

ANÁLISE ESTRUTURAL DA PLATAFORMA DE UMA COLHEITADEIRA DE GRÃOS PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

STRUCTURAL ANALYSIS OF THE PLATFORM OF A GRAIN HARVESTER USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Edson Francisco Macedo Ávila¹ 

Vinicius da Rosa Pepe² 

Adriano Menezes da Silva³ 

Andres Eberhard Friedl Ackermann⁴ 

Resumo: Este estudo promoveu a verificação estrutural de uma plataforma de corte aplicada a uma colheitadeira de grãos, equipamento responsável pelo início do processo de alimentação do material e que está sujeito a esforços variáveis capazes de gerar tensões significativas em sua estrutura. Nesse contexto, torna-se essencial verificar se o dimensionamento deste conjunto atende aos requisitos de segurança e desempenho. Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar a análise estrutural da plataforma por meio de engenharia reversa e simulações pelo método dos elementos finitos (FEM), identificando os pontos de tensão máxima, deslocamento máximo, deformações equivalentes e o fator de segurança. Foi realizado o levantamento em campo das dimensões do equipamento para modelamento tridimensional por intermédio do software Autodesk Inventor Professional 2022, ferramenta utilizada para realizar o modelamento e as simulações estruturais. Através das simulações estruturais pelo método de elementos finitos baseadas nas propriedades do aço ASTM A36, foi possível concluir, com base nos resultados apresentados e pelo fator de segurança gerado, que o dimensionamento estrutural da plataforma estudada é robusto e atende aos critérios de segurança e desempenho mecânico para a operação do equipamento. O fator de segurança encontrado permaneceu dentro do intervalo estipulado entre 1,2 e 5,0. O estudo reforça a necessidade de validações estruturais para garantir a integridade estrutural e a segurança operacional em projetos de engenharia.

Palavras-chave: Método dos Elementos Finitos. FEM. Análise Estrutural. Colheitadeiras.

Abstract: This study carried out the structural validation of a cutting platform applied to a grain harvester, a component responsible for initiating the material feeding process and subjected to

¹ Bacharel em Engenharia Mecânica, Centro Universitário Ritter dos Reis (UNIRITTER). E mail: edson.avila2202@outlook.com

² Doutor em Engenharia Mecânica pela UFRGS. Professor do Centro Universitário Ritter dos Reis (UNIRITTER). Pesquisador no *Complex Flow Systems Lab* do *Institute of Earth Sciences*. E mail: vinicius.pepe@ulife.com.br

³ Mestre em Engenharia Mecânica pela UNISINOS. Professor do Centro Universitário Ritter dos Reis (UNIRITTER). E mail: adriano.menezes@ulife.com.br

⁴ Doutor em Engenharia de Produção e Sistemas pela UNISINOS. Professor do Centro Universitário Ritter dos Reis (UNIRITTE). E mail: andres.ackermann@ulife.com.br

variable loads capable of generating significant stresses on its structure. In this context, it is essential to verify whether the structural design of this assembly meets the required safety and performance criteria. Thus, the objective of this work was to perform the structural analysis of the platform through reverse engineering and simulations using the Finite Element Method (FEM), identifying the points of maximum stress, maximum displacement, equivalent deformations, and the safety factor. A field survey of the equipment's dimensions was conducted for three-dimensional modeling using the Autodesk Inventor Professional 2022 software, which was employed for both modeling and structural simulations. Through the structural simulations based on the properties of ASTM A36 steel, it was possible to conclude, based on the results obtained and the computed safety factor, that the structural design of the studied platform is robust and meets mechanical safety and performance criteria for equipment operation. The safety factor remained within the stipulated range of 1.2 to 5.0. The study reinforces the importance of structural validation to ensure structural integrity and operational safety in engineering projects.

Keywords: Finite Element Method, FEM. Structural Analysis. Harvesters.

1 INTRODUÇÃO

A crescente evolução de soluções agrícolas ao longo das décadas ficou conhecida como mecanização, possibilitando o aumento no nível de produção nas propriedades rurais. As máquinas foram desenvolvidas e aprimoradas com o passar dos anos, chegando a um nível para trabalho na lavragem do solo, plantio de sementes, o que promoveu aceleração neste processo. Deste modo, a mecanização foi uma maneira que o homem encontrou de transformar os recursos materiais em trabalho, diminuindo seu esforço braçal (TEIXEIRA, 2009).

A colheitadeira é uma solução agrícola destinada a colher, debulhar e limpar diferentes culturas de grãos como milho, aveia, soja, arroz, entre outros. Seu sistema mecânico pode variar de acordo com a cultura a ser trabalhada. Para alguns cereais ou produtos colhidos, o cuidado na manutenção e inspeção deve ser redobrado devido ao elevado acúmulo sujidades como a palhada e poeiras, que podem comprometer o bom funcionamento do mecanismo e capacidade de colheita (LOURENÇO, 2018).

Pode-se dizer que o procedimento que envolve processamento de grãos em uma colheitadeira inicia pelo sistema de corte e alimentação da máquina, onde o conjunto mecânico conhecido por plataforma de corte alimenta o sistema de trilha, sendo adaptada a colheitadeira por um sistema pivô, o qual permite seu ajuste de altura através do acionamento de cilindros hidráulicos (PEDÓ, ESTEVES; 2013). Os modelos de plataformas para colheitadeiras de grãos variam conforme a cultura a ser processada. Para plataformas de colheita de soja, por exemplo, o equipamento é constituído por molinete, barra de corte e condutor helicoidal.

Sendo assim, no desenvolvimento de um projeto de engenharia busca-se a otimização de suas partes já na concepção inicial, porém potencialidades de melhoria ainda permanecem mesmo quando as condições adotadas parecem as mais assertivas. Esse cenário é comum em estudos aplicados a projetos mais antigos, elaborados em períodos com recursos de engenharia mais limitados, especialmente no que diz respeito à modelagem e à simulação computacional.

Na prática, a digitalização e a simulação computacional de projetos podem promover ganhos significativos, como melhoria na resistência dos materiais, maior rendimento do sistema, redução de massa e de tamanho dos componentes, além de possibilitar validações estruturais mais precisas (PEDÓ; ESTEVES, 2013).

A expansão da aplicação de validações estruturais ocorreu com a popularização de ferramentas de modelagem e simulação numérica. De tal modo, o método de elementos finitos (FEM) é bastante empregado em simulações estruturais via *software*, pois sua metodologia permite o desenvolvimento da otimização estrutural em projetos de engenharia, visando a máxima resistência dos materiais pelo menor custo (FERREIRA; DE PAULA; DE SOUZA, 2022).

Neste estudo, a abordagem adotada apresenta duas naturezas complementares. A primeira, de caráter confirmatório, consiste na verificação estrutural da plataforma de corte da colheitadeira Massey Ferguson 1630, com objetivo de avaliar as tensões, deslocamentos e fator de segurança para verificar se o dimensionamento atende aos requisitos mecânicos de operação. Essa etapa é relevante diante da escassez de validações estruturais em plataformas reais, especialmente em modelos antigos sem documentação técnica disponível, o que constitui uma lacuna na literatura e na prática.

A segunda, de caráter aplicado, envolve a integração entre engenharia reversa e simulação computacional pelo método dos elementos finitos (FEM), permitindo reconstruir o modelo estrutural a partir de medições em campo e realizar sua avaliação mecânica. Essa abordagem supre a ausência de informações técnicas fornecidas pelos fabricantes e oferece um procedimento replicável para análise de implementos agrícolas sem dados de projeto, realidade comum em máquinas antigas ainda amplamente utilizadas no meio rural.

Desta forma, este trabalho busca responder a seguinte questão de pesquisa: É possível realizar a engenharia reversa e aplicar o método de elementos finitos (FEM) na análise estrutural de uma plataforma de corte de uma colheitadeira de grãos?

Sendo assim, a lacuna de pesquisa que se pretende atender é do desenvolvimento do levantamento dimensional em campo, modelagem computacional com a aplicação do método dos elementos finitos com intuito de verificar o fator de segurança aplicado ao projeto de uma plataforma de corte de uma colheitadeira de grãos modelo Massey Ferguson 1630.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Contextualização do problema

Durante a operação de colheita, a plataforma de corte da colheitadeira agrícola está submetida a diferentes solicitações mecânicas, decorrentes do peso próprio de seus componentes, das forças transmitidas pelos sistemas hidráulicos e das ações dinâmicas associadas ao processo de corte e alimentação do material vegetal. Essas solicitações atuam de forma combinada e podem resultar em concentrações de tensões e deslocamentos elevados em regiões estruturalmente sensíveis, como pontos de solda, conexões aparafusadas e suportes de componentes móveis.

Estudos recentes indicam que componentes estruturais de máquinas agrícolas sujeitos a carregamentos variáveis, impactos e vibrações apresentam comportamento mecânico complexo, no qual a identificação de regiões críticas de tensão é fundamental para garantir a integridade estrutural e a segurança operacional do equipamento (SILVA et al., 2014; ZHENG et al., 2024).

Em plataformas de corte amplamente utilizadas no mercado, especialmente em colheitadeiras de gerações anteriores, o projeto estrutural frequentemente foi desenvolvido com base em métodos empíricos ou dimensionamentos simplificados. A ausência de validações estruturais numéricas mais aprofundadas pode introduzir incertezas quanto à capacidade real de suporte de cargas, aos níveis de deformação admissíveis e ao fator de segurança efetivamente aplicado ao projeto (ZHOU et al., 2022).

Em uma colheitadeira, o processamento dos grãos inicia-se pelo sistema de corte e alimentação, no qual o conjunto mecânico acoplado a colheitadeira, plataforma, realiza o corte e alimentação para o sistema de esteira da máquina,

aparelho que permite o transporte do produto para próxima etapa de processamento, a separação dos grãos do restante da planta (DE CARVALHO, 2023).

O tipo de plataforma a ser utilizada na colheitadeira dependerá da cultura trabalhada, para colheita de cereais como soja, trigo e arroz é utilizado uma plataforma composta por separadores, molinete, barra de corte e caracol (POSSATTO, 2019).

Para o projeto de engenharia de estruturas complexas, a avaliação individual dos elementos de máquinas e conjuntos mecânicos, usualmente refletem em incertezas na magnitude de cargas aplicadas. Assim como, em deformações associadas ao estado de tensões durante as condições de serviço e solicitações do material dimensionado no projeto estrutural. Sendo assim, de um modo geral, os cálculos de carga possuem valores aproximados (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Além disso, todos os materiais utilizados em engenharia possuem um nível de variabilidade de suas propriedades mecânicas o que pode gerar instabilidade durante a operação e mais incertezas a serem consideradas no projeto estrutural.

Para mitigar falhas em projetos, alguns procedimentos de engenharia podem ser realizados. Dentre as práticas mais utilizadas, o cálculo de tensão admissível possui maior relevância para garantir a segurança nas tensões aplicadas, o valor da tensão admissível é a relação entre a tensão de escoamento do material e o fator de segurança determinado para este projeto que costuma variar entre 1,2 a 5,0 (DE JESUS SILVA; DA COSTA, 2019; CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

O estudo do material é necessário para conhecer suas propriedades, visto que todo material ao sofrer aplicação de forças externas está sujeito a deformações, onde cada material possui características próprias como dureza, fragilidade, resistência, elasticidade, entre outras. Dentre as propriedades dos materiais, a fadiga mecânica é um fenômeno que ocorre devido a tensões cíclicas aplicadas em um material, mesmo tratando-se de tensões inferiores à resistência deste material (FELIPPI; DA SILVA; DE ALMEIDA, 2019).

O processo de engenharia reversa envolve coletar informações detalhadas sobre uma peça ou componente de um produto ou sistema, de modo a permitir sua reprodução utilizando técnicas adequadas de fabricação. Para isso, o objeto é medido com precisão, empregando métodos compatíveis com suas características, como dimensões e tolerâncias (DIAS, 1998).

Esses dados servem para elaborar desenhos técnicos ou alimentar softwares CAD (*Computer Aided Design*) em 2D ou 3D. Atualmente a utilização de técnicas de escaneamento a laser 3D pode ser utilizada para capturar a geometria completa do componente com alta precisão, gerando modelos sólidos. Entretanto não se descarta a utilização de instrumentos de medição convencionais no levantamento dimensional de componentes de um sistema (DIAS, 1998).

A aplicação da engenharia reversa em equipamentos agrícolas permite reconstruir modelos tridimensionais precisos a partir de máquinas reais, possibilitando reproduzir geometrias complexas e obter parâmetros essenciais para análises estruturais (YANG, 2024). A partir desses modelos, o método dos elementos finitos (FEM) pode ser empregado para avaliar tensões, deformações e possíveis regiões críticas em implementos agrícolas, contribuindo para o aprimoramento do desempenho estrutural e para o aumento da confiabilidade operacional do equipamento (YANG, 2024).

Além disso, a indisponibilidade de informações técnicas detalhadas por parte dos fabricantes e a dificuldade de estimar com precisão os carregamentos reais de serviço dificultam a aplicação exclusiva de métodos analíticos clássicos, sobretudo em estruturas com geometria complexa. Nesse contexto, métodos numéricos têm se mostrado mais adequados para a avaliação estrutural de implementos agrícolas submetidos a múltiplas condições de carregamento (ŞEFLEK; HACISEFEROĞULLARI, 2018).

Dessa forma, a utilização do método dos elementos finitos associada à engenharia reversa configura-se como uma abordagem adequada para a verificação estrutural da plataforma de corte estudada, permitindo identificar regiões críticas, estimar tensões e deslocamentos máximos e verificar a

adequação do fator de segurança da estrutura frente às condições de operação típicas do processo de colheita.

2.2 Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos (FEM) atua como uma ferramenta de cálculo de engenharia altamente eficaz para análise do comportamento dos materiais em estruturas de projetos (MIRANDA; DA SILVA, 2022). As configurações deformadas de uma estrutura são identificadas nesse método através do deslocamento nodal, que por sua vez são inseridos na discretização da geometria modelada através da projeção de uma grade ou malha processada *por um software*.

Sua potencialidade em auxiliar os projetos de engenharia está na capacidade de avaliar diferentes configurações geométricas, ou seja, os parâmetros que descrevem o componente ou conjunto mecânico, extraíndo assim, o comportamento do sistema estrutural quanto a tensões, deformações e esforços internos (FILHO, 2013). Para que a análise estrutural possa ser realizada pelo método de elementos finitos, na etapa de pré-processamento, é necessário realizar a modelagem tridimensional do corpo ou estrutura a qual se deseja analisar.

Atualmente os avançados *softwares* de engenharia que adotam pacotes de simulação computacional com o método dos elementos finitos, já integram a etapa de modelamento tridimensional (3D) com a discretização da geometria na malha. O *software* atua subdividindo artificialmente o corpo modelado em um certo número finito de elementos, que estão conectados por nós, malha de elementos finitos. Após a aplicação do estado físico desejado, aplicação de forças e solicitações atuantes, o *software* processa as informações baseado em funções matemáticas e modelos físicos que atuam diretamente em cada elemento do conjunto (RAMOS; REAL; ISOLDI, 2018).

A exatidão nos cálculos estruturais é dada através de um modelo de cálculo baseado em estudos de equações diferenciais, onde é possível identificar o comportamento nodal da estrutura em questão, porém essas soluções matemáticas acabam, se limitando a estudos de estruturas mais

simples como vigas com comportamento de cargas bem definidos (FILHO, 2013).

Os métodos analíticos clássicos permitem o cálculo da resposta exata dos deslocamentos, deformações e tensões na estrutura em todos os seus pontos, porém essas soluções são conhecidas em apenas alguns casos específicos, que fogem das aplicações em estruturas com geometria complexa, onde há diversos carregamentos em direções diferentes, assim as técnicas clássicas de análise não apresentam efetividade para estas análises (MIRANDA; DA SILVA, 2022; FILHO, 2013).

O método dos elementos finitos tem sido amplamente aplicado para analisar componentes de máquinas agrícolas sob diferentes condições de carregamento, fornecendo informações sobre distribuições de tensão e deformação (HASHAA M. et al., 2023). Em um estudo de análise tridimensional de um cultivador de hastes, foram simulados diferentes tipos de solos e geometrias de lâminas para identificar regiões de maiores esforços e comportamento mecânico sob condições reais de trabalho, demonstrando a utilidade do FEM para aprimorar o projeto de implementos agrícolas e prever falhas estruturais (HASHAA M. et al., 2023).

O método dos elementos finitos foi empregado neste estudo como ferramenta de análise estrutural para avaliar o comportamento mecânico da plataforma de corte da colheitadeira agrícola sob condições de carregamento representativas da operação. A aplicação permite obter soluções numéricas aproximadas para problemas estruturais com geometria complexa, possibilitando a determinação dos campos de tensões, deformações e deslocamentos em estruturas nas quais métodos analíticos clássicos apresentam limitações significativas (FILHO, 2013; MIRANDA; DA SILVA, 2022).

O modelo numérico desenvolvido possibilitou a avaliação das tensões equivalentes segundo o critério de von Mises, bem como dos deslocamentos máximos da estrutura, parâmetros fundamentais para a verificação da integridade estrutural da plataforma. O critério de von Mises é amplamente utilizado em análises estruturais de componentes metálicos, por permitir a comparação direta entre o estado de tensões multiaxial e o limite de escoamento

do material, sendo adequado para a análise de estruturas submetidas a esforços combinados (CALLISTER; RETHWISCH, 2012; FERREIRA; DE PAULA; DE SOUZA, 2022).

Identificar regiões críticas da estrutura, especialmente em áreas de descontinuidade geométrica, como suportes, regiões soldadas e pontos de aplicação de carregamentos, onde ocorrem concentrações de tensões é uma das vantagens da aplicação do método dos elementos finitos. Esse tipo de abordagem é amplamente empregado em estudos recentes voltados à verificação estrutural de máquinas e implementos agrícolas, demonstrando sua eficácia na análise do desempenho mecânico e na estimativa do fator de segurança estrutural (ZHENG et al., 2024; ZHOU et al., 2022).

Desta forma, o método dos elementos finitos tem sido amplamente aplicado para analisar componentes de máquinas agrícolas sob diferentes condições de carregamento, fornecendo informações sobre distribuições de tensão e deformação (HASHAA M. et al., 2023).

2.3 Discretização da geometria

A conversão de um modelo estrutural em elementos finitos é conhecida como discretização. Esse processo gera uma malha, que representa o objeto por meio de formas geométricas simples conectadas entre si. Para corpos sólidos, ou seja, estruturas tridimensionais (3D), utilizam-se normalmente elementos como tetraedros e hexaedros; já para superfícies, ou estruturas bidimensionais (2D), são comuns elementos triangulares e quadriláteros (BARROSO, 2022).

Em geral, as representações gráficas utilizadas na modelagem geométrica dos objetos não podem ser usadas diretamente para a avaliação das tensões e deformações, a etapa de discretização da geometria e a parametrização física do modelo deve ser executada, para que, desta forma possibilite o processamento da simulação computacional (MIRANDA; DA SILVA, 2022).

A escolha do tipo de geometria do elemento a ser utilizado no estudo deve ser definida conforme a experiência do projetista que executará as simulações, uma vez que a escolha da quantidade e da geometria dos elementos estão

relacionadas com a sensibilidade da resposta obtida. Além disso, o método dos elementos finitos é um procedimento matemático para se obter soluções aproximadas, a precisão dos resultados aumenta com o número de elementos atribuídos à malha. Desta forma, com a redução do tamanho dos elementos obtém-se malhas mais refinadas, porém exigindo uma maior capacidade computacional para a obtenção da solução numérica (MELCONIAN, 2014).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo é de natureza aplicada e de objetivo exploratório (GIL, 2022), sendo desenvolvido através da experimentação numérica associado com a técnica de engenharia reversa. Essa técnica foi adotada em razão da inexistência de documentação técnica detalhada da plataforma de corte da colheitadeira agrícola estudada, condição comum em equipamentos de gerações anteriores ainda amplamente utilizados no meio rural.

3.1 Modelo Computacional

O modelo computacional da plataforma de corte de uma colheitadeira agrícola, foi construído através da observação, medição e representação gráfica de um exemplar disponível em uma lavoura. Os instrumentos de medição como, trena com faixa de medição 0 a 5 m e resolução de 0,001 m, escala graduada com faixa de medição 0 a 0,50 m e resolução de 0,001 m e paquímetro quadrimensional com faixa de medição 0 a 150 mm e resolução de 0,01 mm, foram aplicados na etapa de campo, focando no levantamento dimensional de cada componente que constitui a plataforma de corte.

A Figura 1, apresenta o objeto da pesquisa, uma plataforma de corte de uma colheitadeira agrícola e a utilização dos instrumentos de medição na etapa de coleta de dados dimensionais gerados através da engenharia reversa.

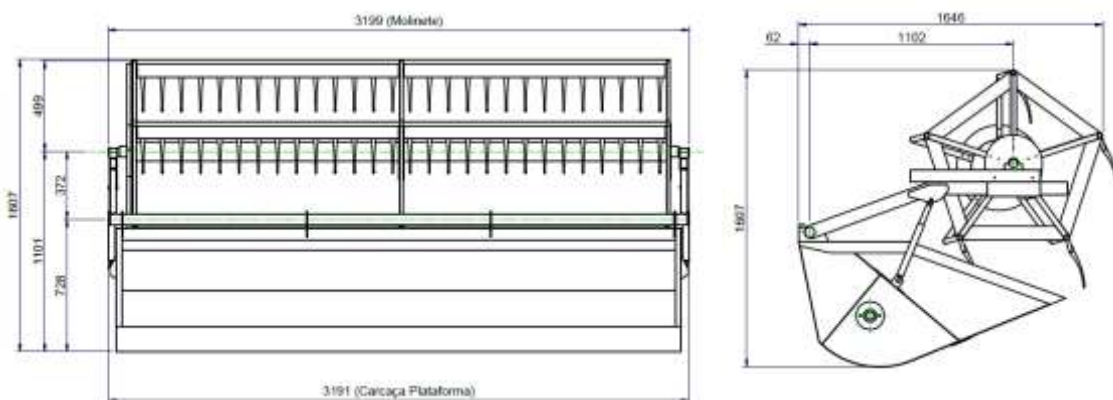
Figura 1 - Registros da coleta de dados dimensionais da plataforma de colheita.



Fonte: Dos autores.

A Figura 2, apresenta as principais dimensões da plataforma de colheita. Para o desenvolvimento da etapa de CAD, todas as dimensões foram criteriosamente levantadas em campo de forma a reconstituir completamente o conjunto mecânico da plataforma de colheita.

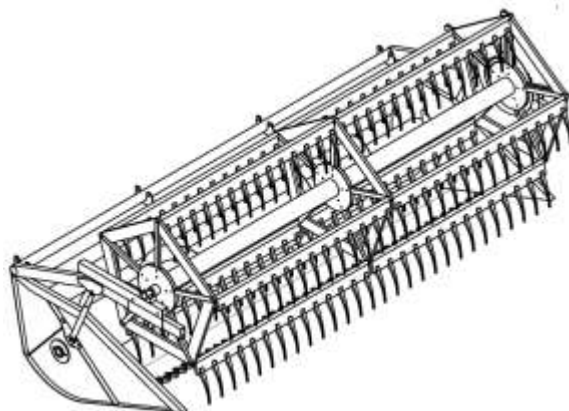
Figura 2 – Principais dimensões da plataforma de colheita.



Fonte: Dos autores.

A Figura 3, representa o domínio computacional a ser estudado através do método dos elementos finitos, observe que cada pequeno componente foi devidamente recriado de forma a desenvolver a montagem completa da plataforma de colheita.

Figura 3 – Esquema do domínio computacional.



Fonte: Dos autores.

Informações sobre a constituição dos materiais da plataforma de corte não estavam disponíveis durante a coleta de campo, sendo assim para a parametrização do modelo, considerou-se o aço ASTM A36. Este material é amplamente utilizado na indústria de estruturas metálicas e em projetos de engenharia devido a sua disponibilidade, custo acessível e propriedades mecânicas adequadas para diversas aplicações.

A escolha do aço ASTM A36 para aplicação na estrutura da plataforma é respaldada pelo o código *ASTM A36/A36M-19 Standard Specification for Carbon Structural Steel* por sua conformidade e amplo reconhecimento internacional (ASTM, 2019). Desta forma facilitando a especificação do material e garantindo a qualidade e segurança da estrutura projetada. Além disso, possui uma resistência à tração de aproximadamente 400 MPa e resistência ao escoamento de cerca de 250 MPa, tornando-o adequado para diversas aplicações em estruturas sujeitas a carregamentos de cargas estáticas e dinâmicas como a plataforma de corte, objeto deste estudo.

As propriedades mecânicas dos materiais, estão apresentadas conforme Tabela 1. Os dados foram coletados da biblioteca do *software* Autodesk Inventor,

que se aproximam muito bem com os valores das propriedades encontradas nos catálogos dos fornecedores de aço e apêndices de livros. Os dados, extraídos e compilados na Tabela 1, foram aplicadas nos estudos dos modelos 3D.

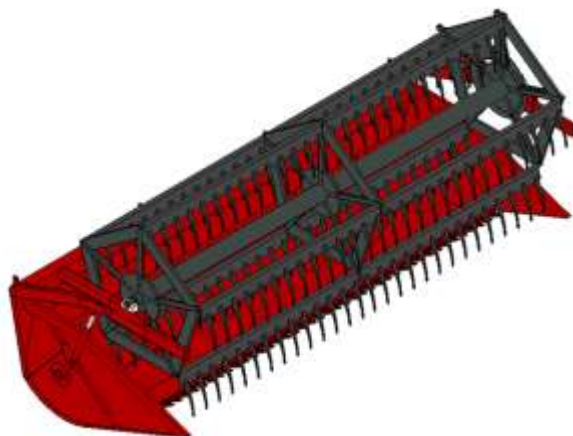
Tabela 1 – Propriedades dos materiais

Propriedade	Empréstimo
Material	ASTM A36
Comportamento	Isotrópico
Limite de escoamento	248,20 MPa
Resistência a tração	399,90 MPa
Módulo de Young	199,96 GPa
Módulo de cisalhamento	76908 MPa
Coefficiente do Poisson	0,30
Massa específica	7850 kg/m ³

Fonte: Autodesk Inventor Professional (2022).

Após a etapa de CAD com o desenvolvimento da modelagem tridimensional (3D) de todas as principais peças que compõem o conjunto da plataforma de corte, através do *software* Autodesk Inventor Professional 2022, foi realizada a montagem dos elementos para compor a estrutura a ser estudada, conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4 - Conjunto montado da plataforma.



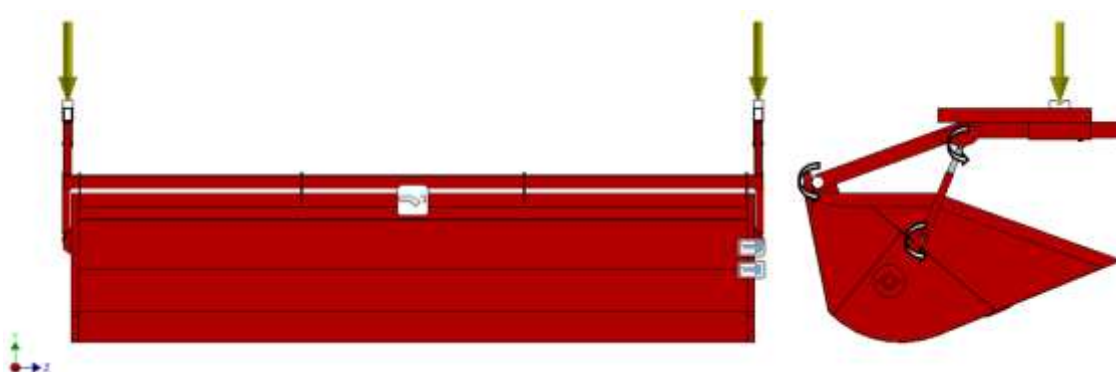
Fonte: Dos autores.

Com a aplicação do aço ASTM A36, em todos os componentes da estrutura, e levando em consideração as propriedades disponíveis na Tabela 1, com auxílio do *software* de modelagem computacional, foi possível obter a massa total aproximada do molinete com valor igual a 142,70 kg.

Considerando que material possui peso específico de 7850 kg/m^3 e adotando a aceleração da gravidade igual a $9,81 \text{ m/s}^2$, estima-se que uma força total de 1400 N atua sobre os dois mancais de rolamento da plataforma, ou seja, distribuída de forma equilibrada entre cada suporte, desta forma uma solicitação de 700 N atua em cada mancal.

Na parametrização do modelo, as condições de contorno foram definidas de modo a representar o comportamento estrutural do molinete em operação. O carregamento aplicado corresponde ao peso próprio do molinete, representado por forças verticais atuando no sentido descendente, conforme indicado pelas setas amarelas na Figura 5.

Figura 5 - Condições de contorno aplicadas à plataforma.



Fonte: Dos autores.

No desenvolvimento do modelo algumas hipóteses simplificadoras foram adotadas como o regime estático de carregamento, ausência de efeitos dinâmicos e flutuações de cargas, ausência de vibrações, material homogêneo e isotrópico, linearidade o material e contato rígido entre os componentes.

A fixação do conjunto foi modelada por meio de um engaste na região de interface com o canal alimentador da colheitadeira, restringindo todos os graus de liberdade translacionais e rotacionais. As conexões entre os componentes do

mecanismo foram representadas como juntas pinadas, permitindo rotação relativa entre as partes conectadas e restringindo os deslocamentos translacionais. Também se adotou a condição fixada aplicada aos elementos unidos por soldas ou uniões parafusadas.

A discretização do modelo, através da geração da malha, foi parametrizada para obter maior refinamento nas regiões de descontinuidade do material, como a região dos furos para conexão de pinos e parafusos, em elementos mecânicos como pinos que unem as chapas laterais da carcaça, no mancal de deslizamento do molinete e na base de sustentação do cilindro hidráulico. Os elementos processados na malha deste estudo possuem formato tetraédrico.

A malha adotada foi determinada por meio de refinamentos sucessivos, dessa forma, realizou-se o teste de qualidade de malha, com o objetivo de determinar o número de elementos finitos necessários para que a malha não gere influências sobre os resultados do estudo. A malha é considerada independente quando o desvio relativo do deslocamento entre malhas sucessivas com diferentes números de elementos finitos é inferior a 1,0% (COLEMAN, 1994).

A escolha do parâmetro deslocamento sobre outras grandezas se justifica devido a menor ordem de derivação em relação a função interpolação, assim em uma solução numérica este é o que apresenta menor erro em comparação com a solução exata, reduzindo assim a propagação de erros numéricos.

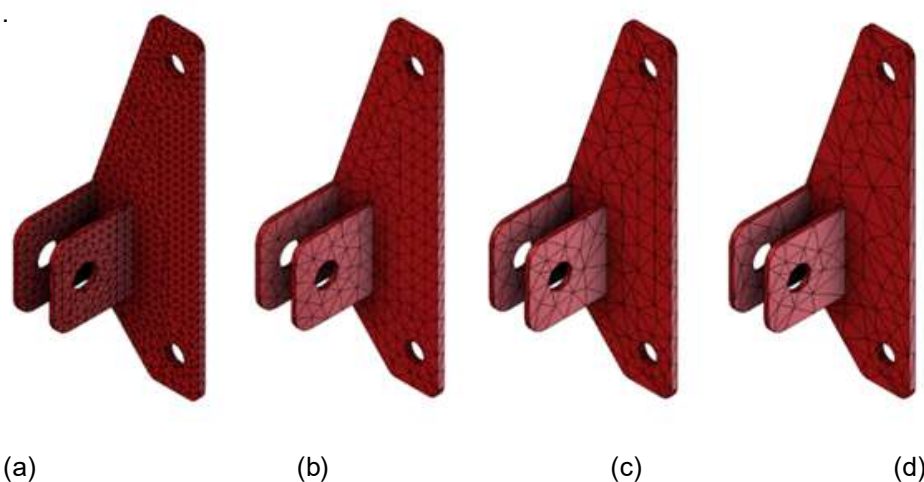
O estudo de convergência de malha foi desenvolvido com a aplicação de quatro refinamentos com tamanhos de elementos entre 5 mm e 20 mm, em intervalos de 5 mm ao longo de toda a estrutura da plataforma de colheita. Tabela 2 apresenta os resultados para cada tamanho de elemento avaliado. A Figura 6 apresenta detalhes da discretização na base do cilindro, uma região alvo onde estima-se a ocorrência da maior solicitação.

Tabela 2 – Estudo de Malha Independente

Propriedade	Tamanho do elemento [mm]			
	5	10	15	20
Número de nós	449.290	426.571	423.031	422.096
Número total de elementos	226.739	214.502	212.745	212.310
Deslocamento [mm]	0,5553	0,5475	0,5441	0,5435
Tempo de processamento (s)	132	123	72	69
Erro Relativo = $ \delta_i - \delta_{i+1} / \delta_i$	1,42%	0,62%	0,11%	----

Fonte: Dos autores.

Figura 06 - Malha gerada na base do cilindro com tamanho de elemento (a) 5 mm, (b) 10 mm, (c) 15mm e (d) 20 mm

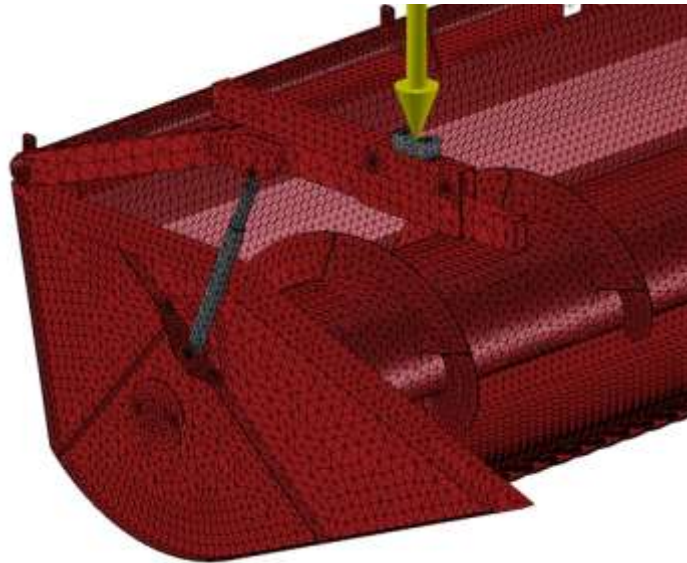


Fonte: Dos autores.

Com o estudo de convergência de malha foi possível verificar o parâmetro deslocamento, onde para todas as malhas encontram-se na mesma ordem de grandeza para o intervalo de refinamento estudado. Adotou-se o elemento com tamanho de 10 mm para todos os estudos desenvolvidos, justifica-se a escolha por este contemplar um erro relativo aceitável com o maior número de elementos possível na região de estudo, garantindo uma melhor exatidão global nos resultados das simulações computacionais.

Para a discretização do modelo, utilizou-se elementos tetraédricos e formato triangular, a Figura 7 ilustra a malha gerada e aplicada em todo o conjunto da plataforma.

Figura 7 - Malha gerada na plataforma.



Fonte: Dos autores.

3.2 Modelo físico e matemático

O modelo físico e matemático que representa o problema a ser resolvido está desenvolvido nesta seção. As condições de equilíbrio estático são determinadas através da eq. (1) e (2).

$$\sum \mathbf{F} = 0 \quad (1)$$

$$\sum \mathbf{M} = 0 \quad (2)$$

onde, \mathbf{F} é o vetor de forças externas, \mathbf{M} é o vetor de momentos nas direções x, y e z.

Os valores para os deslocamentos associados com cada tipo de solicitação que atua em cada componente da estrutura são determinados pelas eq. (3) a (5).

$$\frac{d}{dx} \left(EA(x) \frac{d u(x)}{dx} \right) + q(x) = 0 \quad (3)$$

onde, u é o deslocamento axial em função da posição na direção x, E é o módulo de Young do material, A área da seção transversal, q é uma força externa distribuída por unidade de comprimento aplicada a estrutura e x é a posição ao longo do eixo longitudinal do elemento na direção x.

$$EI \frac{d^2 v}{dx^2} = M(x) \quad (4)$$

onde, v é o deslocamento vertical da viga em um ponto ao longo do comprimento, x é a posição ao longo do eixo longitudinal da estrutura, I é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo neutro e $M(x)$ é a função do momento fletor ao longo da estrutura.

$$\frac{d}{dx} \left(G(x) J(x) \frac{d \phi(x)}{dx} \right) + t(x) = 0 \quad (5)$$

onde, ϕ é o deslocamento angular, G é o módulo de cisalhamento do material, J é o momento de inércia polar da seção transversal e t é um torque externo distribuído aplicada longo do eixo na direção x .

As equações (1) a (3) equação podem ser reescritas de forma semelhante para as demais direções y e z , conforme a decomposição do vetor força que atua em cada componente da estrutura.

A correlação entre as deformações e as tensões ocorre através da Lei de Hooke.

$$\sigma = E \varepsilon \quad (6)$$

$$\tau = \frac{E}{2(1 + \nu)} \gamma \quad (7)$$

onde, σ é a tensão normal, τ é a tensão de cisalhamento, E é o módulo de Young do material, ν é o coeficiente de Poisson, ε a deformação específica longitudinal adimensional e γ é a deformação de cisalhamento adimensional, representada através do deslocamento angular.

A tensão equivalente de von Mises é determinada por:

$$\sigma_{vM} = \left\{ \frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_z - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

onde, σ_{vM} é a tensão equivalente de von Mises, σ são as tensões normais nas respectivas direções x , y e z e τ é a tensão de cisalhamento onde os índices representam os respectivos planos e direções.

O fator de segurança é determinado por:

$$FS = \frac{\sigma_{escoamento}}{\sigma_{vM}} \quad (9)$$

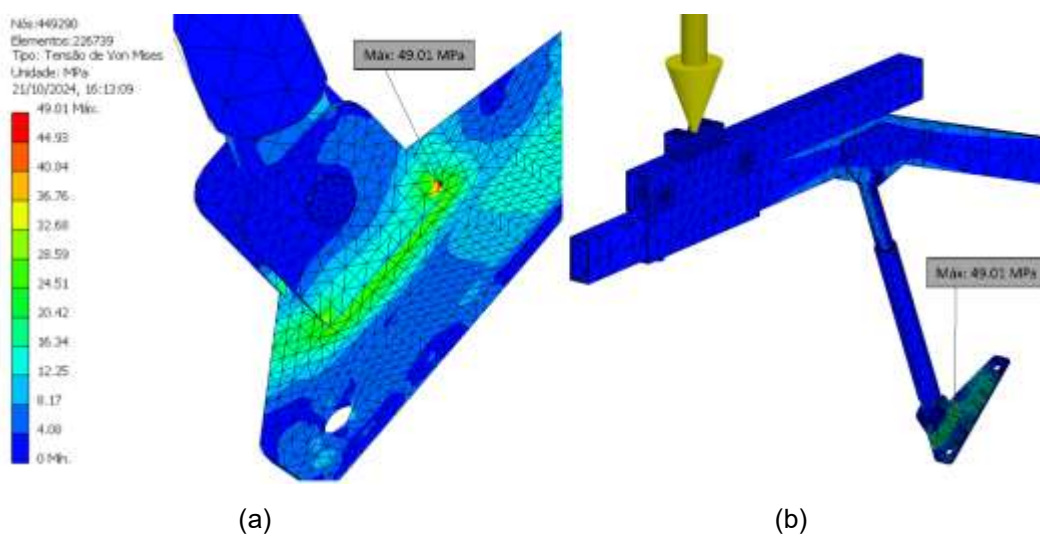
onde, FS é o fator de segurança, $\sigma_{escoamento}$ é a tensões de referência no limite superior onde ocorre a falha, ou seja, a tensão de escoamento do material que é igual a 248,20 MPa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente estudo se propôs modelar uma plataforma de corte de uma colheitadeira agrícola e a analisar o projeto através do método dos elementos finitos, visando identificar as regiões mais demandas e assim estimar o coeficiente de segurança aplicado ao projeto.

A Figura 6, apresenta o campo de tensões de von Mises na região mais solicitada. É possível observar que, após a aplicação do carregamento estático a maior porção da peça apresenta valores das tensões na ordem de 4 MPa, algumas regiões específicas, próximas ao conjunto de chapas soldadas que suportam o cilindro hidráulico, se identifica na Figura 8 tensões na ordem de 25 MPa com um valor máximo igual a 49,01 MPa. Todas as tensões estão abaixo do limite de escoamento (248,20 MPa), o que demonstra que em uma análise estática a estrutura não falha.

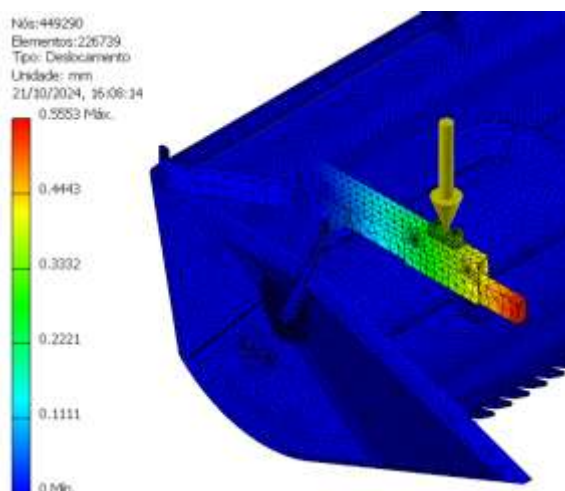
Figura 8 – Campo de tensões de von Mises (a) perfil de sustentação do molinete (b) base do cilindro hidráulico



Fonte: Dos autores.

A Figura 9, apresenta o campo de deslocamentos, o ponto de maior deslocamento está concentrado na extremidade do perfil metálico da base do molinete, com valor máximo igual a 0,55 mm, referente ao peso próprio do molinete.

Figura 9 – Campo deslocamentos, perfil de sustentação do molinete



Fonte: Dos autores.

Sendo assim, supondo as cargas extras de difícil mensuração, uma verificação preliminar é proposta com o acréscimo de 10% sobre a carga inicial.

A adoção deste percentual, não se determina através de normas ou códigos técnicos, mas sim é uma prática conservadora adotada por empresas ou profissionais de engenharia. Esta prática é uma regra de bom senso, onde adiciona-se uma precaução de forma a superdimensionar a estrutura como forma de lidar com quaisquer riscos não estimados ou modelados.

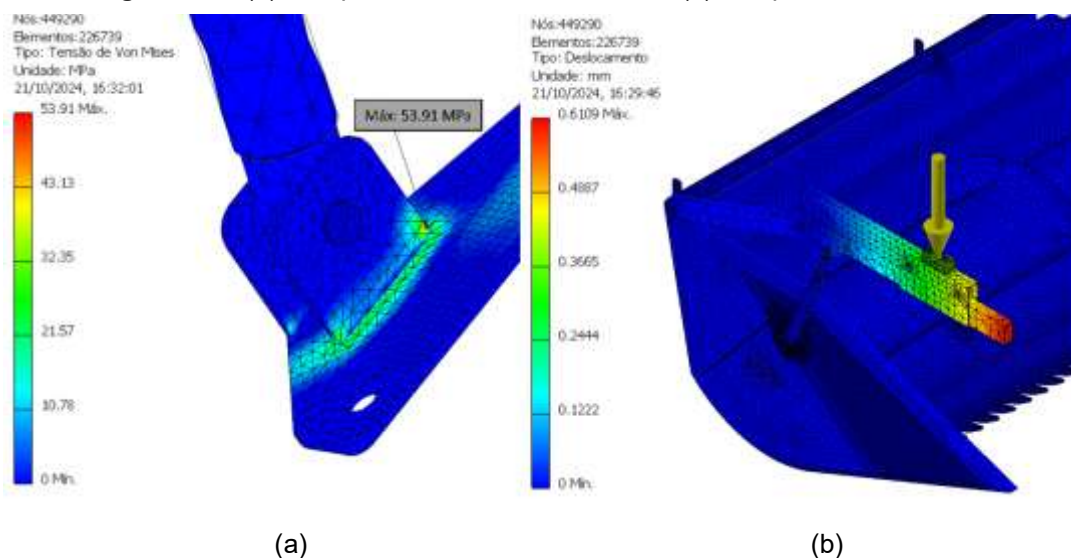
Colaborando com este pensamento, ao avaliar a sensibilidade de parâmetros de projetos estruturais com ênfase na indústria aeroespacial, onde busca-se o desempenho ideal para alta confiabilidade e baixo custo de ciclo de vida. Quando aplicada uma variação de 10% a todos os parâmetros de projeto, observa-se a ocorrência de um incremento de duas ordens de magnitude para os parâmetros médios estruturais. Desta forma evidencia-se que a confiabilidade é bastante sensível aos desvios padrão do material e das tensões aplicadas (VERDERAIME, 1992).

Desta forma, a tensão máxima pelo critério de von Mises e o máximo deslocamento foram recalculados com a sobrecarga de 10% e tais parâmetros possuem respectivamente valores iguais a 53,91 MPa e 0,61 mm.

A Figura 10, apresenta campo de tensões de von Mises e o campo de deslocamentos, nas regiões mais significativas e sensíveis a sobrecarga de 10% aplicada.

Considerando a tensão admissível deste estudo igual a 53,91 MPa, conforme verificado na Figura 10(a) e a tensão de escoamento do aço ASTM A36 de 248,20 MPa, foi possível determinar o fator de segurança para este projeto igual a 4,64. Este coeficiente é responsável por garantir a segurança e integridade estrutural do projeto, garantindo que não haja falhas devido a deformações plásticas nos elementos estruturais. O valor do fator de segurança calculado está em conformidade e concorda com os padrões usualmente estipulados que variam dentro do intervalo de 1,2 a 5,0 (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Figura 10 – (a) Campo de tensões de von Mises (b) campo de deslocamentos



Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir dos resultados obtidos nas simulações iniciais, observou-se que o fator de segurança mínimo calculado para o conjunto da plataforma de colheita foi de aproximadamente 5,1. Este valor é considerado elevado para aplicações

industriais típicas que exigem margens de resistência mais enxutas. Embora a plataforma de colheita opere, na prática, com variações de carga e esforços pontuais e vibrações, esse resultado indica que os atuais materiais são superdimensionados mesmo na região de maior concentração de tensões.

A análise também evidenciou que o comportamento estrutural do conjunto se mantém coerente com as condições de contorno e de carregamento definidas. No entanto, diante dos valores encontrados para o fator de segurança, tornou-se necessário ampliar o estudo, a fim de investigar alternativas que proporcionem uma aplicação mais racional dos materiais de forma que a plataforma de colheita permaneça com sua estrutura robusta e confiável para uma operação.

Diante do exposto, uma expansão da verificação inicial e preliminar com sobrecarga de 10%, uma avaliação paramétrica adicional foi desenvolvida através da adição de cargas externas. Estas cargas foram aplicadas de forma equilibrada nos mancais do molinete, seguindo a metodologia proposta.

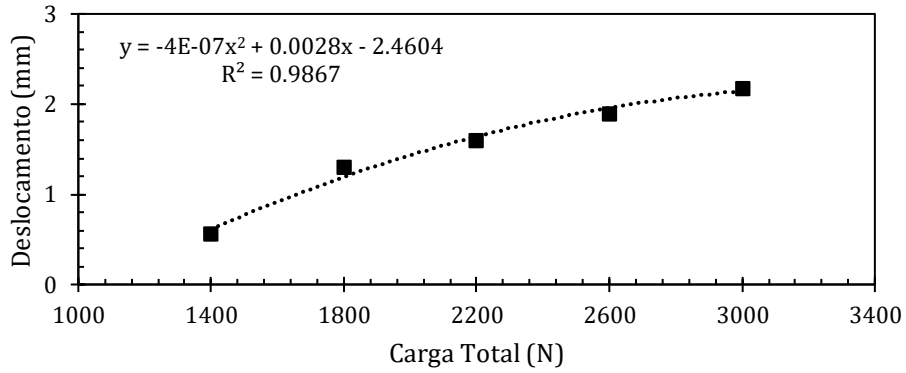
O intuito foi determinar a carga máxima que causa deformações permanente nos suportes do cilindro hidráulico, componente que sofre a maior solicitação no conjunto mecânico da plataforma de colheita. Desta forma buscou-se o fator de segurança igual a unidade, a qual representa a relação de tensão e deformação que está exatamente na região de transição do regime elástico para o plástico.

Com esse objetivo adicional, foi conduzida uma nova série de simulações, variando a condição de carga, mas mantendo os vínculos, parâmetros de malha, e as propriedades dos materiais. Inicialmente, serão adicionados 400N com intervalos regulares de mesma magnitude de forma a testar a capacidade do modelo original. A Figura 11 apresenta as curvas para a tensão e von Mises, deslocamentos e fator de segurança respectivamente.

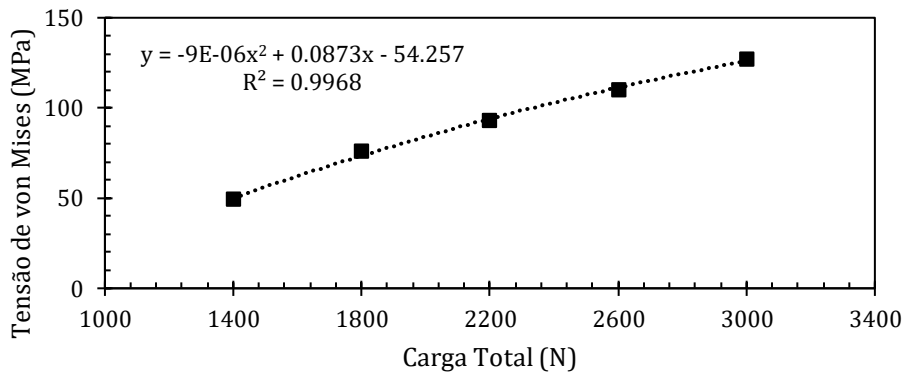
Essa nova etapa do estudo busca identificar a combinação mais adequada de carga, sendo capaz de identificar os fatores de segurança sem comprometer a eficiência estrutural e viabilidade econômica do conjunto mecânico.

Observa-se que, para o incremento de carga houve o aumento das tensões de von Mises e do deslocamento, em contrapartida houve a redução do fator de segurança.

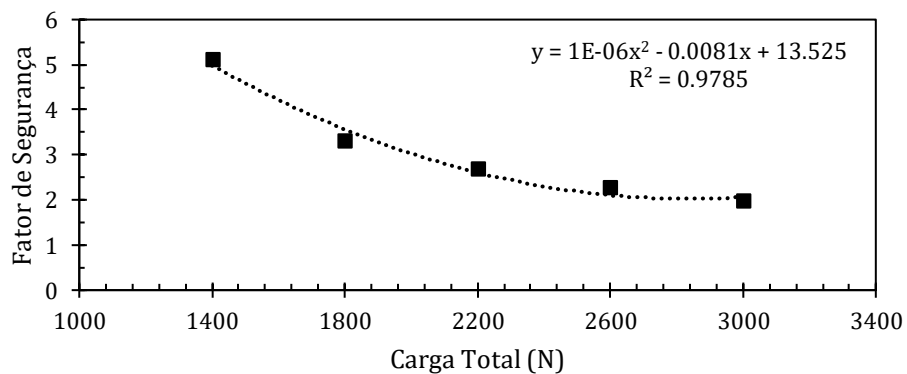
Figura 11 – (a) Tensões de von Mises (b) deslocamentos (c) fator de segurança



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaborado pelos autores.

Esse comportamento previsível confirma a relação direta entre cargas, deformações e fator de segurança, uma vez que as cargas e deslocamentos são diretamente proporcionais conforme se identifica em um gráfico tensão x deformação e o fator de segurança reduz pois a cada incremento fica mais próximo da região de escoamento.

O limite superior da carga total que está na fronteira do regime elástico e plástico é de 5570 N, carga que está diretamente correlacionada com o fator de segurança igual a unidade. Cargas superiores a estas deformarão o componente mais solicitado de forma permanente, o que poderá ser prejudicial para o bom funcionamento do dispositivo mecânico de colheita. Este marcador também auxilia a novos projetos a estimar de forma mais eficaz a relação entre aplicação de materiais e custos de fabricação, pois fatores de segurança elevados apesar de contribuir para estruturas mais robustas também contribuem diretamente para um maior custo de materiais, riscos ergonômicos de montagem e custos de transporte.

5 CONCLUSÕES

Este estudo aplicou o método dos elementos finitos (FEM), associado com a técnica de engenharia reversa para a verificação das tensões e deslocamentos que ocorrem em uma plataforma de colheita agrícola, com intuito de determinar o fator de segurança aplicado no projeto do implemento agrícola.

O levantamento dimensional em campo foi um dos grandes desafios encontrados no desenvolvimento deste trabalho, visto que os componentes possuíam geometrias irregulares e com difícil acesso, com isso foi necessário dar maior ênfase na coleta de dados das partes com maior relevância para a engenharia reversa aplica a este estudo. A disponibilidade limitada de informações técnicas por parte do fabricante do dispositivo, também é uma adversidade a ser destacada.

Os resultados apresentados via simulações estruturais desenvolvidas através do *software*, a tensão máxima requisitada de 53,91 MPa permanece abaixo da tensão de escoamento do material utilizado (aço ASTM A36),

garantindo o bom funcionamento da estrutura projetada sem o comprometimento das propriedades do material.

Com base no estudo estrutural desenvolvido, conclui-se que a estrutura da plataforma da colheitadeira de grãos possui um dimensionamento robusto para as operações do equipamento pois o fator de segurança encontrado é de 4,64, este fator está próximo do limite superior que geralmente é aplicado em projetos de engenharia que buscam uma maior segurança estrutural.

Esse trabalho além de atender aos objetivos propostos, ressaltou a importância do uso de ferramentas de simulações para a verificação estrutural em projetos de engenharia. Essa prática é essencial para garantir o bom funcionamento de um projeto e sua segurança de operação.

5.1 Estudos futuros

Como proposta de continuidade deste trabalho tem-se algumas sugestões para a ampliação tema abordado, como:

- Avaliar as condições operacionais da plataforma de colheita em condições dinâmicas;
- Avaliar as condições de vida útil dos componentes;
- Otimizar a aplicação de materiais com foco na redução da massa total do conjunto mecânico.

REFERÊNCIAS

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM A36/A36M-19 — Standard Specification for Carbon Structural Steel**. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

BARROSO, Elias Saraiva. **Geração de malhas de alta ordem para análise isogeométrica utilizando elementos de bézier racionais**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

Coleman, H. W. **Editorial - Journal of Heat Transfer Editorial Policy Statement on Numerical Accuracy**. ASME Journal of Heat Transfer v. 116: p. 797-798, 1994.

DE CARVALHO, Eduardo Cunha. **Melhorias no Projeto da Caçamba de uma Máquina Colheitadeira de Milho**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2023.

DE JESUS SILVA, Agmar José; DA COSTA, Marysilvia Ferreira. Avaliação mecânica de materiais poliméricos utilizando indentação instrumentada (TII): Revisão de conceitos e estudo de caso. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 11, n. 4, p.1-13, 2019.

DIAS, Adriano Batista. Engenharia reversa: uma porta ainda aberta. **Produto & Produção**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 1-7, 1998.

FELIPPI, Christian; DA SILVA, Rafaela Lopes; DE ALMEIDA, Julio César. Análise numérica do efeito da geometria na resistência de um sistema de implante dentário. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, v. 4, n. 5, p.1-14, 2019.

FERREIRA, Jéssica Luciene; DE PAULA, Geraldo Donizetti; DE SOUZA, Flávio Teixeira. Otimização de sistemas estruturais em aço para edifícios industriais com ponte rolante. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, v. 7, n. 5, p.1-21, 2022.

FILHO, Avelino Alves. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 6. ed. São Paulo: Érica, 2013.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 7.ed. São Paulo: Atlas, 2022.

HASHAA M.; SAEED, M.; ATHAR, M.; et al. 3D Finite Element Analysis of Tine Cultivator and Soil Deformation. **Research in Agricultural Engineering**, v. 69, n. 1, p. 1-11, 2023.

LOURENÇO, Guilherme Lima. **Planejamento da manutenção para as colheitadeiras de café**. Varginha, MG, 2018.

MELCONIAN, Marcos Vinícius. **Modelagem Numérica e Computacional com Similitude e Elementos Finitos**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2014.

MIRANDA, Walzenira Parente; DA SILVA, Antonio Cleiton Lopes. O papel do engenheiro no uso de softwares para cálculo estrutural/The role of engineers in the use of structural calculations softwares. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 1, p. 3681-3698, 2022.

PEDÓ, Cléber Augusto; ESTEVES, Gelson da Crus. **Melhoria de projeto na cobertura do tanque graneleiro de uma colheitadeira de grãos John Deere.** Trabalho de conclusão de curso, Faculdade Horizontina, Horizontina, 2013.

POSSATTO, Maicon. **Desenvolvimento de um dispositivo para içamento de plataforma de colheitadeira de grãos.** Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Panambi, 2019.

RAMOS, Alexandro Pereira; REAL, Mauro de Vasconcellos; ISOLDI, Liércio André. Estudo numérico aplicado à melhoria do comportamento mecânico de placas finas de aço com enrijecedores submetidas à flexão. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, v. 3, n. 3, p.1-26, 2018.

ŞEFLEK, S.; HACISEFEROĞULLARI, H. Finite element analysis for vertical mixer-chopper auger of mixer feeder with a capacity of 1.5 m³. **Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences**, v. 11, n. 1, p.67-72, 2018.

SILVA, E. P.; SILVA, F. M.; MAGALHÃES, R. R. Application of finite elements method for structural analysis in a coffee harvester. **Engineering**, v. 6, p.138-147, 2014.

TEIXEIRA, Sandro; MACHADO, Antônio T.; RESI, Ângelo V. dos; OLDONI, André. **Caracterização da Produção Agroecológica do Sul do Rio Grande do Sul e sua Relação com a Mecanização Agrícola.** Eng. Agríc., Jaboticabal, v.29, n.1, p.162-171. 2009.

VERDERAIME, V. **Structural deterministic safety factors selection criteria and verification.** National Aeronautics and Space Administration, Office of Management, Scientific and Technical Information Program, 1992.

YANG, Jing. Strength Calculation Method of Agricultural Machinery Structure Using Finite Element Analysis. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, v. 15, n. 10, p. 513-520, 2024.

ZHENG, G. Q.; LI, Y. M.; JI, K. Z.; LIANG, Z. W.; MA, X.; CHENG, J. H. Vibration analysis and structural optimization of header frame of millet combine harvester. **Journal of Agricultural Mechanization Research**, v. 46, p. 41-45, 2024.

ZHOU, Y.; WANG, J.; LI, H.; ZHANG, X. Structural optimization of combine harvester plate-shell structure under multi-source excitation. **Applied Sciences**, v. 12, n. 12, p. 5930, 2022.