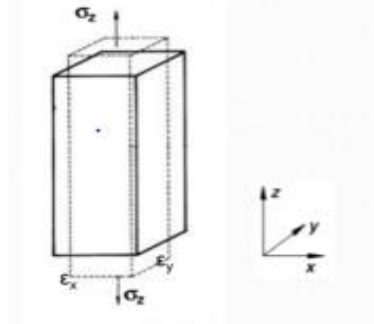
Fonte: Garcia, Spim e Santos (2012).

Toda força ou tensão provoca, ao mesmo tempo, deformação no seu sentido de aplicação e também uma deformação no sentido transversal, assim o coeficiente de Poisson é utilizado para determinar a deformação de um determinado material.

Conforme Garcia, Spim e Santos (2012), o coeficiente de Poisson mede a rigidez do material na direção perpendicular à direção de aplicação da carga uniaxial (Figura 12). O valor numérico desse coeficiente é determinado pela equação:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$

**Figura 12. Tração uniaxial, seção transversal retangular.**



Fonte: Garcia, Spim e Santos (2012).

Para efeito de cálculo alguns materiais apresentam o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson determinados conforme a NBR 8800, com base nisso os valores dessas propriedades mecânicas dos trilhos originais da recuperadora estão de acordo com esta norma.

### 2.5.2 Método numérico

Conforme Araújo (2017), os métodos numéricos são aplicações de algoritmos pelas quais é possível formular e resolver problemas matemáticos usando operações aritméticas menos complexas. Estes também são conhecidos como métodos indiretos. A análise numérica idealiza e concebe métodos para “aprovar” de forma eficiente as soluções de problemas expressados matematicamente. O objetivo principal da análise numérica é encontrar soluções “aproximadas” para problemas complexos.

#### 2.5.2.1 Método de Elementos Finitos

Para a análise estrutural do trilho, será utilizado o Método de Elementos Finitos (MEF). O Método de Elementos Finitos (MEF) proporciona um melhor embasamento nos estudos das análises estruturais, pois proporciona resultados de tensões e deslocamentos atuantes sobre a estrutura os. Os resultados obtidos podem ser utilizados para determinar a durabilidade do elemento, compreender o comportamento da estrutura diante de forças atuantes ou de um carregamento e ainda analisar pontos de concentração de tensões.

O método dos elementos finitos é um método aproximado de cálculo de sistemas contínuos. O corpo contínuo é subdividido em um número finito de partes (elementos), que são conectados entre si por nós. Nos problemas de análise estrutural, os parâmetros são os deslocamentos nodais que são as incógnitas do problema (ALVES FILHO ,2000).

A análise por elementos finitos poderá ter vários níveis de sofisticação, consoante o tipo de problema que se pretende analisar. No entanto, existe uma série de fatores que determinará não só a qualidade dos resultados, mas também, o tempo de cálculo e de esforço computacional, como por exemplo: discretização da malha, a forma da malha bem como a transição entre malhas distintas, o tipo e o grau de interpolação do elemento finito de acordo com o problema a resolver.(MARQUES, SILVA e REBELO, 2009).

Conforme Ramos (2014), é necessário ter o conhecimento das propriedades mecânicas dos componentes, como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, massa específica, dimensões do equipamento. Além disso deve-se conhecer os carregamentos atuantes na estrutura, para as configurações correta do *software* de análise estrutural.

No MEF, existem etapas de solução e análise que são: pré-processamento, solução e pós processamento, conforme visto nos subtópicos posteriores.

#### 2.5.2.1.1 Pré-processamento

No pré-processamento é estabelecido os tipos de análises, a geração da geometria do elemento estrutural, propriedades do material, geração de malhas e condições de contorno.

##### *A) Análise dinâmica e estática*

De acordo com Azevedo (2003), “... resolver um problema de análise de uma estrutura, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas. O modo como o MEF é formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema”.

A análise dinâmica pode ser considerada como uma extensão da estática. A dinâmica acrescenta à análise a variação no tempo e a sua consequência em termos de resposta da estrutura que tem de considerar o efeito das ações de inércia resultantes (MEIRELES, 2007).

Na análise estática as forças de inércia e amortecimentos são desprezíveis. Este tipo de análise é utilizado para estipular tensões, deslocamentos, deformações etc., sob cargas estáticas.

##### *B) Análise linear e não-linear*

Em uma estrutura sólida, é habitual considerar que os deslocamentos provocados pelas ações exteriores são muito pequenos quando comparados com as dimensões dos componentes da estrutura. Assim, admite-se que não existe influência da modificação da geometria da

estrutura na distribuição dos esforços e das tensões[...]. Se esta hipótese não for considerada, a análise é designada não linear geométrica. É também frequente considerar que, ao nível do material que constitui a estrutura, a relação entre tensões e deformações é linear. (AZEVEDO, 2003).

### *C) Análise estática linear: tensões*

De acordo com Fogal (2002), “o método de elementos finitos torna-se indispensável para oferecer subsídios quanto ao comportamento da estrutura por intermédio do panorama de tensões atuantes nos componentes. A análise de tensões é um passo intermediário e um dos inputs para se tomar decisões sobre a estrutura”.

Ainda conforme Fogal (2002), para se executar uma análise de tensões que nos conduza a decisões adequadas devem-se atender alguns pré-requisitos, a saber:

- Conhecimento do comportamento estrutural desejado, formulado por intermédio de um critério de projeto;
- Conhecimento das propriedades dos materiais constituintes da estrutura do componente;
- Características dos elementos finitos envolvidos na análise.

### *D) Geração de malha*

De acordo com Oliveira (2013), “sabe-se que o método de elementos finitos apresenta respostas coerentes em suas análises estruturais, porém, as mesmas não são exatas e sim uma aproximação da resolução de equações geradas a partir de cada nó de uma malha”.

A geração de malha é um grande problema no método de elementos finitos, com a discretização de malha, atinge-se maior quantidade de elementos, desenvolvendo assim resultados mais semelhantes a realidade. Porém, quanto maior o refino de uma malha, maior será o tempo necessário para a elaboração da análise da estrutura, tornando-se um processo menos viável por custos ou até mesmo sendo impossível de ser realizado.

Conforme Fagan (1992), um recurso utilizado para aumentar a eficiência de processamento nos softwares, é elevar o refinamento da malha somente em determinadas regiões. Estas regiões são estabelecidas previamente como regiões críticas prováveis da estrutura analisada, e desta forma terão maior acuracidade do que em outras áreas.

### *E) Condições de contorno*

De acordo com Oliveira (2013), nas análises de métodos de elementos finitos é necessário alimentar o modelo com dados reais ou hipóteses de simulação, estes dados são as restrições e condições de contorno.

As condições de contorno na análise estrutural do método de elementos finitos são as restrições, carregamentos, tipos de contato etc. Assim, estabelecendo a estrutura em análise existem ponderações e procedimentos que devem ser estipuladas na análise.

Conforme Domingos Azevedo (2015), “avaliar quais são as cargas que atuam sobre componentes, a direção, sentido e intensidade. E também, quais são e onde estarão localizados os apoios, bem como, os tipos de contato entre os componentes de um conjunto são extremamente importantes para obter resultados confiáveis”.

#### 2.5.2.1.2 Solução

Na fase da solução do método de elementos finitos, acontece o processamento da análise, no qual resolve-se diferentes problemas que são equacionados e resumidos a sistemas de equações diferenciais. Sendo, assim nessa etapa o software resolve as equações governantes do fenômeno observado pelo método dos elementos finitos.

#### *A.1 Convergência de malha*

Na modelagem do método de elementos finitos, uma malha mais fina, normalmente, pode gerar uma solução mais precisa. Porém, ao passo que a malha se torna mais fina, o tempo de cálculo aumenta e os recursos computacionais devem ser mais rebuscado e muitas vezes não estão disponíveis. Dessa forma a convergência de malha é um meio de alcançar uma malha que satisfaça a precisão dos resultados, o tempo de solução e esteja dentro dos recursos computacionais disponíveis.

#### 2.5.2.1.3 Pós-processamento

Na fase final da análise ocorre os pós processamento, no qual é possível visualizar e analisar os resultados obtidos, através dessa etapa ocorre:

- Geração de gráficos;
- Geração de listagem;

- Geração de tabelas;
- Interpretação de resultados.

### 2.5.2.2 Teorias de falha

Segundo Budynas e Nisbett (2011), a falha pode significar que uma peça tenha se separado em dois ou mais pedaços; tenha se tornado permanentemente distorcida, arruinando assim sua geometria; tenha tido sua confiabilidade depreciada ou sua função comprometida.

Ainda conforme Budynas e Nisbett (2011), os materiais dúcteis são normalmente classificados por ter deformação  $\varepsilon_f \geq 0,05$  e uma resistência ao escoamento identificável, que frequentemente é a mesma sob compressão e tração ( $S_{yt} = S_{yc} = S_y$ ). As teorias para materiais dúcteis (critério de escoamento) geralmente aceitas são:

- Tensão de cisalhamento máxima (MSS);
- Energia de distorção (DE);
- Coulomb- Mohr dúctil (DCM).

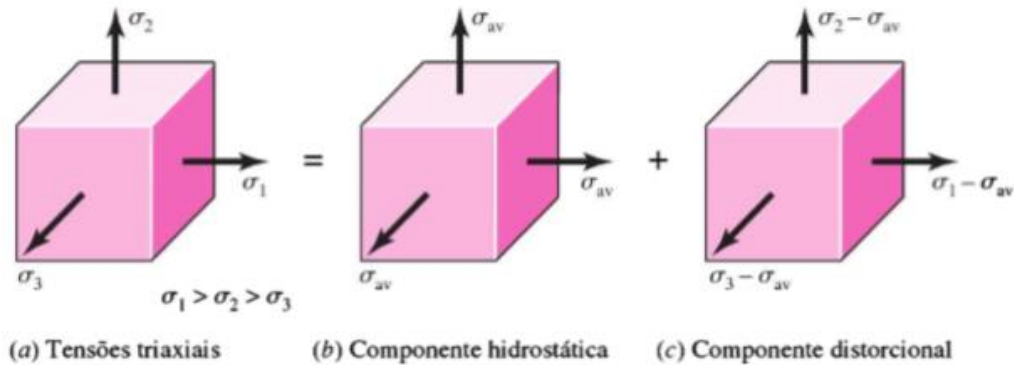
Para esse trabalho será analisado a teoria da energia de distorção para materiais dúcteis.

A teoria da energia de distorção (DE) originou-se por causa da observação de que materiais dúcteis tensionados hidrostáticamente exibiam resistências de escoamento bem acima dos valores dados pelo ensaio de tração simples. Conseqüentemente, foi postulado que o escoamento não era um fenômeno simples de tração ou compressão em absoluto, mas, pelo contrário, que estava relacionado de alguma maneira à distorção angular do elemento tensionado (BUDYNAS e NISBETT, 2011).

Conforme Budynas e Nisbett (2011), para desenvolver a teoria, a unidade de volume está sujeita a um estado de tensão tridimensional qualquer, designado pelas tensões  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  (Figura 13.a). A Figura 13(b) apresenta tensão hidrostática devido a tensões  $\sigma_{av}$ . A fórmula de  $\sigma_{av}$  é:

$$\sigma_{av} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

Figura 13. Deformação de um elemento- tensão tridimensional.



Fonte: Budynas e Nisbett (2011).

O elemento da Figura 13 (b) passa por mudança pura de volume, isto é, sem distorção angular. Se considerarmos  $\sigma_{av}$  uma componente de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ , essa componente pode ser delas subtraída, resultando no estado de tensão mostrado na Figura 13 (c). Este elemento está sujeito à distorção angular pura, isto é, sem nenhuma mudança de volume (BUDYNAS e NISBETT, 2012).

A energia de deformação por unidade de volume para tração simples é  $u = \frac{1}{2} \epsilon \sigma$ . Para as deformações principais temos a eq. (1):

$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (1)$$

A energia de deformação necessária à produção de mudança de volume apenas,  $u_v$ , pode ser obtida por substituição de  $\sigma_{av}$  no lugar de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ , conforme eq. (2):

$$u_v = \frac{3\sigma_{av}^2}{2E} (1 - 2\nu) \quad (2)$$

A energia de distorção é obtida através da subtração de equações, conforme eq. (3):

$$u_d = u - u_v = \frac{1+\nu}{3E} \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] \quad (3)$$

Para o ensaio simples de tração, quando do escoamento,  $\sigma_1 = S_y$  e  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ; assim a energia de distorção resulta na eq. (4):

$$u_d = \frac{1+\nu}{3E} S_y^2 \quad (4)$$

$S_y$  = resistência ao escoamento.

Portanto, para o estado geral de tensões dada pela eq. (3), o escoamento é predito se a eq. (3) iguala ou excede a eq. (4). Assim, temos:

$$\left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \geq S_y \quad (5)$$

Em um caso simples de tração  $\sigma$ , o escoamento ocorreria quando  $\sigma \geq S_y$ . Assim, a parte esquerda da eq. (5) pode ser pensada como uma tensão única, equivalente ou efetiva para o estado geral de tensão completo dado por meio de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ . Essa tensão efetiva é usualmente chamada de tensão de von Mises,  $\sigma'$ . Assim, para escoamento a eq. (5) pode ser escrita como:

$$\sigma' \geq S_y \quad (6)$$

Em que a tensão de von Mises é representada pela eq. (7):

$$\sigma' = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

### 3 METODOLOGIA

Nesse capítulo será apresentado a metodologia utilizada no desenvolvimento desse trabalho, no qual será composta pela análise de um defeito estrutural de uma máquina de pátio de estocagem de minério de ferro, localizado no sudeste do estado do Pará, e ainda será detalhado o processo de solução para tal defeito. A máquina de pátio é uma recuperadora/retomadora de material granular, conforme Figura 14, tipo *reclaimer* ou retomadora de roda de caçamba.

**Figura 14. Recuperadora de minério.**



Fonte: Autoria própria.

**Tabela 9. Dados da recuperadora**

Dados gerais	
<b>Equipamento</b>	Recuperadora tipo roda de caçambas
<b>Fabricante</b>	Dailian Huarui Heavy Industry Group CO.,LTD.
<b>Modelo</b>	QLK11000.50
<b>Capacidade nominal</b>	8.000t/h

Fonte:

A Figura 15 mostra o truque do sistema de giro da recuperadora de minério. A partir de inspeções na mesa giratória do equipamento, notou-se desgaste prematuro dos trilhos sobre os quais os truques, composto por rodas, deslocam-se para girar o equipamento.

**Figura 15. Truque do sistema de giro e desgaste no trilho do sistema.**

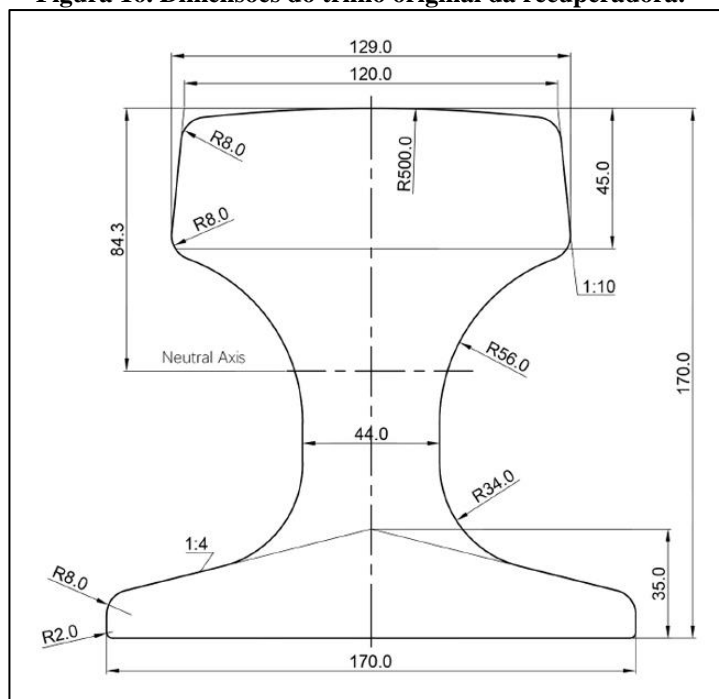


Fonte: Autoria própria.

Utilizando a metodologia de Análise de Falhas Aplicada (AFA) nos trilhos, verificou-se problemas nas superfícies dos mesmos, tais problemas são ocasionados pelo fato dos trilhos não suportarem o peso do equipamento devido a incorreções no dimensionamento. As problemáticas encontradas pela análise são:

1. Os trilhos usados no equipamento não foram projetados para recuperadora/retomadora de minério de ferro: o perfil utilizado pelo fabricante do equipamento, de padrão chinês, é o QU120 composto pelo material U71Mn e de acordo com a norma YB / T 5055 (2014) esse tipo de trilho é utilizado em guindastes e pontes rolantes, conforme Figura 16 e a Tabela 10, pode-se verificar características desse tipo de trilho.

**Figura 16. Dimensões do trilho original da recuperadora.**



Fonte: <https://portuguese.alibaba.com>

**Tabela 10. Dados do trilho original do equipamento.**

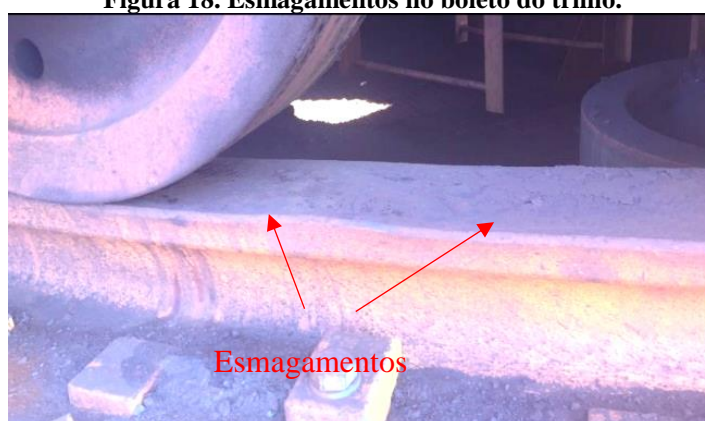
U71Mn	Propriedades mecânicas				Composição química				
	Tensão de escoamento	Resistência à tração	Alongamento	Dureza	C	Si	Mn	S	P
	min	Min	min	HB				≤	≤
510 Mpa	880 Mpa	≥9	≤ 260	0.65-0.76	0.15-0.35	1.1-1.40	0.04	0.04	

Fonte: AGICO GROUP.

Devido aos carregamentos, fator de trabalho e por serem perfis de trilhos projetados para outros tipos de equipamentos, os trilhos aplicados na mesa de giro da retomadora apresentaram falhas por esmagamento, ocasionando escoamento principalmente no boleto e alma, achatamento além de trincas em um espaço de tempo menor que 2 anos de uso, conforme registros das inspeções. O esmagamento do boleto pode ser observado nas Figuras 17 e 18.

**Figura 17. Esmagamento no boleto.**

Fonte: Autoria própria.

**Figura 18. Esmagamentos no boleto do trilho.**

Fonte: Autoria própria.

As trincas e fissuras acarretadas pelo desgaste prematuro devido a sobrecarga dos trilhos são mostradas nas Figuras 19 e 20.

**Figura 19. Fissuras sobre boleto do trilho.**



Fonte: Autoria própria.

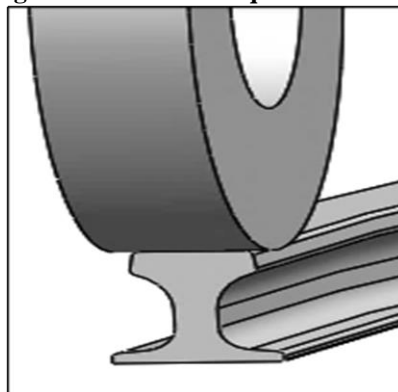
**Figura 20. Trinca sobre boleto do trilho.**



Fonte: Autoria própria.

2. Dimensões incompatíveis: largura do boleto do trilho menor que a largura da roda do truque.

**Figura 21. Largura da roda maior que boleto do trilho.**



Fonte: Autoria própria.

A Figura 21 mostra o desenho do trilho e roda. Pode-se observar uma não uniformidade entre as dimensões da roda e do trilho no contato entre as mesmas. A largura das rodas dos truques possui 160 mm, ao passo que a largura do boleto é de 120 mm. Esta diferença entre dimensões proporciona má distribuição do peso e formação de ângulo de inclinação, que pode resultar no descarrilamento do equipamento.

### 3. Falha de material: durezas incompatíveis

Conforme o manual e desenhos técnicos do equipamento, foi observado que o material das rodas dos truques apresenta dureza de 363 HB, enquanto os trilhos apresentam 260HB. Esta diferença proporciona desgaste do material de menor dureza, ou seja, os trilhos se desgastam em vez das rodas, que deveriam ser o corpo de contato a se desgastar. A Figura 22 mostra o desgaste sobre a superfície do boleto do trilho, onde é possível notar o achatamento na linha central do mesmo.

**Figura 22. Desgaste do trilho.**



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 11 apresenta as propriedades da liga ZG35CrMnSi que compõe as rodas dos truques.

**Tabela 11. Propriedades mecânica e composição química das rodas.**

ZG35CrMnSi	Propriedades mecânicas				Composição química							
	Tensão de escoamento	Resistência à tração	Alongamento	Dureza	C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Cu
	≥	≥	(%)	HB					≤	≤	≤	≤
	1275	1620	≥9	≤ 363	0.32-0.39	1.10-1.40	0.8-1.10	1.10-1.40	0.025	0.025	0.30	0.025

Fonte: YNSHANGJI.

Diante do exposto, existe a necessidade de se propor um novo trilho para compor a mesa de giro da mesma. O novo trilho deve possuir características superiores ao atual nos seguintes aspectos: apresentar geometria robusta, que proporcione menores tensões resultantes em sua estrutura, evitando pontos de menor fragilidade do corpo do trilho; ser feito em material com

composição de carbono, Si e Mn, dentre outros elementos químicos, que forneçam maiores dureza superficial, tensão de escoamento e tensão de ruptura.

Para o desenvolvimento de um perfil de trilho que atenda as exigências de trabalho e que suporte os carregamentos é fundamental a determinação das várias cargas que atuam no trilho. Desse modo, ao propor uma geometria adequada ao caso aqui estudado, primeiramente se fez necessário saber com detalhes a distribuição de tensão ao longo da seção do trilho existente (QU120) quando este se encontra submetido aos carregamentos da máquina como peso total do equipamento e mais o peso do material transportado durante a operação da mesma, além de esforços como acionamento do transportador e roda de caçambas. A seguir é apresentado a descrição do método usado para se fazer essa determinação.

### 3.1 DETERMINAÇÃO DO CARREGAMENTO SOBRE OS TRILHOS

Para analisar as cargas que atuam sobre os trilhos, foi realizado a análise de todas as massas que compõe a recuperadora de minério. Além disso, foram analisados outros tipos de carregamento que atuam sobre o trilho.

#### 3.1.1 Massa e peso do equipamento

As massas obtidas são apenas dos componentes da recuperadora que estão sobre o trilho do sistema de giro, conforme Tabela 12. As massas dos elementos estruturais foram obtidas através de desenhos técnicos e manuais das estruturas do equipamento disponibilizados pela empresa.

**Tabela 12. Massas das estruturas da recuperadora.**

<b>Estrutura</b>	<b>Massa [kg]</b>
Lança e seus componentes	218.916,9
Estrutura de giro	158.342
Cabine	2.198
Chute	28.902
Sala Superior	16.000
Sistema PIN Arranjo Geral	7.855
Brace bar	7.398
Estrutura de suspensão	16.267
Estrutura Triangular	57.326

**Tabela 13. Massas das estruturas da recuperadora.**

Peso da Barra da lança	28.903
<i>Drive unit</i>	21.443,9
Contrapeso	335.361
Massa TOTAL [kg]	962.886,9

Fonte: Autoria própria.

Peso total do equipamento é encontrado:

$$p = 962.886,9 \text{ kg} \quad (8)$$

$$p = 9,45 \times 10^6 \text{ N}$$

### 3.1.2 Peso do minério no transportador de correia da lança

O minério durante seu manuseio passa pelo transportador de correia da lança, produzindo uma força peso, conforme Figura 23. Para o cálculo dessa força resultante, Ramos (2014) propõe a eq. (9). Conforme os manuais e desenhos técnicos da recuperadora, disponibilizados pela empresa, os dados para calcular esse peso são:

$$Gm = \frac{cpt \times g \times ctr}{vc} \quad (9)$$

$$Gm = \frac{3055 \times 9,81 \times 50,25}{4,5}$$

$$Gm = 328210 \text{ N}$$

$$Gm = 32,82 \text{ kN}$$

Sendo:

$Gm$  = peso do minério no transportador (kN).

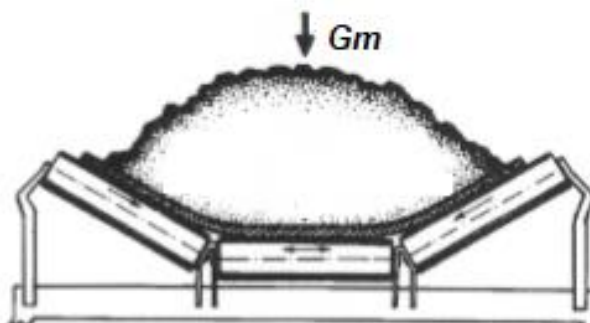
$cpt$  = capacidade de trabalho (kg/s).

$g$  = gravidade ( $\text{m/s}^2$ ).

$ctr$  = comprimento do transportador de correia (m).

$vc$  = velocidade da correia (m/s).

Figura 23. Peso do minério sobre correia

Fonte: Moura *et al.*

### 3.1.3 Peso do minério na roda de caçambas da lança

Para o cálculo do peso do minério ( $Pm$ ) que é produzido na roda de caçambas da lança, é necessário encontrar a quantidade de caçambas por hora ( $Qc$ ) que são produzidas e a massa correspondente do minério por caçamba ( $Mc$ ). Os dados para esses cálculos, como capacidade da recuperadora ( $Q$ ), número total de caçambas ( $Nc$ ), velocidade da roda ( $rpm$ ), foram retirados do manual do fabricante e dos dados cedidos pela empresa.

A eq. (10), conforme NBR 8800 (2008), é utilizada para o cálculo da quantidade de caçambas abastecidas de minério por hora, no qual:

$$Qc = rpm \times Nc \times 60 \quad (10)$$

$$Qc = 4,5 \times 11 \times 60$$

$$Qc = 2970 \text{ caçambas/h}$$

Sendo:

$Qc$  = peso do minério na roda de caçambas da lança

$rpm$  = velocidade da roda (rpm)

$Nc$  = número total de caçambas

A eq. (11), é utilizada para encontrar a massa de minério por caçamba (Ramos, 2014):

$$Mc = \frac{Q}{Qc} \times 1,5 \quad (11)$$

$$Mc = \frac{11000}{2970} \times 1,5$$

$$Mc = 5,5 \text{ t/caçamba}$$

Sendo:

$Mc$  = massa de minério por caçamba (t/caçamba).

$Q$  = capacidade da recuperadora (t/h).

$Q_c$  = peso do minério na roda de caçambas (caçambas/h).

São considerados para cálculo do peso do minério nas caçambas, conforme a ISO5049, 1/4 das caçambas cheias. Portanto, o peso produzido é calculado pela seguinte eq. (12):

$$Pm = Mc \times \frac{Nc}{4} \quad (12)$$

$$Pm = 5,55 \times \frac{11}{4}$$

$$Pm = 15,26 \text{ t}$$

$$Pm = 149,65 \text{ kN}$$

Sendo:

$Pm$  = peso do minério na roda de caçambas (kN).

### 3.1.4 Carga de escavação

Para o cálculo da força produzida durante o processo de escavação é necessário conhecer a força de escavação longitudinal e a força de escavação lateral que são produzidas durante a extração do minério. Os cálculos posteriores e da carga de escavação são calculadas conforme a NBR 8800 (2008):

Momento de elevação do material:

A eq. (13) apresenta a fórmula para encontrar o momento produzido pela elevação do material:

$$Melev = Pm \times Rex \times \cos 45^\circ \quad (13)$$

$$Melev = 15,26 \times 5,25 \times \cos 45^\circ$$

$$Melev = 42 \text{ t.m}$$

Sendo:

$Melev$  = momento de elevação do material (t.m).

$Pm$  = peso do minério na roda de caçambas (kN).

$Rex$  = raio externo da roda de caçambas (m).

A eq. (14) fornece o momento do motor da roda:

$$Mmo = 0,7162 \times \frac{Pmr}{rot} \times \eta r \quad (14)$$

$$Mmo = 0,7162 \times \frac{(400/0,7355)}{4,5} \times 0,89$$

$$Mmo = 77 \text{ t.m}$$

Sendo:

$Mmo$  = momento do motor (t.m).

$Pmr$  = potência do motor (cv).

$\eta r$  = rendimento do motor.

$rot$  = velocidade da roda (rpm).

Conforme a eq. (15) a carga de escavação pode ser encontrada de acordo com os momentos anteriormente encontrados e o raio externo:

$$Ces = \frac{(Mmo - Melev)}{Rex} \quad (15)$$

$$Ces = \frac{(77 - 42)}{5,25}$$

$$Ces = 6,67 \text{ t}$$

Sendo:

$Ces$  = carga de escavação (t).

Força escavação longitudinal:

A eq. (16) representa a força de escavação durante o processo de recuperação de minério:

$$Fes = Ces \times 1000 \times g \quad (16)$$

$$Fes = 6,67 \times 1000 \times 9,81$$

$$Fes = 65,43 \text{ kN}$$

$Fes$  = Força de escavação (kN).

$Ces$  = carga de escavação (t).

$g$  = gravidade ( $m/s^2$ ).

Força de escavação lateral:

A eq. (17) representa a força de escavação lateral durante a recuperação de minério:

$$Fl = Fes \times 0,707 \quad (17)$$

$$Fl = 65,43 \times 0,707$$

$$Fl = 46,26 \text{ kN}$$

Sendo:

$Fl$  = Força de escavação lateral (kN).

$Fes$  = Força de escavação (kN).

### 3.1.5 Força de tração no acionamento da correia

Conforme ASSESSOTEC (2019), a eq. (19) fornece a força de tração ( $Ft$ ) no acionamento da correia. Para encontrar as variáveis da eq. (19), os cálculos posteriores foram necessários.

$$Ft = [(Gm + Gb + Gr) \times C] + Fad \quad (19)$$

Sendo:

$Gm$  = Peso do minério no transportador (kN).

$Gb$  = Peso da correia transportadora (kN). Para encontrar o peso da correia a eq. (20) é utilizada:

$$Gb = mc \times g \quad (20)$$

$$Gb = 2300 \times 9,81$$

$$Gb = 22,56 \text{ kN}$$

Onde:  $mc$  = massa da correia (kg),  $g$  = gravidade ( $m/s^2$ ).

A eq. (21) é utilizada para encontrar o peso do apoio das correias (rolete).

$$Gr = mr \times g \quad (21)$$

$$Gr = 97 \times 9,81 \times 40$$

$$Gr = 38 \text{ kN}$$

Onde:

$Gr$  = peso do rolete (kN),  $mr$  = massa do rolete (kg).

O coeficiente utilizado no cálculo da força de tração do acionamento deve ser para correia apoiada sobre roletes, conforme a Tabela 13.

**Tabela 14. Coeficiente para correia**

Compr. (m)	Até 5	5-15	30-60	60-90	90-120	120-150
C	0,13	0,12	0,055	0,045	0,035	0,032

Fonte: ASSESSOTEC (2019).

Como observado na Tabela 13, o coeficiente deve ser  $(C) = 0,055$ , pois a correia tem 50 m de comprimento.

As forças resistentes de outros componentes da correia transportador é dado pela eq. (22), para encontrar essas forças as equações:

$$F_{ad} = F_{ra} + F_{tp} \quad (22)$$

Onde:  $F_{ad}$  = Forças adicionais

$F_{ra}$  é a força para vencer os atritos no raspador calculado de acordo com a eq. (23):

$$F_{ra} = 1,4 \times B \quad (23)$$

$$F_{ra} = 1,4 \times 70,86$$

$$F_{ra} = 99,2 \text{ kgf}$$

$$F_{ra} = 972,92 \text{ N}$$

Onde: B é a Largura da correia em polegadas  $(B) = 1,8 \text{ m} = 70,86 \text{ pol.}$

$F_{tp}$  é a Força de acionamento do tambor *tripper*, que dependendo da largura da correia pode assumir os seguintes valores de acordo com Tabela 14.

**Tabela 15. Força de acionamento do tambor**

Larg. correia (pol)	16	20	24	42	54	72
$F_{tp}$ (kgf)	22,7	37,7	49,8	72,5	81,5	95,3

Fonte: ASSESSOTEC (2019).

Para efeito de cálculo, considerou-se a largura da correia de 72 polegadas, conforme Tabela 14.

Portanto:

$$F_{tp} = 95,3 \text{ kgf}$$

$$F_{tp} = 934,57 \text{ N}$$

Com visto antes, a somatória das forças adicionais corresponde a somatória da força para vencer os atritos no raspador e a força de acionamento do tambor *tripper*:

$$F_{ad} = F_{ra} + F_{tp}$$

$$F_{ad} = 972,92 + 934,57$$

$$F_{ad} = 1,9 \text{ kN}$$

Portanto, a força de tração no acionamento ( $F_t$ ) é igual:

$$Ft = [(Gm + Gb + Gr) \times C] + Fad$$

$$Ft = [(32,82kN + 22,56kN + 38 kN) \times 0,055] + 1,9 kN$$

$$Ft = 7 kN$$

### 3.1.6 Incrustação na roda

Conforme CEMEF (2018), é necessário considerar uma espessura de incrustação de 50 mm de minério na roda de caçamba do equipamento. A eq. (24) representa o cálculo da incrustação na roda. A incrustação é ocasionada pelo acúmulo de minério nas paredes da roda de caçambas.

$$Inc = \pi \times r^2 \times e \times \rho \times g \quad (24)$$

$$Inc = \pi \times 5,25^2 \times 0,05 \times 2500 \times 9,81$$

$$Inc = 106 kN$$

Sendo:

*Inc* = incrustação

*r* = Raio externo da roda de caçamba (m)

*e* = Espessura de incrustação na roda de caçamba (m)

$\rho$  = densidade do material ( $kg/m^3$ )

*g* = gravidade

### 3.1.7 Carga por roda

A Tabela 15 apresenta os carregamentos atuantes sobre os trilhos da mesa de giro.

**Tabela 16. Carregamentos sobre o trilho.**

<b>Cargas sobre o trilho</b>	
1. Peso do equipamento	9,45 x 10 <sup>6</sup> N
2. Peso do minério no transportador de correia da lança	32,82 kN
3. Peso do minério na roda	149,65 kN
4. Carga de escavação	111,7 kN
5. Força de tração de acionamento	7 kN
6. Incrustação na roda	106 kN
<b>TOTAL</b>	<b>9,86 x 10<sup>6</sup> N</b>

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 16 apresenta informações dimensionais e estruturais sobre a mesa giratória.

**Tabela 17. Dados da mesa giratória.**

<b>Mesa giratória</b>	
Ângulo de rotação à direita do trilho	162,3°
Diâmetro da mesa	9.000mm
Quantidade de rodas	16unidades
Diâmetro das rodas	800mm

Fonte: Autoria própria.

A mesa giratória é composta por 4 truques, cada um contém 4 rodas. Com isso, o total de rodas girantes sobre o trilho são 16. A carga por roda é calculada dividindo-se a carga total sobre o trilho pela quantidade de rodas. Dessa forma a carga por roda encontrada é de 616,25E+03N.

### 3.2 SIMULAÇÃO ESTRUTURAL ESTÁTICA DO TRILHO ORIGINAL E RODA

Utilizando-se o *software Ansys*, as etapas de pré-processamento, solução e pós-processamento da simulação foram realizadas na estrutura do trilho original QU120 e da roda

#### 3.2.1 Simulação estrutural estática em 3D

##### 3.2.1.1 Pré-processamento

##### 3.2.1.1.1 Geração de geometria

O conjunto roda e trilho foram desenhados no *software CAD SolidWorks*, levando em consideração as dimensões fornecidas pelo manual do fabricante. O trilho possui comprimento de aproximadamente 12 m e as rodas estão separadas umas das outras por uma distância entre centros de 1.800 mm, conforme demonstrado na Figura 24.

**Figura 24. Modelo trilho-roda 3D**

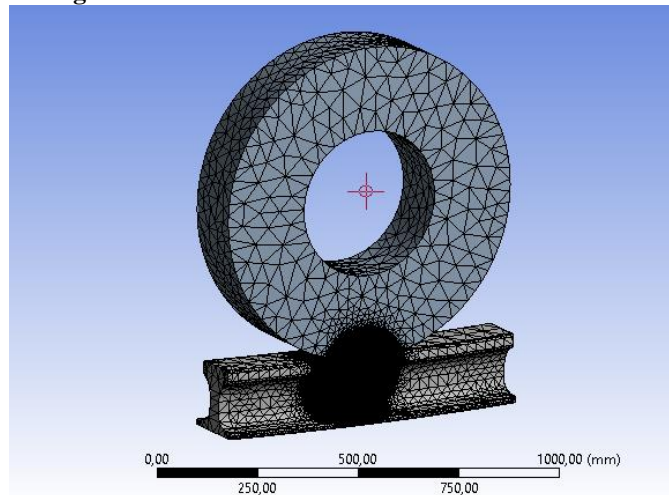


Fonte: Autoria própria.

### 3.2.1.1.2 Geração da malha de elemento finitos para roda-trilho

Com intuito de simplificar a simulação e diminuir o custo computacional, foram consideradas apenas interações entre parte do trilho e uma roda de um truque. Os elementos de malha utilizados para gerar a malha são hexaédricos e prismáticos, conforme Figura 25.

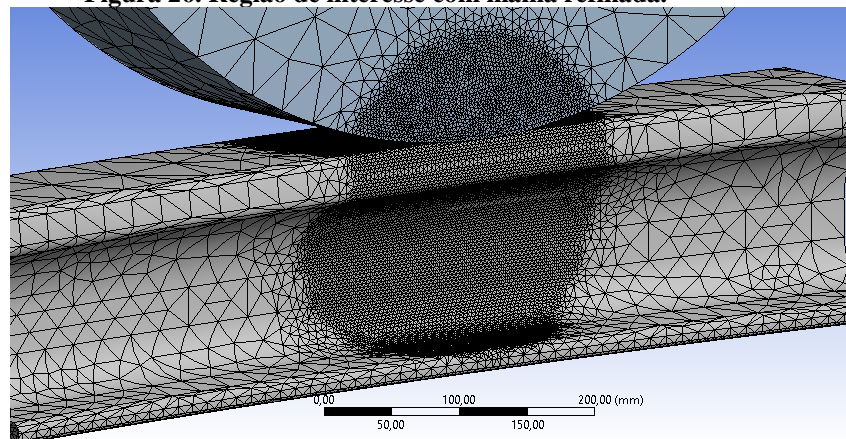
**Figura 25. Malha numérica do modelo 3D**



Fonte: Autoria própria.

Como o interesse desse trabalho é avaliar o campo tensão-deformação no contato roda-trilho a região de maior refinamento corresponde ao ponto de aplicação da carga pelas rodas no trilho. Nesta região os elementos apresentam tamanho máximo de 3mm, enquanto o restante da geometria é composto por elementos de até 30mm. A Figura 26 mostra os detalhes do refinamento localizado na região de interesse do trabalho.

**Figura 26. Região de interesse com malha refinada.**



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.1.1.3 Material e propriedades mecânicas

As propriedades do material do conjunto adicionados no *software* para simulação são apresentados na Tabela 17.

**Tabela 18. Propriedades mecânicas**

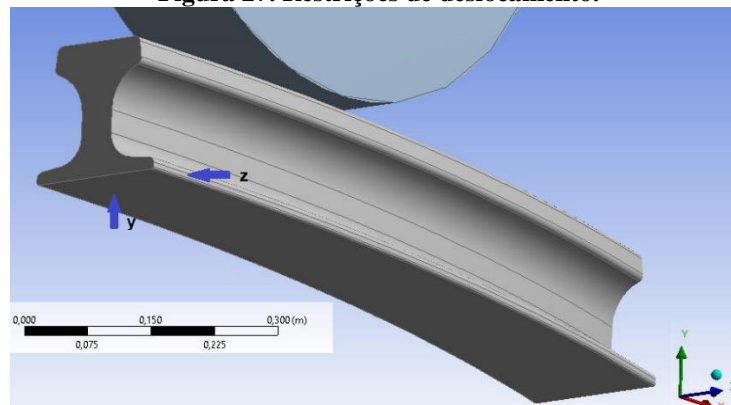
Componente	Material	Tensão de escoamento	Resistência à tração	Módulo de elasticidade	Dureza
Trilho	U71Mn	510 Mpa	880 Mpa	200GPa	$\leq 260$
Roda	ZG35CrMnSi	1.275Mpa	1.620 Mpa	191GPa	$\leq 363$

Fonte: AGICO GROUP e YNSHANGJI.

### 3.2.1.1.4 Condições de contorno

As restrições de deslocamentos foram aplicadas sobre a parte inferior do trilho (base), restringindo o deslocamento do mesmo para a direção y, e na direção z onde estão os elementos de fixação do trilho. Conforme Figura 27, pode-se visualizar as direções de restrições.

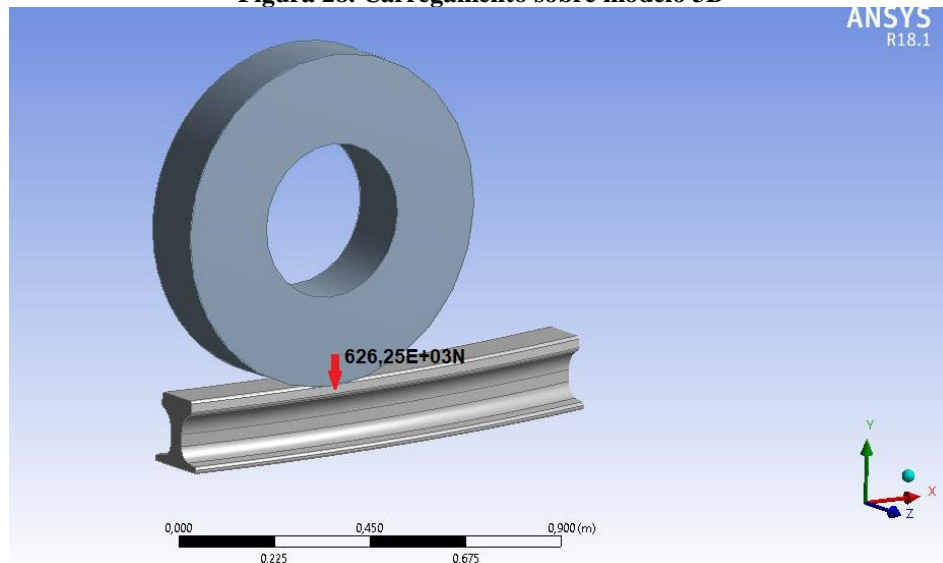
**Figura 27. Restrições de deslocamento.**



Fonte: Autoria própria

A carga é aplicada pela roda sobre o trilho, a carga total sobre o trilho foi de  $9,86 \times 10^6$  N. Dividindo-se essa carga por 16 rodas, que compõe o sistema de giro, tem-se  $626,25 \times 10^3$  N de carga por roda conforme Figura 28.

**Figura 28. Carregamento sobre modelo 3D**



Fonte: Autoria própria

### 3.2.1.2 Solução: convergência de malha do trilho original (QU120)

A convergência de malha é um estudo que analisa e avalia a solução e precisão do resultado em função do refinamento da malha. Para o estudo de convergência foram utilizados 6 tipos de malha com as descrições conforme a Tabela 18.

**Tabela 19. Dados utilizados para a convergência de malha- trilho QU 120**

Malha	Refinamento contato	Refinamento contorno	Nº de nós	Nº de Elementos
1	5mm	25mm	101138	21602
2	4mm	25mm	116682	25250
3	3,5mm	25mm	221106	49134
4	3,25mm	25mm	239407	53524
5	3mm	25mm	256154	57374
6	2mm	25mm	401934	91574

Fonte: Autoria própria.

### 3.2.2 Simulação estrutural estática em 2D

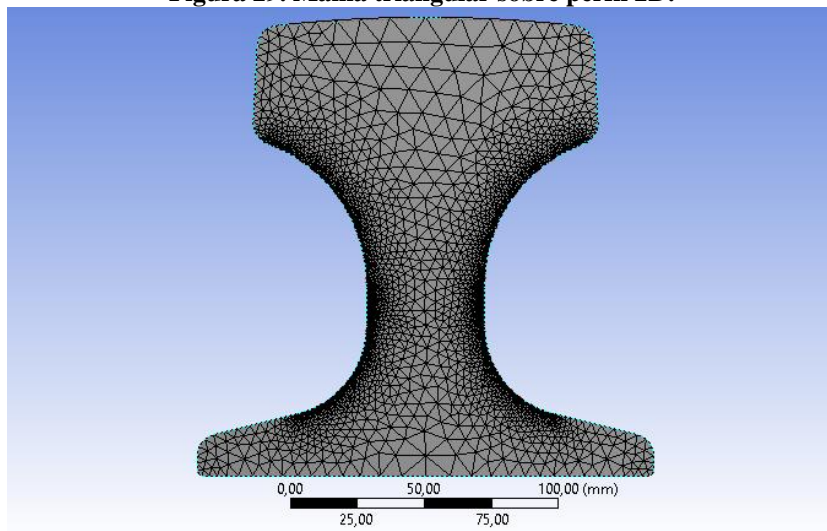
Realizou-se simulação em 2D do perfil do trilho original (QU120) para serem observados os pontos onde ocorriam as concentrações de tensões.

### 3.2.2.1 Geração de geometria e discretização de malha

Conforme as dimensões do trilho original (Figura 6) a geometria do trilho foi desenhada no *Ansys* em 2D, posteriormente realizou-se a discretização de malha.

Na discretização de malha os elementos que consistem na superfície do trilho da simulação em 2D são todos triangulares com tamanho máximo de 2,5 mm. As regiões de maior refinamento, contendo elementos de até 0,5mm, correspondem as áreas propicias de maiores tensões resultantes, como pode ser observado na Figura 29.

**Figura 29. Malha triangular sobre perfil 2D.**

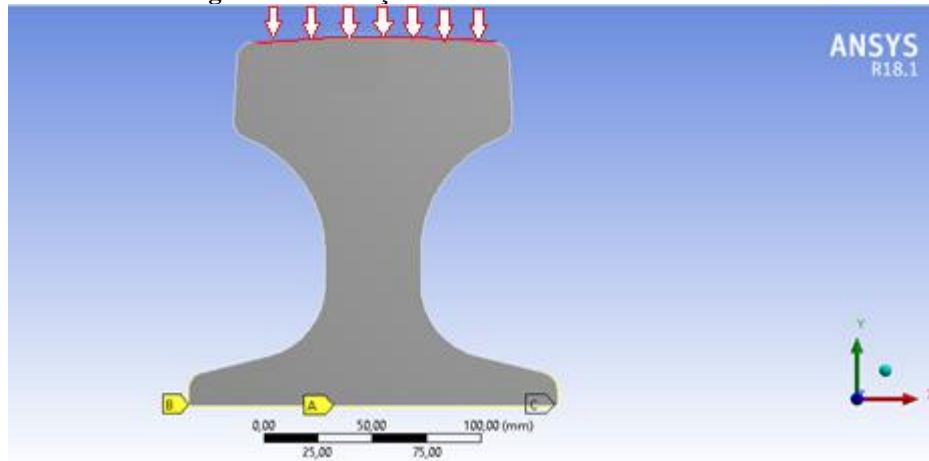


Fonte: Autoria própria

### 3.2.2.2 Condições de contorno

A carga distribuída foi aplicada sobre a linha do boleto do trilho, corresponde ao carregamento por roda de 626,623 kN. As restrições de movimentação foram aplicadas sobre a base do patim, na direção y e nas direções laterais (x). A carga e as condições de contorno podem ser visualizadas na Figura 30.

**Figura 30. Condições de contorno sobre modelo 2D**



Fonte: Autoria própria.

### 3.3 SIMULAÇÃO ESTRUTURAL ESTÁTICA DO TRILHO PROPOSTO

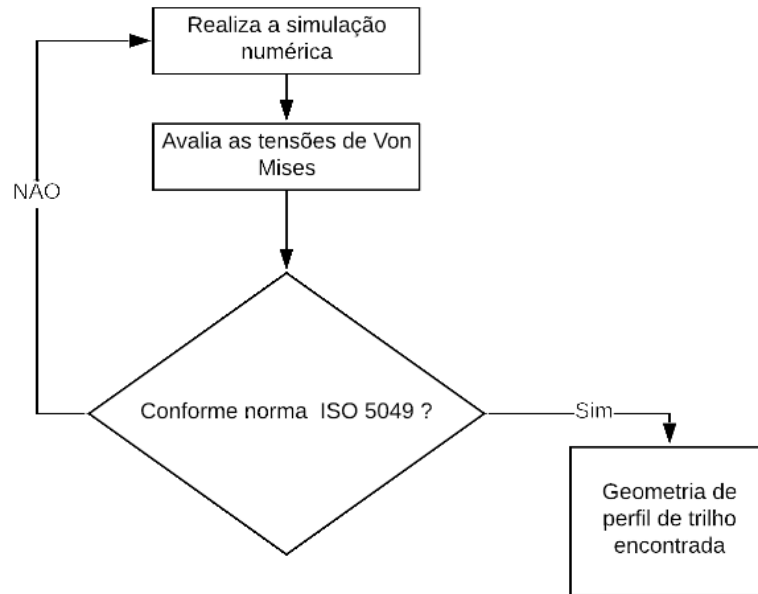
Em busca de propor um novo perfil de trilho que atenda aos carregamentos solicitados sobre a mesa de giro da máquina e se mantenha dentro dos limites de segurança exigidos pela norma ISO 5049, realizou-se simulações do perfil 2D simplificado, de forma que apenas os efeitos da geometria sejam analisados como fator de influência para as tensões resultantes. Dessa forma, primeiramente o perfil QU120 foi simulado seguindo o mesmo fluxograma de simulação descrita na Figura 31, sendo o modelo simulado em forma de superfície.

#### 3.3.1 Simulação estrutural estática em 2D

##### 3.3.1.1 Pré-processamento

###### 3.3.1.1.1 Geração da geometria: alterações no perfil

Esta etapa consiste na verificação das tensões resultantes sobre o trilho QU120 e modificações na geometria, buscando reduzir as tensões nos pontos críticos. Em resumo, simula-se o perfil; avalia-se as tensões de Von Mises, uma vez que o critério de falha adotado para materiais dúcteis foi o da máxima energia de distorção; modifica-se a geometria nos pontos ou áreas de maiores tensões e novamente o perfil é simulado; caso as tensões resultantes sejam abaixo da tensão admissível, de acordo com a norma ISO 5049, obtém-se o perfil proposto, caso contrário, continua-se conforme o fluxograma ilustrado na Figura 31.

**Figura 31. Fluxograma de simulação.**

Fonte: Autoria própria.

#### 3.3.1.1.2 Discretização de malha e condições de contorno

A discretização de malha foi realizada com as mesmas características do trilho original, no qual os elementos da simulação em 2D são triangulares e com tamanho máximo de 2,5 mm. As regiões de maior refinamento constituem as áreas de maiores tensões resultantes, conforme observado na simulação na Figura 29.

A carga distribuída de 626, 623 kN foi aplicada sobre a linha do boleto do trilho. As restrições de movimentação foram aplicadas com as características do trilho original (Figura 30).

As etapas de pós-processamento é o processo de verificação da solução e exposição dos resultados, portanto, será mostrado no tópico resultados e discussões.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES: TRILHO ORIGINAL (QU120)

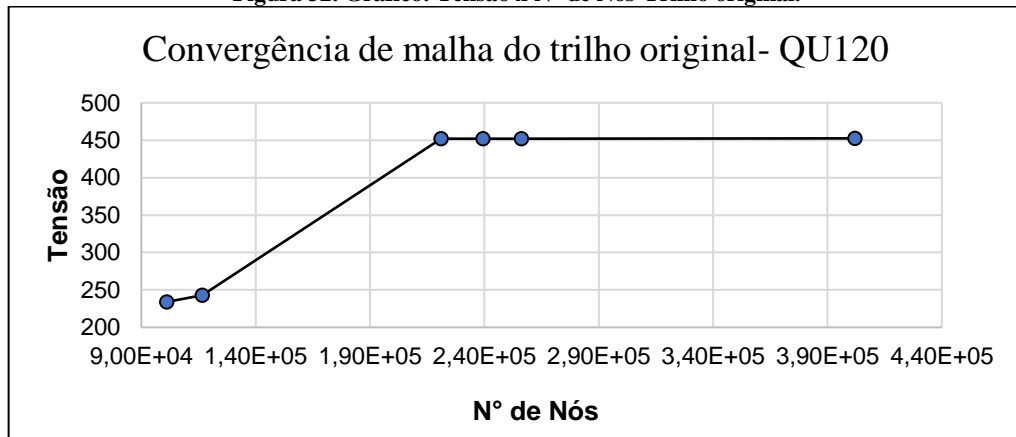
A análise de convergência de malha dos resultados foi realizada no ponto de contato da roda com o trilho, pois nesse ponto ocorre as tensões máximas resultantes dos carregamentos. Os resultados das tensões de Von Mises, deformações e os fatores de segurança das 6 malhas geradas, estão demonstradas na Tabela 19.

**Tabela 20. Resultados das malhas geradas.**

Malha	Tensão de Von Mises (MPa)	Deformação (mm)	Fator de segurança
1	234	0,152	2,09
2	243	0,1599	2,09
3	452	0,162	1,12
4	452	0,1619	1,12
5	452	0,162	1,12
6	452,5	0,161	1,127

A malha 1 com cerca de cem mil elementos apresentou a menor tensão de 234 MPa. Conforme ocorreu o refinamento da malha as tensões de Von Mises foram aumentando até o valor de 452 MPa (a partir da malha 3), em que o número de nós alcançou cerca de 220 mil. Conforme Figura 32, a partir desse ponto observa-se que a variação da tensão de Von Mises pouco depende do aumento do número de nós. Portanto, não se justifica utilizar uma malha mais refinada do que a malha 3, pois demandaria maior poder computacional e tempo de solução.

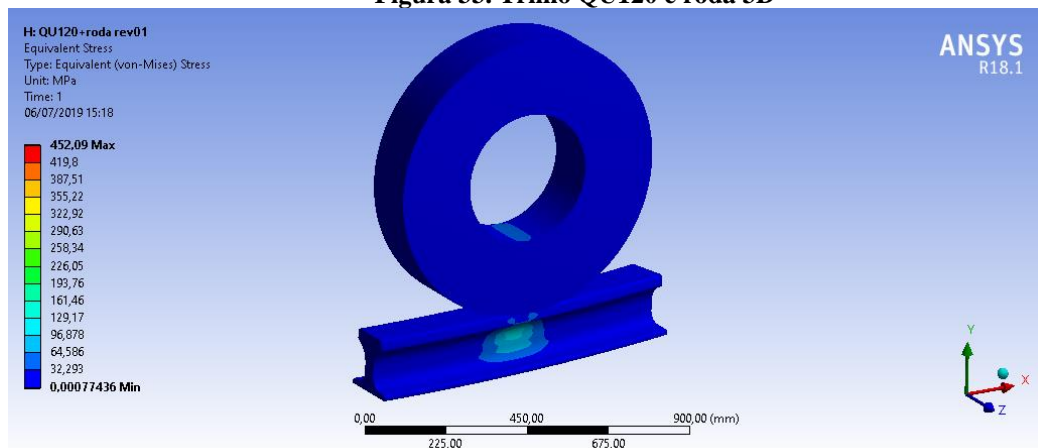
**Figura 32. Gráfico: Tensão x N° de Nós-Trilho original.**



Fonte: Autoria própria.

Conforme perfil, material e características do trilho original (QU120) do equipamento, as simulações 3D foram imputadas e obtiveram os seguintes resultados: o trilho QU120 apresentou máxima tensão de 452 MPa, e fator de segurança de 1,12 sendo inferior ao que a norma ISO 5049 solicita ( $\geq 1,5$ ). A Figura 33 apresenta as tensões do contato entre roda e trilho.

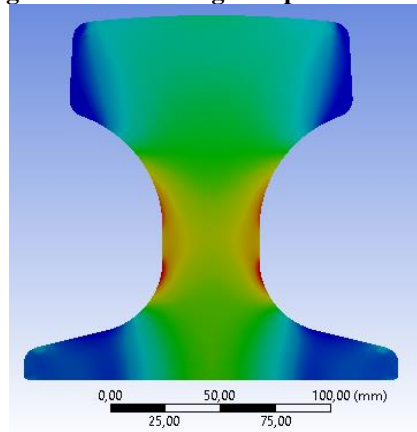
**Figura 33. Trilho QU120 e roda 3D**



Fonte: Autoria própria.

De acordo com a simulação em 2D do trilho QU120, observa-se que os pontos críticos devido os carregamentos sobre o trilho estão na alma, conforme constatado na Figura 34.

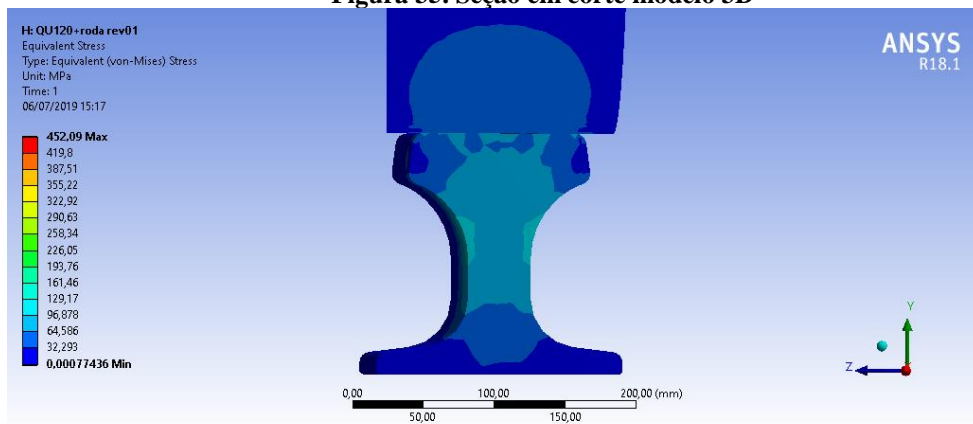
**Figura 34. Trilho original- pontos críticos.**



Fonte: Autoria própria.

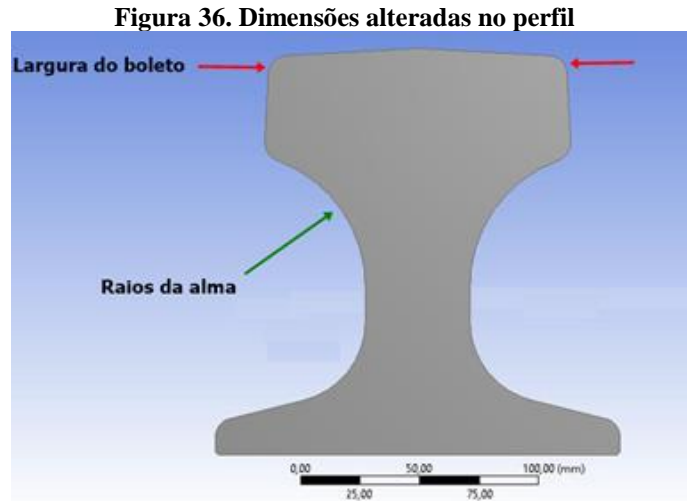
Analisando as tensões ao longo da seção em corte do perfil QU120 (Figura 35) abaixo do ponto de aplicação do carregamento pela roda, observa-se que as maiores tensões estão localizadas sobre as regiões acima dos raios superiores da alma, estando de acordo com o resultado das simulações em 2D.

**Figura 35. Seção em corte modelo 3D**



Fonte: Autoria própria

Para encontrar um novo perfil de trilho com maior resistência, foram realizadas alterações nas dimensões do perfil original nos raios superiores da alma do trilho, onde se encontram maiores tensões, e na largura do boleto para ser adequar ao comprimento das rodas dos truques. A Figura 36 identifica as regiões do trilho QU120 que tiveram suas dimensões adaptadas, lembrando que altura total do trilho e largura do patim foram mantidas constantes.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES: TRILHO PROPOSTO

Conforme fluxograma apresentado na Figura 29, a geometria do perfil original foi modificada nas regiões que apresentam maiores tensões. A Tabela 21 apresenta as simulações em 2D, do trilho original (Perfil A) e do trilho proposto (Perfil B) com a geometria que dentre as modificações propostas, melhor se adequou ao nível de tensão e fator de segurança conforme ISO5049.

**Tabela 21. Perfis versus máxima tensão**

Perfil	Trilho	Tensão de Von Mises (MPa)	Fator de segurança
A		374	1,36
B		153,54	5

Fonte: Autoria própria

As primeiras modificações no perfil foram: o ajuste da largura do boleto de 120mm para 170mm, largura da alma e as dimensões dos raios superiores. Com o novo perfil definido (Perfil B), a segunda etapa foi selecionar um material, considerando-se a NBR 7590. O material foi selecionado conforme demonstrado na Figura 37.

**Figura 37. Propriedades mecânicas NBR 7590.**

Tipo de aço		Resistência à tração mínima Mpa	Alongamento mínimo %	Escoamento mínimo Mpa	Dureza Brinell HB
Aço-carbono (resistência mínima)	3	880	10	420	260 a 310
	4	980	10	510	280 a 320
Aço-liga (média resistência)	7	1 000	8	580	310 a 340
	8	1 190	10	770	340 a 370
Aço tratado (alta resistência)	10	1 200	10	840	370 a 420

Fonte: NBR 7590.

Os parâmetros que definiram a seleção do aço-liga (tipo 8) foram a resistência à tração, escoamento mínimo e principalmente a dureza Brinell, uma vez que as rodas dos truques apresentam dureza máxima de 363HB e do trilho deve ser superior a isso. Além das propriedades mecânicas, as composições químicas também devem estar de acordo com o grau do aço, conforme Figura 38.

**Figura 38. Composição química segundo NBR 7590.**

Composição química %		Aço-carbono		Aço-liga		
		3	4	7	8	10
Carbono	Máxima	0,80	0,82	0,80	0,92	0,92
	Mínima	0,60	0,72	0,70	0,72	0,72
Manganês	Máxima	1,30	1,10	1,40	0,79	1,25
	Mínima	0,80	0,80	1,00	0,60	1,11
Silício	Máxima	0,50	0,60	1,00	0,60	0,60
	Mínima	0,10	0,10	0,60	0,10	0,10
Fósforo	Máxima	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Enxofre	Máxima	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Níquel	Máxima	–	–	–	0,15	0,15
Cromo	Máxima	0,15	0,15	0,40	0,70	0,70
	Mínima	–	–	0,15	0,15	0,15
Molibdênio	Máxima	–	–	–	0,05	0,05
Vanádio	Máxima	–	–	–	0,01	0,01
Nióbio	Máxima	–	–	0,05	–	–
	Mínima	–	–	0,02	–	–

Fonte: NBR7590

Com base nas especificações da norma NBR 7590, as propriedades mecânicas e a composição química do trilho proposto devem conter as faixas e valores, conforme Tabela 21.

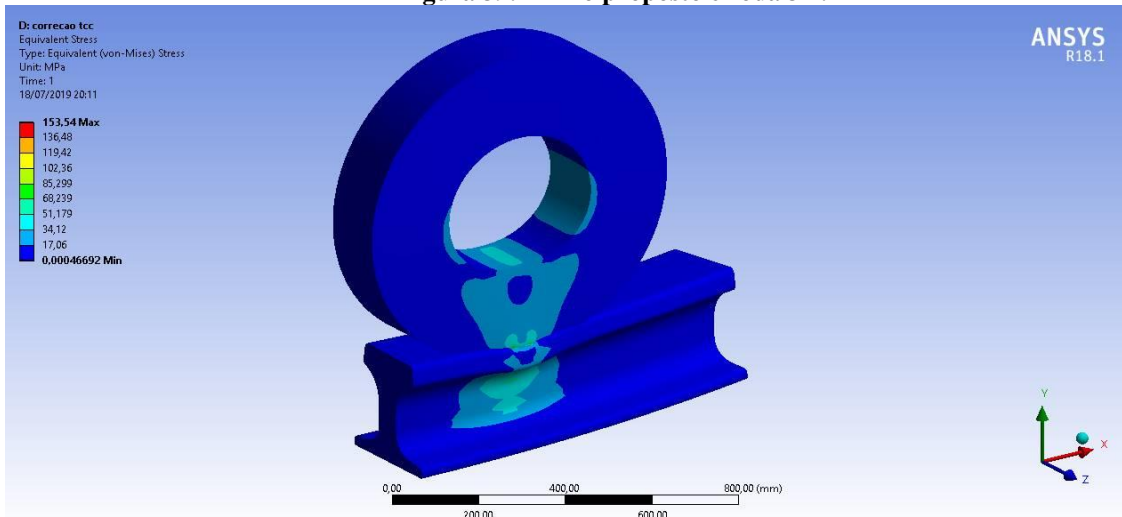
Tabela 22. Propriedades mecânicas e composições químicas do material do trilho proposto.

Trilho proposto	Propriedades mecânicas				Composição química						
	Tensão de escoamento	Resistência à tração	Alongamento	Dureza	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr
	Min	Min	min	HB							
	770Mpa	1190 Mpa	10	34 a 370	0,72- 0,92	0,10- 0,60	0,60- 0,79	0,02	0,02	0,15	0,15- 0,70

Fonte: NBR 7590(2012).

Por sua vez, na Figura 39 observa-se a considerável redução da tensão sobre o trilho, comparado com o trilho original do equipamento (cerca de 66%), apresentando máxima tensão de 153,54MPa e fator de segurança de 5. Essas diferenças de tensões são devido ao fato da mudança de geometria e das propriedades do material do trilho proposto.

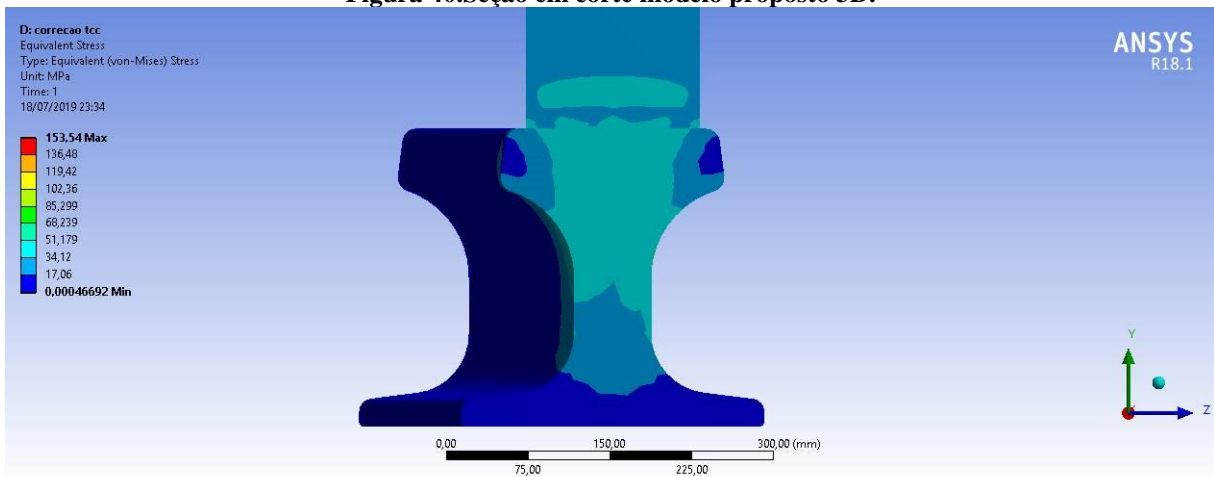
Figura 39. Trilho proposto e roda 3D.



Fonte: Autoria própria.

Por sua vez, na Figura 40 observa-se que as tensões anteriormente localizadas sobre os raios superiores da alma não estão presentes no novo perfil, neste as maiores tensões atuam na área do boleto e parte da alma. Com isso, as máximas tensões são distribuídas em áreas maiores, evitando o aparecimento de zonas de elevadas tensões.

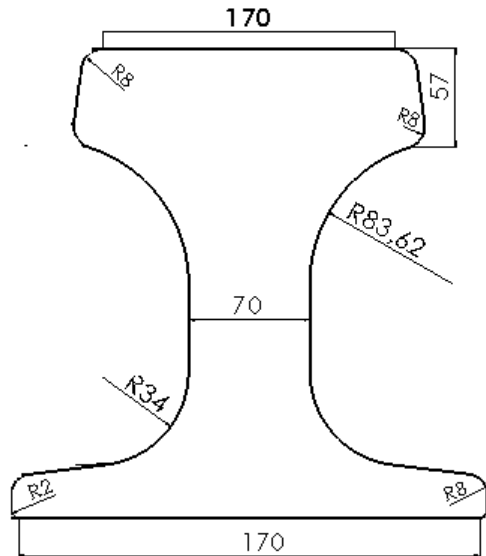
**Figura 40. Seção em corte modelo proposto 3D.**



Fonte: Autoria própria

Através dos resultados das simulações em 2D e 3D do trilho original QU120 e do trilho proposto, as dimensões de um perfil de trilho que suporte aos carregamentos com o mínimo efeito de esmagamentos e achatamentos em sua estrutura são sugeridas conforme Figura 41.

**Figura 41. Proposta das dimensões do novo trilho.**



Fonte: Autoria própria.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

O problema evidenciado neste trabalho foi resultado de falhas de projeto do equipamento. A primeira por erro de dimensionamento do perfil do trilho, onde a largura do mesmo não era compatível com a largura das rodas dos truques da mesa de giro; segundo pela não compatibilidade entre propriedades mecânicas entre roda e trilho, principalmente a dureza Brinell, onde foi constatado que a dureza do trilho é inferior a dureza das rodas, proporcionando desgaste excessivo, além de os limites de escoamento e resistência à tração proporcionarem fator de segurança abaixo de 1.5, permitindo deformações plásticas e trincas na alma e boleto em menos de 2 anos de operação.

A forma do trilho foi adequada para as condições de carregamento e dimensões da mesa de giro, onde foram alterados os raios entre boleto e alma, largura da alma e largura do boleto, as demais dimensões foram mantidas constantes. As modificações promoveram a redução das regiões de elevadas tensões sobre as áreas com curvaturas, com isso a tensão máxima anteriormente de 374MPa no trilho QU120 foi reduzida para 153,54MPa no perfil proposto, conforme simulações em 2D.

A próxima etapa foi propor o material deste novo trilho de acordo com a norma NBR 7590, apresentando composição química e propriedades mecânicas dentro das exigências operacionais. O material selecionado foi um aço-liga de grau 8, que dentre outras, possui dureza Brinell máxima de 370 e tensão de escoamento de 770MPa. Com isso, as simulações do modelo 3D mostraram a redução de aproximadamente 66% da máxima tensão de Von Mises e assim elevação do coeficiente de segurança para 5. Portanto, conclui-se que o material e perfil propostos encontram-se dentro de condições de propriedades mecânicas e dimensionais para a aplicação para o qual foram propostos.

### 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo metalográficos dos trilhos;
- Análise de custo do material proposto do trilho;
- Simulação considerando as castanhas (fixações) dos trilhos,
- Análise e comparação de carga descentralizada e centralizada sobre os trilhos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGICO GROUP. **Trilho padrão chinês YB/T5055-93 QU70 do guindaste, QU80, QU100, QU120 com o U71Mn em 12m.** Disponível em : <<http://www.railroadpart.com/rail-track-parts/steel-rails.html>>. Acessado em: 17 de junho de 2019.
- ALIBABA. **Trilho de aço ferroviário.** Disponível: < <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/china-steel-rail-asce-60-lbs-rail-60781708214.html>>. Acesso em: 29 de junho de 2019.
- ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: A base da tecnologia CAE.** São Paulo: Editora Érica. 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade.** Rio de Janeiro, p. 3. 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7590: Trilho Vignole-Requisitos.** Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.** Rio de Janeiro. 2008.
- AZEVEDO, A.F.M. **Método dos elementos finitos.** 1ª Edição. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. 2003.
- AZEVEDO, D.F.O. **Análise Estrutural.** Agosto de 2015. Disponível: <<http://www.domingosdeazevedo.com/mef/per/per2>>. Acesso em: 14 de junho de 2019.
- BRANCO FILHO, G. **Dicionário de termos de manutenção e Confiabilidade.** Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2000.
- BRANCO FILHO, G. **A Organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção.** 1ª ed., Editora Ciência Moderna Ltda, 2008.
- BUDYNAS, R.G., NISBETT, J.K. **Elementos de Máquinas de Shigley.** 8ª ed., São Paulo: AMGH Editora Ltda, 2011.
- CHIAVERINI, V., **Aços e ferros fundidos.** 7ª ed., São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), 2008.
- DIAS, S.O. **Aplicação de ferramenta FMEA para análise de falhas de uma máquina empilhadeira/recuperadora.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí. Tucuruí, Pará, 2018.
- DNIT. **PIM - Procedimento de inspeção de material.** 2015. Disponível: <<http://www.dnit.gov.br/download/ferrovias/consulta-publica/101-pim-trilho.pdf>>. Acesso em: 29 de junho de 2019.
- FARIA, P.H.L. **Estudos de confiabilidade de manutenção em sistemas de expedição de produtos de mineração.** 2014. 102 f. Tese (Pós-Graduação em Engenharia de Produção) -

Faculdade de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

FAGAN, M. J. *Finite Element Analysis – Theory and Practice*. USA, 1992.

FEVEREIRO, J.L. **Como calcular a potência do motor e selecionar o redutor no acionamento de máquinas e equipamentos**. ASSESSOTEC, São Paulo.

FOGAL, M.L.F. **Métodos de elementos finitos aplicado em análise estrutural estática**. Relatório de estágio, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo.2002.

GARCIA, A., SPIM, J.A., SANTOS, C.A. **Ensaio dos Materiais**.2ª ed., Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 2012.

GOLDSTEIN, A. **Brazilian Privatization in International Perspective: The Rocky Path from State Capitalism to Regulatory Capitalism**. *Industrial and Corporate Change*, Vol. 8, No. 4, December 1999.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 5ª. Ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

KARDEC, A., NASCIF, J. **Manutenção - Função Estratégica**. 3ª ed., Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda, 2009.

MARTHA. L. F., **Métodos Básicos da Análise de Estruturas**.2010. Disponível em <[http://coral.ufsm.br/decc/ECC1002/Downloads/ Cap\\_1\\_Introducao](http://coral.ufsm.br/decc/ECC1002/Downloads/ Cap_1_Introducao)>. Acessado em: 05 de julho de 2019.

MARQUES, L.; SILVA, L. S.; REBELO, C. **Métodos Avançados de Análise por Elementos Finitos para Verificação da Estabilidade de Estruturas Metálicas**. VII Congresso de Construção Metálica e Mista de Coimbra, 19 e 20 nov. 2009.

MEIRELES, F.B. **Análise dinâmica de estruturas por modelos de elementos finitos identificados experimentalmente**.2007. Tese de doutorado (Engenharia mecânica, área de mecânica dos materiais). Universidade do Minho, Portugal.

MORO, N., AURAS, A.P. **Introdução à gestão da manutenção**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Gerência Educacional de Metal Mecânica, Curso Técnico de Mecânica Industrial. Florianópolis, Santa Catarina. 2007.

Norma ISO 5049-1 – **Mobile equipment for continuous handling of bulk materials - Part 1: Rules for the design of steel structures**, 1994.

OLIVEIRA, M. A. **Sistema de gestão da manutenção baseada no grau de maturidade da organização no âmbito da manutenção**.2017. Tese de Doutorado (Engenharia Industrial e Sistemas) - Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal.

OLIVEIRA, M.L. **Análise comparativa de dois conceitos de travessas para chassis de semirreboques carga seca para transportes de bobinas**. Trabalho de Conclusão de Curso da disciplina Estágio II. Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, 2013.

PEREIRA, M.J., **Engenharia de Manutenção- Teoria e Prática**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2011.

PORTO, T.G. **PTR 2501- Ferrovias**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. 2004.

RAMOS, I.C.J. **Análise de causas de trincas em carro de translação de empilhadeira/recuperadora**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual Paulista, Campus Universitário de Guaratinguetá. Guaratinguetá, 2014.

SHANGHAI, L.S. **Processo de soldagem do trilho de guindaste U71Mn**. Indústria Pesada (Grupo) Co., Ltd. Xangai ,2013.

SEBRAE. **Manual de Ferramentas da Qualidade** .2005 [cited 2011 Sept]

SOUZA, J. B. **Alinhamento das estratégias do Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) com as finalidades e função do Planejamento e Controle da Produção (PCP): Uma abordagem Analítica**.2008.169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. Ponta Grossa.

TERNER, G.L.K. **Avaliação da aplicação dos métodos de análise e solução de problemas em uma empresa metal-mecânica**. Porto Alegre, 2008. 33-55p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VIANA, HEBERT R. G. **Planejamento e Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro: Qualitymark, Ed. 2002.

WILLIAMS, Richard L. **“Como Implantar a Qualidade Total na sua Empresa”**. 1ª edição, Rio de Janeiro Ed.: Campus, 1995.

YNSHANGJI. **Liga de aço estrutural 35CrMnSi aço composto**. Disponível em :  
<<http://www.ynshangji.com/c3000000231251508/>> Acessado em :16 de junho de 2019.