



RENAN PEREIRA FERREIRA

**MELHORIA OPERACIONAL DE UM COMPONENTE DO SISTEMA
DE ELEVAÇÃO DE FRUTOS DE UMA COLHEDORA DE CAFÉ: UM
ESTUDO DE CASO**

Lavras – MG

2022

RENAN PEREIRA FERREIRA

**MELHORIA OPERACIONAL DE UM COMPONENTE DO
SISTEMA DE ELEVAÇÃO DE FRUTOS DE UMA COLHEDORA DE
CAFÉ: UM ESTUDO DE CASO**

Concepção básica apresentada à
Universidade Federal de Lavras, como parte
das exigências do Curso de Engenharia
Mecânica, para a obtenção do título de
Bacharel.

Prof. Dr. Mauricio Francisco Caliri Junior

Orientador

Lavras – MG

2022

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelos(as) próprios(as) autores(as).**

Ferreira, Renan Pereira.

Estudo de melhoria operacional do elevador de frutos da colhedora
de café modelo MC1400 / Renan Pereira. - 2022.

70 p.

Orientador(a): Mauricio Francisco Caliri Junior

TCC (graduação) - Universidade Federal de Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Projeto mecânico. 2.Elementos finitos. 3.Análise estrutural e modal.
4. Máquinas agrícolas.

DEDICATÓRIA

Dedico o trabalho de concepção básica à minha família, amigos e ao meu orientador. Em primeiro lugar a Deus que sempre iluminou meu caminho e um sentimento especial de gratidão aos meus pais, pelo apoio e ajuda durante toda essa etapa de minha vida. Aos amigos, que sempre estiveram tanto nos melhores quanto nos mais difíceis momentos, sempre ajudando para que pudesse chegar nesse querido momento. E ao meu orientador, professor Maurício, que me auxiliou muito nessa etapa final do curso de graduação.

RESUMO

O aumento da demanda brasileira de *commodities*, em especial o café, está em constante crescimento e o mesmo está diretamente atrelado ao crescimento da produtividade. Dentro do processo de colheita, a evolução tecnológica, principalmente com a mecanização das técnicas agrícolas, é de suma importância. Após uma análise da colhedora do fabricante MakReis modelo MC14000 em operação, o elevador de frutos da mesma, ao realizar o processo de transporte de frutos de café da parte inferior da máquina para a parte superior, pode travar devido ao bloqueio dos frutos de café na parte inferior desse dispositivo, causado pela própria queda dos frutos durante a operação da máquina, o que gera problemas e interrupções indesejadas. Visto esse problema, o presente trabalho tem como proposta uma melhoria para a colhedora MakReis MC1400, através da modelagem de uma cuba na parte inferior do elevador que automaticamente abrirá e fechará, aliviando o sistema em intervalos predeterminados, visando a redução das perdas durante a operação em campo. O projeto contribuiu com a melhoria operacional do elevador de frutos, focando no dimensionamento de uma cuba basculante situada no ponto mais baixo do elevador de frutos, fabricada com chapas feitas de aço (SAE1020) soldadas, com a finalidade de minimizar o travamento do sistema. O projeto inclui um dimensionamento considerando análises de tensão estática, vida em fadiga e análise modal. Para a proposta elaborada, a previsão para a duração da alteração proposta é de pelo menos 5 anos antes da quebra (1200 ciclos de operação).

Palavras-Chave: Projeto mecânico; Elementos finitos; Análise estrutural e modal; máquinas agrícolas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Elevador de frutos da colhedora com a tampa dos dois elevadores abertas.	13
Figura 2: Representação do transporte de frutos de café.	14
Figura 3: Visão traseira com as tampas do elevador fechadas da colhedora MC1400.	15
Figura 4: Flexão pura.	18
Figura 5: Momento torçor.	19
Figura 6: Tensões cisalhantes na torção.	19
Figura 7: Nós e elementos de uma malha.	20
Figura 8: Forma de elementos 2D.	22
Figura 9: Malha com 2 tipos de elementos.	23
Figura 10: Um diagrama S-N traçado a partir dos resultados de testes de fadiga axial completamente inversa.	27
Figura 11: 2 ciclos de tensão aleatórios do tipo reverso e repetido.	28
Figura 12: Fluxograma da metodologia do projeto.	30
Figura 13: Geometria e funcionamento da proposta da cuba automatizada.	34
Figura 14: Dimensões do projeto da cuba.	35
Figura 15: pré-dimensionamento da cuba.	36
Figura 16: Vista superior da cuba.	37
Figura 17: Diagrama representativo do momento gerado pela cuba.	38
Figura 18: Superfície média do modelo para modelagem 2D.	40
Figura 19: Limpeza do modelo para modelagem 2D.	41
Figura 20: Malha final da geometria.	42
Figura 21: Quality index da malha realizada.	43
Figura 22: Elementos onde será aplicado o peso do café.	44
Figura 24: Cuba travada.	45
Figura 25: Cuba destravada Gy.	45
Figura 26: Cuba destravada Gx.	46
Figura 27: Impacto 2Gy negativo balanço com café.	47
Figura 28: Curva aproximada do material SAE1020.	49
Figura 29: Representação do ciclo de operação da cuba.	50
Figura 30: Resultado análise linear cuba travada.	51
Figura 31: Resultado análise linear cuba destravada Gy.	52
Figura 32: Resultado análise linear cuba destravada Gx.	53

Figura 33: Resultado análise linear impacto Gy com café.	54
Figura 34: Imagem dos modos de vibração da cuba.	55
Figura 35: Pontos críticos de dano no modelo.	56
Figura 36: Dano e vida do modelo da cuba.	57
Figura 37: folha de cota da cuba em formato A4.	61
Figura 38: Torque aplicado no eixo.	62
Figura 39: Classificação do motor TJW58FX.	63
Figura 40: Motor elétrico 5Nm TYHE.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo da situação atual e a melhoria proposta.	33
Tabela 2: Características do aço SAE1020.....	39
Tabela 3: Malha utilizada.	41
Tabela 4: Tabela de dimensões de chapas SAE1020 AluPlex Brasil.....	50
Tabela 5: Modos de frequência da cuba.	55
Tabela 6: Resumo das análises.	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVO GERAL	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	Projeto e cálculo estrutural	17
3.2	Momento fletor	18
3.3	Momento torçor	18
3.4	FESA	20
3.5	Análise linear estática	23
3.6	Critério de von Mises	24
3.7	Análise modal	25
3.8	Soldagem	25
3.9	Análise de fadiga	26
3.10	Correção das curvas SN	28
3.11	Regra do dano linear de Palmgren-Miner	28
4	METODOLOGIA	30
4.1	Estudo do problema apresentado em campo	30
4.2	Estudo da concepção escolhida para a melhoria do sistema	30
4.3	(Pré)Dimensionamento	31
4.4	Desenho (CAD)	31
4.5	FESA	31
4.5.1	Condições de carregamentos/casos de carga	31
5	RESULTADO E DISCUSSÕES	33
5.1	Estudo e estabelecimento da melhor concepção	33
5.1.1	Pré-dimensionamento	34
5.1.2	Seleção dos materiais e componentes	39
5.2	Dimensionamento dos componentes	39

5.3	FESA	39
5.3.1	Geometria e simplificações	40
5.3.2	Malha	41
5.3.3	Condições de contorno	43
5.3.4	Resultado das análises lineares	50
5.3.4.1	Cuba travada	51
5.3.4.2	Cuba destravada Gy	51
5.3.4.3	Cuba destravada Gx	52
5.3.4.4	Impacto 2Gy com café	53
5.3.5	Resultado da análise modal	54
5.3.6	Resultado da análise de fadiga	56
5.3.7	Resumo das análises	58
5.3.8	Escolha do motor	62
5.3.9	Estudo do tempo de <i>setup</i> da máquina	64
6	CONCLUSÃO	65
7	REFERÊNCIAS	66
8	Anexo	70

1 INTRODUÇÃO

O café é uma bebida amplamente consumida no mundo com sabor, aroma, cor e efeitos benéficos à saúde, e é uma das *commodities* mais negociadas. Estima-se um consumo mundial de 3,5 bilhões de xícaras de café todos os dias (BLINOVA, L., et al. 2017).

Segundo o relatório mensal do Cecafe (2022), as exportações de café do Brasil no mês de fevereiro de 2022 foram equivalentes a 3,4 milhões de sacas de 60 kg.

De acordo com a CONAB (2022), sem seu relatório de fevereiro, a área brasileira destinada à produção de café em 2022 é de 1,82 milhão de hectares. A produtividade média nacional prevista é de 30,6 sacas/ha, valor 16,1% maior em relação à safra anterior. A escolha de técnicas específicas para colheita, é um fator de extrema importância para os produtores, pois contribui para maiores retornos econômicos:

De acordo com Da Silva, et al. (2001), existem três tipos de técnicas para a colheita do café: manual, que requer uma grande quantidade de trabalho humano; semi-mecanizado, em que as operações de colheita manual e mecanizada são usadas; e mecanizada, em que todas as operações de colheita são realizadas mecanicamente. O tipo de cultura utilizada pode variar de acordo com a topografia local e a inclinação e o espaçamento, alinhamento e altura das plantas. Assim, com base nesses fatores, os produtores devem escolher o tipo de técnica que melhor se adapta à sua colheita.

A mecanização da colheita do café vem sendo utilizada no Brasil como alternativa para redução de custos operacionais desde a década de 1970. A mecanização da cafeicultura no Cerrado brasileiro passou a ter maior vitalidade, principalmente devido às medidas de relevo relativamente planas (SANTINATO, F. et al. 2014), e por se tratar de uma tecnologia que pode reduzir custos operacionais (SILVA, F. et al., 2011). Isso pode reduzir os custos de produção em até 67% (SILVA et al., 2013; TAVARES et al., 2015). A eficiência da colheita mecanizada do café tem aumentado, principalmente devido à evolução tecnológica das colhedoras, ao

treinamento dos operadores e ao maior conhecimento dos profissionais (OLIVEIRA et al., 2006). Com a mecanização, foram necessárias transformações e adaptações estruturais da lavoura, como retirada de arvoredos e alargamento dos carregadores, assim não somente os profissionais precisaram se adaptar, como também o ambiente (ORTEGA et al., 2011).

O aumento da produtividade e a redução de custos é um dos principais objetivos de qualquer processo produtivo.

O setor cafeeiro se destaca mundialmente por sua importância socioeconômica, atuando direta ou indiretamente nos mais diversos setores. Com isso, surgiram novas tecnologias e diversos modelos de colhedoras por todo o globo.

Segundo Oliveira et al. (2007), a colheita mecanizada do café tornou-se uma prática crescente com benefícios diretos em termos de redução de custos e aumento da qualidade da bebida. Porém, dado a grande variabilidade de espécies de café, tipos de solo, máquinas e implementos agrícolas, ainda existem muitos problemas a serem resolvidos, bem como otimizações no processo de plantio e colheita e também nas máquinas colhedoras de café já existentes.

Destaca-se que a colheita de café é uma operação complexa, devido ao formato da planta, da não uniformidade de maturação e do elevado teor de água dos frutos, tais fatores somam para dificultar a mecanização. Contudo, as colhedoras de café existentes no mercado conseguem trazer para o produtor uma eficiência operacional de derriça de até aproximadamente 97%. A cada ano que passa as colhedoras estão cada vez mais tecnológicas e eficientes, trazendo tanto lucro para o produtor, como conforto para o operador durante a operação da mesma (OLIVEIRA et al., 2007).

No processo mecanizado, a colhedora de café foi criada para a facilitação da colheita bem como o aumento da produtividade da lavoura. De um modo geral, as colhedoras de cafés automotrizes utilizam de hastes vibratórias para colher(derriçar) o café da planta. Após a derriça, esteiras horizontais transportam esse café para um elevador de canecas que levam os frutos para a parte superior da máquina que posteriormente podem ser descarregados em uma carreta que acompanha a máquina.

O presente TCC, foi motivado a partir de um problema identificado na colhedora de café do fabricante MakReis modelo MC1400. O problema consiste em um travamento do mecanismo por causa de um acúmulo de frutos de café que são depositados na parte inferior do mecanismo de elevação. Durante o transporte do elevador, os frutos de café muitas das vezes não saem ou entram na caneca de modo idealizado (uma falha do próprio transporte), o que leva

a queda do café para parte inferior do elevador, podendo entupir e travar o movimento do mecanismo. Esse problema foi detectado durante uma supervisão de colheita em uma fazenda de café em Machado - MG. Optou-se então por elaborar um projeto de concepção básica, buscando identificar e propor uma solução para o respectivo problema.

A Figura 1 mostra a parte de trás da colhedora do fabricante MakReis modelo MC1400. O estudo de caso está focado na área enquadrada da foto.

Figura 1: Elevador de frutos da colhedora com a tampa dos dois elevadores abertas.



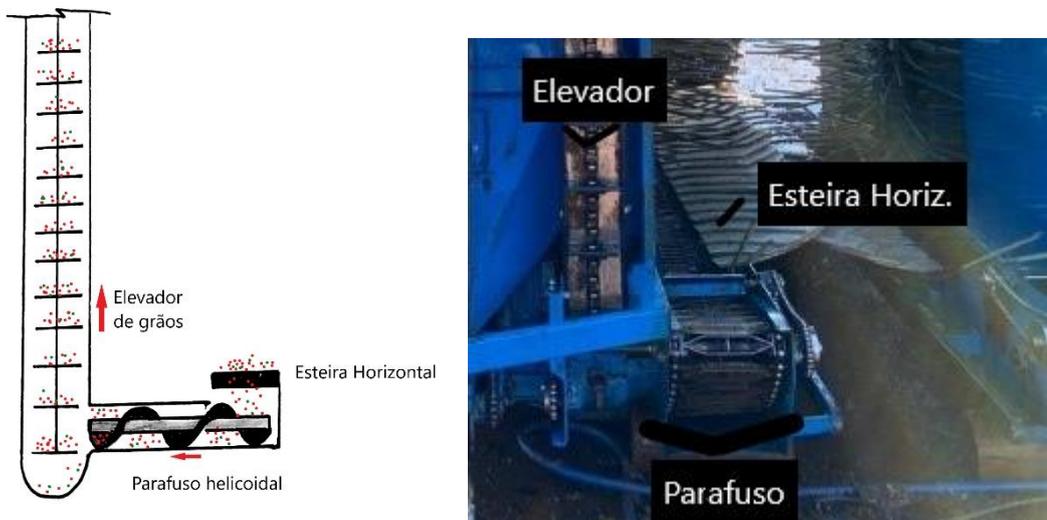
Fonte: Do autor.

Esse modelo de máquina colhedora possui 3 componentes mecânicos que estão sendo alimentados por um motor de 3cv. Tais componentes formam o mecanismo de transporte do café até o ponto mais alto da colhedora. Esses componentes são:

- Esteira horizontal;
- Parafuso helicoidal;
- Elevador vertical.

Foi realizado um croqui exemplificando o processo de transporte dentro da área do escopo do projeto, mostrado na Figura 2, em que os frutos de café passam pelos 3 mecanismos que foram citados.

Figura 2: Representação do transporte de frutos de café.

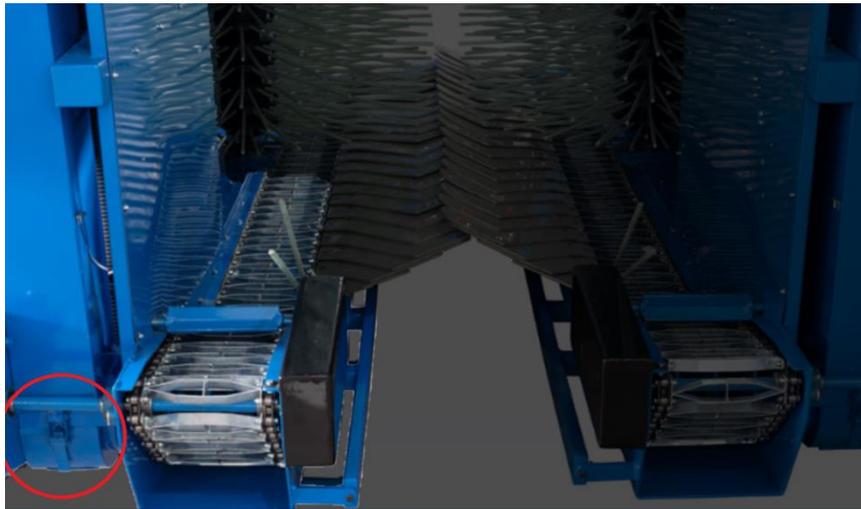


Fonte: Do autor.

Resumidamente, as hastes são estruturas flexíveis que vibram e removem o café da planta conforme a máquina se move. Esse café cai numa esteira que leva os frutos até a região do parafuso helicoidal que transporta os frutos para o elevador situado ao lado da esteira que leva o café para o reservatório da máquina e, se for o caso, para a caçamba de outro veículo que acompanha a colhedora.

Nesse escopo, o presente projeto de concepção básica, estará focado na melhoria do sistema de elevação de frutos, com o dimensionamento de uma cuba para a eliminação de frutos de café acumulados na região mais baixa do elevador, onde ocorre o travamento. A área foi circulada em vermelho na Figura 3, para um melhor entendimento, do local mencionado.

Figura 3: Visão traseira com as tampas do elevador fechadas da colhedora MC1400.



Fonte: MakReis¹.

¹ Disponível em: <<https://makreis.com.br/cafeira-mc1400/>>. Acesso em: 30, Agosto de 2022.

2 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo entregar um projeto de concepção básica, visando evitar o travamento do elevador de frutos que pode levar à interrupção de toda colheita, além de danos ao mecanismo de elevação. Para isso, será realizado um dimensionamento estrutural de uma cuba, que será instalada na parte mais baixa do elevador de frutos, substituindo a estrutura atual cuja abertura é manual. A nova cuba trabalhará automaticamente, abrindo e fechando em intervalos pré-determinados, propiciando a eliminação dos frutos acumulados na cuba. Para alcançar o respectivo objetivo, os seguintes objetivos específicos foram determinados:

- Propor uma modificação do subsistema(cuba) do elevador de frutos que irá minimizar o problema apresentado, utilizando de um *software* CAD para criar o modelo da cuba.
- Realização do dimensionamento da cuba submetida aos esforços de natureza relacionada aos fenômenos mecânicos de torção e flexão.
- Complementar o dimensionamento analítico com métodos numéricos (CAE/FESA) para identificar o comportamento mecânico do sistema proposto.
- Estimativa de otimização do tempo de *setup* da colhedora.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Projeto e cálculo estrutural

Todo projeto de máquinas e/ou componentes mecânicos, precisam passar pelas etapas de concepção de forma ajustada pelo dimensionamento efetivo. Esse dimensionamento está relacionado à funcionalidade da máquina e/ou componente. O dimensionamento é feito a partir de restrições geométricas e estruturais para o projeto em questão. As restrições estruturais estão atreladas à escolha do material para a geometria proposta. O cálculo estrutural possibilita que o engenheiro encontre o melhor material para uma geometria e/ou altere uma geometria para usar um determinado material:

Segundo Tsukamoto (2011), os cálculos estruturais podem ser realizados tanto de formas analíticas como com a utilização de métodos numéricos. Os métodos analíticos realizados de forma manual, são mais usados quando o problema é de rápida solução e de baixa complexidade. Já as soluções via métodos numéricos são auxiliadas por métodos específicos como, por exemplo, o Método de Elementos Finitos (MEF).

O MEF é comumente encontrado integrado a ferramentas CAE (*Computer Aided Engineering*), que são *softwares* com a finalidade de realizar simulações de problemas de engenharia, auxiliando o desenvolvimento de projetos. As simulações estruturais são comumente referenciadas por FESA, do inglês, Finite Element Structural Analysis, em português, análise estrutural utilizando elementos finitos.

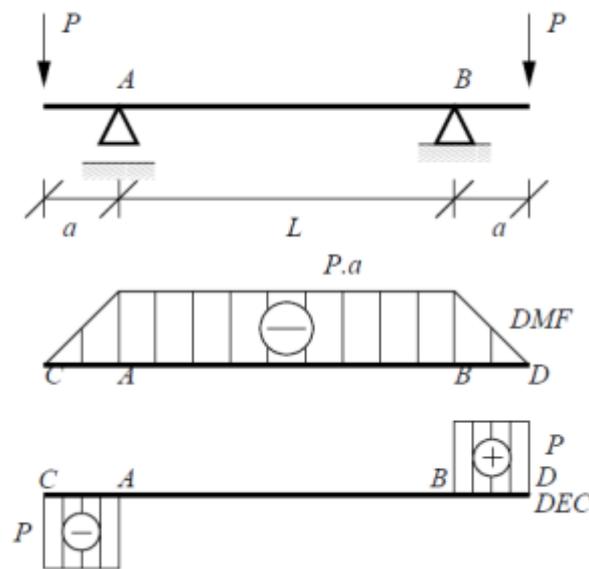
Segundo Niemczewski (2014), a grande presença da utilização dos métodos numéricos permitiu o desenvolvimento de várias técnicas para a solução de problemas complexos. Esses métodos resolvem equações diferenciais de modo rotineiro com o uso de softwares comerciais de CAE que, apesar de apresentar um certo investimento, destacam-se em relação aos métodos analíticos de solução, por simplesmente trazerem soluções para modelos ou estruturas complexas, que aproximam muito do comportamento de um protótipo real, ou ainda, fornecem soluções antes inexistentes através de métodos analíticos.

Nesse trabalho, a proposta para resolver o problema identificado na colhedora do fabricante MakReis, modelo MC1400, passará por uma etapa de avaliação conceitual, para definição da melhoria do sistema de elevação de frutos e depois um pré-dimensionamento analítico seguido de uma otimização numérica via MEF para uma proposta geométrica da cuba.

3.2 Momento fletor

Segundo Sarkis (2014), momento fletor é um tipo de carregamento relacionado ao fenômeno de flexão. A flexão poder ser advinda de braços de forças ou momentos concentrados. Quando uma seção transversal está sujeita somente a esforços de momentos, temos a flexão pura, como exibido no diagrama de esforços da Figura 4.

Figura 4: Flexão pura.



Fonte: HALLACK, et al. (2014).

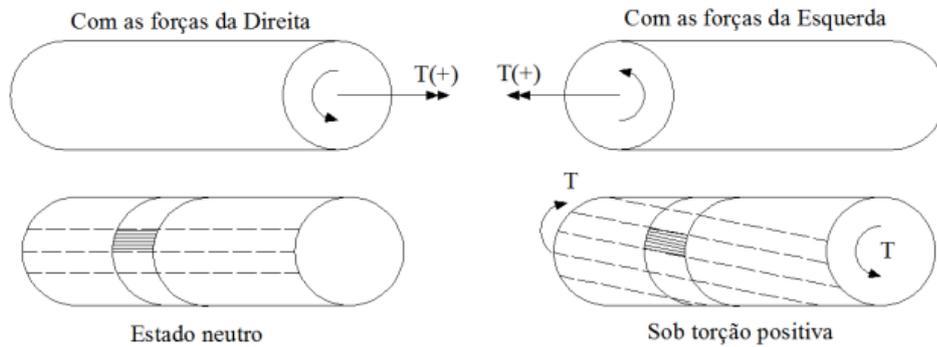
Segundo Sarkis (2014), o momento fletor é definido através da integral da força cortante que atua na seção transversal estudada. Que é representada pela equação 1:

$$M = \int Q dx \quad Q = \frac{dM}{dx} \quad (1)$$

3.3 Momento torçor

Uma peça submete-se a esforço de torção, quando temos um torque em uma das suas extremidades e um contra torque na extremidade oposta (SARKIS, 2013). O momento torçor causa rotação em torno do eixo z, de uma face do elemento de volume em relação a outra, exemplificado na Figura 5.

Figura 5: Momento torçor.



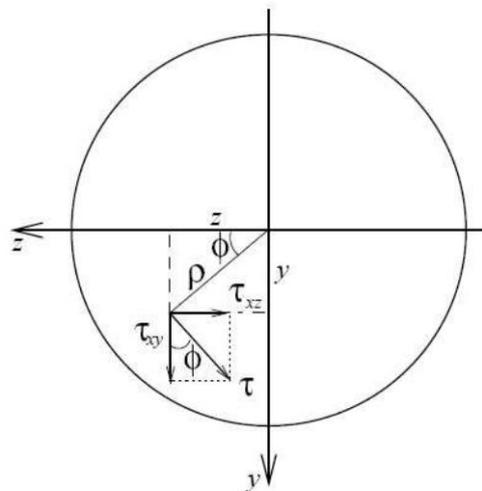
Fonte: HALLACK, et al. (2013).

De acordo com Hallack, et al. (2013), O momento torçor está associado as tensões cisalhantes τ_{xy} e τ_{xz} .

A partir da Figura 6, se analisado um ponto P(x,y) contido dentro da secção transversal de um eixo chega-se à equação para o torque a partir do braço " ρ ", da tensão cisalhante " τ " e da área "A":

$$T = \int_A \rho \tau dA \quad (2)$$

Figura 6: Tensões cisalhantes na torção.



Fonte: HALLACK, et al. (2013).

3.4 FESA

Segundo Mirlisenna (2016), o método dos elementos finitos é um método numérico para resolver problemas de valor de contorno, ou seja, problemas de engenharia com geometria não idealizada, simétrica. Áreas problemáticas típicas de interesse em engenharia que são solucionáveis pelo uso do método dos elementos finitos incluem análise estrutural, transferência de calor, fluxo de fluido, transporte de massa e potencial eletromagnético.

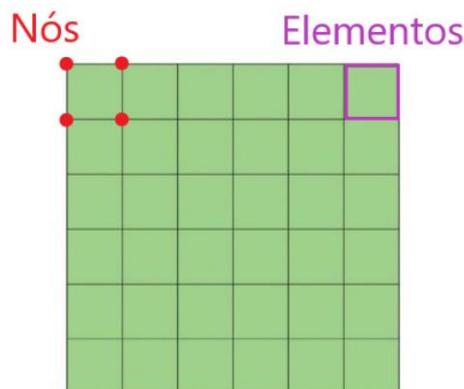
Para problemas envolvendo geometrias complexas, carregamentos e propriedades do material, geralmente não é possível obter soluções matemáticas analíticas (LOGAN, 2016).

Na modelagem utilizando o MEF e softwares comerciais, é necessário a compreensão do comportamento físico dos elementos que estão disponíveis para o uso. A análise numérica começa com a discretização dos componentes, ou seja, escolhendo o tipo de elemento para compor a malha dos componentes. Malha é o conjunto de elementos que formam/representam a geometria do produto analisado.

Escolher o tipo adequado de elemento ou elementos para se obter o comportamento físico do problema é uma das inúmeras decisões que devem ser tomadas pelo projetista (LOGAN, 2016).

Segundo Logan (2016), a malha do modelo é formada por nós e elementos que nada mais são coordenadas que representam o desenho do modelo a ser analisado, assim representado na Figura 7.

Figura 7: Nós e elementos de uma malha.



Fonte: ALTAIR (2019).

Planejar os vários aspectos da solução de problemas é o primeiro passo para resolver um problema de engenharia. Um planejamento cuidadoso economiza tempo a longo prazo e pode garantir maiores chances de sucesso na obtenção de um modelo virtual satisfatório.

Os objetivos para o dimensionamento dos componentes do projeto devem ser claros, tais como: deflexões máximas, picos de tensão, rigidez sob carga (flambagem), força máxima, vida à fadiga, características de vibrações, tensões térmicas, etc. A escolha do elemento pode ser feita pela análise de três parâmetros: tamanho e forma da geometria, o tipo de análise a ser feita e o tempo alocado para o projeto (ALTAIR, 2019).

Em relação à geometria, a escolha dos elementos pode ser categorizada como 1-D, 2-D ou 3-D com base nas dimensões dominantes da geometria e, em seguida, o tipo de elemento é selecionado de acordo com a análise feita.

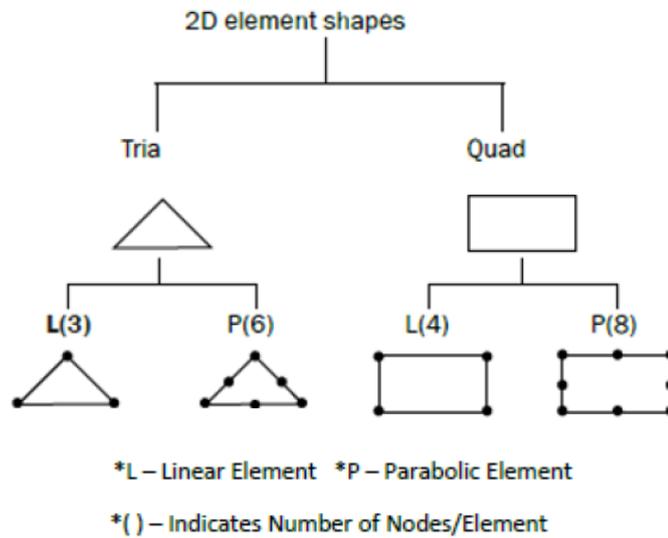
Elemento 1-D: usado para geometrias com uma das dimensões muito grandes em comparação com as outras duas. A forma do elemento 1-D é uma linha. Quando o elemento é criado conectando dois nós, o *software* conhece apenas uma das três dimensões. As duas outras dimensões, área da seção transversal, devem ser definidas pelo usuário como dados de entrada adicionais e atribuídas aos respectivos elementos. Exemplo prático: eixo longo, barra, viga, coluna, solda a ponto, juntas parafusadas, juntas de pinos, modelagem de rolamentos etc (ALTAIR, 2019).

Elemento 2-D: Usado quando duas dimensões são muito grandes em comparação à terceira. A malha 2-D é realizada em uma superfície intermediária da peça. Os elementos 2D são planares, assim como uma folha de papel. Ao criar elementos 2-D, o *software* conhece 2 das 3 dimensões necessárias. A terceira dimensão, espessura, deve ser fornecida pelo usuário como um dado de entrada adicional. Exemplos práticos: Todas as peças de chapa metálica, componentes de plástico como painéis de instrumentos, etc. Em geral, a malha 2D é usada para peças com uma relação largura / espessura > 20 (ALTAIR, 2019).

Elemento 3D: usado quando todas as três dimensões são comparáveis. Exemplos práticos: Caixa de transmissão, caixa da embreagem, bloco do motor, biela, eixo da manivela, etc (ALTAIR, 2019).

A Figura 8 exemplifica os tipos de elementos 2D que podem ser utilizados na confecção da malha do modelo.

Figura 8: Forma de elementos 2D.



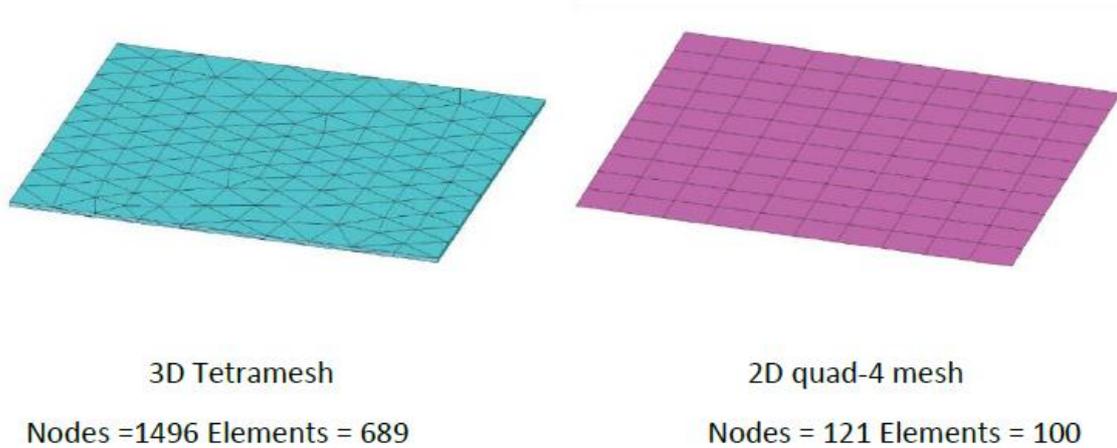
Fonte: ALTAIR, 2019.

Existem algumas regras para facilitar realização das análises e criação de uma malha de qualidade, dentre elas:

- A malha precisa de uma aparência uniforme e regular, minimizando as incertezas de malha, com a utilização de elementos mais simples que atendam ao projeto.
- Iniciar as análises com uma malha mais grosseira, facilita o entendimento dos resultados da modelagem, podendo assim, refinar a malha onde necessário.

Um exemplo claro da otimização de uma malha para análise é representado na Figura 9, que realça a diferença da utilização de uma malha 3D Tetra em relação a uma malha de casca 2D. A figura representa uma chapa, uma geometria simples, que para as duas representações traz resultados equivalentes, porém a malha 3D tem um custo computacional maior que o da malha 2D, devido a maior quantidade de nós que essa malha gerou.

Figura 9: Malha com 2 tipos de elementos.



Fonte: ALTAIR, 2019.

Convencionalmente é realizado um estudo sobre a qualidade da malha que será utilizada. *Softwares* CAE possuem a opção de geradores de malhas de modo automático, porém essa opção pode trazer problemas para geometrias mais complexas. A quantidade de elementos que o algoritmo malhador gera pode ser um problema para o projeto, já que aumentando a quantidade de elementos ou informações para o *software* calcular, maior é o custo computacional e o tempo necessário para conseguir discretizar (malha).

O balanceamento entre a fidelidade dos resultados com a complexidade do modelo é o objetivo das análises de convergência de malha. Análises de convergência de malha é uma técnica que auxilia na escolha do tamanho dos elementos de modo que o engenheiro tenha uma boa representação física do problema. Elementos com formas geometricamente isotrópicas, ou seja, formas que se aproximam de figuras geométricas como quadrado, cubos, triângulos equiláteros, dentre outros, também trazem robustez matemática à modelagem.

3.5 Análise linear estática

A análise linear indica que o comportamento elástico material e da estrutura se mantém linear sob carregamento, isto é para o caso unidimensional (lei de Hooke):

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (4)$$

$$F = k u \quad (5)$$

A análise estática, por outro lado, respeita, duas condições:

- A resposta do modelo não dependa da variável física tempo ($d/dt = 0$);
- a solução é obtida através de um equilíbrio de forças e momentos, nas equações 5 e 6:

$$\sum F_{x,y,z} = 0 \quad (5)$$

$$\sum M_{x,y,z} = 0 \quad (6)$$

Esse tipo de análise envolve a especificação de casos de carga e condições de contorno apropriadas que serão utilizados na determinação das máximas tensões que o material irá se submeter. Esses resultados podem ser usados para avaliar a estrutura sob critérios de tensão de pico, análises de fadiga, flambagem, transmissibilidade e outros.

3.6 Critério de von Mises

De acordo com Norton (2013), a tensão equivalente de von Mises σ' é definida como a tensão de tração uniaxial equivalente, que criaria a mesma energia de distorção que é criada pela combinação atual das tensões aplicadas. Esse procedimento nos permite tratar casos de tensão multiaxial combinada a tensões de cisalhamento como se fossem devidos a um carregamento de tração pura. Para o caso tridimensional, a tensão de von Mises pode ser representada equação 7, onde σ_n , para $n=1,2,3$, são as tensões principais.

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (7)$$

Para esse projeto, foi escolhido o critério de von Mises pelo fato de que é considerado o mais usual para materiais dúcteis e homogêneos cujas resistências à compressão e à tração são aproximadamente as mesmas e cuja resistência ao cisalhamento é menor que a resistência à tração. Considera-se que esses materiais falham por cisalhamento, e a teoria da energia de distorção melhor prediz suas falhas. Materiais não uniformes e frágeis, como ferro fundido, têm tipicamente suas resistências à tração muito abaixo de suas resistências à compressão, e suas resistências ao cisalhamento estão entre estes dois valores (NORTON, 2013).

3.7 Análise modal

Análise modal é uma técnica poderosa para identificar as características dinâmicas das estruturas. É imprescindível conhecer os parâmetros modais - frequência de ressonância, forma modal e características de amortecimento da estrutura em sua variação (CHANDRAVANSI, 2013), para uma correta interpretação dos resultados.

Segundo Chandravanshi e Mukhopadhyay (2013), a análise modal é o estudo das propriedades dinâmicas de estruturas sob excitação vibracional. É um procedimento linear de resposta dinâmica que pode avaliar e sobrepor as formas de modo de vibração livre para caracterizar os padrões de deslocamento. As análises modais em estruturas livres, descrevem as configurações nas quais uma estrutura se desloca naturalmente. Os modos mais baixos (menores frequências) tendem a apresentar a maior contribuição na representação da resposta estrutural. Para os modos mais altos, os modos de vibrar são mais difíceis de serem representados/modelados. O mais comum é fazer análises para os primeiros modos de vibrar (5-10 modos) ou para faixas de frequência de interesse.

3.8 Soldagem

No mundo os tipos de soldas mais populares encontrados são (MODENESI, 2000):

- Eletrodo revestido (SMAW)
- TIG (GTAW)
- MIG/MAG (GMAW)
- Hidrogênio atômico (AHW)
- Arame tubular (FCAW)
- Arco de plasma (PAW)
- Oxigás
- Arco submerso (SAW)

O processo de soldagem de eletrodo revestido une metais através do aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo especial revestido e a peça. E de acordo com Modenesi (2000), é considerado um processo versátil em termos de materiais soldáveis e também é recomendado para aços carbono e suas ligas.

Segundo Modenesi (2012), a junta dos processos de soldagem por fusão trabalha com altas temperaturas, onde o arco elétrico pode chegar a 20000°C e a poça de fusão acima de 2000°C. Temperaturas concentradas na superfície de contato da junta de poucos milímetros

quadrados. A transferência de calor pode gerar alterações de temperaturas na região de solda e adjacentes.

Essas variações causam, além da fusão e solidificação do cordão de solda, variações dimensionais e alterações microestruturais localizadas que podem resultar em efeitos indesejáveis, tais como:

- Tensões residuais e distorção;
- deterioração de propriedades mecânicas (ductilidade, tenacidade, resistência mecânica, etc);
- Formação de trincas devido a (a) e (b);
- Deterioração de propriedades físicas, químicas, etc.

Assim, quando um projeto mecânico considerada um processo de solda em seu processo de fabricação, o dimensionamento das regiões soldadas requer uma maior atenção.

Nas juntas soldadas com carregamento de fadiga, alguns fatores que afetam a segurança da junta, como condições de operação, tipo, projeto e confiabilidade da solda, já são considerados no cálculo da resistência à fadiga da junta soldada. Com isso, necessita-se atenção com a qualidade do projeto da solda ao propor o fator de segurança de fadiga. Ao se considerar a característica do carregamento de fadiga (especialmente para carregamento reverso), as concentrações altas de tensão que são originadas em soldas não homogêneas reduzem a segurança de fadiga da junta. Assim, as transições entre a solda e o material básico representam a parte mais arriscada da junta soldada. O efeito dos entalhes é maior em lugares de projeto de solda ou usinagem não adequado (INVENTOR, 2020).

De acordo com o Inventor (2020), o valor mínimo recomendado do fator de segurança durante o carregamento de fadiga é indicado na faixa $n_f = \langle 1,5 \dots 3 \rangle$ e depende do padrão de carregamento da fadiga.

3.9 Análise de fadiga

Para o projeto, foi levado em consideração a falha por fadiga uniaxial do mecanismo da cuba, e de acordo com Shigley, et al. (2014), a fadiga é responsável por boa parte das falhas em serviço de quase a totalidade dos componentes mecânicos. A fadiga foi utilizada para determinar, junto as outras análises, o melhor dimensionamento para essa concepção, para que resulte no menor custo de produção bem como a facilidade da compra dos componentes.

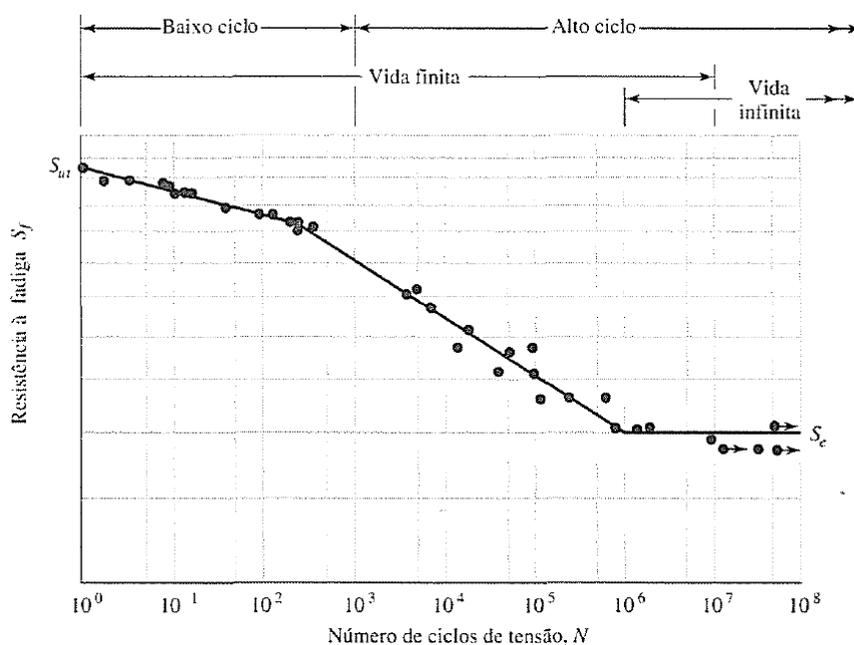
A fadiga é o dano estrutural progressivo e localizado que ocorre quando um material é submetido a um carregamento cíclico. A fadiga é o modo de falha mais importante para componentes mecânicos sob carga cíclica. É importante reconhecer que a falha por fadiga é um

evento probabilístico e que um bom projeto contra fadiga deve envolver análises, sínteses e testes (ALTAIR, 2018).

O diagrama S-N tornou-se o método padrão para se caracterizar o comportamento dos materiais submetidos a solicitações alternadas e ainda é utilizado atualmente, apesar de outras abordagens para se determinar a resistência dos materiais submetidos a cargas dinâmicas estarem disponíveis (NORTON, 2013).

De acordo com Altair (2018), a curva SN de um material qualquer, é determinada a partir de experimentos. A Figura 10 representa uma curva S-N qualquer, representada pela relação de tensão por números de ciclos.

Figura 10: Um diagrama S-N traçado a partir dos resultados de testes de fadiga axial completamente inversa.



Fonte: SHIGLEY, 2018.

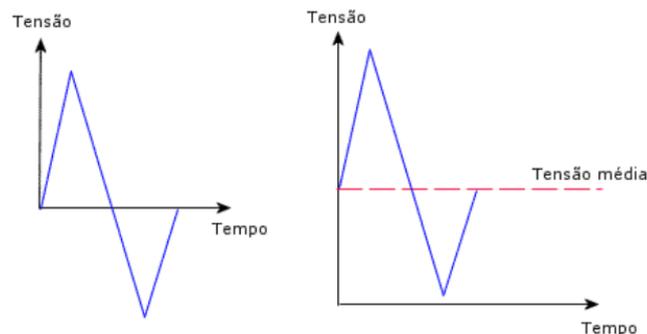
Essa figura representa a utilização típica da análise de fadiga de alto ciclo. De modo geral a curva S-N pode ser dividida em:

- Baixo ciclo: A vida de um componente está abaixo de 10^3 ciclos, usualmente considerados em aplicações de carregamento pesado.
- Alto ciclo: Componente que está sujeito a cargas e vida útil menores e que possuem uma vida maior que 10^5 ciclos.
- Vida infinita: A vida infinita, em que o material nunca irá falhar pelos níveis de tensão impostos no sistema.

3.10 Correção das curvas SN

Segundo Solidworks (2019), a amplitude da tensão alternada em um ciclo de tensão é calculada como metade do intervalo de tensão do ciclo. A extensão dos danos causados por um ciclo de tensão depende não apenas da tensão alternada, mas também da tensão média. Por exemplo, a Figura 11 apresenta 2 ciclos que possuem a mesma tensão alternada, mas como possuem tensões médias diferentes, eles causam diferentes extensões de dano.

Figura 11: 2 ciclos de tensão aleatórios do tipo reverso e repetido.



Fonte: SOLIDWORKS, 2019.

A tensão média é zero quando a carga é totalmente reversível. Os resultados experimentais mostraram que a tensão média tem um impacto significativo na resistência à fadiga de um componente (SOLIDWORKS, 2019).

Para o projeto foi utilizado o critério de correção de tensão média de Goodman. A equação de correção de tensão Goodman pode ser representada na equação 8:

$$S_{ca} = \frac{S_a}{1 - \left(\frac{S_m}{S_{ut}}\right)} \quad (8)$$

S_a - Tensão alternada [MPa]

S_m - Tensão média [MPa]

S_{ca} - Tensão corrigida [MPa]

S_{ut} - Resistência máxima a tração [MPa]

3.11 Regra do dano linear de Palmgren-Miner

Uma vez que a análise de fadiga será feita para uma filosofia de vida para vida finita, é preciso estimar quando a estrutura irá falhar por fadiga (ao contrário da filosofia de projeto para

vida infinita onde a estrutura não falha por fadiga). A teoria de danos cumulativos pressupõe que um ciclo de tensão com uma tensão alternada acima do limite de resistência inflige um dano permanente mensurável. Ela também pressupõe que os danos totais causados por um número de ciclos de tensão são iguais à soma dos danos causados pelos ciclos de tensões individuais (SOLIDWORKS, 2017).

Segundo Altair (2018), o solver utilizado nas análises, o *optistruct*, utiliza a regra de Palmgren-Miner de acumulação de dano linear para avaliar quando ocorre dano no material. Representado na equação 9:

$$\sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_{i,f}} \geq 1.0 \quad (9)$$

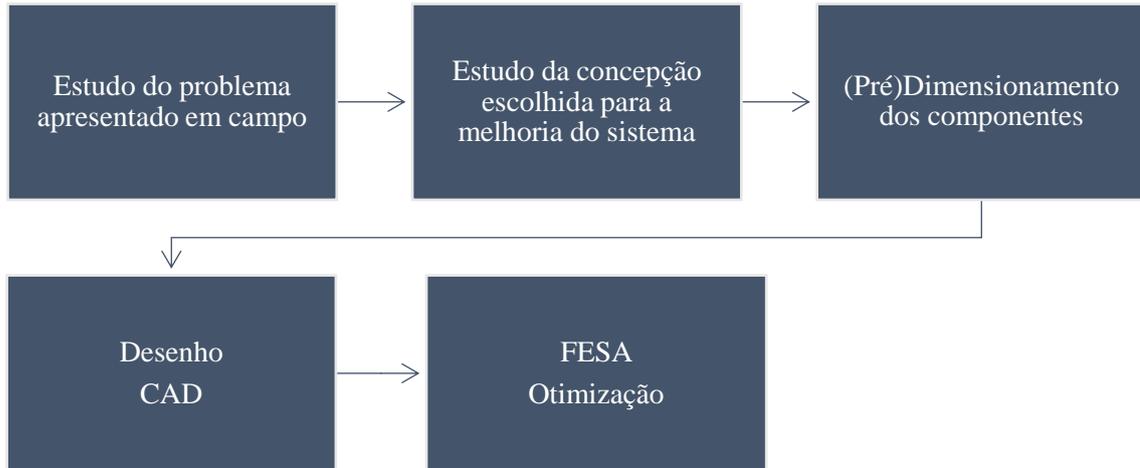
$N_{i,f}$ - Vida de fadiga do material da curva SN para a tensão/deformação de referência do nível de tensão particular i (a correção média deve ser aplicada).

n_i - Número de ciclos de estresse neste nível de carga i .

4 METODOLOGIA

Na escolha da melhor concepção e do dimensionamento dos principais componentes do elevador de frutos de café, será considerada a metodologia a seguir. A mesma possui 5 etapas que estão representadas no fluxograma da Figura 12.

Figura 12: Fluxograma da metodologia do projeto.



Fonte: Dos autores.

4.1 Estudo do problema apresentado em campo

Conforme já identificado, o problema em questão se trata do travamento dos elevadores de canecas na colhedora MakReis MC1400. O projeto tem início no estudo do elevador de canecas, com a finalidade de entendimento do seu funcionamento e quais os pontos que podem ser melhorados.

4.2 Estudo da concepção escolhida para a melhoria do sistema

Para a definição e escolha de concepções que abrangem o projeto com a finalidade de melhorar o desempenho, é necessária a identificação dos critérios responsáveis pela tomada de decisão final e escolha da melhor concepção. Para isso, será realizada uma análise comparativa dos parâmetros atuais e como o sistema será melhorado a partir da escolha de um novo conceito.

4.3 (Pré)Dimensionamento

Antes de dar início aos cálculos dos componentes para o dimensionamento final do sistema, foi realizado um desenho preliminar da concepção escolhida, com o intuito de trazer uma visão melhor da proposta do trabalho. Destaca-se que desde o pré-dimensionamento, utilizou-se uma ferramenta de CAD para se determinar as dimensões iniciais, que seguiram as dimensões de referência da colhedora.

Na sequência, um cálculo analítico foi proposto para se tentar identificar as dimensões do projeto. A simplificação gira em torno de tensões advindas de momentos fletores e torções.

Dimensões preliminares como largura e comprimento foram retiradas com medições reais da cuba do próprio elevador da colhedora para dar a base da geometria do projeto. Após a definição da geometria conceitual, define-se um material para que os cálculos estruturais possam ser utilizados no dimensionamento final do mecanismo. A seleção de um material adequado é importante pois influencia diretamente tanto na qualidade do produto, quanto no custo, garantindo a funcionalidade confiável e segura.

4.4 Desenho (CAD)

Após o pré-dimensionamento, a proposta para a solução do problema em questão foi atualizada e uma proposta tridimensional foi elaborada para a avaliação utilizando o MEF/FESA.

4.5 FESA

Após a investigação analítica para o dimensionamento da cuba, percebeu-se a necessidade em se utilizar uma ferramenta de CAE e passou-se então para a análise em elementos finitos, como forma de otimização, mas agora considerando a geometria real da proposta. Ao modelar os componentes em conjunto, é possível considerar a influência da flexibilidade de todos os componentes do mecanismo.

4.5.1 Condições de carregamentos/casos de carga

Levando em conta a concepção escolhida para o trabalho, foi definido um conjunto de condições de carregamento/ casos de carga que mais se aproximam da operação real desse mecanismo durante o processo de colheita:

- **Análises lineares:** tem a finalidade de estimar as tensões na geometria proposta, considerando as seguintes situações:
 - Travada em posição horizontal;

- Destravada, com café, em balanço no momento em que começa abrir;
- Totalmente aberta, sem café.
- Destravada, com café e em balanço, porém durante um momento de impacto em que a máquina passou em algum buraco.
- **Análise modal:** tem a finalidade de se identificar as frequências naturais desse sistema e verificar se esses valores não apresentarão problemas de transmissibilidade e/ou ressonância devido as vibrações da própria máquina.

Como referência, compara-se os valores obtidos do mecanismo da cuba com as frequências obtidas numa instrumentação de uma colhedora de café modelo K3 *advance* em funcionamento. Apesar de não ser do mesmo fabricante, a comparação é válida pois ambas as máquinas trabalham com a colheita da mesma cultura, o café.

- **Análise de fadiga:** uma das mais importantes, que foi levado em conta os ciclos de operação desse mecanismo, simplificando o espectro de carga para as configurações de carga mais críticas.

5 RESULTADO E DISCUSSÕES

Utilizando da metodologia acima, estão apresentados abaixo todo o estudo e cálculo realizado visando o objetivo proposto, que é propor uma geometria que possivelmente irá sanar o problema do travamento do mecanismo do elevador de frutos da colhedora do fabricante MakReis do modelo MC1400.

5.1 Estudo e estabelecimento da melhor concepção

Por padrão o elevador atual da colhedora trabalha transportando o café do ponto inferior ao ponto mais alto da máquina. O café começa a se acumular na parte inferior, e depois de um certo tempo, causa o travamento desse mecanismo, o que faz com que o operador desligue toda a máquina, abra o compartimento, e realize a limpeza desse café que está preso.

Pensando em eliminar o procedimento manual de limpeza para destravamento do elevador de frutos, foi proposta uma simples ideia de remover a cuba inferior do elevador e substituir com uma cuba automatizada. Essa cuba tomaria o lugar do fundo do elevador da colhedora, e seria um sistema automatizado, alimentado por um motor elétrico 12V, através do qual o mecanismo abriria e fecharia automaticamente em momentos pré-determinados durante o período de funcionamento da colhedora. Esse destravamento e travamento da cuba pode ser implementado com uma fechadura tipo solenoide.

Tabela 1: Comparativo da situação atual e a melhoria proposta.

Situação atual da cuba	<ul style="list-style-type: none"> • Região causa entupimento e travamento de todo o mecanismo do elevador; • Sistema manual de abertura e fechamento para o alívio dessa região de frutos de café; • Necessidade do desligamento de toda a máquina para a limpeza.
Cuba automatizada (concepção do projeto)	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema é aliviado automaticamente em intervalos pré-determinados durante a etapa de colheita; • Sistema automático de abertura e fechamento da cuba; • Alimentação do mecanismo por um motor de 12V; • Destravamento do sistema através de um pino de fechadura tipo solenoide;

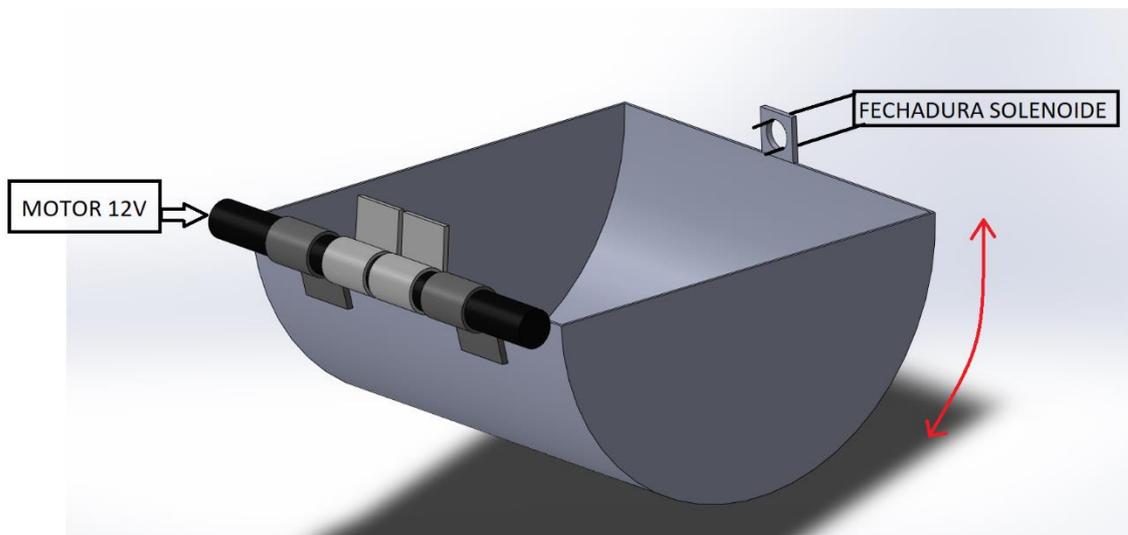
Fonte: Do autor.

Essa ideia de otimização desse subsistema do elevador de frutos de café (cuba), veio após um *brainstorm* realizado após a identificação desse problema em campo. Buscou-se uma

proposta que poderia minimizar esse problema, e também tentar eliminar a necessidade da interrupção da colheita, focando no ganho de produtividade. Essa automatização da cuba traria a facilidade de que o operador não precisaria mais interromper toda a colheita para destravar o mecanismo.

Para um melhor entendimento, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e xemplifica as características comentadas anteriormente.

Figura 13: Geometria e funcionamento da proposta da cuba automatizada.



Fonte: Do autor.

Para a confecção dessa cuba, seriam utilizadas uma chapa conformada unida a duas chapas de formato semicilíndrico por uma solda. A conexão entre a cuba e o motor elétrico é proposto nesse trabalho através de duas estruturas iguais que funcionam como dobradiças em formato que lembra uma “orelha” (termo usado no restante do texto). As orelhas, também soldadas, representam uma região onde se encontra os concentradores de tensão mais críticos do projeto. É a região de transmissão do torque do motor, através do eixo, até a cuba.

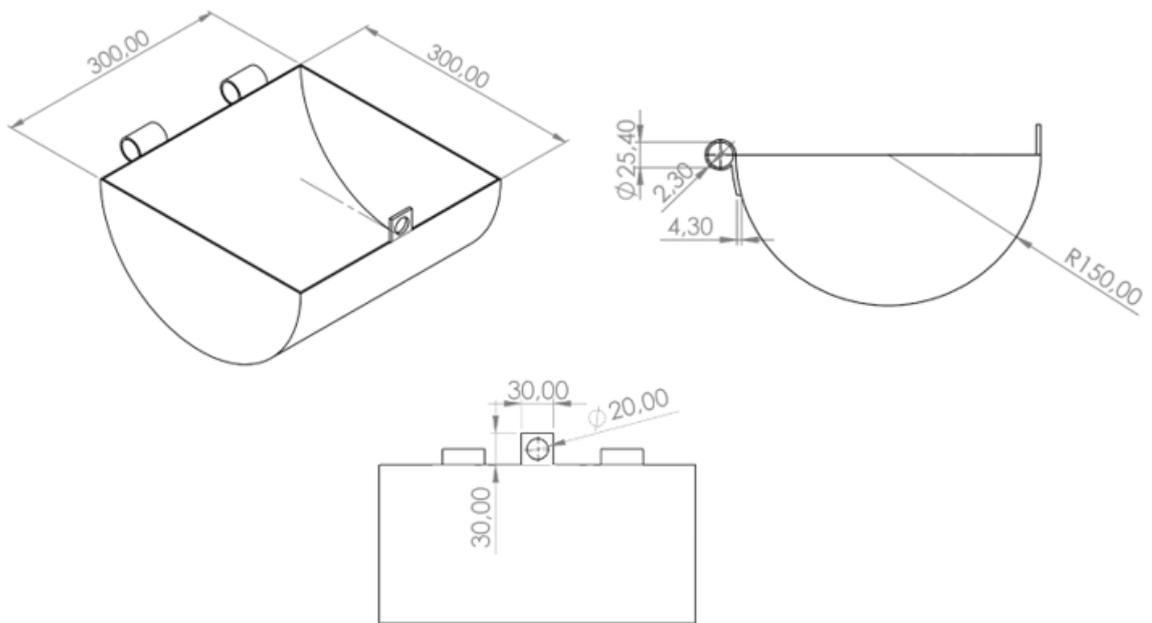
5.1.1 Pré-dimensionamento

Como proposta inicial, definiu-se uma geometria para o mecanismo da cuba, com auxílio de um software de CAD. Para chegar nas cotas do desenho, foram extraídas medidas do próprio elevador da colhedora em que a cuba será instalada. As orelhas foram criadas com o diâmetro a partir do próprio eixo que transmitira o torque do motor elétrico.

Já a espessura foi determinada por tentativa e erro durante a análise preliminar com cálculos analíticos, que por fim, chegou a um valor mínimo de espessura de chapa, e também

que atende aos critérios estabelecidos para esse projeto. A Figura 14 apresenta as dimensões utilizadas para o projeto. Inicialmente utilizando espessuras para a cuba de 0,9mm e para as orelhas 1,1mm.

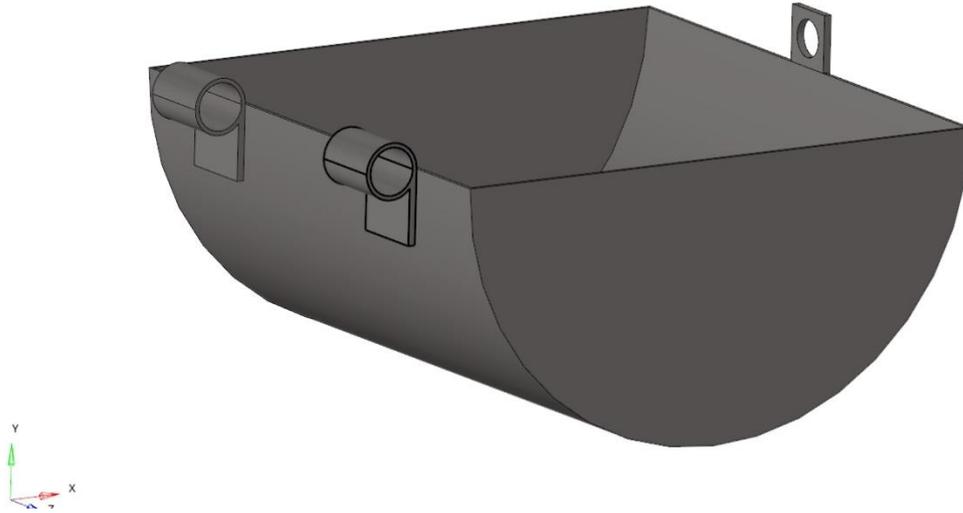
Figura 14: Dimensões do projeto da cuba.



Fonte: Do autor.

A partir das dimensões obtidas foi possível a realização da geometria, que está representada na Figura 15.

Figura 15: pré-dimensionamento da cuba.



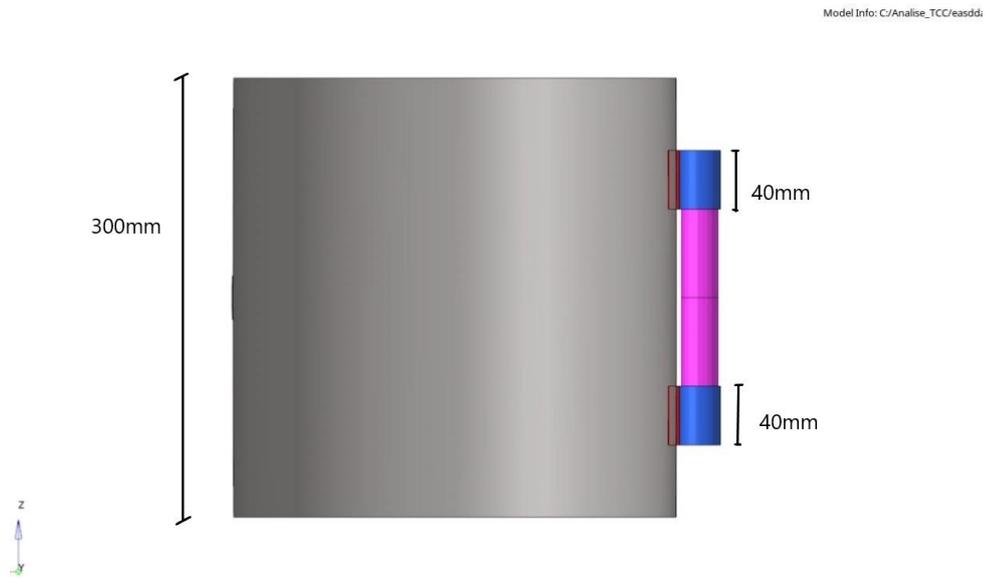
Fonte: Do autor.

Os componentes principais desse sistema são:

- A cuba, feita com chapa de metal;
- 2 “orelhas” da mesma chapa que serão soldadas na cuba e servem de pontos de ancoragem dessa cuba no eixo do motor, e mais 2 para a ligação com o elevador.;
- 1 eixo para a transmissão do torque;
- 1 motor elétrico que acionaria todo o sistema;
- 1 solenóide para realizar o destravamento e travamento da cuba.

Analisando os esforços que estão atuando na cuba, observa-se que a mesma está sendo solicitada principalmente pelos esforços de flexão e torção, localizados na região de fixação, nas duas orelhas (em azul), representado na vista de cima da cuba na Figura 16.

Figura 16: Vista superior da cuba.



Fonte: Do autor.

Analisando a Figura 17 e considerando o momento do centro de massa da cuba e o tamanho do braço das orelhas até o centro de massa (aproximado), é possível estimar o momento fletor na cuba e o torque no eixo, com auxílio das equações básicas 10, 11 e 12.

$$M = F \times r \quad (10)$$

$$\sigma_x = -\frac{M \cdot y_{\text{máx}}}{I} \quad (11)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (12)$$

F - Força peso [N]

r – Braço de aplicação da força [mm]

M - Momento [N.mm]

I - Momento de inércia [mm⁴]

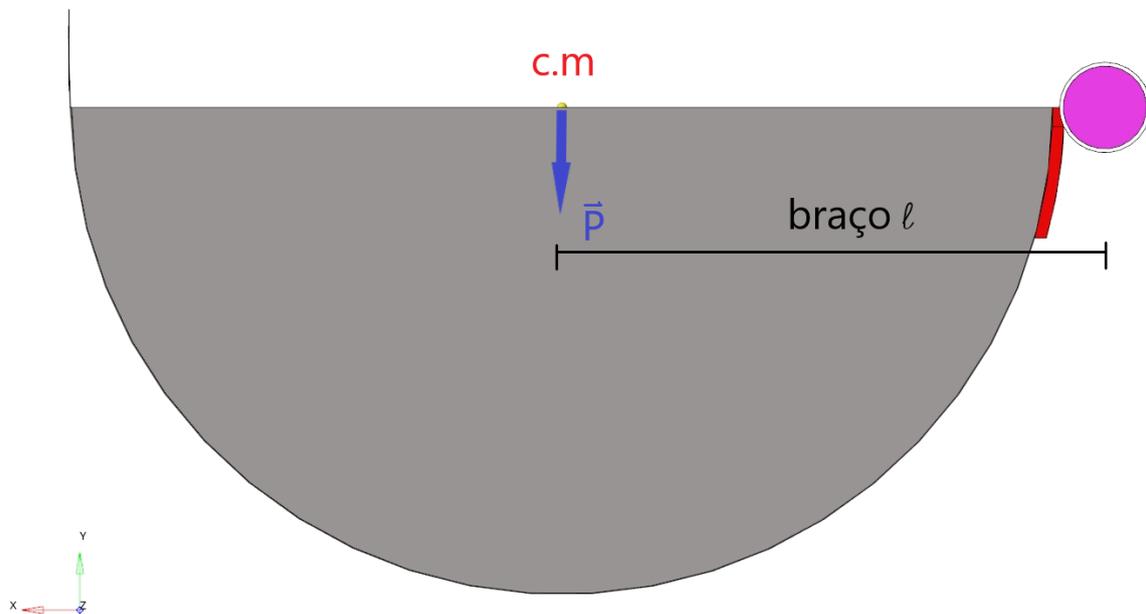
$y_{\text{máx}}$ - $h/2$ [mm]

σ_x - Tensão longitudinal [MPa]

b - Largura da seção [mm]

h - Altura da seção [mm]

Figura 17: Diagrama representativo do momento gerado pela cuba.



Fonte: Do autor.

Simplificando a geometria considerando uma viga em balanço e utilizando os seguintes parâmetros:

- Massa da cuba + peso do café (m) = 3,7kg
- Espessura de chapa (h) = 0,9mm
- Largura (b) = 300mm
- Braço (espaço + espessura) $r = 150,45$ mm
- $y_{máx} = (h/2) = 0,45$ mm

Ressaltando que o valor de massa da cuba foi retirado do programa, já que o mesmo a calcula, e a quantidade de café considerada para a conta analítica e posteriormente a numérica é de 1 kg.

O valor de tensão obtido utilizando a equação 8, 9 e 10 obteve-se um valor de 136MPa. Um valor baixo, mas devido a simplificação pela falta da seção dessa cuba e pela utilização da largura de seção com valor alto. Levando em conta somente a largura e espessura das orelhas da cuba, ou seja, $b = 80$ mm (valor da largura das 2 orelhas) e $h = 1,1$ mm (espessura das orelhas), o valor agora de tensão obtida é de 343MPa. Considerando o material SAE1020 (limite de escoamento = 330MPa) que foi utilizado nesse projeto, pode-se ver que ele escoou.

Verifica-se assim a necessidade da utilização da simulação para entender os locais críticos desse modelo, visto a discrepância dos valores de tensão obtidos.

5.1.2 Seleção dos materiais e componentes

Para a escolha do material da cuba, foi pensado no SAE1020, que atualmente é o aço mais utilizado no mercado, devido a sua versatilidade, boa conformabilidade e boa usinagem. A relação custo-benefício desse metal é ótima comparada com outros metais e foi a escolha para esse projeto.

A cuba, as orelhas e o eixo foram todos considerados feitos com SAE1020, suas características principais estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Características do aço SAE1020.

SAE 1020	
Resistência máxima a tração	450MPa
Limite de escoamento	330 MPa
Módulo de elasticidade	186GPa
Densidade	7,87 g/cm ³
Poisson	0,29
Estirado a Frio	

Fonte: MatWeb.

É também um aço comumente utilizado para componentes mecânicos, pois possui uma excelente plasticidade e soldabilidade.

5.2 Dimensionamento dos componentes

O dimensionamento partiu da primeira proposta geométrica do pré-dimensionamento. As análises de FESA que refinam essa proposta são detalhadas na sequência.

5.3 FESA

Com base na geometria inicial, parte-se para a análise estrutural da proposta, com a utilização do pacote Hyperworks[®]. Nesse pacote de aplicativos, o aplicativo Hypermesh[®] é a interface de pré-processamento, onde é realizada a estratégia de malha em cima do modelo, a montagem do *case* (casos de carga/condições de contorno).

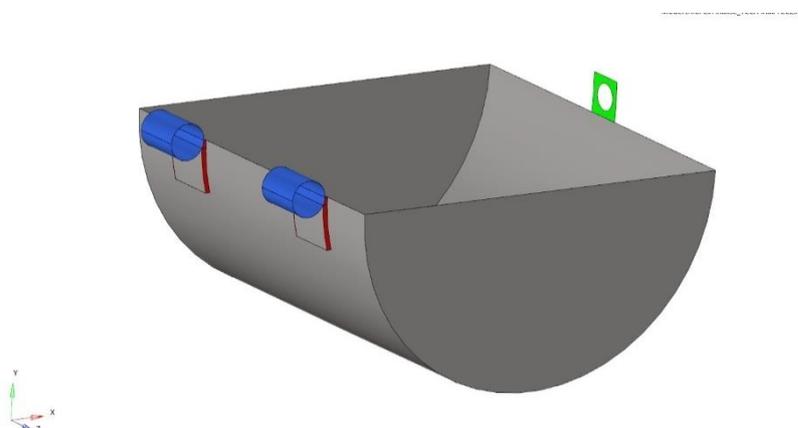
A fase de processamento nada mais é que a etapa de cálculo que o *software* realiza. Segundo Altair 2019, o *Optistruct* é um dos melhores solvers do mercado, é abrangente e preciso, que traz soluções para problemas lineares e não lineares, amplamente utilizado na solução de designs estruturais e otimização.

Após o processamento, o resultado é transportado para o aplicativo Hyperview®. Aqui é possível ser observado todos os resultados que foram calculados. Usualmente é feito uma análise visual no resultado em busca de variações abruptas de tensão entre elementos em áreas críticas, o que pode indicar a necessidade de refinamento da malha nessa região.

5.3.1 Geometria e simplificações

Por ser uma chapa, o modelo foi construído com elementos 2D. Com isso, a parametrização da espessura foi feita de modo natural dentro do software de CAE. Os elementos 2D são baseados em formulações analíticas para o plano médio de chapas, também chamadas superfícies medias. A superfície média está representada pela Figura 18.

Figura 18: Superfície média do modelo para modelagem 2D.



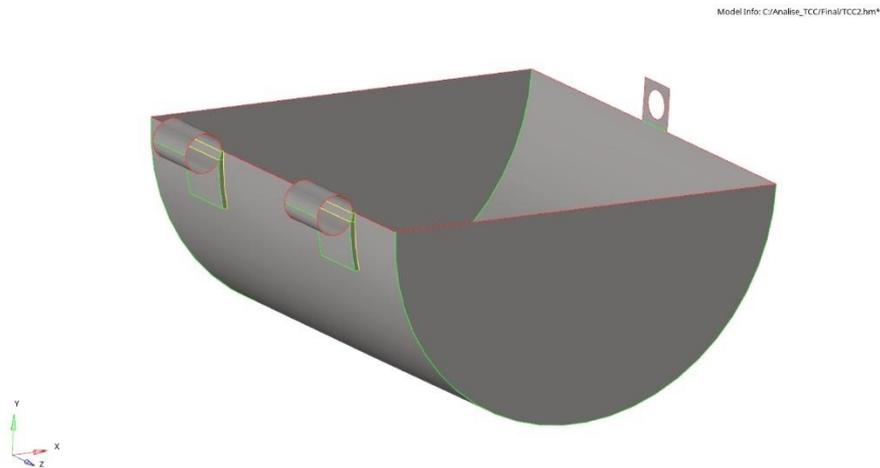
Fonte: Do autor.

Os componentes da cuba foram separados na análise por propriedade e cor. A área vermelha representa a solda que será feita para a união da orelha com a cuba. As orelhas de azul, com o intuito da alteração da espessura da mesma durante as análises, bem como a cuba (cinza) e o pino (verde).

Um ponto importante também após a criação da superfície, é a verificação se a geometria se encontra limpa e conectada. A Figura 19 apresenta o modelo final após a limpeza

e checagem em relação a algum tipo de aresta livre ou desconectada, que, comprometesse toda a análise.

Figura 19: Limpeza do modelo para modelagem 2D.



Fonte: Do autor.

5.3.2 Malha

Para a malha do conjunto, foi utilizado o conjunto de parâmetros na Tabela 3, dentro do *software*:

Tabela 3: Malha utilizada.

Algoritmo quality index optimize (QI)

Tam. de elemento	3 mm
Tipo de elemento	1ª Ordem Quadrilátero

Fonte: Do autor.

Após todo o procedimento de criação de malha, a mesma pode ser vista na Figura 20.

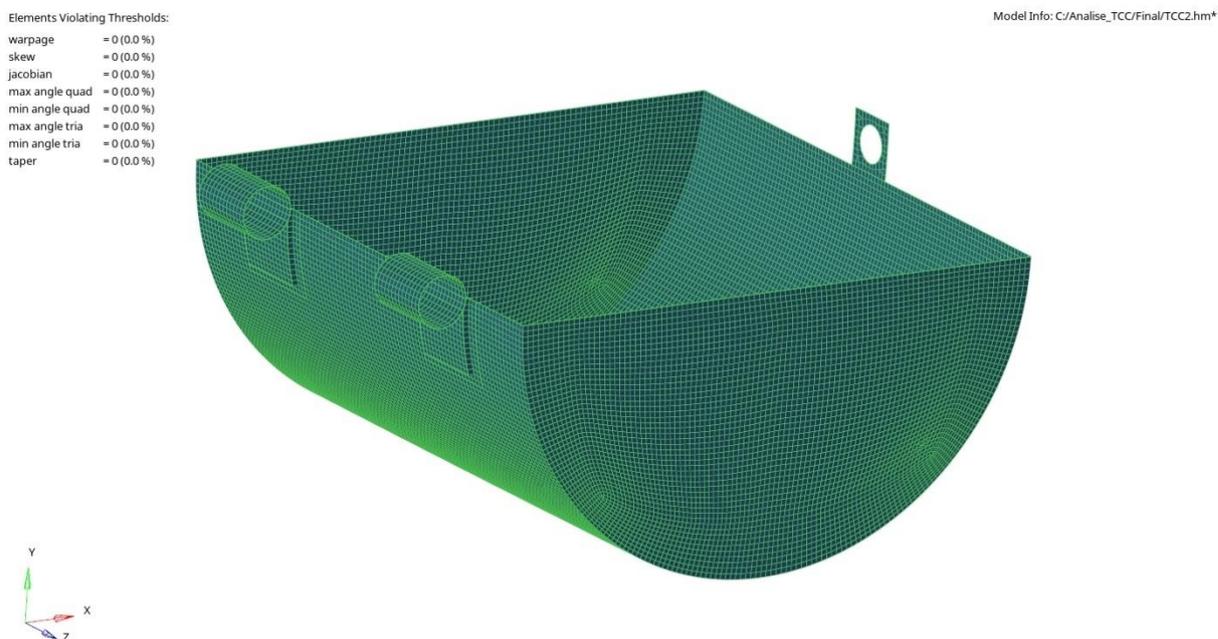
Figura 20: Malha final da geometria.



Fonte: Do autor.

E também com a utilização da ferramenta do programa de análise de qualidade de malha pode-se ver que a malha não apresenta nenhum elemento que irá impossibilitar a execução das análises pelo *optistruct*.

Figura 21: Quality index da malha realizada.



Fonte: Do autor.

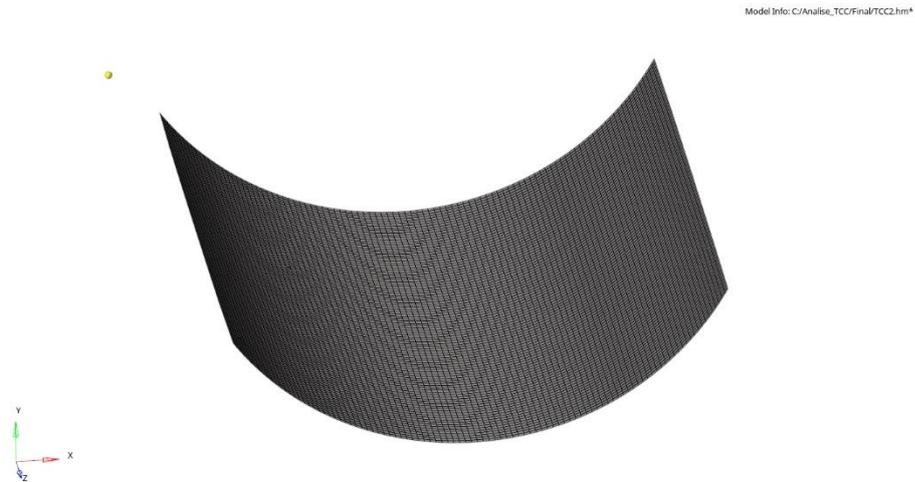
5.3.3 Condições de contorno

Para as condições de contorno do problema, foi feito um elemento RBE3 nas orelhas para transferir todas as forças e momentos para um único nó. O RBE3 não aplica rigidez no componente, diferente do RBE2, o que traz mais fidelidade nos resultados. O módulo para a aceleração da gravidade utilizada foi de $9,81 \text{ m/s}^2$, que foi considerada em todos os casos. O eixo foi modelado com elementos de viga 1D, CBEAM, com 1 polegada de diâmetro e seção maciça. Este eixo não foi objeto de dimensionamento desse trabalho. Todas as restrições de movimentos foram centralizadas no meio da viga, para poder obter os valores totais para o torque de reação no eixo.

Foi considerado uma quantidade de café de 1kg distribuída em uma área da face inferior da cuba. Essa quantidade foi estipulada por falta de conhecimento experimental da quantidade exata de café que reside nesse local e desse modo não desprezar essa solicitação nas análises. A cuba inteira com a espessura escolhida tem um peso total de aproximadamente 2kg. Somente o café já é metade do peso do sistema sozinho, logo o peso do café não é desprezível.

A Figura 22 mostra o corte feito na superfície para descobrir a área pelo próprio software e calcular a quantidade de café que será aplicada nessa região em forma de pressão.

Figura 22: Elementos onde será aplicado o peso do café.

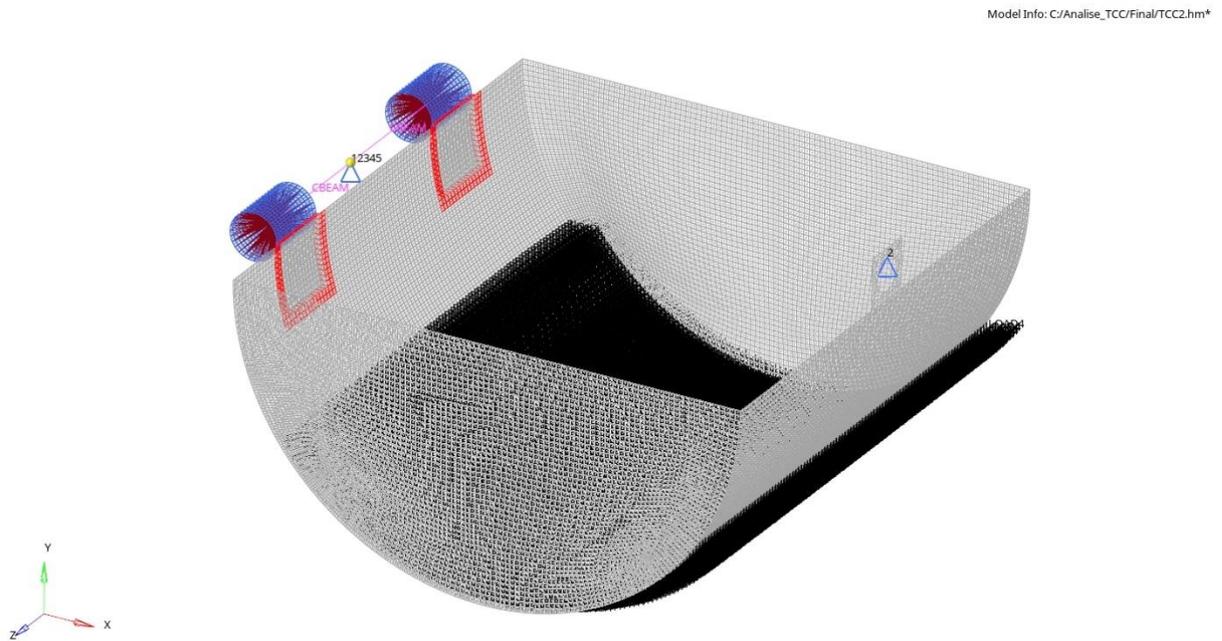


Fonte: Do autor.

Para o projeto serão realizados três tipos de análises estruturais (linear estática, modal e fadiga), porém ao total foram feitos 6 casos de carga para investigar toda a estrutura. Começando com as análises lineares estáticas, as seguintes combinações de carregamento e restrição foram identificadas:

- **Cuba travada:** A cuba está fixa, com café, na posição horizontal. A viga possui rotação em Z, e no encaixe do pino com apenas a restrição de movimento de translação em Y. Solicitada pelo peso da cuba mais o café, mostrado na Figura 23.

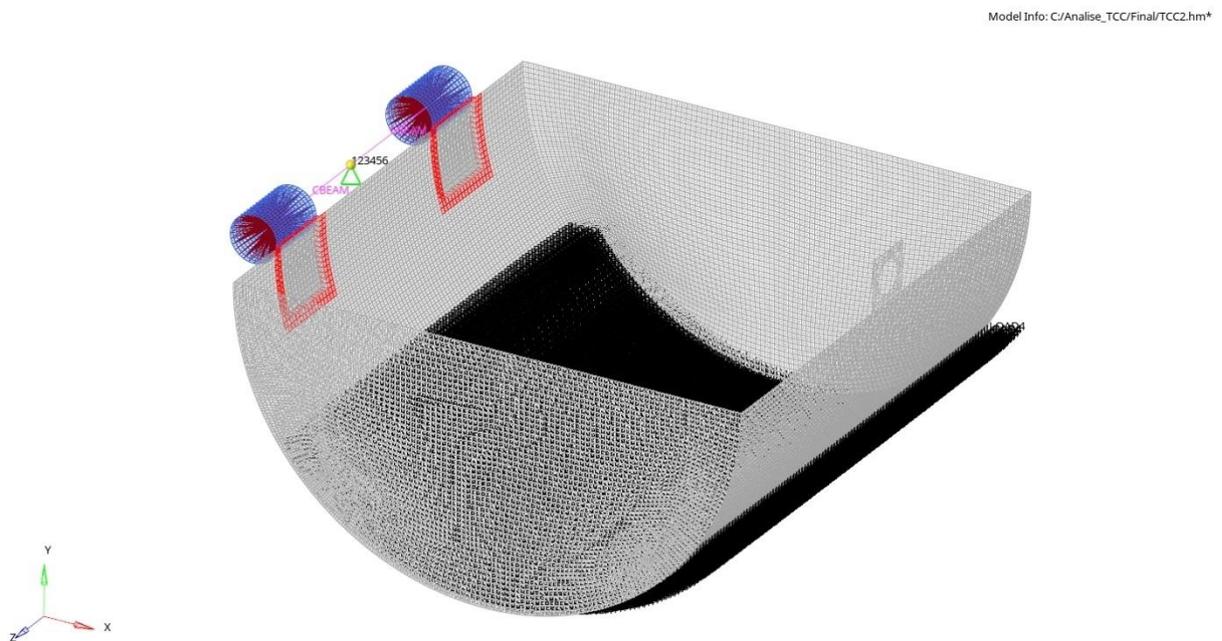
Figura 23: Cuba travada.



Fonte: Do autor.

- **Cuba destravada Gy:** A cuba está em balanço logo após o solenoide abrir, com frutos de café no seu interior. Mostrado na Figura 24.

Figura 24: Cuba destravada Gy.

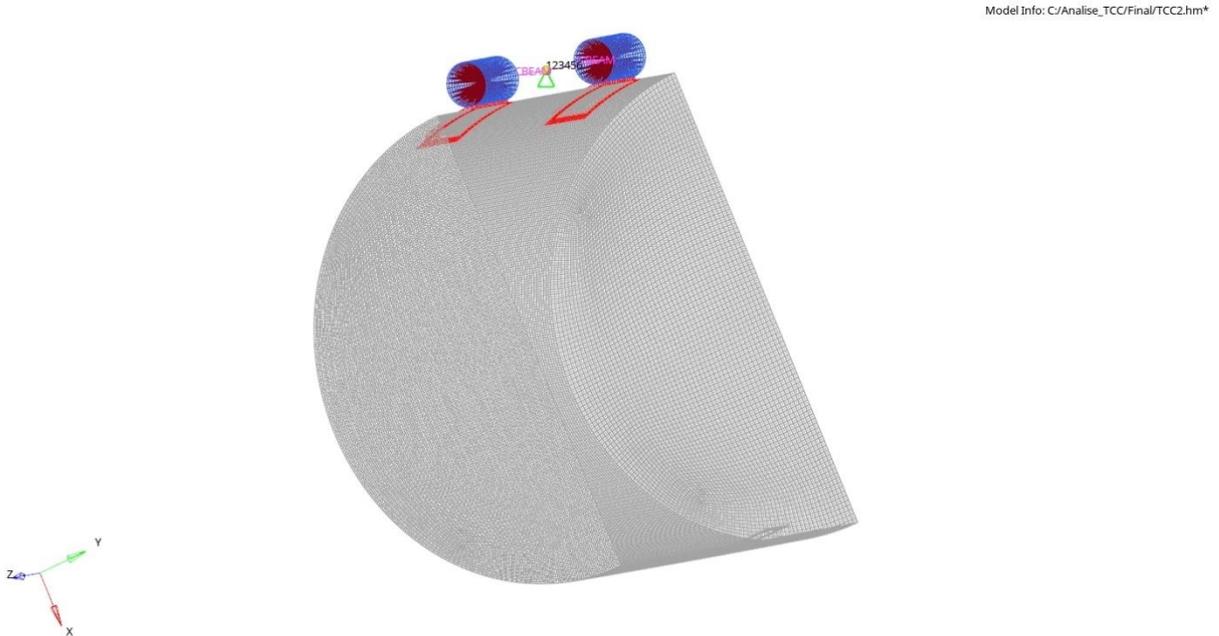


Fonte: Do autor.

- **Cuba destravada Gx:** A cuba está aberta, sem café, somente com a atuação da gravidade. Para facilitar a modelagem sem a necessidade de alterações de geometria,

foi alterado somente a direção da gravidade de Y negativo para X positivo, representando-a aberta, indicado na Figura 25.

Figura 25: Cuba destravada Gx.

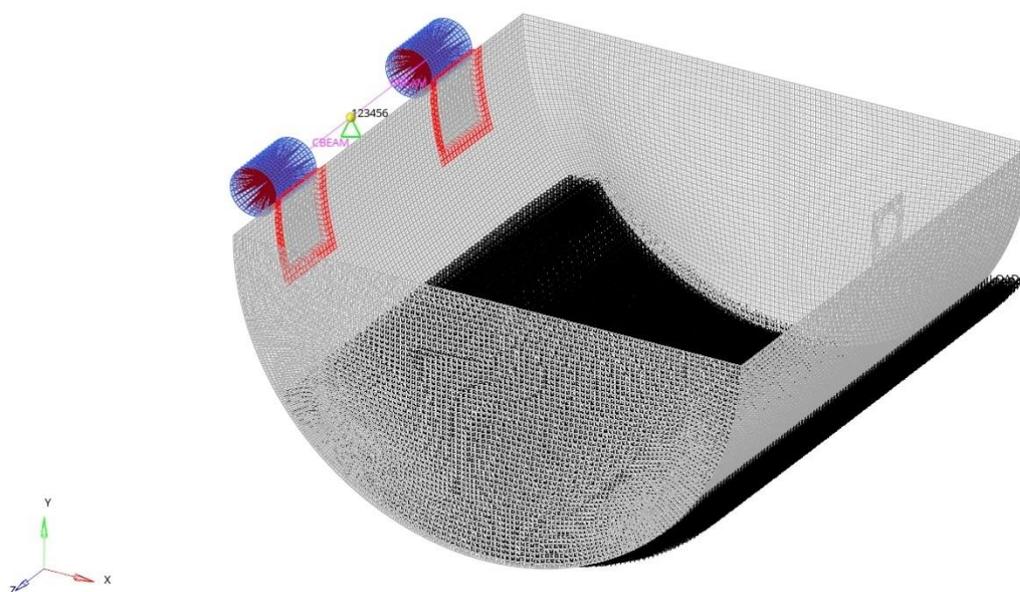


Fonte: Do autor.

- **Impacto 2Gy_neg_balanço_com_cafe:** A cuba possui os mesmos parâmetros da **Cuba destravada Gy**, porém é um caso mais conservador, onde é levado em conta uma situação de impacto que a colhedora possa ter passado em um buraco, e isso pode ser estimado, inicialmente, assumindo o dobro do carregamento de gravidade e peso do café.

Figura 26: Impacto2Gy negativo balanço com café.

Model Info: C:/Analise_TCC/Final/TCC2.hm*



Fonte: Do autor.

Já a análise modal, foi considerado o sistema operando no caso **Cuba travada Gy**, requisitando os 10 primeiros modos de vibrar em um intervalo de 1 a 60Hz. Os valores de frequência desse modelo de colhedora (MakReis MC1400) não foram encontrados na literatura, porém foi utilizado os valores instrumentados de uma colhedora de outro fabricante, porém com modelo similar.

Por fim, para a análise de fadiga buscou-se aqui aplicar a uma metodologia de projeto de vida finita (~1000 - 1000000 ciclos) para estimar o dano de fadiga no componente. Ou seja, calcular se há o dano acumulado no componente de modo a estimar o momento da ruptura do mesmo de modo otimizado em relação a metodologia de projeto de vida infinita. Assim, foi necessário setar quais tipos de carregamentos estão aplicados e qual o número de ciclos (vezes) isso ocorre, ou seja, é preciso definir o espectro de carga.

Para isso são considerados os 2 casos de carga:

- **Cuba destravada Gy**: o momento em que a cubra abre com o café.
- **Cuba destravada Gx**: o momento de abertura e fechamento da cuba.

Para o cálculo dos ciclos, estima-se quantas vezes esse sistema será acionado durante o período de colheita que é de 2 meses. Foi considerado uma vida de 5 anos para esse mecanismo, que é o tempo mínimo até que esse componente irá falhar.

A conexão da orelha com a cuba será realizada a partir de uma solda, e o fato da mesma ser uma região extremamente sensível, será levado em conta a triplicação da tensão aplicada naquela área, sendo o mais conservador para os aspectos da solda.

Essas análises foram realizadas com o objetivo principal de otimizar a estrutura de modo que o custo e a facilidade de usinagem da mesma sejam satisfatórios para o cliente.

Para o projeto serão estudados 3 casos de carga, porém ao total serão feitas 6 situações de carga para investigar toda a estrutura.

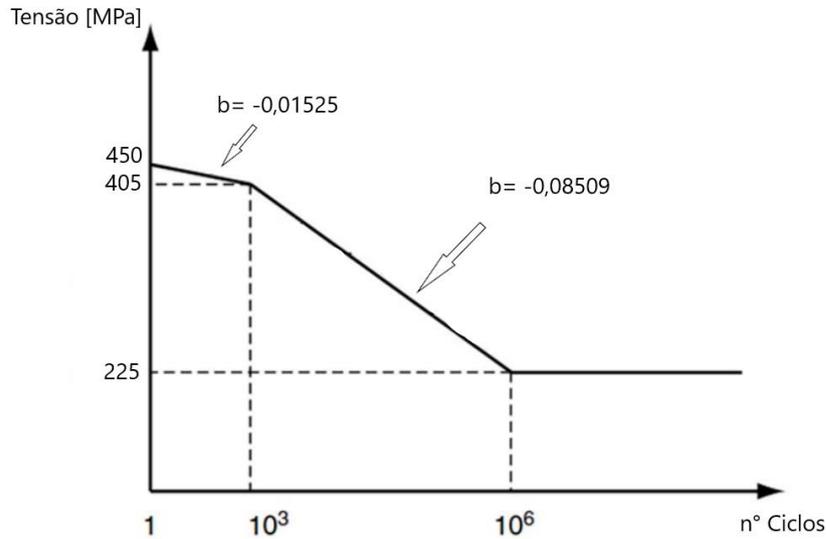
A análise de fadiga requer a criação da curva SN do material que está sendo utilizado, que nesse caso é o SAE1020. Com a utilização da apostila de projeto de máquinas SHIGLEY (2014), pode-se aproximar uma curva SN desse material para a análise.

Foi levado em conta algumas considerações para a confecção e posteriormente utilização da curva SN:

- Cálculos realizados com a máxima tensão principal.
- Correção de tensão média via critério de Goodman;
- O ponto máximo de tensão do gráfico é o limite de resistência a tração de 450Mpa (para 1 ciclo, 10^0);
- A transição da fadiga de baixo ciclo está em 10^3 ciclos;
- A vida infinita está a partir de 10^6 ciclos;
- Fator de transição entre o comportamento de baixo e alto ciclo $f = 0,9$ (retirado da literatura para um $S_{ut} \approx 65$ ksi ou 450 Mpa);
- Limite de fadiga sendo $FL = S_{ut} \cdot 0,5$;
- A equação logarítmica de fadiga, para os dois ciclos de fadiga $S_f = aN^b$

Com o conhecimento dos pontos no número de ciclos: $10^0 = 450$ MPa, $10^3 = 0,9 \cdot 450$ MPa e $10^6 = 0,5 \cdot 450$ MPa, pode-se retirar as inclinações da curva SN e confeccionar a mesma, representada na Figura 27.

Figura 27: Curva aproximada do material SAE1020.



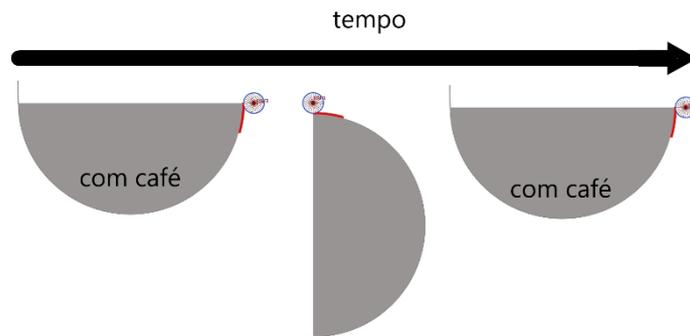
Fonte: Do autor.

Para criar o caso de fadiga, levamos em consideração o número de ciclos que a cuba irá realizar durante o período de colheita. A carga horária da colheita de café dessa máquina é de 9 horas diárias, e a toda a colheita é realizada em 2 meses. O problema de entupimento do elevador surge diariamente segundo o operador, então será aberta pelo menos 4 vezes ao dia. A cuba também está sendo projetada para ter uma vida de 5 anos antes de precisar realizar uma manutenção, e levando em conta que a colheita de café é anual:

$$N(\text{ciclos}) = 4 (\text{vezes ao dia}) \times 60 (2 \text{ meses}) = 240 \text{ ciclos anuais} \times 5 (\text{anos de vida}) = 1200 \text{ ciclos.}$$

A Figura 28 exemplifica como o ciclo de operação da cuba para análise de fadiga, onde a cuba será avaliada no momento em que está em balanço na posição horizontal duas vezes e uma vez na vertical.

Figura 28: Representação do ciclo de operação da cuba.



Fonte: Do autor.

Assim, o espectro de carga linear foi criado com pontos $[x,y]=[0,0;0,1]$. Com um sistema de contagem de ciclos do tipo *Rainflow*, essa curva vai representar um espectro de carga pulsante, ou seja, onde há a aplicação e posterior remoção do carregamento.

5.3.4 Resultado das análises lineares

Após várias simulações, as espessuras encontradas foram (segundo a Tabela 4 de espessuras de chapas SAE1020 da empresa AluPlex Brasil):

- Cuba e a solda: Bitola 18 (1,21mm)
- Orelhas: Bitola 16 (1,52mm)

Tabela 4: Tabela de dimensões de chapas SAE1020 AluPlex Brasil.

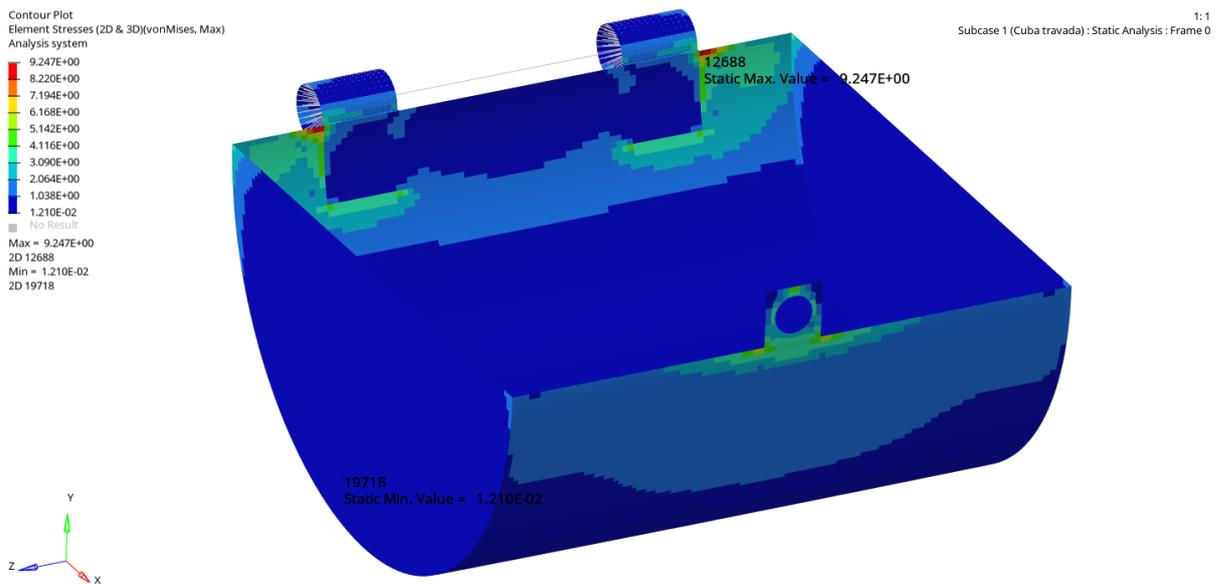
CHAPAS FINAS A FRIO		
Bitola GSG	Espessura (mm)	Peso (kg/m ²)
16	1,52	12,206
17	1,37	10,985
18	1,21	9,765
19	1,06	8,544
20	0,91	7,324
21	0,84	6,713
22	0,76	6,103
23	0,68	5,493
24	0,61	4,882
25	0,53	4,272
26	0,46	3,662
27	0,42	2,357
28	0,38	3,052
29	0,34	2,746
30	0,31	2,441

Fonte: AluPlex Brasil.

5.3.4.1 Cuba travada

Seguindo os casos de carga em ordem, começando pela cuba travada, na Figura 29 está representado as tensões de von Mises e como ela está distribuída em toda a superfície da cuba. As concentrações de tensão já eram de se esperar de estarem localizadas próximas a orelha e também do pino.

Figura 29: Resultado análise linear cuba travada.



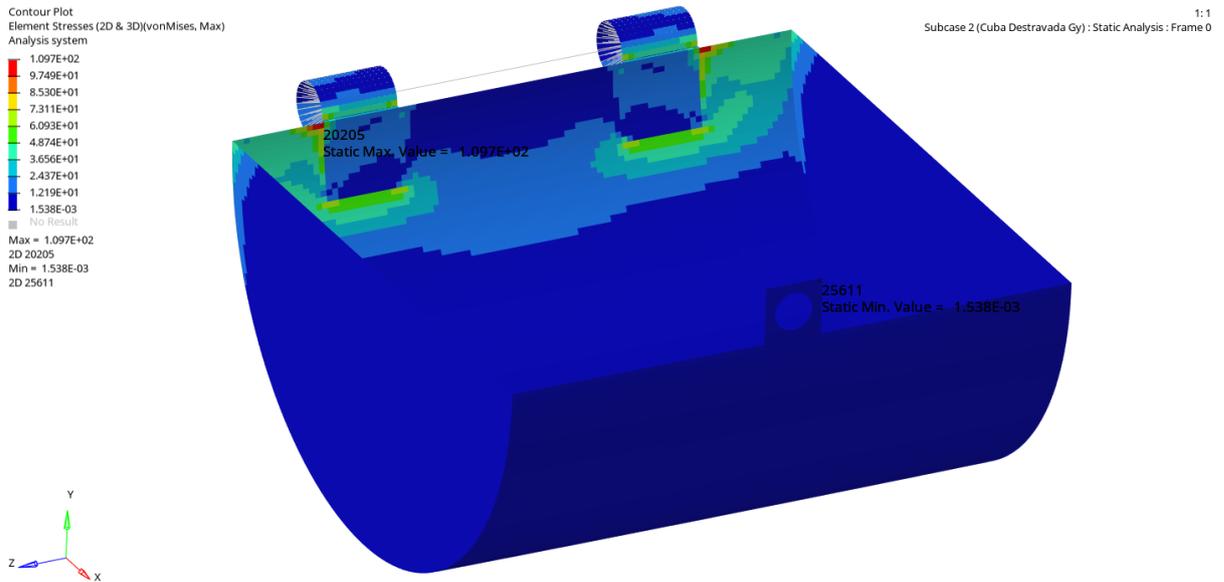
Fonte: Do autor.

O valor máximo de tensão retirado é de 9,2 MPa que já imediatamente não trará nenhum risco, o que era esperado. Com um fator de segurança de 35,8.

5.3.4.2 Cuba destravada Gy

O caso de carga para a cuba destravada gy, segue o resultado da análise na Figura 30

Figura 30: Resultado análise linear cuba destravada Gy.



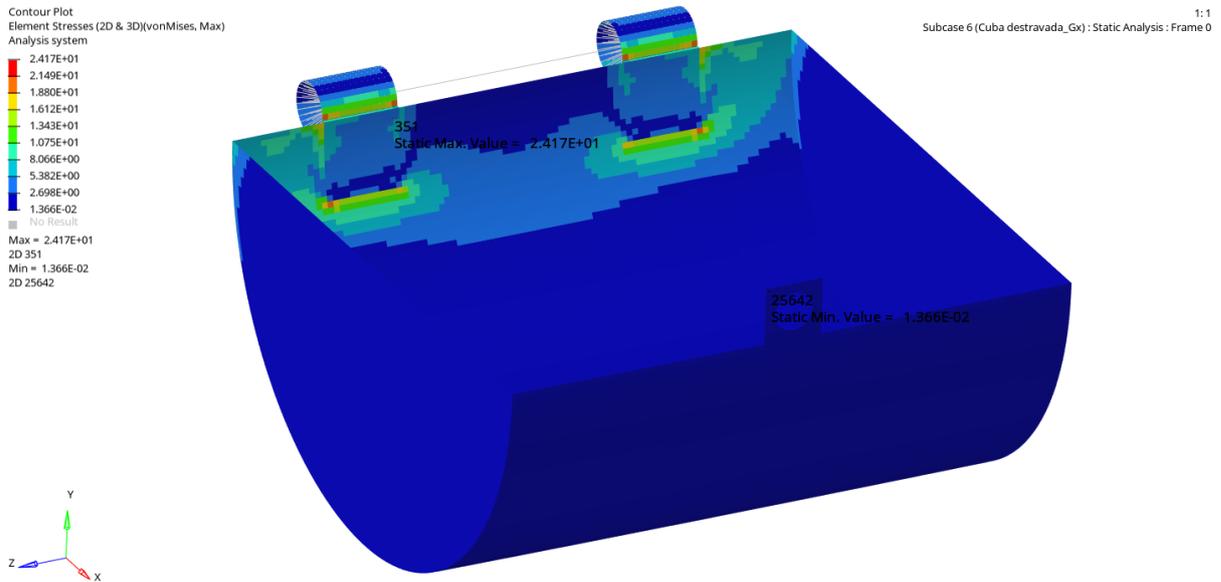
Fonte: Do autor.

Os valores de tensão são maiores que a análise anterior, já que a máxima tensão é de 109,7 MPa que traz um fator de segurança para essa análise de 3. Análise que servirá para a fadiga junto da cuba destravada Gx.

5.3.4.3 Cuba destravada Gx

Considerando a cuba em uma posição aberta, a Figura 31 apresenta os resultados dessa análise.

Figura 31: Resultado análise linear cuba destravada Gx.



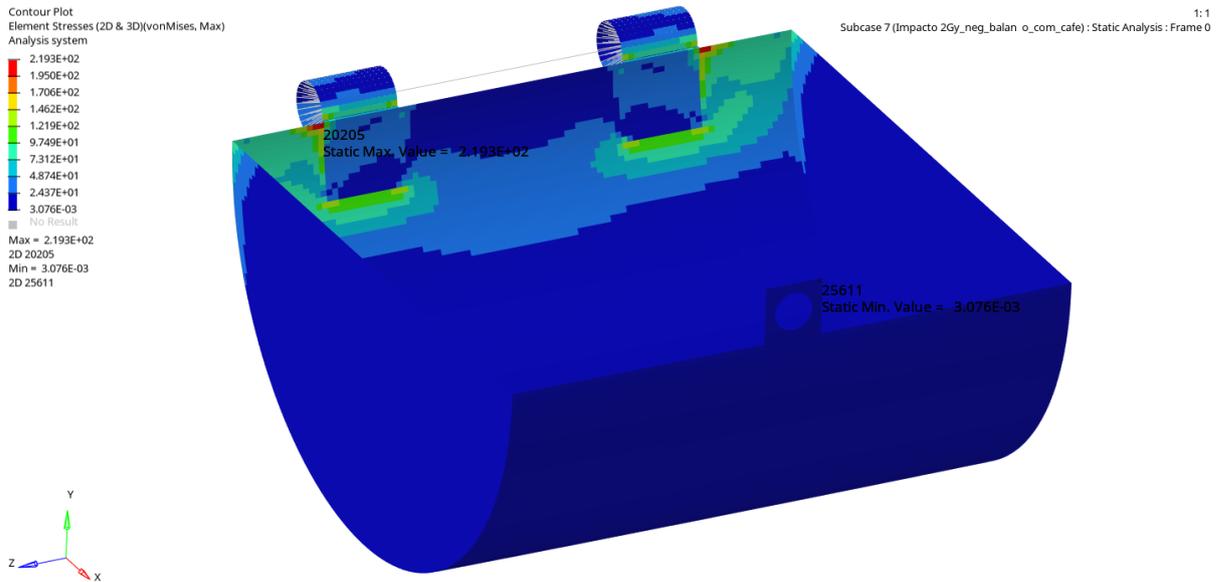
Fonte: Do autor.

Um carregamento baixo de tensão máxima de 24,17 MPa, e com fator de segurança de 13,6.

5.3.4.4 Impacto 2Gy com café

Para o caso de impacto, foi dobrado os carregamentos de gravidade e o peso do café, representados na Figura 32. Dentre todas as análises lineares de tensão essa é a mais importante. Apesar do caso de impacto durante a colheita ser bem raro, ele é considerado o mais conservador de todos, e prova, pelos resultados, que o sistema não irá escoar, não trazendo danos irreparáveis a geometria.

Figura 32: Resultado análise linear impacto Gy com café.



Fonte: Do autor.

Com tensão máxima de 219,3 MPa, com coeficiente de segurança de 1,50.

5.3.5 Resultado da análise modal

Dentro do intervalo requisitado de 1 - 60Hz, a geometria apresentou 2 modos naturais de vibrar. Para a comparação dos modos de vibrar das análises e as vibrações da máquina, seria necessária uma instrumentação real da máquina em operação e coletar as vibrações predominantes do sistema.

Existe uma falta de dados na literatura a respeito da colhedora MakReis MC1400. Por fins comparativos, levou-se em conta o valor de frequência das hastes derrigadeiras de uma colhedora de outro fabricante. Segundo Ferreira Junior (2014), as hastes da colhedora de café automotriz K3 *advance*, que foi instrumentada, apresentou frequências de vibração do cilindro de 12,5Hz; 14,16Hz e 15,8Hz.

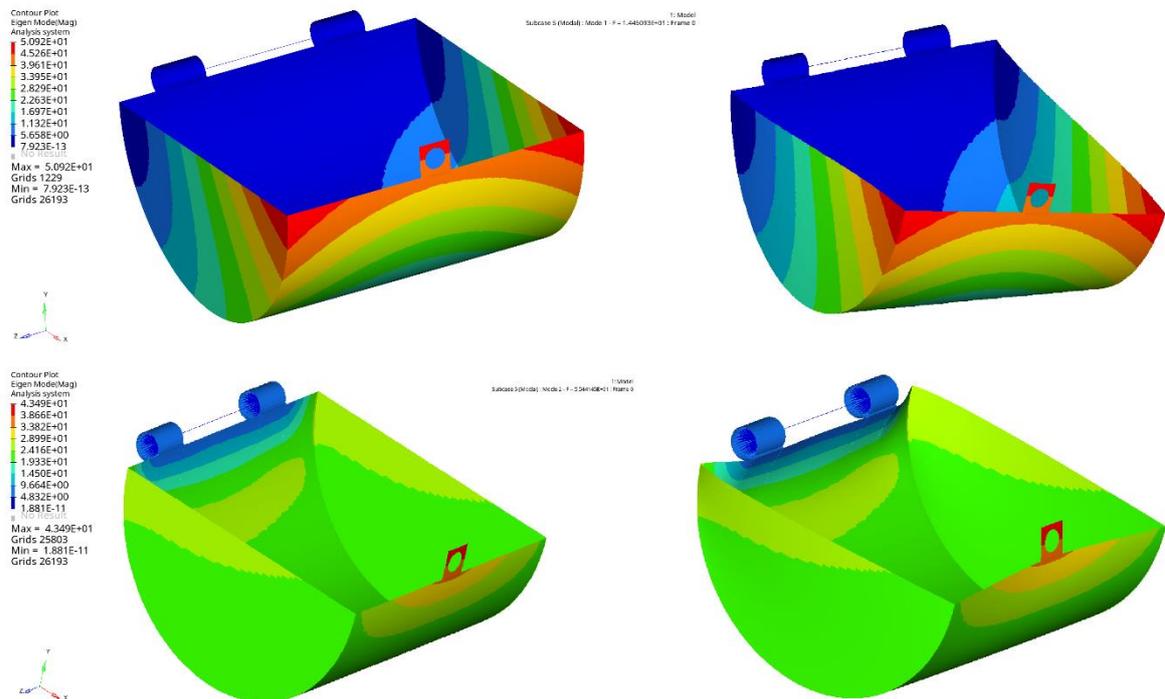
Os valores de frequência para os modos de vibrar da estrutura proposta estão escritos na Tabela 5 e representados na Figura 33.

Tabela 5: Modos de frequência da cuba.

Mode	Frequency [Hz]
1	14,5
2	55,4

Fonte: Do autor.

Figura 33: Imagem dos modos de vibração da cuba.



Fonte: Do autor.

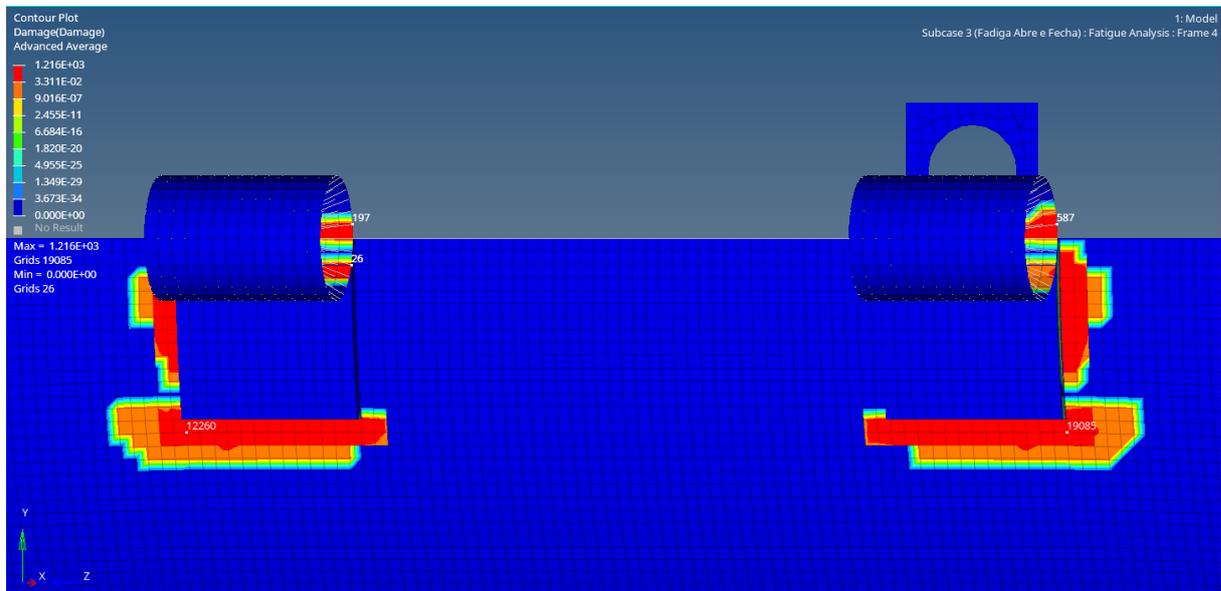
Dentro da faixa de frequência escolhida de 1 a 60Hz, o modelo possui 2 modos de vibrar dentro desse intervalo sendo eles 14,5 Hz e 55,4Hz. O primeiro modo de vibração chega muito perto do valor instrumentado pela referência a ponto de chamar atenção, porém, esse comportamento deve ser confirmado pelo fato de que os valores reais da colhedora em questão serem desconhecidos, além da necessidade em se fazer uma análise da transmissibilidade. Recomenda-se então que numa eventual implementação e teste da proposta de automatização da cuba, o efeito da vibração da máquina seja considerada e investigada.

5.3.6 Resultado da análise de fadiga

Para o número de ciclos escolhidos, a análise de fadiga provou ser uma combinação precisa do valor de espessura de chapa vendida pelo fabricante, já que o carregamento aplicado foi triplicado por causa da presença de solda no modelo, a necessidade do estudo da espessura de chapa foi fundamental.

Primeiramente foi realizado uma análise para identificar os pontos mais críticos de dano no modelo, representado na Figura 34. Todos os nós selecionados na figura apresentam um dano na faixa de valor de 1200. Destaque para a largura de 2 elementos que foi criada para considerar a solda, e os maiores valores de dano estão presentes nessa área.

Figura 34: Pontos críticos de dano no modelo.



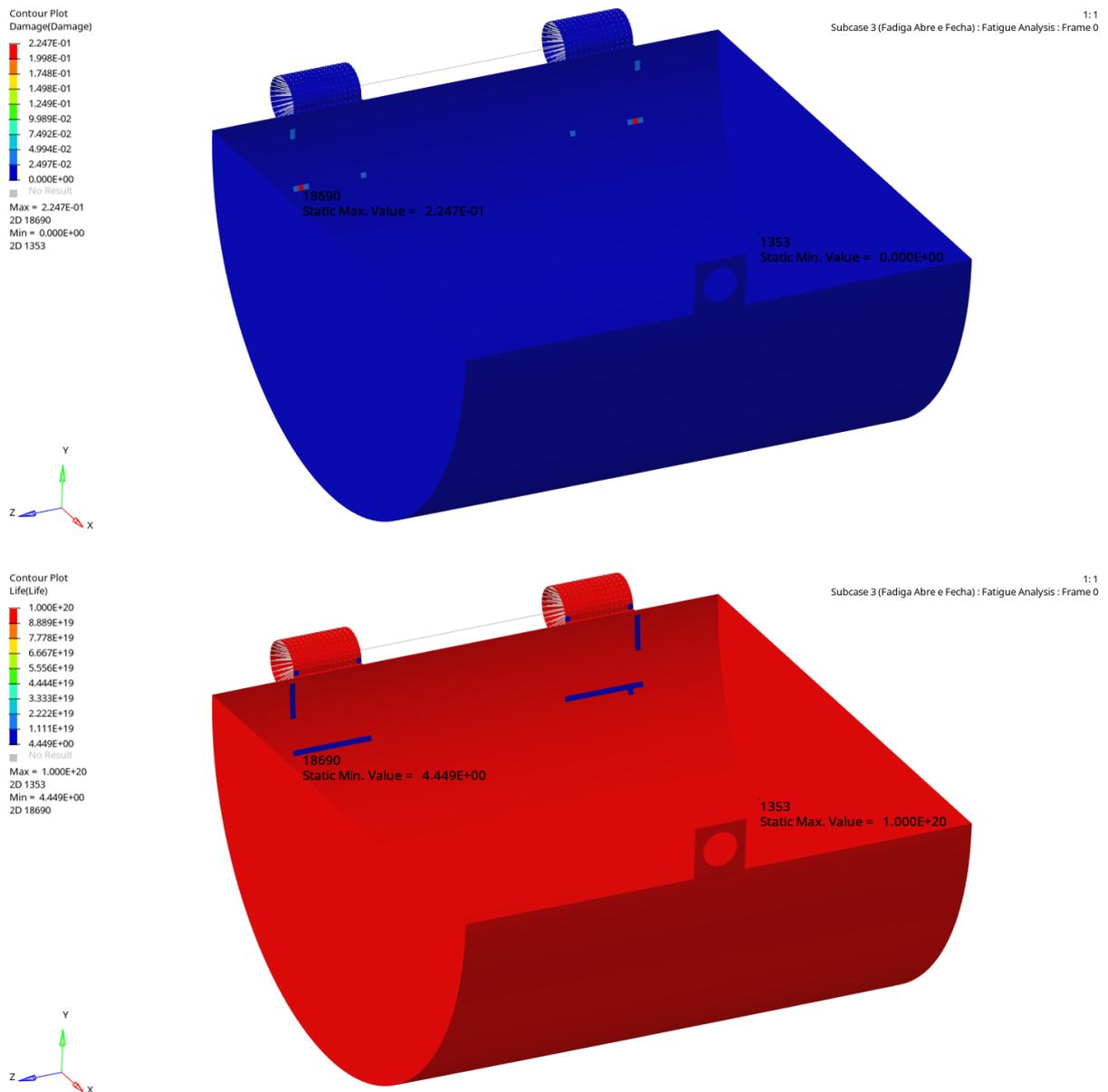
Fonte: Do autor.

Sendo assim, as espessuras iniciais de 0,9mm para a cuba e 1.1mm para as orelhas, foram aumentadas até os valores que satisfazem os critérios do projeto:

- Cuba e a solda: Bitola 18 (1,21mm);
- Orelhas: Bitola 16 (1,52mm).

Desse modo o dano e vida desse modelo está representado na Figura 35.

Figura 35: Dano e vida do modelo da cuba.



Fonte: Do autor.

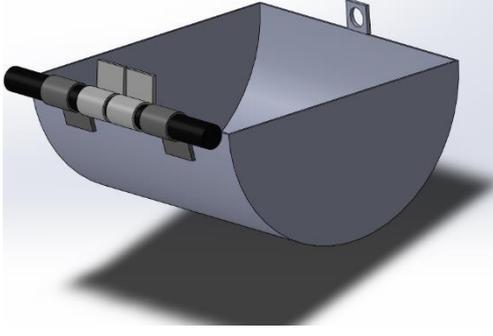
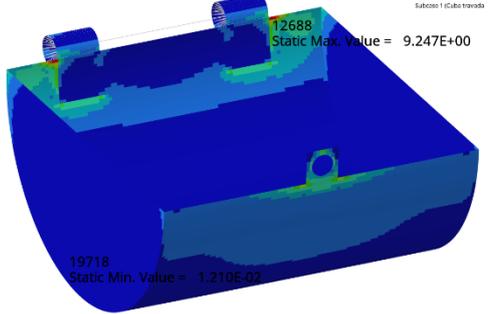
A utilização dessas espessuras trouxe um valor de dano máximo menor que 1, o que induz que, de modo geral, a geometria apresenta vida infinita. No resultado de vida, todas as cores vermelhas indicam vida infinita, ou seja, a geometria nunca irá falhar, e os valores em azul, sendo o mínimo de 4,5, representa que essa área tem 4,5 vidas, e como 1 vida equivale a 5 anos da máquina em questão operando conforme previsto na metodologia de cálculo e identificação dos carregamentos para o caso de fadiga, esse sistema poderá trabalhar durante até 22,5 anos.

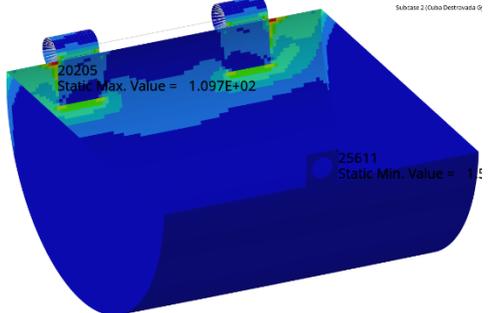
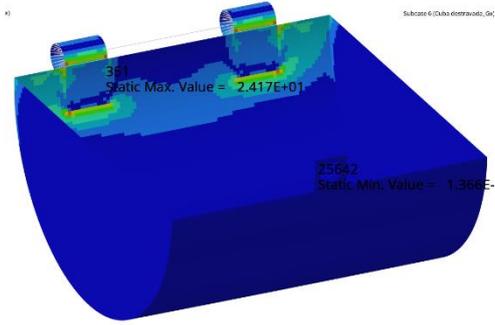
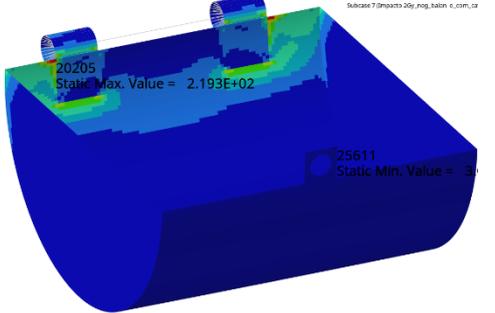
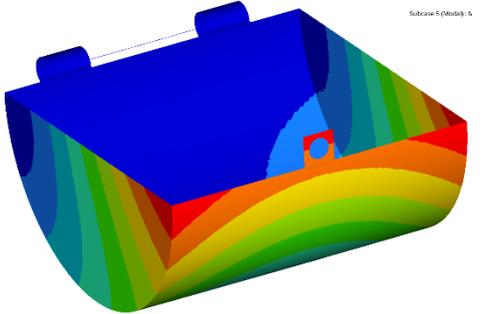
É importante registrar que a metodologia de cálculo utilizada é estática, ou seja, a velocidade de aplicação dos carregamentos identificados não tem influência nos cálculos. Logo, não é possível estimar em unidades de tempo a vida do respectivo componente. No entanto, a exemplo, se o movimento de abertura e fechamento da cuba demorasse 1min, o tempo de operação do mecanismo seria $1200 \times 1/60 = 20$ horas. Como a vida é de 4,5, teríamos então 90 horas de operação seguras contra falha.

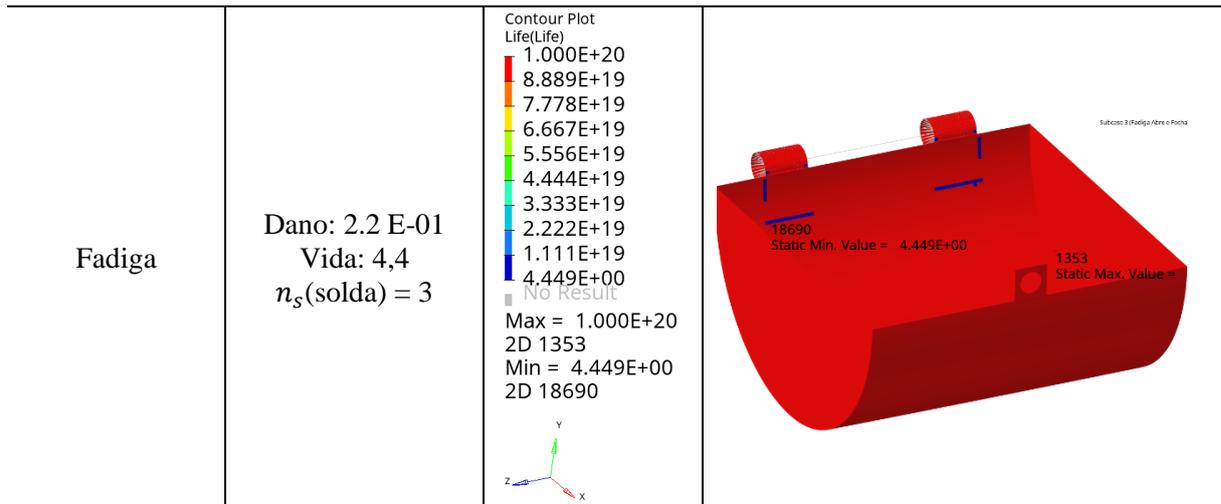
5.3.7 Resumo das análises

Foi criado na Tabela 6, um resumo de todas as análises dos respectivos casos de carga e suas informações:

Tabela 6: Resumo das análises.

<i>LoadCase</i>	Critérios de Falha		Resultados
Desenho	Modelo final		
Cuba travada	$\sigma_{max} = 9,2 \text{ Mpa}$ $n_s = 35,8$	Contour Plot Element Stresses (2D & 3D)(vonMises, Max) Global System 9.247E+00 8.220E+00 7.194E+00 6.168E+00 5.142E+00 4.116E+00 3.090E+00 2.064E+00 1.038E+00 1.210E-02 No Result Max = 9.247E+00 2D 12688 Min = 1.210E-02 2D 19718 	

<p>Cuba destravada Gy</p>	<p>$\sigma_{max} = 109,7 \text{ Mpa}$ $n_s = 3$</p>	<p>Contour Plot Element Stresses (2D & 3D)(vonMises, Max) Global System 1.097E+02 9.749E+01 8.530E+01 7.311E+01 6.093E+01 4.874E+01 3.656E+01 2.437E+01 1.219E+01 1.538E-03 No Result Max = 1.097E+02 2D 20205 Min = 1.538E-03 2D 25611</p> 	 <p>Subcase 2 (Cuba destravada Gy) 20205 Static Max. Value = 1.097E+02 25611 Static Min. Value = 1.538E-03</p>
<p>Cuba destravada Gx</p>	<p>$\sigma_{max} = 24,2 \text{ Mpa}$ $n_s = 13,6$</p>	<p>Contour Plot Element Stresses (2D & 3D)(vonMises, Max) Global System 2.417E+01 2.149E+01 1.880E+01 1.612E+01 1.343E+01 1.075E+01 8.066E+00 5.382E+00 2.698E+00 1.366E-02 No Result Max = 2.417E+01 2D 351 Min = 1.366E-02 2D 25642</p> 	 <p>Subcase 6 (Cuba destravada Gx) 351 Static Max. Value = 2.417E+01 25642 Static Min. Value = 1.366E-02</p>
<p>Impacto Gy com café</p>	<p>$\sigma_{max} = 219,3 \text{ Mpa}$ $n_s = 1,5$</p>	<p>Contour Plot Element Stresses (2D & 3D)(vonMises, Max) Global System 2.193E+02 1.950E+02 1.706E+02 1.462E+02 1.219E+02 9.749E+01 7.312E+01 4.874E+01 2.437E+01 3.076E-03 No Result Max = 2.193E+02 2D 20205 Min = 3.076E-03 2D 25611</p> 	 <p>Subcase 7 (Impacto Gy com café) 20205 Static Max. Value = 2.193E+02 25611 Static Min. Value = 3.076E-03</p>
<p>Modal</p>	<p>$n_1 = 14,5 \text{ Hz}$ $n_2 = 55,4 \text{ Hz}$</p>	<p>Contour Plot Eigen Mode (Mag) Global System 5.092E+01 4.526E+01 3.961E+01 3.395E+01 2.829E+01 2.263E+01 1.697E+01 1.132E+01 5.658E+00 7.923E-13 No Result Max = 5.092E+01 Grids 1229 Min = 7.923E-13 Grids 26193</p> 	 <p>Subcase 5 (Modal) 1</p>



Fonte: Do autor.

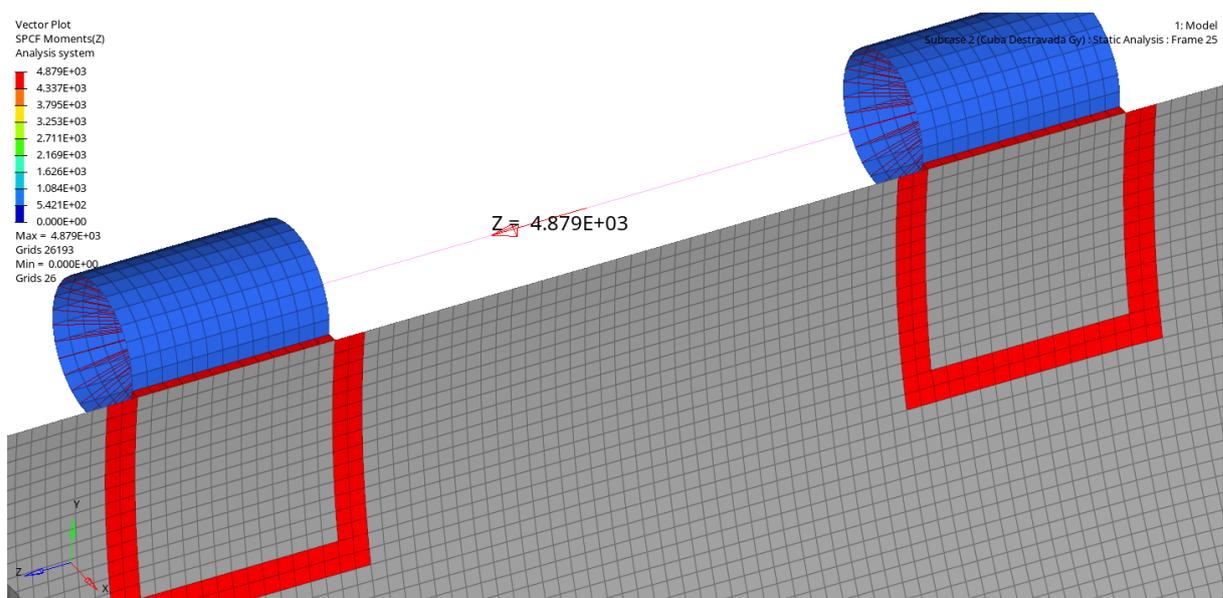
Após a finalização de todas as análises, pode-se chegar à geometria final da cuba em folha de desenho padronizada em A4, representada na Figura 36:

5.3.8 Escolha do motor

Após as análises resta a escolha do motor elétrico que irá acionar esse sistema. Para isso, foi retirado do próprio software a soma do momento localizado nas duas orelhas, que se concentraram no ponto médio criado no centro da viga. Porém, cada caso de carga apresenta um valor de torque diferente, e assim foi considerado o caso da cuba em balanço, que seria o caso mais crítico. O descarte do caso de impacto vem do simples fato de que é um caso muito raro de acontecer na prática, e ainda mais que a colhedora se move a uma velocidade muito baixa para ocasionar quaisquer impactos significativos na cuba.

A Figura 37 mostra o torque que está sendo aplicado no eixo, na direção Z que é justamente o eixo de rotação do sistema.

Figura 37: Torque aplicado no eixo.



Fonte: Do autor.

Para o valor de torque, foi retirado a quantia de 4,879 Nm. Portanto um motor de 5Nm ou 50kgf.cm está aceitável para o funcionamento desse mecanismo. A empresa TYHE chinesa confecciona motores elétricos, e um modelo TJW58FX de 12V com 5Nm e rotação de até 150rpm se encaixa no projeto. A Figura 38 e Figura 39 mostram mais detalhes do produto.

Figura 38: Classificação do motor TJW58FX.

Warranty:	3months-1year	Place of Origin:	Zhejiang, China
Brand Name:	TYHE	Model Number:	TJW58FX
Usage:	BOAT, Car, Electric Bicycle, FAN, Home Appliance, Cos...	Type:	GEAR MOTOR
Torque:	5 N.m	Construction:	Permanent Magnet
Commutation:	Brush	Protect Feature:	Drip-proof
Speed(RPM):	5~150rpm	Continuous Current(A):	0.8~3A
Efficiency:	IE 2	Size:	58mm*40mm*27mm
Weight:	350g	Shaft diameter:	8mm Customzied
Gear Material:	Powder metallurgy&Steel	IP grade:	IP50
Noise:	Low Noise Level	Direction of rotation:	CW/CCW
Life time:	1000H	Bearing:	Ball Bearing
Keywords:	12v 24 volt 5Nm high torque dc worm gear motor with...		

Fonte: TYHE Corp.

Encontra-se um pouco de dificuldade para encontrar preços desse tipo de motor, porém, dessa empresa fica na faixa de \$10 dólares a unidade. Existe a possibilidade também da utilização de uma redução com engrenagens e utilizar um motor com um torque menor, já que quanto menor a velocidade menor será o choque no motor, e o objetivo é somente abrir e fechar a cuba.

Figura 39: Motor elétrico 5Nm TYHE.



Fonte: TYHE Corp.

5.3.9 Estudo do tempo de *setup* da máquina

Após a escolha do motor, foi realizado uma etapa de estudo inicial de como seria o impacto dessa implementação na produtividade da colheita levando em conta a pausa realizada hoje para o destravamento do sistema quando o mesmo se encontra travado.

Levando em conta os parâmetros a seguir para as contas:

- 50 horas de trabalho semanal
- 2 meses o período de colheita (anual)
- Travamentos ocorrem dia sim dia não
- Interrompimento de 10 min/dia para o alívio do sistema

$$50.4 = 200 \frac{\text{horas}}{\text{mês}} \rightarrow 200.2 \text{ meses} = 400 \text{ horas/ano} \quad (10)$$

$$10 \text{ min}/1 \text{ dia} \rightarrow 30 \text{ dias} \cdot 10 = 300 \text{ min} = 5 \text{ horas}$$

Sendo assim, temos 400 horas/ano de trabalho e o cálculo indica que 5 horas do tempo total de colheita é dedicado para a resolução do travamento do elevador de frutos. Sendo assim, o tempo desperdiçado nesse processo de conserto do elevador, equivale a 1,25% do tempo de toda a colheita de café.

6 CONCLUSÃO

Tomando como base os objetivos do projeto apresentados, pode-se concluir que a proposta geométrica para futura automatização do processo de esvaziamento da cuba da colhedora foi aprovado pelos critérios escolhidos para a colhedora MakReis MC1400.

O dimensionamento calculado se mostrou aprovado através dos cálculos feitos pelo pacote *Hyperworks*[®], em que as análises modais, estática e de fadiga apresentaram bons resultados para as condições da máquina. De modo geral, a espessura da chapa poderia ser menor dados os altos coeficientes de segurança. No entanto, a sensibilidade da análise de fadiga e a variabilidade da medida de espessura de acordo com fabricante, remetem ao resultado escolhido. Com isso, o modelo ficou superdimensionado, com uma vida mínima de pelo menos 20 anos.

O modelo apresentou 2 modos de vibrar dentro do intervalo pedido entre 1 e 60Hz. O primeiro modo se encaixou em um intervalo de frequências que foram instrumentadas na pesquisa da referência. Para aprofundar essa verificação, seria interessante uma modelagem da colhedora como um todo e analisar como as frequências se transmite para todos os componentes da máquina. A colhedora de café é uma máquina que essencialmente trabalha com vibração, sendo assim é interessante analisar o comportamento de transmissibilidade dela.

O cálculo realizado para contabilizar o impacto dessas interrupções na colheita como um todo, trouxe uma visão interessante visto que existe um atraso e desperdício de 5 horas de trabalho por ano. É um valor que pode ser agora utilizado num futuro cálculo para contabilizar o quanto esse tempo “salvo” pela aplicação dessa nova cuba irá trazer ao produtor ao longo prazo.

Trabalhos futuros

Os resultados indicaram uma proposta promissora, e para um futuro projeto esse mecanismo poderia ser fabricado e testado, para checar de fato se essa automatização realmente irá minimizar o travamento do elevador de frutos, e também, se terá um retorno lucrativo ao produtor, porque temos que contabilizar o custo dos componentes. Porém o retorno tecnicamente seria de longo prazo, visto que deve ser levado em conta a redução das interrupções, bem como as perdas de frutos durante o travamento. A ideia seria uma análise de viabilidade econômica executada pelo fabricante da colhedora MC1400 para se identificar de modo quantitativo e específico os benefícios dessa implementação.

7 REFERÊNCIAS

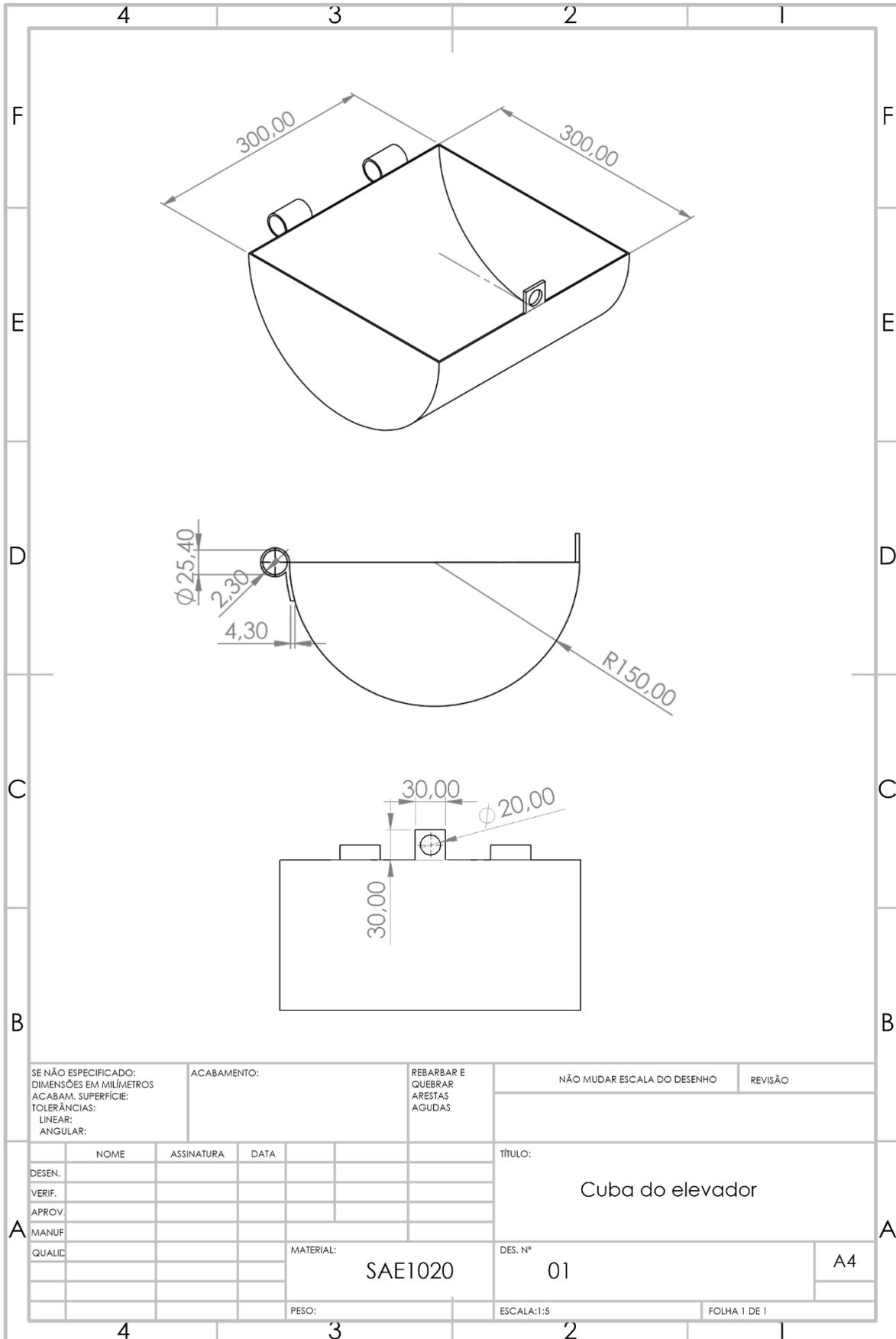
1. ALTAIR, University (ed.). Learn Fatigue Analysis with Altair Optistruct. Troy, MI: Altair, 2018. E-book (153p.) color. Disponível em: <https://altairuniversity.com/free-ebooks/>. Acesso em: 20 jun. 2022.
2. ALTAIR, University (ed.). Practical Aspects of Finite Element Simulation: A Study Guide. Troy, MI: Altair, 2019. E-book (578p.) color. Disponível em: <https://altairuniversity.com/free-ebooks/>. Acesso em: 20 jun. 2022.
3. ALUPLEX. Chapas de aço lisa. AluPlex Brasil peças para baús e contêineres, 2014. Disponível em: <http://aluplexbrasil.com.br/produto/chapas-de-a-o-carbono-inox-e-galvanizadas/chapa-a-o-lisa/chapa-de-a-o-lisa/207/>>. Acesso em: 30, Agosto de 2022.
4. ARAMVAREEKUL, Peerapong; SEIDER, Daniel J. Cost-time-risk diagram: project planning and management. *Cost engineering*, v. 48, n. 11, p. 12, 2006.
5. BARBOSA, J.A. et al. Desempenho operacional de derriçadores mecânicos portáteis, em diferentes condições de lavouras cafeeiras. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.9, n.1, p.129-132, 2005.
6. BLACHE, M. K. & SHRIVASTAVA, B. A., Defining Failure of Manufacturing & Equipment. In: *Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 69-75, 1994.
7. BLINOVÁ, L., et al. (2017). Review: Utilization of Waste From Coffee Production. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, 25(40), pg. 91–101. <https://doi.org/10.1515/rput-2017-0011>
8. CECAFE. Relatório mensal. Brasil: Cecafe, pg 22. Fev 2022. Disponível em: <http://www.consorciopesquisacafe.com.br/images/stories/noticias/2021/dezembro/CECAF E-FEVEREIRO-2022.pdf> > Acesso em: 01, Junho de 2022.
9. CHANDRAVANSI, M. L.; MUKHOPADHYAY, A. K. Modal analysis of structural vibration. In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers, 2013. p. V014T15A052.
10. CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). Boletim Café Dezembro 2020. 2020. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe/item/14817-4-levantamento-de-cafe-safra-2020>>. Acesso em: 11 dezembro de 2021.

11. CONAB. Companhia nacional de abastecimento. Perspectivas para a agropecuária. Fevereiro 2022.: Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2022. Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em: 10 de Jan 2022.
12. DA SILVA, Fábio Moreira et al. Colheita do café mecanizada e semimecanizada. 2001.
13. DENG, S., Han, X., & Yang, L. (2018). Modal analysis and optimization of bus body structure. *Journal of Physics: Conference Series*, 1074, 012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1074/1/012048>
14. DUTRA, E.R. Avaliação da viabilidade de determinação do grau de torrefação de café por meio da composição de voláteis no efluente gasoso do processo, Dissertação de Mestrado, CPGEQ/UFMG, 2000.
15. ELIAS, Alexandre Ismael. Mapeamento da colheita mecanizada de frutos utilizando um sistema de posicionamento global. 1998. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998. doi:10.11606/D.11.2019.tde-20190821-113713. Acesso em: 2022-03-17.
16. ESTEVES VIEIRA, L. G., Andrade, A. C., Colombo, C. A., De Araújo Moraes, A. H., Metha, A., De Oliveira, A. C.,Guimaraes ~ Pereira, G. A. (2006). Brazilian coffee genome project: An EST-based genomic resource. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. Sociedade Brasileira de Fisiologia Vegetal. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100008>
17. FERREIRA JÚNIOR, Luiz de Gonzaga. Análise de vibração das hastes de uma colhedora de café. 2014.
18. HALLACK, Joao Chafi et al. Apostila de resistência dos materiais I. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013.
19. INVENTOR, Autodesk. Fator de segurança de juntas soldadas com carga de fadiga. Autodesk Inventor, 2018. Disponível em: <<https://help.autodesk.com/view/INVENTOR/2018/PTB/?guid=GUID-3CB418FA-386B-4E3F-B155-BF71C76129F1>>. Acesso em: 30, Agosto de 2022.
20. KASHIMA, T. A colheita mecanizada do café: produtos, desempenho e custos. In: CICLOS DE ESTUDOS SOBRE MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA, 4., 1990, Campinas, SP. Anais... Campinas: Fundação CARGILL, 1990. p.234-246.
21. LOGAN, Daryl L. A first course in the finite element method. Cengage Learning, 2016.
22. MAKREIS. Cafeeira MakReis MC1400. Disponível em: <<https://makreis.com.br/cafeeira-mc1400/>>. Acesso em: 30, Agosto de 2022.
23. MELCONIAN, Sarkis. Elementos de Máquinas-Edição revisada, atualizada e ampliada. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2018.

24. MIRLISENNA, Giuseppe. Método dos Elementos finitos: o que é. ESSS - Engineering Simulation And Scientific Software. 22, janeiro. 2016. Disponível em:< <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 25, agosto de 2022.
25. MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. Introdução à metalurgia da soldagem. Belo Horizonte: UFMG, 2012.
26. MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo Villani. Soldagem i introdução aos processos de soldagem. Belo Horizonte, 2000.
27. NIEMCZEWSKI, Bóris K. et al. Validação de um modelo de cálculo por elementos finitos do chassi de uma semeadora de quatro linhas. Engenharia Agrícola, v. 34, p. 161-170, 2014.
28. NORTON, R. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada – 4. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: Bookman, 2013.
29. OLIVEIRA, Ezequiel de et al. Influência da vibração das hastes e da velocidade de deslocamento da colhedora no processo de colheita mecanizada do café. Engenharia Agrícola, v. 27, p. 714-721, 2007.
30. OLIVEIRA, Ezequiel. Colheita mecanizada do café em maiores velocidades operacionais. 2006.
31. ORTEGA, Antonio César e Jesus, Clesio Marcelino Território café do Cerrado: transformações na estrutura produtiva e seus impactos sobre o pessoal ocupado. Revista de Economia e Sociologia Rural [online]. 2011, v. 49, n. 3 [Acessado 17 Março 2022], pp. 771-800. Dez 2011. ISSN 1806-9479. <https://doi.org/10.1590/S0103-20032011000300010>.
32. PAULO, Marcos Antônio de Lemos. Projetos e simulações de protótipos virtuais para máquinas recolhadora de caju. 2014.
33. PMI. Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos. Guia PMBOK 4a. ed. – EUA: Project Management Institute, 2008.
34. RAO, Singiresu S. “Vibrações Mecânicas”. Pearson-Prentice Hall, 2008.
35. RAUSAND, M.; OIEN, K. The basic concepts of failure analysis. Reliability Engineering and System Safety, 1996, nº 53, pp. 73-83, 1996.
36. SANTINATO, F. et al. Análise quali-quantitativa da operação de colheita mecanizada de café em duas safras. Coffee Science, Lavras, v. 9, n. 4, p. 495-505, 2014.
37. SANTINATO, F. et al. Uso de extensores flexíveis na derriça em lavouras de café de primeira safra. Coffee Science, Lavras, v. 10, n. 2, 2016.

38. SANTOS, P. M. dos. Modelagem do desempenho em tração de conjuntos mecanizados visando ao dimensionamento do trator. 2010. 154f. Monografia (tese) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2010.
39. SARKIS, Melconian. Mecânica técnica e resistência dos materiais. Editora Érica, São Paulo, 2014.
40. SHIGLEY, Joseph E.; et al. Standard handbook of machine design. McGraw-Hill Education, 2004.
41. SILVA, F. M.; CARVALHO, G. R. Evolução da mecanização na cafeicultura. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 32, n. 261, p. 52-65, 2011.
42. SOLIDWORKS, Corp. Correção de tensão média. 2019. Disponível em: <https://help.solidworks.com/2019/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_Mean_Stress_Correction.htm>. Acesso em: 05, Setembro de 2022.
43. SOLIDWORKS, Corp. Teoria dos danos acumulativos. 2017. Disponível em: <https://help.solidworks.com/2017/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_Theory_of_Cumulative_Damage.htm?format=P&value=#:~:text=A%20regra%20do%20dano%20linear,independe%20do%20nível%20de%20tensão.o.>. Acesso em: 05, Setembro de 2022.
44. SUBEDI, Madhu et al. An awareness-adoption matrix for strategic decision making in agricultural development projects: a case study in Yunnan province, China. Agricultural Sciences in China, v. 8, n. 9, p. 1112-1119, 2009.
45. TAVARES, T. O. et al. Qualidade do recolhimento mecanizado do café. Coffee Science, Lavras, v. 10, n. 4, p. 455-463, 2015.
46. TIERNEY, Christopher, et al. "Using mesh-geometry relationships to transfer analysis models between CAE tools." Engineering with Computers 31.3 (2015): 465-481.
47. TSUKAMOTO, Marcio Michiharu. Modelagem analítica e simulação numérica de um sistema móvel de supressão de sloshing. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
48. TYHE, Corp. Motor elétrico customizável 5Nm 12V. Disponível em <https://www.alibaba.com/product-detail/Custom-speed-58mm-gearbox-12v-24v_62486563338.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.3.607c4571vwiOgp>.

8 Anexo



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:	REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO	REVISÃO																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOME</th> <th>ASSINATURA</th> <th>DATA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DESEN.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROV.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MANUF.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>QUALID.</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			NOME	ASSINATURA	DATA	DESEN.			VERIF.			APROV.			MANUF.			QUALID.			TÍTULO: <p style="text-align: center;">Cuba do elevador</p>		A4
NOME	ASSINATURA	DATA																					
DESEN.																							
VERIF.																							
APROV.																							
MANUF.																							
QUALID.																							
MATERIAL: <p style="text-align: center;">SAE1020</p>			DES. N° <p style="text-align: center;">01</p>	ESCALA:1:5	FOLHA 1 DE 1																		