

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA - COEME
ENGENHARIA MECÂNICA**

ANDRÉ LUIZ DA SILVA BOSA

**ANÁLISE ESTRUTURAL DO CHASSI DE UM TRANSBORDO
CANAVIEIRO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2017

ANDRE LUIZ DA SILVA BOSA

**ANÁLISE ESTRUTURAL DO CHASSI DE UM TRANSBORDO
CANAVIEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado a disciplina de TCC 2, do curso superior de Engenharia mecânica da coordenação de Engenharia Mecânica - COEME da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientadora: Professora Dra. Denise Alves Ramalho

GUARAPUAVA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa

Nome da Diretoria
Nome da Coordenação
Nome do Curso



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE ESTRUTURAL DO CHASSI DE UM TRANSBORDO CANAVIEIRO

por

ANDRÉ LUIZ DA SILVA BOSA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 23 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Dra. Denise Alves Ramalho
Professora Orientadora

Dr. Sergio Dalmás
Membro titular

Dra. Carla Dantas
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico esse trabalho, em primeiro lugar, a Deus, pela força e coragem durante toda esta longa caminhada. A todos os professores do curso, que foram tão importantes na minha vida acadêmica e no desenvolvimento deste trabalho. Aos meus amigos, pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas e à minha família, por sua capacidade de acreditar e investir em mim.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitário, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Agradeço a minha orientadora Profa. Dra. Denise Alves Ramalho, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de curso.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, seu corpo docente, direção e administração pela oportunidade a mim concedida.

Agradeço também a minha mãe Neide, heroína que me deu apoio e incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço.

O sucesso nasce do querer, da
determinação e persistência em se chegar
a um objetivo. Mesmo não atingindo o
alvo, quem busca e vence obstáculos, no
mínimo fará coisas admiráveis.
(ALENCAR, José, 1829-1877)

RESUMO

BOSA, André L. S. **Análise Estrutural do Chassi de um transbordo Canavieiro.** 2017. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2017.

O trabalho desenvolvido tem o intuito de analisar o mercado da cana de açúcar no Brasil, expondo um breve histórico do seu crescimento e suas principais utilizações. Aliado a isso, realizou uma introdução para análise estrutural de um transbordo canavieiro, cujo projeto foi cedido pela empresa Metalcana de Cianorte - Paraná. Nesse estudo, utilizando o referencial bibliográfico, determinaram-se as principais diferenças entre os modelos de falhas estáticas e dinâmicas (por fadiga), expondo os tipos de análise, cálculo das tensões e carregamentos contidos no sistema. Definiram-se os estágios da mecânica da fratura, explicou-se o surgimento e a propagação da trinca e expôs o tempo em que cada estágio demora para acontecer. Por fim, realizaram-se as simulações de deformação, deslocamento e distribuição de carga no chassi, analisando os resultados das mesmas, comparando-os com a necessidade operacional do equipamento e avaliando a necessidade de otimização.

Palavras-chave: Transbordo. Falha. Trinca. Esforços.

ABSTRACT

BOSA, André L. S. **Structural Analysis of a Sugarcane Wagon Chassis**. 2017. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Federal Technology University - Paraná. Guarapuava, 2017.

The purpose of this study is to analyze the sugarcane market in Brazil, showing a brief history of its development and application. Also, this paper introduces a structural analysis of a sugarcane wagon project from the company Metal Cana of Cianorte – Paraná. Using scientific data from the literature, differences between failures in static and dynamic models were determined, presenting different types of analysis, stress and loading calculations within the system. Furthermore, the stages of a mechanical fracture were defined, explanations on how a crack appears and propagates were elucidated and the time that each stage takes to occur was stated. Finally, the simulations of deformation, displacement and load distribution were carried out in the chassis, analyzing their results, comparing them with the operational need of the equipment and evaluating the need for optimization.

Keywords: Sugarcane Wagon. Cracks. Mechanical Fracture. Stress. Tension.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fotografia lateral do transbordo a ser estudado	13
Figura 2 - Projeto em CAD do transbordo	13
Figura 3 - Diagramas tensão-deformação de materiais dúcteis (a) e frágeis (b).....	14
Figura 4 - Trinca Sob Efeito de Dilatação.....	20
Figura 5 – Transbordo MCT 10500 e seus reforços na estrutura.....	26
Figura 6 – Vista isométrica do Chassi	27
Figura 7 – Sistema fixo.....	28
Figura 8 – Malha aplicada no chassi	29
Figura 9 – Resultado da análise de deformação do chassi.....	30
Figura 10 – Resultado da análise de deformação do chassi.....	31
Figura 11 – Resultado da análise da distribuição de tensão do chassi	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das propriedades dos aços	28
Tabela 2 – Dados e propriedades da malha	29

LISTA DE SIGLAS

FAC	Fadiga de Alto Ciclo
FBC	Fadiga de Baixo Ciclo
MFLE	Método da Mecânica de Fratura Linear Elástica
END	Ensaio Não Destrutivo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS GERAIS	14
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	15
1.3 MOTIVAÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 TEORIA DAS FALHAS ESTÁTICAS.....	16
2.1.1 Teoria da Energia de Distorção Para Materiais Dúcteis – Tensão de Von Mises-Hencky	16
2.1.2 Teoria da Tensão Máxima de Cisalhamento	17
2.1.3 Mecânica da Fratura	18
2.2 TEORIA DE FALHAS POR FADIGA.....	19
2.2.1 Mecanismo da Falha por Fadiga.....	19
2.2.1.1 Estágio de início da trinca	19
2.2.1.2 Estágio de propagação da trinca.....	19
2.2.1.3 Fratura	20
2.2.2 Modelos de Falha Por Fadiga	21
2.2.2.1 Método de tensão-vida.....	22
2.2.2.2 Método de deformação-vida	22
2.2.2.3 Método da mecânica de fratura linear elástica (MFLE)	22
3 METODOLOGIA	24
3.1 DELIMITAÇÃO DOS MATERIAIS.....	24
3.2 ANALISE DOS RESULTADOS	24
4 MODELAGEM MATEMÁTICA	25
5 MODELAGEM COMPUTACIONAL	27
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
6.1 DEFORMAÇÃO	30
6.2 DESLOCAMENTO.....	31
6.3 DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO.....	32
7 CONCLUSÃO	34
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	35
REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

O mercado da cana de açúcar vem crescendo exponencialmente desde o final da segunda guerra mundial. A utilização e exportação dos produtos derivados da cana, tais como açúcar e álcool, motivou a criação de usinas em todo o Brasil. O programa PROALCOOL (Programa Nacional do álcool), criado e subsidiado pelo governo em 1975, incentivou a substituição gradativa dos combustíveis veiculares derivados do petróleo por motores que funcionavam com recursos naturais, incentivando o Brasil a produzir milhares de litros de combustível para suprir a atual demanda. (SZMRECSÁNYI, 2002).

Outra alta no mercado ocorreu em 2003 com o sucesso dos veículos Flex e a atual crescente no pensamento sustentável, impulsionando novamente o surgimento de novas tecnologias no cultivo e colheita de cana de açúcar no país.

Essas crescentes no mercado obrigam as empresas responsáveis pela colheita e transporte da matéria prima a se atualizarem e manterem seus produtos e serviços sempre em alto nível, a fim de continuarem sempre no topo, garantindo eficiência e transmitindo confiabilidade para seus clientes.

O enfoco desse trabalho será a análise estrutural do chassi de um transbordo canavieiro projetado e construído pela empresa METALCANA de Cianorte – Paraná. Seu modelo é o MCT – 10500, com capacidade de carga de 10,5 toneladas e capacidade volumétrica de 26,5m³. Seu chassi é composto por longarinas em perfil Z e travessas, sendo confeccionadas com aço estrutural LN28. Essa análise visa a melhoria do projeto desse transbordo, reduzindo falhas que ocorrem em determinados componentes.

Conforme a Figura 1, temos a imagem do equipamento cedido pela empresa METALCANA:



Figura 1 - Fotografia lateral do transbordo a ser estudado
Fonte: Cedido pela empresa (2016)

Conforme Figura 2, dispomos também do projeto estrutura, cedido pela mesma, a fim de obter dimensões e disposições das peças do mesmo.

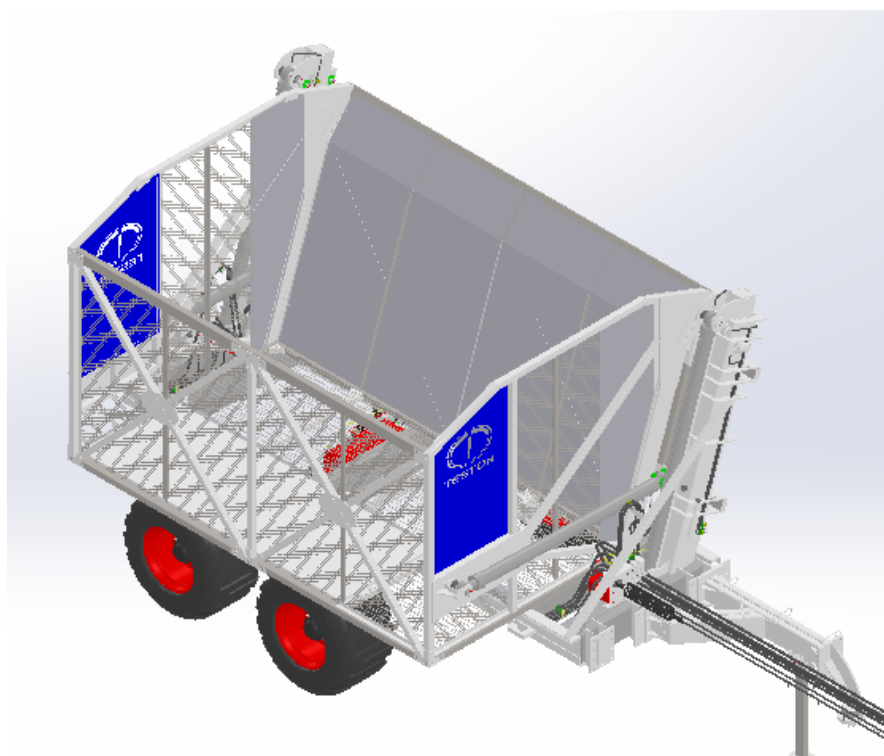


Figura 2 - Projeto em CAD do transbordo
Fonte: Cedido pela empresa (2016)

Na realização dessa análise, faz-se necessário definir o que é falha e como ela se comporta. Segundo Norton (2013), a falha ocorre quando uma peça é

submetida a condições onde suas deformações ou distorções forem grandes o suficiente para que esta não funcione adequadamente, ou quando a peça rompe-se totalmente, dividindo-se em duas ou mais partes. Essa definição é muito ampla e cada material falhará de acordo com suas características. Materiais frágeis falham sem mudanças significativas na sua forma, eventualmente são imperceptíveis macroscopicamente. Já materiais dúcteis falham depois de se deformarem elasticamente e plasticamente, podendo ser visível sua distorção. Na Figura 3, apresenta-se os diagramas de tensão-deformação de materiais dúcteis (gráfico a) e materiais frágeis (gráfico b).

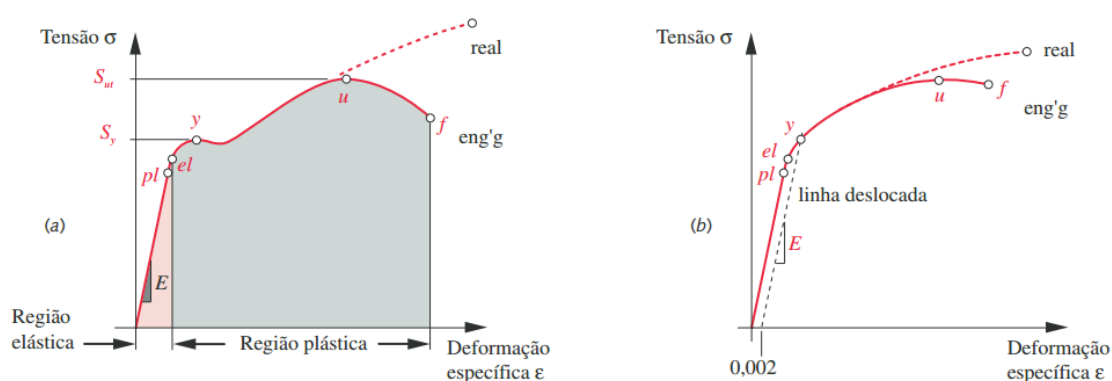


Figura 3 - Diagramas tensão-deformação de materiais dúcteis (a) e frágeis (b)
Fonte: NORTON (2013)

Nota-se que a região plástica existe quase que exclusivamente nos materiais dúcteis, reforçando o fato de que materiais frágeis falham sem aparentar deformação.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral desse trabalho é analisar e compreender o mercado da cana de açúcar no Brasil e aplicar os conhecimentos numa análise estrutural de falhas no chassi de um transbordo canavieiro, cujo modelo e projeto foram cedidos pela empresa METALCANA de Cianorte – Paraná.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Definir a distribuição de carga no chassi, analisando as consequências do carregamento na estrutura, visando apontar os locais sob maior exigência mecânica e quais são as cargas naquele local, com o intuito de considerar uma possível otimização na estrutura.

1.3 MOTIVAÇÃO

Justifica-se através da alta demanda do setor sucroenergético, bem como a constante evolução das tecnologias de colheita e transporte da matéria prima. Ressaltando ainda que essa constante evolução de tecnologias aquecem o mercado, obrigando as empresas a sempre reverem e atualizarem seus produtos buscando o sucesso entre as demais concorrentes, garantindo assim, a total eficiência do seu produto, desde o âmbito de transporte do material com segurança até a durabilidade extrema do mesmo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Inicialmente, é importante definir quais as principais diferenças entre falhas sob carregamento estático e falhas sob carregamento dinâmico. Segundo Norton (2013), carregamentos estáticos são cargas aplicadas lentamente e permanecem essencialmente constantes no tempo. Já cargas dinâmicas podem ser aplicadas subitamente (carga de impacto) ou variadas repetidamente no tempo (carga de fadiga).

2.1 TEORIA DAS FALHAS ESTÁTICAS

Diante dessa definição Shigley (2005) destaca: carga estática como sendo uma força estacionária ou momento aplicados a um elemento. Para ser estacionária, a força deve ser constante em magnitude, ponto de aplicação e direção.

2.1.1 Teoria da Energia de Distorção Para Materiais Dúcteis – Tensão de Von Mises-Hencky

Segundo Shigley (2005) a teoria da energia de distorção prevê que ocorre escoamento quando a energia de deformação por distorção em uma unidade de volume alcança ou excede a energia de deformação por distorção por unidade de volume correspondente ao escoamento sob tração ou compressão do mesmo material.

Sendo assim, é comum pensar que a energia total de deformação do material carregado seja totalmente responsável pela falha do mesmo, porém isso não é verdade. A falha do material ocorre quando a união de dois componentes – o carregamento hidrostático (que muda seu volume) e a distorção (que muda sua forma) (JUVINALL, 2012).

Separadamente, o carregamento hidrostático consegue armazenar certa quantidade de energia, contanto que esse material carregado esteja sob carregamento hidrostático, o qual cria tensões uniformes em todas as direções. Já a

energia de distorção representará a parcela da tensão de cisalhamento presente no carregamento.

Nesse sentido, Juvinal (2012) diz que, em certas circunstâncias, ocorrem tensões combinadas, sendo elas tensão normal e tensão de cisalhamento. Nesses casos, é conveniente encontrar uma tensão equivalente que represente o carregamento combinado. Assim, faz-se necessário o cálculo da tensão equivalente de von Mises que, segundo Norton (2013), é a tração uniaxial que representa fielmente a energia de distorção criada pela combinação de tensões do carregamento. Assim, para o caso tridimensional

Von Mises, em termos das tensões aplicadas, é dado por:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}} \quad (1)$$

Segundo Norton (2012), geralmente é conveniente definir um coeficiente de segurança para que o projeto se mantenha seguro. Segue que:

$$N = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (2)$$

Onde N é o coeficiente de segurança, σ' a tensão de Von Mises e S_y a tensão de escoamento do material.

2.1.2 Teoria da Tensão Máxima de Cisalhamento

A teoria da tensão máxima de cisalhamento nos diz que a falha acontece quando a tensão máxima de cisalhamento em uma região excede a tensão máxima de cisalhamento em um corpo de prova sob tração em escoamento (NORTON, 2012). Assim, temos:

$$S_{ys} = 0,5 * S_y \quad (3)$$

Onde S_{ys} é a tensão máxima de cisalhamento de um material dúctil e S_y é a tensão normal de escoamento.

Diante desse contexto, o coeficiente de segurança pode ser obtido por:

$$N = \frac{S_{ys}}{\tau_{max}} = \frac{0,5S_y}{\tau_{max}} = \frac{S_y}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (4)$$

Onde τ_{max} é a maior tensão de cisalhamento encontrada, e σ_1 e σ_3 são as tensões principais no carregamento.

2.1.3 Mecânica da Fratura

Praticamente todos os materiais reais possuem imperfeições, fendas, lacunas ou micro trincas que podem servir como concentradores de tensão. Essas, por sua vez, podem ser desde inclusões de materiais não metálicos na peça, rachaduras internas, trincas não visíveis a olho nu ou até defeitos em soldas, arranhões, dobras na superfície, etc. Essas imperfeições criam concentrações de tensões que, por sua vez, ocasionam trincas internas ou externas ao material, prejudicando consideravelmente seu desempenho (NORTON, 2013).

Dependendo da aplicação, cada material possui um valor crítico chamado tenacidade à fratura (K_c). Enquanto o fator de intensidade de tensão K for menor que K_c , a trinca é considerada estável e em modo de crescimento lento, ao menos que o ambiente de trabalho seja em meio corrosivo. Neste caso ela é estável, mas com crescimento acelerado. Porém, quando o fator de intensidade de tensão K atinge a tenacidade à fratura K_c , a trinca falha quase que instantaneamente. A fim de evitar essa falha, pode-se definir um coeficiente de segurança para a falha de fratura, definido por:

$$N_{FM} = \frac{K_c}{K} \quad (5)$$

Contudo, vale ressaltar que o K_c é determinado por meio de experimentos em peças padronizadas que contém uma trinca de dimensão definida. Assim, essas

peças são testadas até a falha por uma máquina de teste servo-hidráulica de tal forma que a peça seja tracionada ortogonalmente a trinca (NORTON, 2013).

2.2 TEORIA DE FALHAS POR FADIGA

2.2.1 Mecanismo da Falha por Fadiga

Constatou-se que as falhas por fadiga sempre iniciam com uma trinca em uma área crítica, com uma alta tensão local, podendo essa estar presente desde a produção do material ou ter surgido ao longo de sua vida útil. As falhas por fadiga ocorrem em três estágios, sendo eles: início da trinca, propagação e ruptura devido ao crescimento instável da trinca. Observando que o primeiro estágio pode ter curta duração, já que a trinca pode estar presente no material desde sua manufatura, o segundo leva o maior tempo, quase que o tempo da vida útil da peça e o último estágio é instantâneo (JUVINALL, 2012).

2.2.1.1 Estágio de início da trinca

Comumente, os materiais de engenharia possuem partículas ou inclusões no metal, tornando-os não homogêneos quando visto em escala microscópica. Sendo assim, para um material dúctil, essas regiões causam uma concentração de tensão quando o material é colocado sob efeito de uma componente positiva de tensão (SHIGLEY, 2011).

Entretanto, conforme essas tensões oscilam, pode ocorrer um escoamento local nessas regiões devido ao acúmulo de tensões. Com a repetição dos ciclos de carga no material, esses escoamentos localizados induzem o surgimento de regiões com intensa deformação, agrupando-se e criando a trinca. (NORTON, 2013)

2.2.1.2 Estágio de propagação da trinca

Quando a trinca surge e o material é posto a carga, começa o ciclo de crescimento da mesma. A trinca sob esforço cria uma concentração de tensão em sua

extremidade, sendo essa diretamente proporcional à tensão aplicada. Essa concentração de tensão cria uma região de deformação plástica na extremidade da trinca, fazendo-a crescer um pouco. Quando a tensão diminui consideravelmente ou cessa, a trinca se fecha e o escoamento que antes existia na ponta da trinca some, e a mesma torna-se novamente pontiaguda, porém um pouco maior. Esse processo se repete, cada vez mais alongando a trinca (ROSA, 2002).

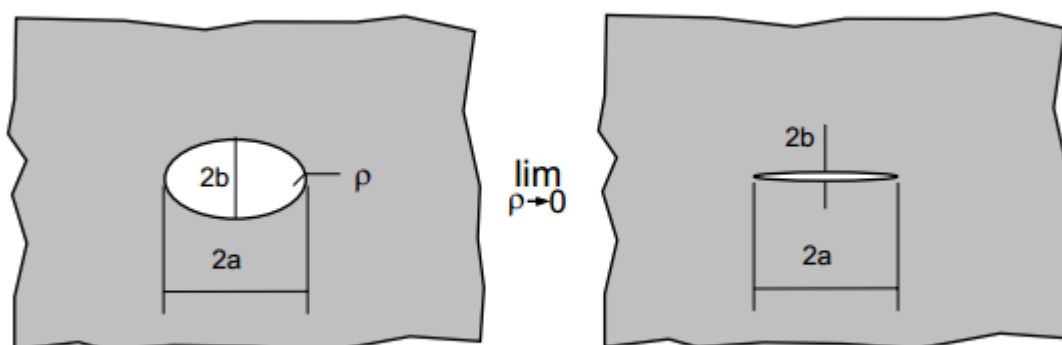


Figura 4 - Trinca Sob Efeito de Dilatação
Fonte: Rosa (2002)

Sendo assim, Norton (2013) corrobora com essa ideia ao estipular que o crescimento ou propagação da trinca seja da ordem de 10^{-8} até a 10^{-4} polegadas por ciclo. Por isso, necessita de uma grande quantidade de ciclos para tornar-se significativa.

Outro modo de propagação da trinca é a corrosão. A aplicação de tensão em um material submetido a um meio corrosivo cria uma sinergia e o material corrói mais rapidamente se comparado a um material aplicado ao mesmo meio corrosivo porém sem sofrer tensão. (NORTON, 2013). Essa peça, quando carregada ciclicamente em meio corrosivo, terá uma propagação de trinca mais rápida do que qualquer outro caso, sendo assim chamado de Fadiga de Corrosão (SHIGLEY, 2011).

2.2.1.3 Fratura

Com isso, enquanto a peça está submetida a tensões e meios corrosivos, a trinca continua em fase de crescimento. Em um dado momento, a trinca atingirá um

tamanho suficientemente grande para alterar o fator de intensidade de tensão K na sua extremidade, até igualar-se com o valor do nível de tenacidade a fratura do material K_c e, assim, causando instantaneamente a falha do material no próximo ciclo de tensão. Peças que falharam sob fadiga exibem um padrão típico na face onde aconteceu a ruptura (JUVINALL, 2012).

Nesse processo formam-se duas regiões: uma polida e outra áspera. A região polida é a que comumente exhibe marcas de praia, sendo assim chamada, devido a se parecerem com as marcas deixadas na areia da praia pelo movimento das ondas. Essas marcas de praia surgem devido aos movimentos cíclicos de início e parada do crescimento da trinca e sempre a circulam. Já a região áspera é aquela onde os movimentos cíclicos da trinca ainda não provocaram deformação plástica, e assim rompe subitamente com a fratura do material, adquirindo aparência de uma fratura frágil (SHIGLEY, 2011).

2.2.2 Modelos de Falha Por Fadiga

Segundo Shigley (2011) existem três métodos principais de cálculo de vida sob fadiga, os quais são utilizados em análises e projetos, sendo eles:

- Método de Tensão-vida;
- Método da deformação-vida;
- Método da mecânica de fratura linear elástica (MFLE).

Esses métodos tentam prever o número de ciclos N até o momento em que a falha ocorrerá, levando em consideração um determinado carregamento. Os tipos de fadiga são classificados de acordo com o número de ciclos, ou seja, uma vida com até 10^3 ciclos é considerada uma fadiga de baixo ciclo (FBC) e, para a fadiga de alto ciclo (FAC), a vida é de $N > 10^3$ ciclos (SHIGLEY, 2011). Abaixo, apresentaremos uma explicação mais detalhada de cada um dos modelos de falha.

2.2.2.1 Método de tensão-vida

O método de tensão-vida é baseado apenas nos níveis de tensão aplicados, se tornando assim o menos apurado, principalmente para aplicações de FBC. Entretanto, esse método é o mais tradicional e o mais fácil de aplicar, já que possui bastante dados de suporte devido à sua utilização durante um longo período de tempo, além de representar fielmente as aplicações de FAC. (SHIGLEY, 2011).

O referido método utiliza-se de um modelo baseado na tensão, ou seja, busca determinar a resistência à fadiga bem como o limite de fadiga do material, de modo que as tensões se mantenham abaixo desse nível determinado, evitando a falha do material para o número de ciclos solicitado. Vale lembrar ainda que o material será construído levando em consideração a resistência à fadiga e também um coeficiente de segurança adequado (NORTON, 2013).

2.2.2.2 Método de deformação-vida

Esse método se aplica para projetos que possuem vida de FBC e para aplicá-lo, muitas idealizações devem ser feitas no intuito de torná-lo viável. Dessa forma, ele abre espaços para inseguranças no projeto e sua aplicação se dá analisando as deformações plásticas existentes em um material submetido a tensões cíclicas (SHIGLEY, 2011). Segundo Norton (2013), esse método é o mais complicado de se utilizar e, por isso, frequentemente necessita de auxílio computacional para encontrar uma solução.

2.2.2.3 Método da mecânica de fratura linear elástica (MFLE)

Sendo este o método mais prático dos três, o MFLE considera que já exista uma trinca no material e que esta tenha sido detectada, assim podendo prever o crescimento da trinca em relação à tensão aplicada (SHIGLEY, 2011).

Norton (2013) contribui com essa ideia ao afirmar que esse método é o melhor modelo para o estágio de propagação da trinca no processo de fadiga, sendo utilizado

para regimes de FBC e em projetos onde as tensões cíclicas são conhecidas e grandes o suficiente para causar surgimento de falhas no material.

Possui uma aplicação direta, dependendo do tamanho inicial da trinca e da precisão desejada. É feita geralmente em conjunto com ensaios não destrutivos (END) e em programas de inspeção periódica (NORTON, 2013).

3 METODOLOGIA

3.1 DELIMITAÇÃO DOS MATERIAIS

Essa proposta de análise tem a intenção de determinar as principais forças e cargas que são aplicadas no chassi do transbordo, analisando o quão impactante elas são na estrutura, verificando quais são as consequências desses esforços, tais como criação de falhas e trincas.

Para tal, coletaremos com a empresa os principais dados operacionais do equipamento, na intenção estudarmos as cargas aplicadas no mesmo, utilizando-se da formulação apresentada. Ainda, dispendo do projeto do transbordo, utilizaremos o software de CAD para realizar simulações de esforços.

3.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com os resultados obtidos durante a análise, pretende-se considerar a necessidade de otimizar os componentes do chassi, podendo ser com mudança de material ou mudanças no projeto. Portanto, analisaremos e explanaremos os resultados obtidos e as conclusões, sendo esses apresentados na seção 6.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA

A fim de modelar as forças atuantes no sistema, definiram-se as cargas que são impostas sobre a estrutura durante a operação, além do seu peso sobre o chassi.

Sendo assim, de acordo com o fabricante, o transbordo a ser estudado possui uma capacidade de carga líquida total de 10500 kg e sobre o chassi estão dispostas a caixa de transbordamento, a qual pesa 1547 kg, um reforço da caixa de transbordamento em formato de 'X', constituído de tubos que se cruzam e pesam um total de 354kg. Dessa forma temos a carga total exercida pela estrutura, calculada na equação (6):

$$m_{Est} = m_{Caixa} + m_{Reforço} \quad (6)$$

$$m_{Est} = 1547 + 354 \quad (7)$$

$$m_{Est} = 1901kg \quad (8)$$

Diante disso, somando a massa da estrutura, a massa das duas torres com pistões responsáveis pelo levantamento da caixa, pesando aproximadamente 591kg cada torre, com a carga máxima do implemento, obtemos a massa total sobre o chassi, verificada na equação (9):

$$m_{Total} = m_{Est} + m_{Carga} + (m_{torres} * 2) \quad (9)$$

$$m_{Total} = 1901 + 10500 + 591 * 2 \quad (10)$$

$$m_{Total} = 13583kg \quad (11)$$

Ainda, a partir da massa total disposta sobre o chassi, calculamos a força exercida pela mesma, disposta na equação (12):

$$F = m_{Total} * G \quad (12)$$

$$F = 13583kg * 9,81 \frac{m}{s^2} \quad (13)$$

$$F = 133249,23N \quad (14)$$

Na Figura 5 pode-se conferir a estrutura disposta sobre o chassi, bem como seus componentes citados na modelagem:



Figura 5 – Transbordo MCT 10500 e seus reforços na estrutura
Fonte: Autoria Própria

Com essas informações, podemos configurar o programa de simulação, fornecendo os dados de trabalho do equipamento, afim de obter resultados próximos concretos.

5 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Após pesquisas realizadas, utilizando o projeto em CAD do transbordo cedido pela empresa, foi possível avaliar a estrutura do chassi e das peças agregadas a ele. Em seguida, criou-se um esquema geral do chassi e as medidas de cada peça, com o objetivo de, unido com a licença do sistema Solid Works também cedido pela METAL CANA, produzir um modelo simplificado do chassi, que fosse capaz de reproduzir fielmente suas características estruturais e dimensionais e, ao mesmo tempo, facilitar a análise e a simulação, suprimindo peças desnecessárias e que não agregam na resistência do sistema. Dessa forma, o projeto ainda possibilita modificações e testes de forma mais simplificada. Na Figura 6 podemos visualizar o modelo do projeto criado:

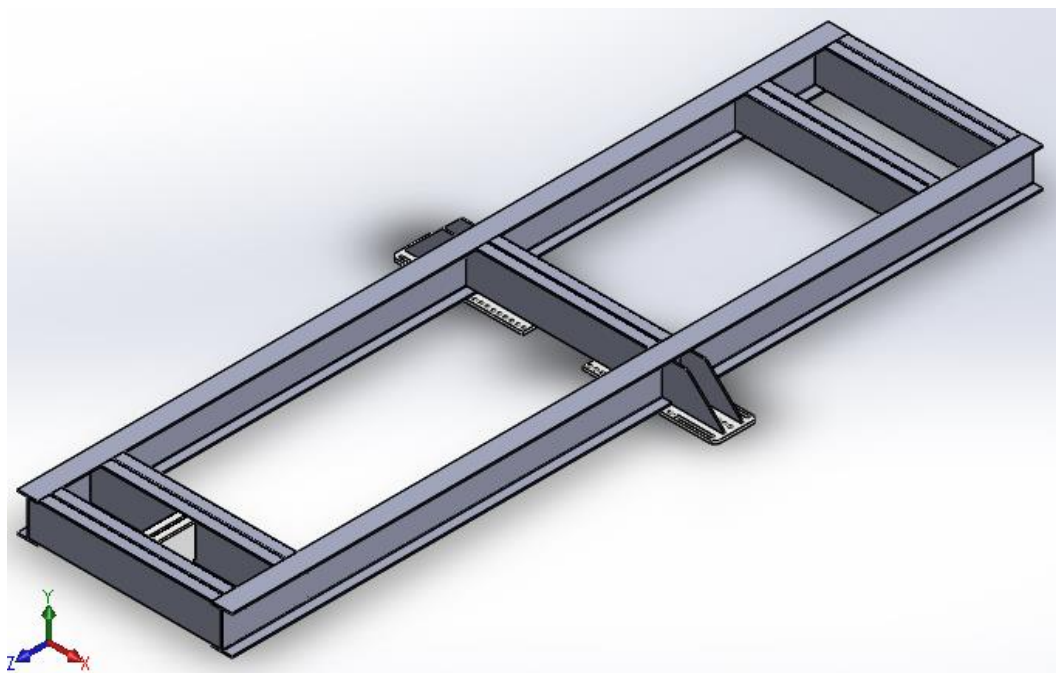


Figura 6 – Vista isométrica do Chassi
Fonte: Autoria Própria

Após a concepção do projeto e a execução do modelo simplificado, definiu-se como o material de estudo o aço ASTM A36, o qual é o material no banco de dados do programa que possui o limite de resistência a tração e o limite de escoamento mais próximo do aço estrutural LN28, utilizado no transbordo. Esses dados podem ser conferidos e comparados na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação das propriedades dos aços

Propriedade	Aço ASTM A36	Aço LN 28
Resistencia a tração	400 MPa	410 MPa
Limite de escoamento	250 MPa	280 MPa

Fonte: Banco de dados do SolidWorks (ASTM A36) e Catálogo aços planos Gerdau (LN 28)

De acordo com a modelagem matemática realizada na seção 4, definiu-se no software as forças atuantes no sistema, as quais são a gravidade e a carga máxima suportada pelo equipamento em operação, que é de 10500 kg de acordo com a empresa, somado com aproximadamente 3083kg de estrutura da caçamba, torres e reforços, distribuídas de forma igualitária sobre toda a parte superior estrutura.

Nesse próximo passo, foi definido como sistema fixo, a base do chassi que dá lugar ao suporte do eixo das rodas, como mostrado na Figura 6.

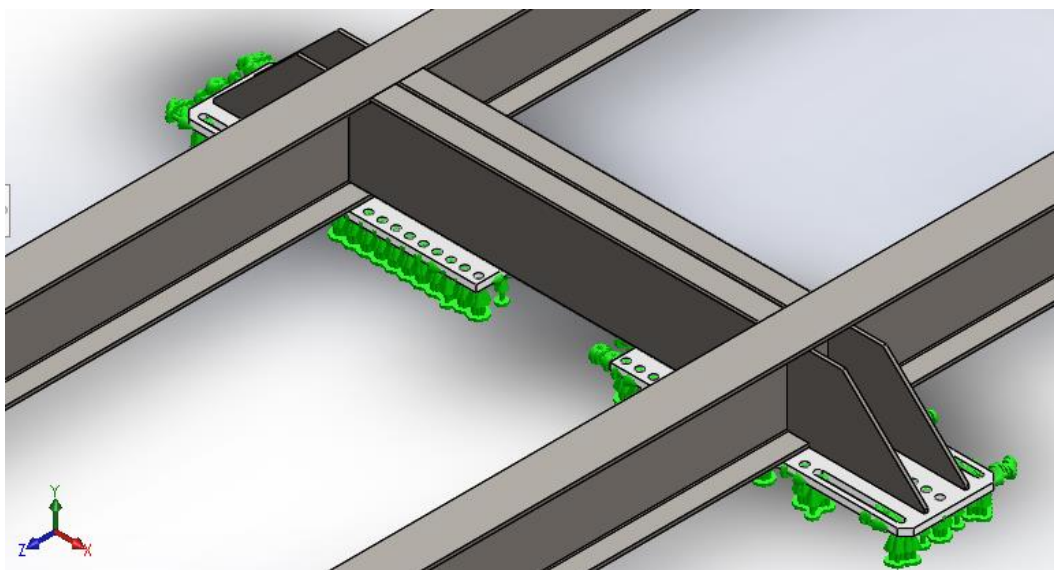


Figura 7 – Sistema fixo
Fonte: Autoria Própria

Para realização da simulação, foi criada uma malha sólida gerada pelo próprio software com a qualidade fina e com a maior quantidade de elementos possíveis. Os dados da mesma são encontrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados e propriedades da malha

Tipo de Malha	Malha sólida
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do Elemento	63,1382mm
Tolerância	3,15691mm
Qualidade	Alta
Total de nós	101547
Total de Elementos	51626

Fonte: Solid Works

Criada na melhor qualidade de resolução do programa para evitar erros na simulação, a malha pode ser conferida na Figura 7.

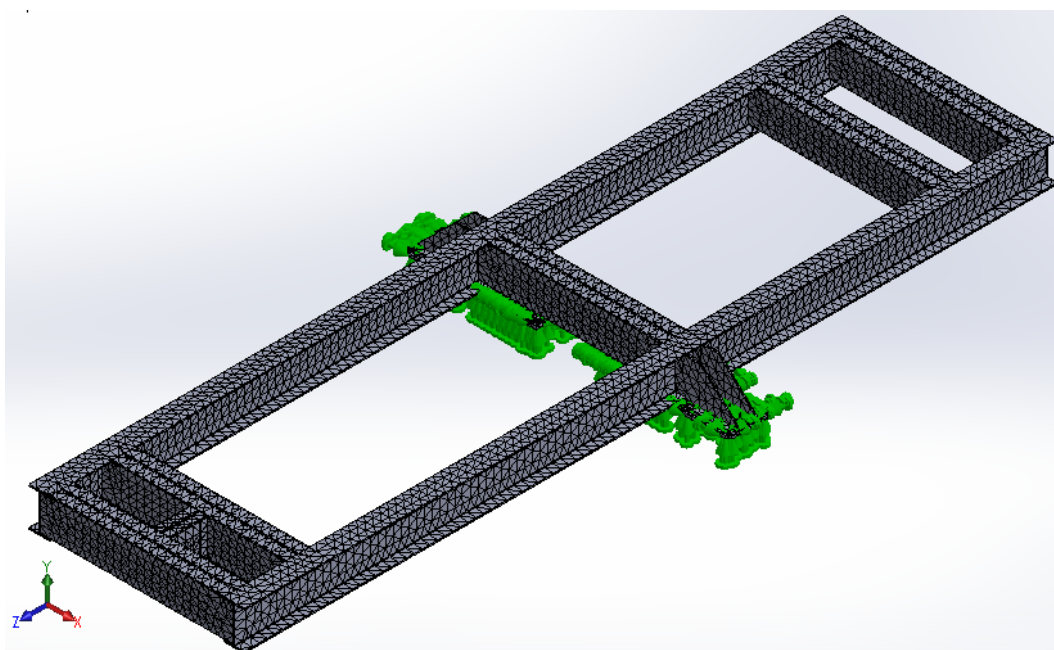


Figura 8 – Malha aplicada no chassi
Fonte: Autoria Própria

Por fim, configurou-se o programa para realizar uma análise estática no sistema como um todo, respeitando as condições de contorno descritas acima e pedindo como resultado o deslocamento do sistema, a deformação causada em carga máxima e, por fim, a distribuição de tensão.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados das simulações descritas e realizadas pelo presente trabalho.

Apresentaremos e explanaremos os resultados de três simulações realizadas pelo programa, as quais são: deformação, deslocamento e distribuição de tensão.

6.1 DEFORMAÇÃO

Com o intuito de analisar e verificar a deformação do sistema sob carga total, realizou-se uma simulação para a estimar a deformação do sistema e analisar os pontos críticos. Na Figura 8 pode-se verificar essa deformação estimada pela simulação, incluindo o gráfico de energia de deformação.

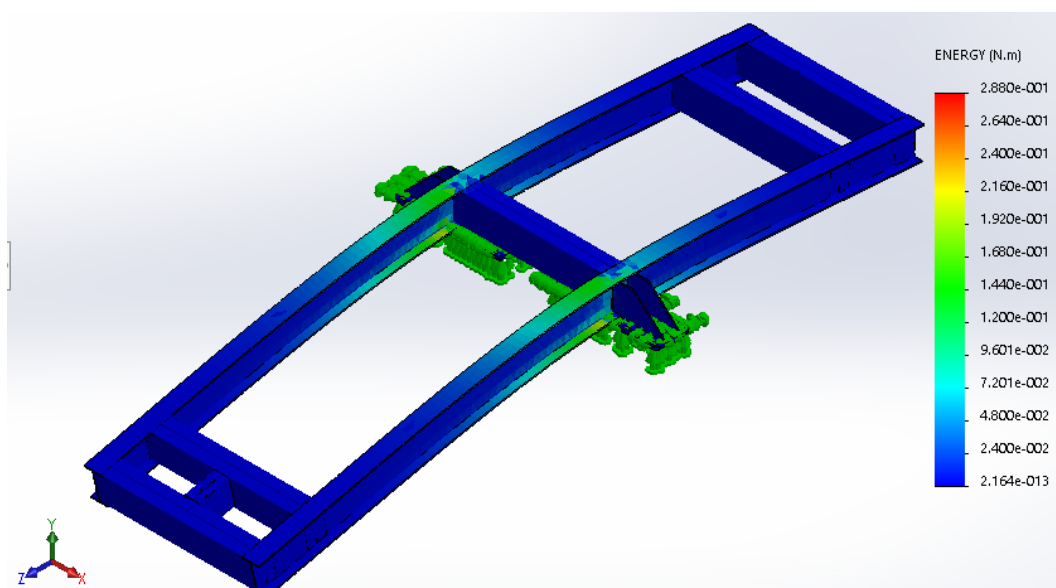


Figura 9 – Resultado da análise de deformação do chassi
Fonte: Autoria Própria

Verifica-se que a região que sofre a maior deformação encontra-se no centro da estrutura, mais precisamente próximas a base do chassi que dá lugar ao suporte das rodas. Esse resultado já era esperado, devido ao fato de que o transbordo possui apenas contato com o solo no meio da estrutura, de forma com que a carga distribuída flexiona as extremidades do sistema sob efeito de alavanca. Essa flexão das extremidades causa a deformação do centro das vigas, próximas ao ponto fixo,

criando ali um local de grande concentração de tensão, possibilitando o surgimento de falhas e trincas ao longo da vida útil do implemento.

6.2 DESLOCAMENTO

Análogo à deformação, realizou-se a simulação de deslocamento do conjunto. O resultado obtido é plausível e condizente com as demais simulações, visto que as extremidades são submetidas a ação da carga e estão longe do ponto de apoio do chassi, conseqüentemente irão se deslocar mais. A Figura 9 representa o deslocamento e a legenda, em milímetros, indicando os pontos de maior deslocamento.

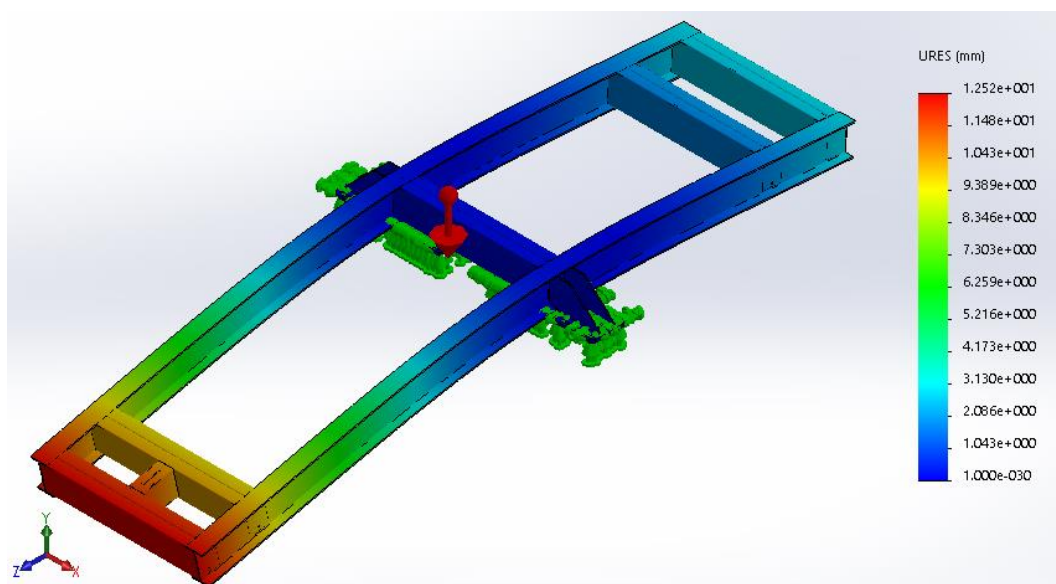


Figura 10 – Resultado da análise de deformação do chassi
Fonte: Autoria Própria

Pela simulação, podemos avaliar que a maior deformação do chassi ocorreu em sua extremidade frontal, a qual atingiu a marca de 12,52mm, enquanto a extremidade traseira do equipamento deformou aproximadamente 3,13mm.

6.3 DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO

Por fim, a simulação da distribuição de tensão na estrutura do chassi pode ser analisada na Figura 10.

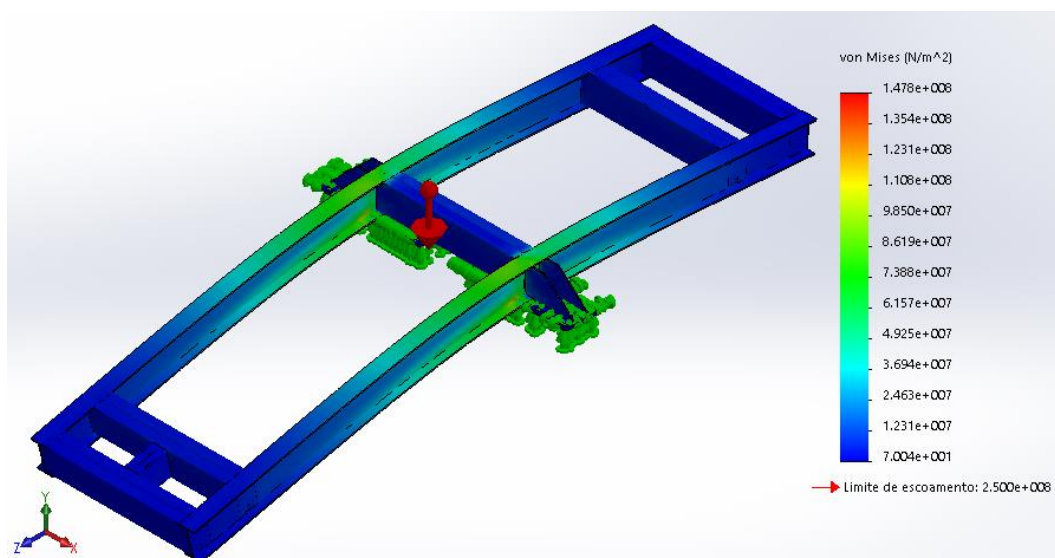


Figura 11 – Resultado da análise da distribuição de tensão do chassi
Fonte: Autoria Própria

Seguindo o padrão do estudo e condizente com a deformação, o local do chassi com a maior concentração de tensão é o centro da estrutura, próximo aos pontos fixos. Um resultado é satisfatório, visto que o local de maior concentração de tensão é o mesmo local que sofreu maior deformação sob carga máxima.

Pela escala, podemos verificar que a maior tensão gerada pela carga na estrutura é de 147 MPa, a qual ainda está bem abaixo dos 250MPa de limite de escoamento do material.

Com o valor da tensão equivalente de Von Misses (σ') gerado na simulação, da tensão de escoamento (S_y) do material e com o auxílio da equação (2) pode-se calcular o coeficiente de segurança da estrutura (N), conforme equação (15):

$$N = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (15)$$

$$N = \frac{250MPa}{147MPa} = 1,70068 \quad (16)$$

Dessa forma, podemos verificar que, mesmo sob carga máxima, os pontos críticos da estrutura estão trabalhando sob um coeficiente de segurança de 1,7, garantindo a confiabilidade do implemento. Ainda, pode-se verificar que existem poucos pontos que estão submetidos a esta tensão, de forma com que a maior parte do sistema tensionado está submetido a uma tensão de aproximadamente 86 MPa, aumentando exponencialmente o coeficiente de segurança, a confiabilidade e a vida útil do transbordo.

7 CONCLUSÃO

O referido trabalho de conclusão de curso foi desenvolvido através de um estudo do chassi de um implemento agrícola utilizado na colheita da cana de açúcar, conhecendo a sua utilização e seus detalhes técnicos, afim de realizar uma simulação computacional em sua estrutura visando analisar o impacto gerado pela utilização do equipamento em carga máxima, levando em consideração todos os componentes estruturais do chassi.

Dessa forma, com o auxílio do projeto e todos os dados operacionais cedidos pela Metal Cana, tornou-se possível mensurar as cargas e o peso da estrutura, fornecendo assim os dados necessários para que o software realizasse as simulações.

Os resultados obtidos nas mesmas foram satisfatórios, visto que nos pontos críticos, ou seja, de maior tensão, o chassi ainda consegue manter um coeficiente de segurança de 1,7, o que garante a confiabilidade da estrutura e do implemento como um todo. Ainda, visualizou-se que existem poucos pontos em que a estrutura foi submetida a tensão máxima, que foi de 147 MPa, sendo que na maioria do chassi a carga foi bem distribuída e diminuiu consideravelmente essa tensão, chegando na marca dos 86 MPa, quase 40% menor.

Dessa forma, concluiu-se que a estrutura atende fielmente a necessidade do implemento, garantindo total segurança aos operadores e as pessoas próximas ao implemento em operação, mesmo sob máximo esforço, não necessitando otimizações para tal carga.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o resultado do presente trabalho, garantindo o perfeito funcionamento da estrutura, algumas sugestões para trabalhos são:

1. Aplicação de diferentes materiais no chassi, visando analisar o desempenho e otimizar os custos de fabricação;
2. Estudo da forma do chassi, analisando possíveis mudanças no formato da estrutura, vislumbrando reduzir peso ou custos;
3. Aplicar um trabalho semelhante aos outros implementos utilizados no cultivo da cana de açúcar, possibilitando analisar o desempenho de todos os maquinários.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

BUDYNAS, Richard G; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. Tradução João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar. 8 ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

COLLINS, Jack A. **Projeto mecânico de elementos de máquinas: Uma perspectiva de prevenção da falha**. Tradução Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco [et al.]. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

FACCHINETTI, Matteo Luca. Fatigue Tests for Automotive Design: Optimization of the Test Protocol and Improvement of the Fatigue Strength Parameters Estimation. **Procedia Engineering**, v. 133, p. 21-30, 2015.

GERDAU, Comercial. **Aços planos e suas aplicações**. Disponível em < <https://www.comercialgerdau.com.br/pt/catalogos#k=#s=51> >. Acesso em 07 jun. 2017.

HÄGELE, N.; SONSINO, C. M. Structural durability design recommendations for forged automotive aluminium chassis components submitted to spectrum and environmental loadings by the example of a tension strut. **International Journal of Fatigue**, v. 69, p. 63-70, 2014.

JUVINALL, Robert C.; MARSHEK, Kurt M. **Fundamentos do projeto de componentes de máquinas**. Tradução e revisão Fernando Ribeiro da Silva. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

KARAOĞLU, Çiçek; KURALAY, N. Sefa. Stress analysis of a truck chassis with riveted joints. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 38, n. 12, p. 1115-1130, 2002.

NOR, Mohd Azizi Muhammad et al. Stress analysis of a low loader chassis. **Procedia Engineering**, v. 41, p. 995-1001, 2012.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman; 2013.

OLMI, Giorgio. Failure of the chassis of roller skates for agonistic figure skating. **Case Studies in Engineering Failure Analysis**, v. 3, p. 62-67, 2015.

RAGHUVANSHI, Akash Chaudhary et al. Design and Development of Foldable Kart Chassis. **Materials Today: Proceedings**, v. 2, n. 4, p. 1707-1713, 2015.

ROSA, Edilson. **Análise de resistência mecânica**: mecânica da fratura e fadiga. UFSC, 2002.

SZMRECSÁNYI, Tamás; MOREIRA, Eduardo P. **O desenvolvimento da agroindústria canavieira do Brasil desde a segunda guerra mundial**. Disponível em < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141991000100006>. Acesso em 5 jun. 2016.

TOMASELLA, A.; WAGENER, R.; MELZ, T. Influence of the Transient Material Behaviour in the Fatigue Life Estimation Under Random Loading. **Procedia Engineering**, v. 101, p. 485-492, 2015.

VELOSO, V. et al. Failure investigation and stress analysis of a longitudinal stringer of an automobile chassis. **Engineering Failure Analysis**, v. 16, n. 5, p. 1696-1702, 2009.