

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE UMA PLATAFORMA ROBÓTICA AGRÍCOLA MÓVEL DE PEQUENO PORTE

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF A SMALL SIZED MOVING ROBOTIC AGRICULTURAL PLATFORM

Kemelin Carvalho dos Santos

Engenharia Mecânica – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – IFSP Campus Araraquara

Profº Dr. Clayton José Torres

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – IFSP Campus Araraquara

Profº Dr. Mário Luiz Tronco

Departamento de Engenharia Mecânica – EESC - USP

Este presente artigo consiste na otimização estrutural de um protótipo de plataforma robótica agrícola móvel, visando melhores resultados de desempenho, como redução no tempo de execução de determinadas tarefas e diminuição de custos de produção e/ou manutenção. Para isto, foram aplicados conceitos de automação em máquinas convencionais utilizadas na área agrícola, a fim de obter a capacidade de interação homem-máquina sem que a autonomia almejada para o funcionamento do robô fosse desprezada. A partir do estudo de caso de uma plataforma agrícola em parceria com a EESC-USP, foi realizada uma modelagem 3D da mesma, utilizando os softwares de Desenho Assistido por Computador (Inventor e Solid Works), com o intuito de avaliar a estrutura mecânica através do método de Elementos Finitos e estudar pontos críticos que necessitam de otimizações para, posteriormente, remodelar a plataforma com as alterações relevantes.

Palavras-chave: Plataforma Agrícola. Modelagem. Elementos Finitos. Otimização.

This present article consists on the structural optimization of a moving robotic agricultural platform prototype intending better performance results, such as execution time reduction on certain tasks and costs reduction on both production and maintenance. In order to do this, concepts based on automation of standard machines which are already used on agriculture field were applied with the purpose of obtaining the human-machine interaction capacity without despising the desired robot operation autonomy. Since the fulfilment of the study case from a agriculture platform due the partnership with EESC-USP, it's 3D modeling was done by utilizing Computer-Aided Design softwares (Inventor and Solid Works), with the objective of evaluate the mechanical structure using Finite Element Method and to study the platform's

critical points, which may need optimization, intending to, posteriorly, remodel the platform with relevant alterations.

Agriculture Platform. Modeling. Finite Elements Method. Optimization.

1 INTRODUÇÃO

No presente artigo, apresenta-se a construção de um modelo de plataforma robótica agrícola com o auxílio de ferramentas de Desenho Assistido por Computador, desde as peças e até restrições de movimentos para, posteriormente, realizar simulações de esforços utilizando o Método de Elementos Finitos, que se trata de um procedimento numérico onde a estrutura a ser estudada é dividida em malhas. O método consiste em analisar os esforços aos quais a estrutura será submetida por meio da construção de matriz de rigidez do elemento (ALVES FILHO, 2008).

A possibilidade de prever o comportamento da estrutura traz uma grande vantagem (AUTODESK, 2020), já que é possível alterar o modelo antes de sua fabricação de modo a intervir nos resultados finais, uma vez que a simulação está sendo realizada nos softwares, de maneira virtual, além de permitir a análise de pontos reais que precisem de melhorias, a fim de remodelar a plataforma com as alterações necessárias, como no objetivo deste projeto.

Com o avanço da tecnologia, a indústria procurou se atualizar, buscando sistemas de produção que diminuíssem seus custos e aumentassem sua produtividade. Na área agrícola não poderia ser diferente: cada vez mais estão sendo utilizados robôs para auxiliar em tarefas no campo, sejam elas de cultivo ou até mesmo de coleta seletiva. Devido à ampla variedade de solos e espécies de plantações que esse setor possui, os robôs têm como desafio serem capazes de se locomover em segurança em terrenos irregulares (MAHADHIR et al, 2014). Para validar a construção de um modelo representativo, utilizou-se como base a Plataforma Robótica Agrícola que vem sendo desenvolvida pelo Prof. Mário Luiz Tronco, do Departamento de Engenharia Mecânica – EESC – USP.

O controle de sistemas realizado pela simulação a partir de programas de análise permite prever com precisão e confiabilidade a forma como os produtos vão se comportar (MSC Software, 2012) e, com isso, disponibiliza aos engenheiros a possibilidade de projetos cada vez melhores e inovadores. Com a criação de protótipos virtuais, o desenvolvimento do projeto se torna mais econômico, uma vez que testes físicos deixam de ser necessários. Esses programas são comumente utilizados nas áreas automobilística e aeroespacial (SCHEIDT, 2004) e possibilitam ao engenheiro previsões acerca do comportamento do sistema antes mesmo de sua construção física.

O presente estudo tem como objetivo principal realizar a análise estrutural no mesmo com auxílio dos softwares *Inventor* e *Solidworks*, para identificar possíveis falhas no sistema e elaborar melhorias. Para isto, é necessário realizar os objetivos específicos elencados a seguir:

- construir modelos em 3d com o auxílio de softwares de desenho;
- realizar análise estrutural a partir de simulações de esforços com diferentes cargas utilizando o método de elementos finitos;
- interpretar os resultados obtidos a partir das simulações realizadas;
- investigar possíveis falhas e rupturas da plataforma e identificar suas respectivas origens;
- elaborar melhorias estruturais afim de otimizar e viabilizar o projeto, tornando-o seguro e funcional.

2 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Na engenharia, estruturas simples submetidas a carregamentos simples, quando estudadas, possuem soluções exatas quanto à análise de esforços. Estruturas complexas, por sua vez, submetidas a diversos tipos de esforços, apresentam soluções aproximadas quando analisadas a partir do Método de Elementos Finitos – procedimento numérico que consiste em analisar estruturas e simulá-las, tomando como parâmetros principais suas deformações e tensões ao longo do sólido em questão.

Este método possui três requisitos, que são: pré-processamento, processamento e solução. Para isto, o corpo da estrutura, composto por diversos elementos, é subdividido em múltiplas malhas, constituídas por diversos pontos de ligações, denominados nós. Com a simulação, a matriz de rigidez da estrutura é encontrada e, com isso, é possível estudar os efeitos de tensões e deformações que o sólido sofrerá de acordo com os deslocamentos nodais ocasionados pelas cargas nele aplicadas e suas respectivas reações.

Por ser uma técnica numérica que reduz os problemas definidos no espaço geométrico – também chamado de domínio – e capaz de encontrar uma solução em um número finito de pontos, o método é amplamente utilizado para modelagem de problemas de engenharia e física (PEPPER, 2017). De fácil compreensão, combinando conceitos estudados em álgebra linear e resistência dos materiais, e índice de utilidade em grande escala na área de projetos, será também utilizado como base para o estudo estrutural da plataforma robótica em questão.

Para dedução, análise e aplicação do conceito de elementos finitos, a estrutura de mais fácil entendimento a ser usada como exemplo de aplicação deste método numérico é o elemento mola, visto que a mola, quando composta apenas por um material, possui constante elástica inalterada. Ou seja, a constante será sempre a mesma, não importando se a mola estiver sofrendo maior compressão ou tração, e obedecendo a Lei de Hooke (apresentada a partir da equação 7). Levando em consideração uma mola de constante elástica \mathbf{K} , e submetendo-a a uma força \mathbf{F} , sua reação será um deslocamento \mathbf{X} , como pode ser observado na figura 1. Ou seja, a mola sofrerá um esforço de tração ou compressão. Em seguida, é possível analisar a mola sob uma determinada situação de esforço e sua respectiva análises de esforços (figura 2). A análise pode ser extrapolada para diversas situações de esforços diferentes, e um breve resumo da análise pelo MEF é apresentado na sequência abaixo:

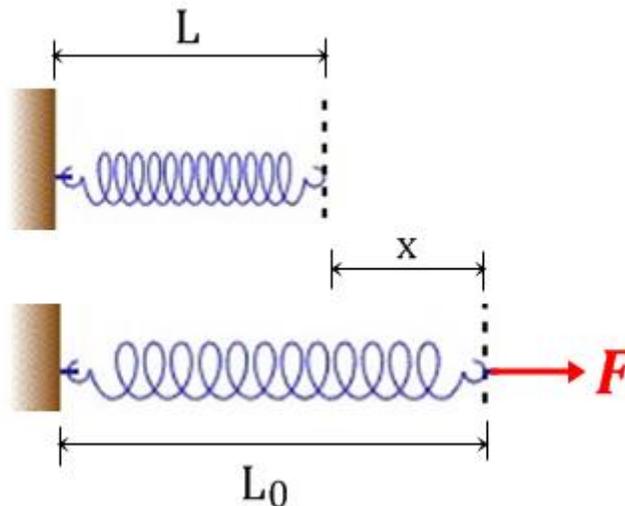


Figura 1: Mola no seu estado inicial e, posteriormente, sendo submetida a uma força F .
Fonte: próprio autor.

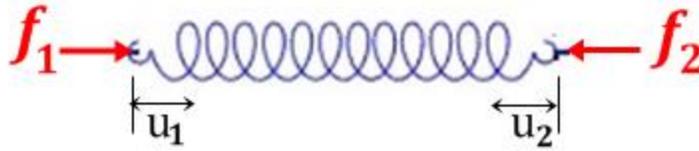


Figura 2: Mola sendo submetida às forças f_1 e f_2 , resultando em um esforço de compressão e deslocamentos nos dois pontos.
Fonte: próprio autor.

Análise de esforços da figura 2 na forma equacional:

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} * \mathbf{X} \quad (\text{Eq. 1})$$

Na forma matricial, tem-se:

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{Eq. 2})$$

Portanto, as forças podem ser descritas a partir das equações 3 e 4.

$$f_1 = K_{11} * u_1 + K_{12} * u_2 \quad (\text{Eq. 3})$$

$$f_2 = K_{21} * u_1 + K_{22} * u_2 \quad (\text{Eq. 4})$$

Ao expandir a análise para as demais possibilidades de esforços mediante a aplicação das forças em outros sentidos, é possível obter as equações para combinações de esforços de tração e compressão, e com possibilidades de apoios fixos ou móveis, gerando assim a análise completa pelo método aqui apresentado.

Ao analisar cada exemplo como componentes de um conjunto e juntando os resultados de todas as possíveis condições que a mola pode ser submetida, tem-se uma combinação que resulta na matriz de rigidez do Elemento Mola, definida na equação 5. Com esta, é possível encontrar a relação entre forças às quais o material foi submetido e os respectivos deslocamentos resultantes.

$$\begin{bmatrix} K & -K \\ -K & K \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 5})$$

Uma estrutura pode ser composta por diversos elementos e, para encontrar a matriz de rigidez da estrutura, primeiro é necessário encontrar a matriz de rigidez de cada elemento que a compõe, para então, realizar a combinação entre elas.

Além do Elemento Mola, é possível realizar a análise de esforços para diversos elementos, chamados de elementos rígidos. Quando aplicada uma força \mathbf{F} sobre um elemento rígido, o corpo todo se deforma, sofrendo as reações. Essa força \mathbf{F} distribuída sobre uma área \mathbf{A} , resulta em uma tensão $\boldsymbol{\sigma}$, como pode ser observado na equação 6, denominada por tensão mecânica.

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{F}{A} \quad (\text{Eq. 6})$$

Tensão mecânica refere-se ao valor resultante da distribuição de esforços por unidade de área. O corpo que sofre o impacto desta força tende a impedir a movimentação e limitar a

deformação sofrida, que é o fenômeno pelo qual se propaga. Sempre que uma força é aplicada sobre um corpo, a tendência é que resulte em mudanças sob a forma e o tamanho dele. Estas mudanças são denominadas de deformações (HIBBELER, 2009).

Na região de deformação elástica, a tensão pode ser definida pelo produto entre o módulo de elasticidade do material ou módulo de Young (E) e a deformação linear (ϵ), como consta na equação 7, conhecida como Lei de Hooke.

$$\sigma = E * \epsilon \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

$$\epsilon = \frac{\text{deformação } (\Delta l)}{\text{comprimento inicial}} = \frac{d}{L} \quad (\text{Eq. 8})$$

A Lei de Hooke representa matematicamente a porção inicial, em linha reta, do diagrama tensão-deformação até o limite de proporcionalidade, e o módulo de elasticidade representa a inclinação dessa reta (HIBBELER, 2009).

Na região elástica, a tensão no material pode ser obtida a partir da multiplicação do módulo de elasticidade e deformação, dividido pelo comprimento inicial, como mostrado na equação 9.

$$\frac{F}{A} = \frac{E*d}{L} \quad (\text{Eq. 9})^1$$

Onde, a partir da realização de algumas manipulações algébricas, obtém-se a equação 10:

$$K = \frac{E*A}{L} \quad (\text{Eq. 10})$$

E assim, faz-se possível obter a Matriz de rigidez, apresentada na equação 11. Portanto, tem-se:

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K & -K \\ -K & K \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{Eq. 11})$$

Em alguns casos, como o da treliça mostrada na figura 3, são apresentadas reações em duas dimensões para cada viga que compõe a treliça.

¹ Vale salientar que na região plástica essa igualdade não existe, uma vez que o material submetido a uma força F sofreria uma deformação permanente acima da tensão de escoamento do mesmo, o que resultaria em ruptura do material.

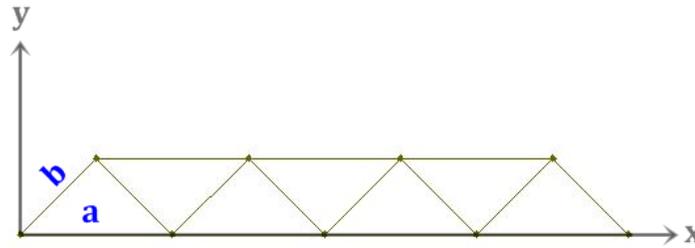


Figura 3: Treliça a ser analisada.
Fonte: próprio autor.



Figura 3 (a): Análise de esforços referente a viga “a” da treliça apresentada na figura 6.
Fonte: próprio autor.

A estrutura apresentada na figura 3 é composta por um conjunto de vigas em inclinações diferentes, onde cada viga possui seu próprio eixo, denominado eixo local. A estrutura, porém, possui o eixo geral, denominado eixo global. É necessário, portanto, generalizar os termos, ou seja, transformar eixo local em eixo global, decompondo em termos de seno e cosseno utilizando relações trigonométricas padrões para decomposição de vetores nos eixos x e y.

A matriz de rigidez da viga pode ser obtida inicialmente a partir da equação 12, trabalhada em termos dos eixos locais e suas reações.

$$\begin{Bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \\ f_{x2} \\ f_{y2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & \frac{EA}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{L} & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{Eq. 12})$$

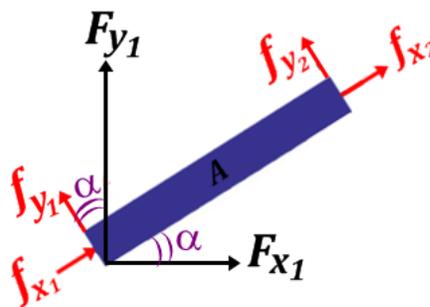


Figura 3 (b): Análise de esforços referente a viga “b” da treliça apresentada na figura 6.
Fonte: próprio autor.

Ao observar a viga “b”, é notável que a mesma apresenta um ângulo de inclinação (α), que compõe as forças no eixo local (da viga). É necessário, então, transformar as forças do eixo local para o eixo global (da estrutura).

Para realizar o procedimento de generalização, é necessário criar uma matriz de transformação $[T]$ que, ao ser multiplicada pelo vetor de forças resultantes do eixo global $\{F\}$, resulta no vetor de forças do eixo local $\{f\}$, como na sequência de equações apresentadas abaixo.

$$\cos \alpha = \lambda \quad (\text{Eq. 13})$$

$$\text{sen } \alpha = \mu \quad (\text{Eq. 14})$$

$$\{f\} = [T] \cdot \{F\} \quad (\text{Eq. 15})$$

$$f_{x_1} = F_{x_1} \cdot \cos \alpha + F_{y_1} \cdot \text{sen } \alpha \quad (\text{Eq. 16})$$

$$f_{y_1} = -F_{x_1} \cdot \text{sen } \alpha + F_{y_1} \cdot \cos \alpha \quad (\text{Eq. 17})$$

$$f_{x_2} = F_{x_2} \cdot \cos \alpha + F_{y_2} \cdot \text{sen } \alpha \quad (\text{Eq. 18})$$

$$f_{y_2} = -F_{x_2} \cdot \text{sen } \alpha + F_{y_2} \cdot \cos \alpha \quad (\text{Eq. 19})$$

Portanto, trabalhando as equações na forma matricial, obtém-se a equação 20.

$$\begin{Bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \\ f_{x2} \\ f_{y2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda & \mu & 0 & 0 \\ -\mu & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & \mu \\ 0 & 0 & -\mu & \lambda \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{x2} \\ F_{y2} \end{Bmatrix} \quad (\text{Eq. 20})$$

Sendo assim, no eixo local de cada elemento, a matriz de rigidez é dada pela equação 21.

$$\{f\} = [K_e] \cdot [\mu] \quad (\text{Eq. 21})$$

Consequentemente, é possível encontrar a matriz de rigidez no eixo global, como mostrado na equação 22.

$$[T] \cdot [F] = [K_e] \cdot [T] \cdot [U] \quad (\text{Eq. 22})$$

A partir de algumas manipulações algébricas e conceitos de materiais pré-estabelecidos, é obtida a equação 23, solução para a matriz de rigidez da estrutura na forma explícita. Como pode ser observado na mesma, toda matriz de rigidez global é quadrada e diagonalmente simétrica.

$$[K_e] = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \lambda^2 & \lambda\mu & -\lambda^2 & -\lambda\mu \\ \lambda\mu & \mu^2 & -\lambda\mu & -\mu^2 \\ -\lambda^2 & -\lambda\mu & \lambda^2 & \lambda\mu \\ -\lambda\mu & -\mu^2 & \lambda\mu & \mu^2 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 23})$$

Como pode ser observado, o método consiste em uma sequência de passos que envolvem operações matemáticas e conhecimentos de engenharia, que podem ser resumidos em:

Passo 1 – Discretizar e selecionar os tipos de elementos.

Passo 2 – Selecionar uma função de deslocamento.

Passo 3 – Definir as relações de tensão/deslocamento e tensão/deformação.

Passo 4 – Derivar a matriz de rigidez do elemento e as equações.

Passo 5 – Montar as equações dos elementos para obter as equações globais e introduzir as condições de contorno.

Passo 6 – Resolver a equação dos graus de liberdade desconhecidos (ou deslocamentos generalizados).

Passo 7 – Resolver as deformações e tensões no elemento.

Passo 8 – Interpretar os resultados.

O Método de Elementos Finitos pode ser aplicado em diversos problemas de engenharia, visto que as análises podem ser extrapoladas para casos de estruturas complexas que envolvam outros tipos de esforços, como por exemplo flexão e torção. Como observado, realizar os cálculos de forma manual demanda tempo e está sujeito a diversos erros. Em contrapartida, os softwares de Engenharia Assistida por Computador (CAE) permitem que a análise aconteça de forma rápida e precisa, proporcionando ao engenheiro uma previsão dos resultados, otimizando a performance e segurança dos produtos, além de reduzir consideravelmente as chances de falhas do conjunto estudado.

O método pode ser utilizado para analisar problemas estruturais (análise de estruturas e treliças, problemas de concentração de tensão, flambagem, análise de vibração e problemas de impacto) e não estruturais (transferência de calor, fluxo de fluido e infiltração, distribuição de potencial elétrico ou magnético) e até mesmo em problemas de engenharia biomecânica, que normalmente incluem análises dos ossos como coluna e crânio, articulações do quadril e em implantes dentais.

Para o presente trabalho foi construída, com o auxílio dos softwares *Inventor* e *Solid Works*, uma estrutura constituída, em sua maior parte, pelo material Aço Carbono, dando forma a uma Plataforma Robótica Agrícola. A escolha do material Aço Carbono pode ser justificada devido sua maior durabilidade e por possuir grande resistência à altas temperaturas e até mesmo à corrosão provocada pelo ambiente, além de possuir o ponto de fusão mais baixo, facilitando a fabricação e sendo um dos materiais mais eficientes no setor agrícola (SERRALHEIRO, 2021). A estrutura, que pode ser observada na Figura 4, foi idealizada pelo Prof. Dr. Mário Luiz Tronco com o objetivo de mapear e monitorar áreas de cultivo agrícola, como por exemplo, plantação de café.

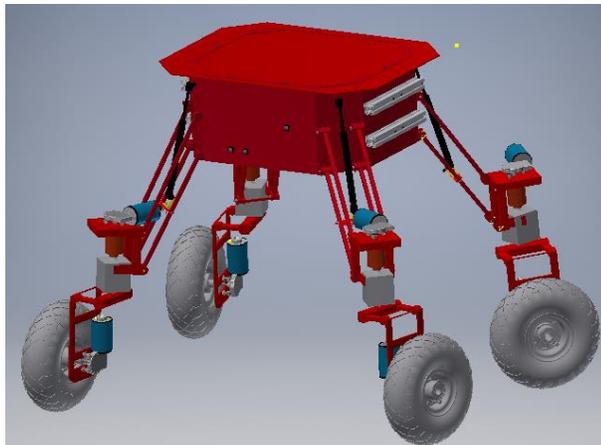


Figura 4: Plataforma Robótica Agrícola Móvel de Pequeno Porte
Fonte: próprio autor.

As uniões na base da plataforma são todas parafusadas e/ou soldadas. O conjunto conta ainda com perfis de alumínio, que serão utilizados para posicionar as câmeras de monitoramento do solo; amortecedores pneumáticos, utilizados para promover estabilidade à plataforma e absorver os impactos provocados pelos desníveis do solo; mancais, motores e rodas disponíveis no mercado e de fácil acesso, que são mostrados nas figuras 5, 6 e 7.

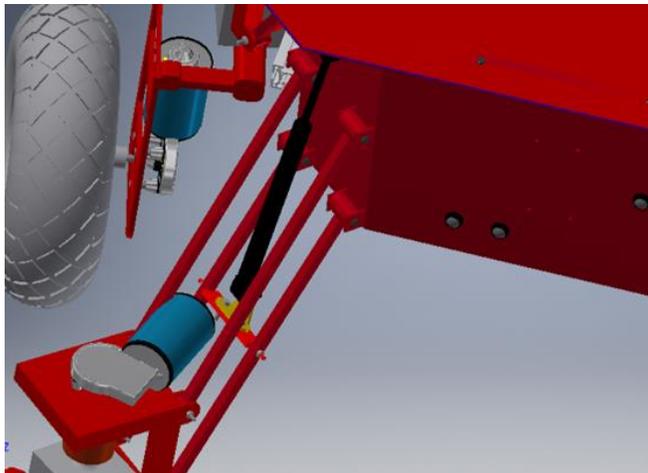


Figura 5: Detalhe das garras inferiores: amortecedor e motor.
Fonte: próprio autor.



Figura 6: Detalhe das garras inferiores: roda e motor.
Fonte: próprio autor.

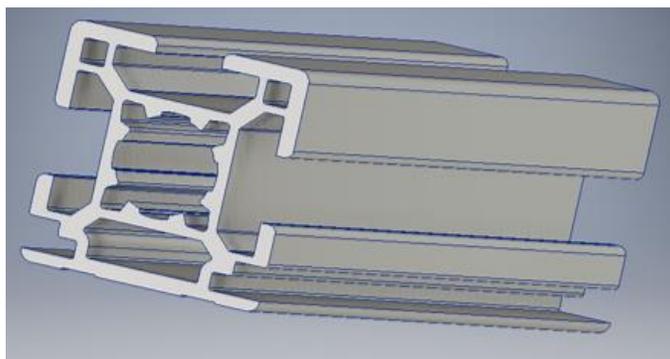


Figura 7: Perfil de alumínio utilizado.
Fonte: próprio autor.

A plataforma conta com um sistema de direção autônomo, criado a partir de uma programação prévia que leva em consideração dados de entrada como ajustes e controle de velocidade, potência dos motores, sistemas de detecção de obstáculos e proximidade a partir dos sensores instalados, além de controle de estabilidade com a utilização dos amortecedores. As quatro rodas são independentes, pois possuem motores próprios, tornando possível a realização de manobras complexas que necessitem de maior precisão nos movimentos, utilizando o modelo da Geometria de Ackermann.

RESULTADOS

Conforme já descrito por Secchi em seus estudos (SECCHI, 2008), a atuação de robôs agrícolas móveis em ambientes externos não estruturados e não previamente modelados, define-os como robôs de serviço de campo, desenvolvidos para superar a movimentação em diversos tipos de solos e áreas de cultivos. Na trajetória dos robôs em ambiente agrícola, é comum que aconteçam deslizamentos laterais do robô e travamentos no solo, e estes efeitos devem ser considerados no estudo estrutural da plataforma desenvolvida no atual trabalho.

Foi identificada uma possível fonte de problemas no formato da estrutura inferior, onde são presos a roda e o motor. Anteriormente, o suporte de fixação das rodas era de formato retangular com cantos vivos, o que provavelmente ocasionaria travamentos, visto que o solo agrícola possui irregularidades e desníveis, fatores estes que dificultam a locomoção. A fim de solucionar esse problema, foi proposto um novo formato com adoçamento dos cantos, que consiste no arredondamento do canto formado por dois segmentos de linhas. As duas versões do suporte da roda são apresentadas na figura 8.



Figura 8: À esquerda, garra no formato retangular. À direita, garra com adoçamento nos cantos.
Fonte: próprio autor.

Outra solução para amenizar a condição de deslizamento no solo é o emprego da roda tipo *torus-shaped*, composta por uma suspensão com dois graus de liberdade e mecanismo formado por quatro barras. Este conjunto, responsável por realizar a movimentação de inclinação lateral e independente da roda é denominado *D4Bar*. Segundo estudos, a utilização deste tipo de roda apresenta resultados favoráveis para navegação em terrenos irregulares, pois age diminuindo o deslizamento lateral do veículo (APPALA & GHOSAL, 2015).

Após realizado o ajuste do suporte de fixação das rodas com adoçamento nos cantos e montada a roda do tipo torus-shaped no conjunto, conclui-se a modelagem tridimensional da plataforma, resultado que pode ser observado na Figura 9.

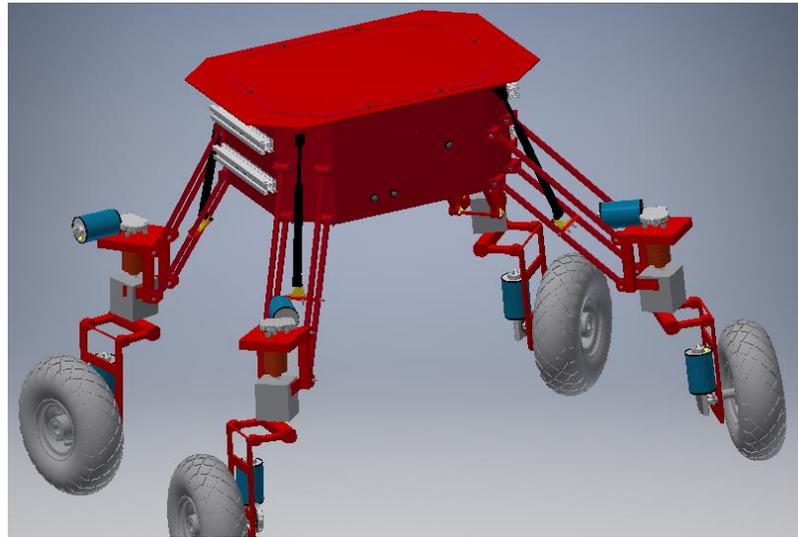


Figura 9: Resultado da modelagem da Plataforma utilizando o software Inventor.
Fonte: próprio autor.

A estrutura foi, então, submetida a uma simulação para análise de esforços pelo método de elementos finitos, com auxílio dos softwares *Inventor* e *Solid Works*. Na simulação inicial, apenas uma parte da plataforma, no caso a face superior, foi submetida a uma carga de $900N$ distribuída uniformemente sobre a tampa superior. A justificativa para a aplicação dessa carga é que a estrutura da plataforma não foi projetada para carregar grandes cargas, mas é capaz de suportar uma pessoa de aproximadamente $90kg$, além das forças dos cabos de travamentos atuando sobre ela em situações em que seja necessário deslocar a plataforma com o auxílio de um carro, onde a plataforma seria amarrada ao veículo.

Como a plataforma é apoiada sobre quatro conjuntos de garras que, na parte simulada, configura apoios de geometria fixa, o carregamento de força normal foi dividido sobre eles, gerando uma série de esforços, dentre os quais se faz possível destacar os esforços de tração e compressão. O resultado da modelagem parcial da plataforma pode ser observado na figura 10 e, na figura 11, pode-se observar a distribuição da carga de $900N$ e as reações dos apoios de geometria fixa.

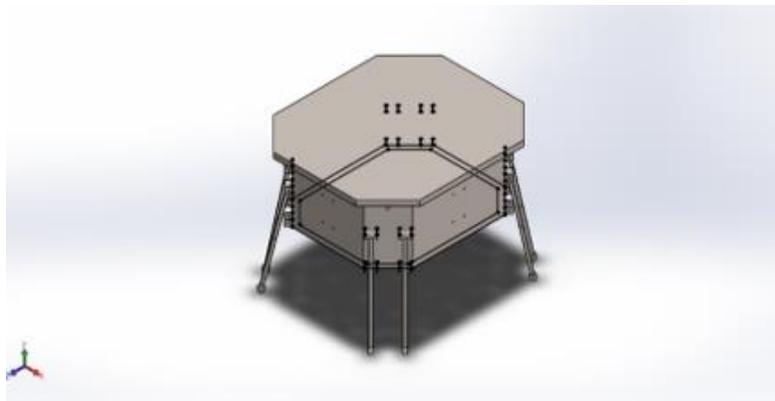
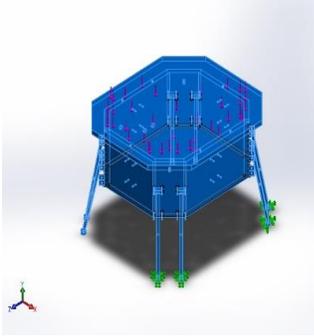


Figura 10: Resultado da modelagem parcial da Plataforma utilizando o software SolidWorks.
Fonte: próprio autor.

Na tabela 1, são apresentadas as propriedades do modelo simulado, do tipo isotrópico linear elástico, obtidas a partir do estudo do software. O critério de falha predeterminado selecionado foi o da tensão de von Mises máxima.

Tabela 1 – Propriedades do material do modelo simulado.

Referência do modelo	Propriedades	Componentes
	<p>Nome: Liga de aço</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico</p> <p>Critério de falha predeterminado: Tensão de von Mises máxima</p> <p>Limite de escoamento: 6,20422e+008 N/m²</p> <p>Resistência à tração: 7,23826e+008 N/m²</p> <p>Módulo elástico: 2,1e+011 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0,28</p> <p>Massa específica: 7700 kg/m³</p> <p>Módulo de cisalhamento: 7,9e+010 N/m²</p> <p>Coefficiente de expansão térmica: 1,3e-005 /Kelvin</p>	<p>Corpo sólido 1(Ressalto-extrusão1)(base-1),</p> <p>Corpo sólido 1(Importado1)(garra1-1),</p> <p>Corpo sólido 1(Importado1)(garra1-2),</p> <p>Corpo sólido 1(Importado1)(garra1-3),</p> <p>Corpo sólido 1(Importado1)(garra1-4),</p> <p>Corpo sólido 1(Importado1)(garra1-5),</p> <p>Corpo sólido 1(Importado1)(garra1-6),</p> <p>Corpo sólido 1(Importado1)(garra1-7),</p> <p>Corpo sólido 1(Importado1)(garra1-8)</p>

Fonte: próprio autor.

Para as configurações de contato, foi selecionado o contato global do tipo unido. Já para as configurações de malha, foi selecionada o tipo de malha sólida com gerador de malhas com base em curvatura, a partir da geometria da plataforma. Foram selecionados quatro pontos jacobianos e qualidade de malha alta. Pelo software, foram encontrados 31.081 nós e 15.653 elementos. A malha aplicada à estrutura da plataforma pode ser observada na figura 11, bem como o detalhamento de informações da malha é apresentado na tabela 2.



Figura 11: Malha aplicada à estrutura.

Fonte: próprio autor.

Tabela 2 – Informações da malha aplicada à estrutura.

Total de nós	31081
Total de elementos	15653
Proporção máxima	66.647
% de elementos com Proporção < 3	51.9
% de elementos com Proporção < 10	7.9
% de elementos distorcidos(Jacobiana)	0
Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss):	00:00:07
Nome do computador:	KEMELIN

Fonte: próprio autor.

Conforme comentado, a plataforma foi submetida a uma carga de $900N$, distribuída uniformemente sobre a tampa superior, onde o carregamento foi dividido sobre os conjuntos de garras configurados como apoios fixos que sofreram, assim, uma série de esforços, dentre os quais se faz possível destacar os esforços de tração e compressão.

Com a simulação realizada a partir do critério de falha pela tensão de von Mises máxima, foi possível encontrar propriedades do material, como sua massa específica (7700 kg/m^3), limite de escoamento ($6,20422e + 008 \text{ N/m}^2$), resistência à tração ($7,23826e + 008 \text{ N/m}^2$) e módulo de cisalhamento ($7,9e + 010 \text{ N/m}^2$), fatores que definem o comportamento do material quando submetidos à esforços mecânicos.

A malha aplicada à estrutura da plataforma foi do tipo malha sólida com gerador de malhas com base em curvatura, a partir da geometria da plataforma, e com qualidade de malha alta. Pelo software, foram encontrados 31.081 nós e 15.653 elementos, o que garante a confiabilidade dos resultados obtidos.

Com a simulação realizada, foi possível identificar os pontos submetidos a maiores valores de tensões, conhecidos como “pontos críticos” e avaliar se, ainda assim, o projeto pode ser executado sem maiores riscos.

Como visto anteriormente, o conjunto foi submetido a uma carga de $900N$, distribuídos entre os vetores x, y e z, portanto, apresentou deslocamentos, rotações e tensões nestes mesmos eixos. Os resultados encontrados podem ser observados nas figuras 12, 13 e 14.

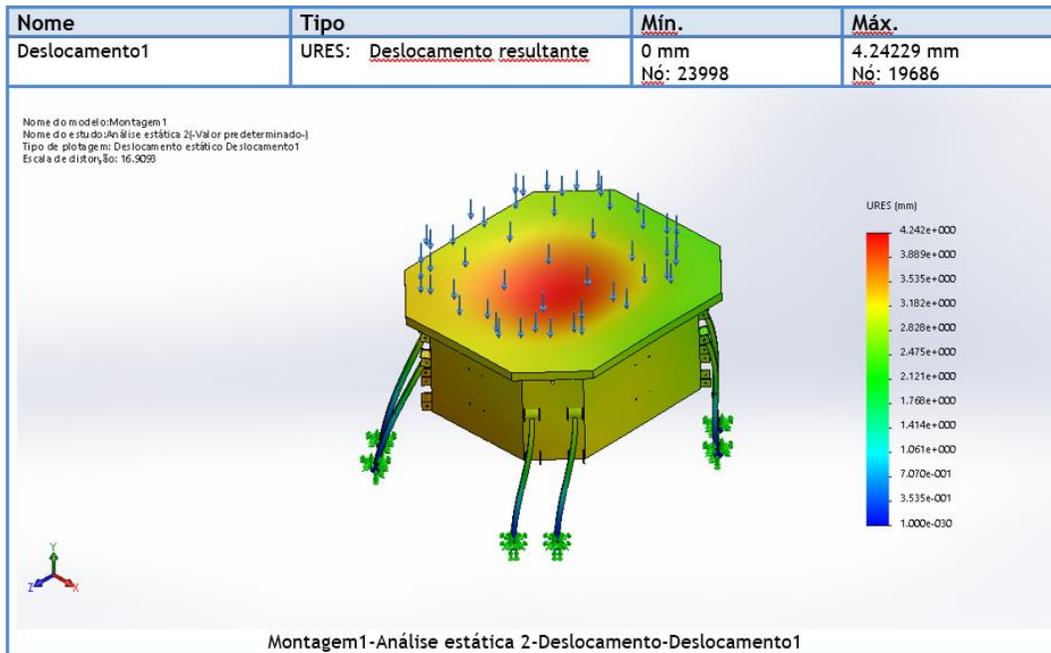


Figura 12: Deslocamentos resultantes da análise de esforços - aço.
Fonte: próprio autor.

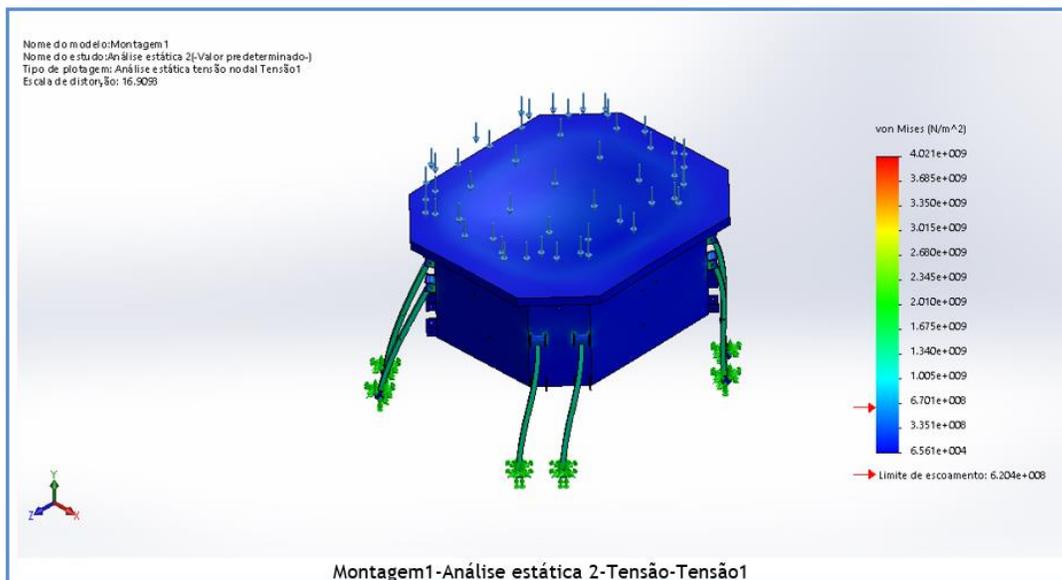


Figura 13: Tensões resultantes da análise de esforços - aço.
Fonte: próprio autor.

Os valores de tensões e deformações encontrados não excederam o limite considerado aceitável, uma vez que sua tensão crítica ficou abaixo da tensão de escoamento, resultando em uma deformação elástica, fato que pode ser verificado na figura 14. Ou seja, a deformação não é permanente e a estrutura suportará a carga sem se romper.

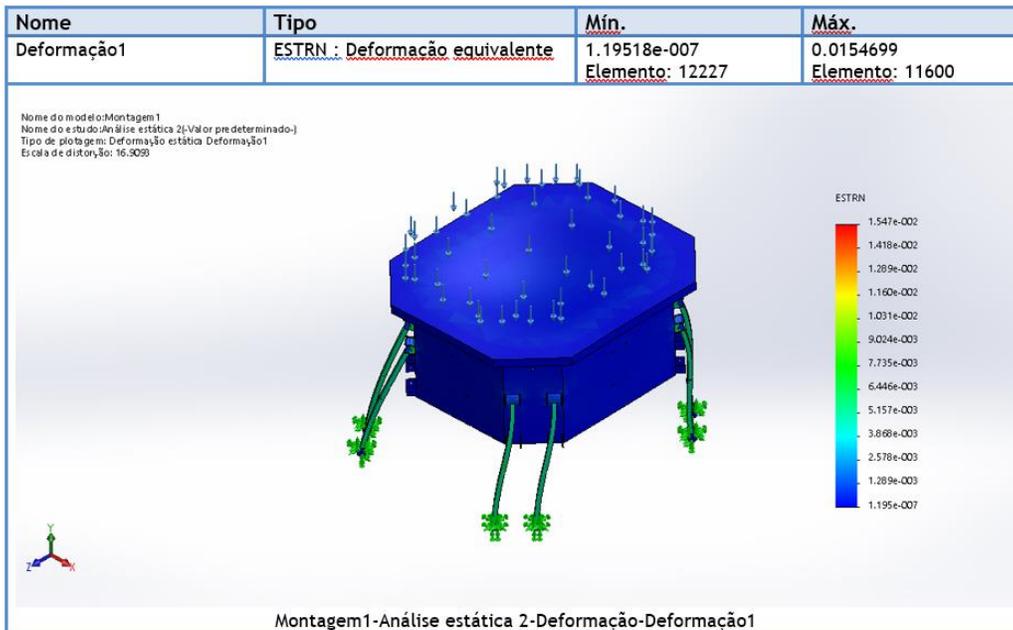


Figura 14: Deformações resultantes da análise de esforços - aço.
Fonte: próprio autor.

A fim de comparar os resultados do comportamento estrutural da plataforma, foi realizada também outra simulação de esforços, desta vez utilizando o material alumínio. O conjunto foi submetido à mesma carga de 900N, distribuídos da mesma forma entre os vetores x, y e z, alterando-se apenas o material de composição da plataforma, utilizando uma Liga de Alumínio 1060. Os resultados encontrados podem ser observados nas figuras 15, 16 e 17.

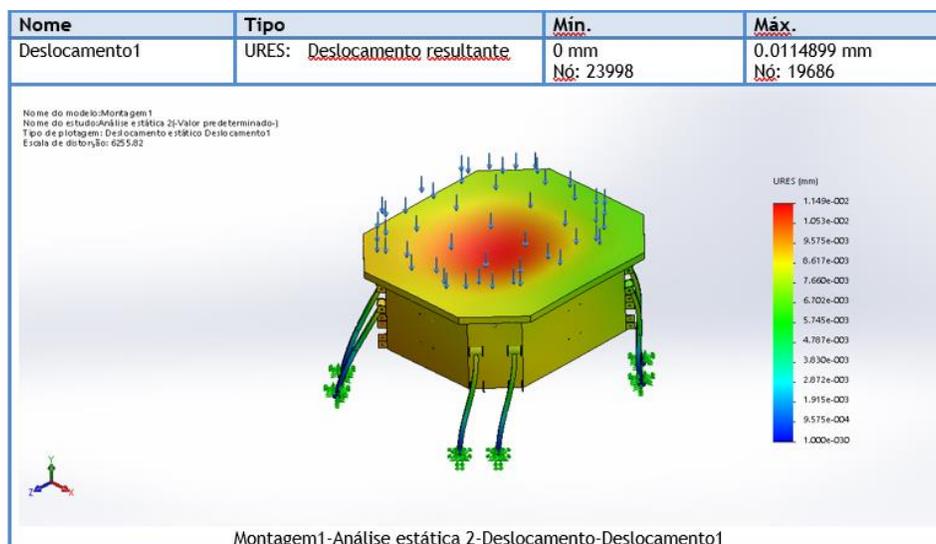


Figura 15: Deslocamentos resultantes da análise de esforços - alumínio.
Fonte: próprio autor.

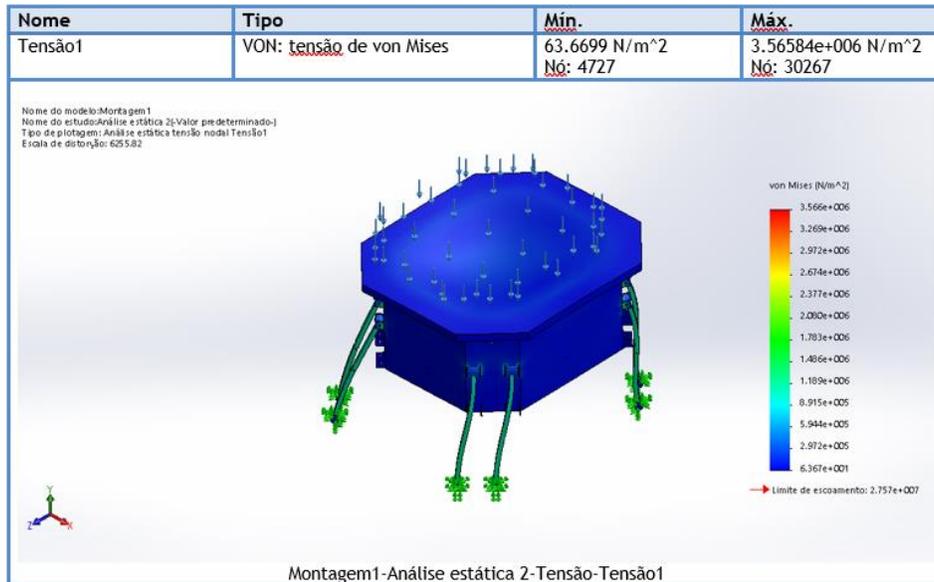


Figura 16: Tensões resultantes da análise de esforços - alumínio.
Fonte: próprio autor.

Como na simulação anterior, os valores de tensões e deformações encontrados também não excederam o limite considerado aceitável, já que a tensão crítica ficou abaixo da tensão de escoamento, como pode ser observado ainda na figura 17. Ou seja, a deformação não é permanente e a estrutura suportará a carga sem se romper.

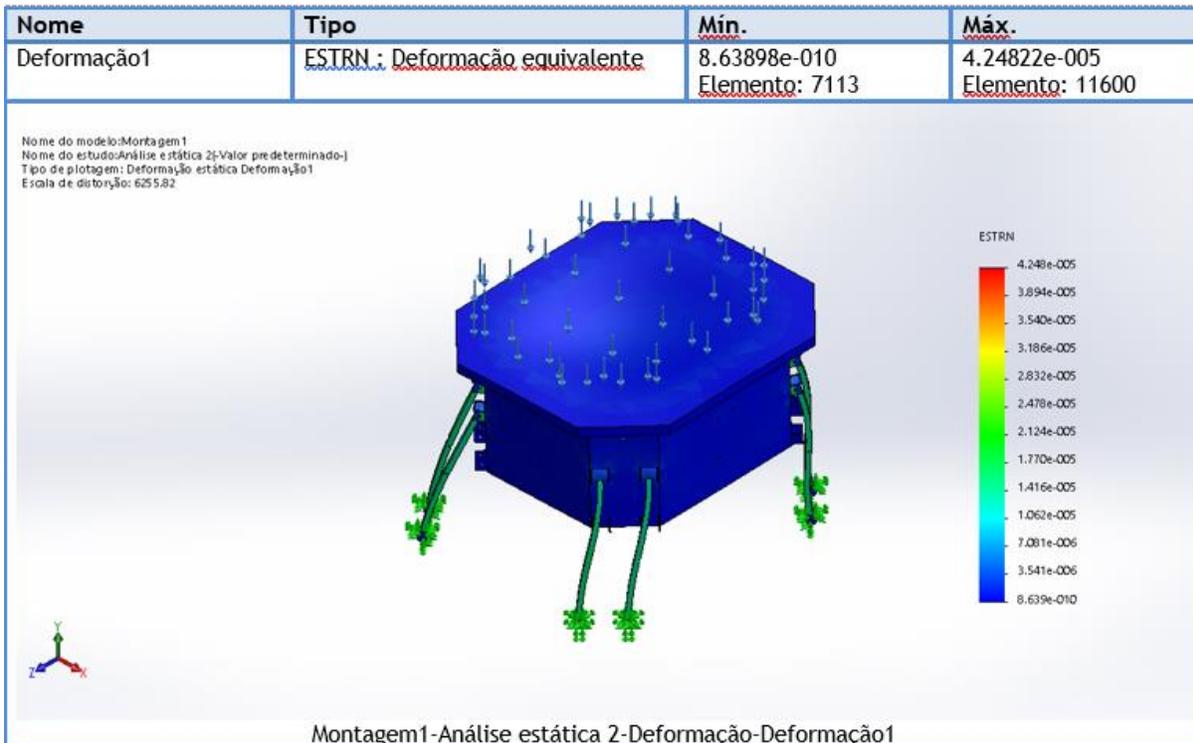


Figura 17: Deformações resultantes da análise de esforços - alumínio.
Fonte: próprio autor.

Como observado, os resultados de tensões críticas para os dois materiais apresentaram valores bem próximos, sendo de $60,3667\text{N/m}^2$ para o aço e de $63,6699\text{N/m}^2$ para o alumínio.

Os valores de deslocamento e de deformação equivalente também foram menores para a simulação utilizando o aço. Porém, a plataforma de alumínio apresentou massa de $40,3954kg$, comparado a $115,202kg$ do aço. Ou seja, a estrutura de alumínio representa uma diminuição de aproximadamente 65% de massa com relação à de aço.

Desta forma, é considerado mais vantajoso a utilização da liga de alumínio para construção da plataforma, visto que a plataforma no todo ficaria mais leve e, conseqüentemente, iria gerar uma economia financeira, isto levando em consideração que os materiais também apresentam custos semelhantes, porém, são vendidos por peso. Além disso, outra importante vantagem de utilizar uma estrutura mais leve é que o baixo peso facilita o transporte da mesma e, ainda, leva a um consumo menor do motor, podendo ser utilizando um motor de menor potência e menor carga, consumindo também menos bateria e economizando, assim, com a fonte de energia também. Além dos motivos já justificados, o alumínio apresenta uma excelente resistência à corrosão e oxidação.

Os resultados referentes à modelagem 3D foram satisfatórios, visto que foi possível concluir a ideia proposta inicialmente e, ainda, propor uma substituição do material de composição da plataforma com ótimo desempenho considerando o custo x benefício do mesmo.

CONCLUSÃO

Este trabalho utilizou, a princípio, a base metodológica de engenharia reversa, visto que partiu de um modelo físico já existente e construído anteriormente, mas do qual não eram conhecidos os princípios tecnológicos nem mesmo o funcionamento do dispositivo na íntegra.

Para a concretização dos objetivos propostos inicialmente, fundamentados na otimização estrutural de uma plataforma robótica agrícola móvel de pequeno porte, o trabalho apresentou uma breve revisão acerca de Robótica Agrícola Móvel e Método de Elementos Finitos, bem como suas aplicações. Entretanto, é importante lembrar que a utilização de robôs em setor agrícola ainda se encontra em fase de desenvolvimento e em constante evolução.

Além disso, este trabalho apresentou, de forma prática, simplificada e objetiva, como funciona o desenvolvimento analítico de um projeto de engenharia, o qual consiste em uma sequência de atividades temporárias, partindo de uma ideia inicial, seguida do desenho, mobilização dos recursos e desenvolvimento, que possibilitam a entrega do projeto. Isso se fez possível a partir da aplicação dos conceitos explorados na revisão bibliográfica realizada previamente e com a construção do modelo tridimensional em softwares CAD, o qual foi submetido a análises estruturais e cinemáticas.

No que se refere à construção 3D da plataforma, a modelagem se mostrou satisfatória e sem grandes pontos de atenção e dificuldades, visto que foi possível replicar o modelo físico já existente em alguns softwares CAD, bem como impor as restrições mecânicas e geométricas e obter, assim, um protótipo para os estudos estruturais. Ainda nesse quesito, foram identificados pontos de melhorias e aplicadas as otimizações estruturais sugeridas, como no formato do suporte de fixação da roda, onde foi realizado o adoçamento dos cantos, e a utilização da roda do tipo *torus-shaped*, para minimizar o efeito de deslizamento no solo.

Quanto à análise estrutural, por sua vez, os resultados também foram satisfatórios, já que a análise cumpriu o objetivo de investigar possíveis falhas e rupturas da plataforma e identificar suas origens, a partir da interpretação das simulações realizadas. Neste ponto, foi factível encontrar as propriedades dos materiais utilizado e prever o comportamento do mesmo quando submetido a cargas iguais ou menores que $900N$, o qual resultou em esforços de tensões abaixo da tensão de cisalhamento, o que significa que a estrutura da plataforma é capaz de suportar a

carga sem se romper. Além disso, foi proposta a alteração do material, de aço para alumínio, relacionando o custo x benefício deles a partir das simulações realizadas.

Com o presente trabalho, foi possível realizar uma atividade similar a um projeto real: não existe uma única resposta para o problema dado, mas sim um campo de soluções plausíveis dentro dos parâmetros iniciais de projeto. Foi apresentada uma possível solução de melhoria para o problema, dentre as várias possibilidades, tendo em vista que todo projeto pode ser otimizado. Entretanto, a proposta apresentada é embasada em um referencial teórico bem consolidado, tornando-se válida para o cumprimento da tarefa proposta.

Como sugestão para continuação desse trabalho, pode ser realizado o estudo cinemático veicular e de esterçamento, utilizando o modelo da Geometria Ackermann, para controle de velocidade e estudos sobre a ocorrência de deslizamento no solo. Além disso, pode ser desenvolvida uma plataforma, ainda de pequeno porte, porém que suporte cargas maiores que 900N. Outra sugestão é o desenvolvimento um sistema de controle e supervisão a partir da obtenção de dados sensoriais. Pode ser, ainda, desenvolvido um módulo de navegação autônoma a partir do planejamento prévio da trajetória. Além destes citados, pode-se buscar aplicações inovadoras para o robô na área da robótica agrícola móvel, já que este presente trabalho foi viabilizado para monitoramento de plantações de café.

REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos: A base da tecnologia CAE**. 2ª. São Paulo: Érica. 2008.

AUTODESK. **Software CAD 3D e de projeto mecânico**. Disponível em: <https://www.autodesk.com.br/products/inventor/overview>. Acesso em: 02 mar. 2020.

AZEVEDO, Domingos de. **Análise Estrutural: Perguntas e Respostas sobre CAE**. 2013. Disponível em: <http://www.domingosdeazevedo.com/mef/per>. Acesso em: 02 mar. 2020.

AZEVEDO, Domingos de. **Análise Estrutural: ANÁLISE ESTRUTURAL COM O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**. 2013. Disponível em: <http://www.domingosdeazevedo.com/mef>. Acesso em: 02 mar. 2020.

BEKEY, G. A. **Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control**. Cambridge. USA: The MIT Press, 2005. p. 577.

DIAS, Victor Sammarco. **Modelagem dos sistemas mecânicos de tração e de esterçamento das rodas, com implementação dos parâmetros nos controladores embarcados (nós CAN) na Plataforma Robótica RAM**. 2020. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

GARCIA, R. F. et al. **Stress analysis applied at a cutter mechanism of sugarcane harvester prototype**. Engenharia na Agricultura, v. 23, n. 5, p. 428-434, 2015.

GREBOT, Guy; ALMEIDA, Igor A.R. **Estudo de geometria através da análise do mecanismo de direção do carro**. In: V Bienal da SBM. 2010.

- HACKENHAAR, Neusa Maria; HACKENHAAR, Celso; ABREU, Yolanda Vieira de. **Robótica na agricultura**. Interações (Campo Grande), v. 16, p. 119-129, 2015.
- HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2009.
- LOGAN, Daryl L. **A First in the Finite Element Method**. 6ª. Boston: Cengage Learning. 2015.
- MAHADHIR ET AL, Khairul Azmi. Terrain classification for track-driven agricultural robots. **Procedia Technology**. Amsterdã, p. 776-783. Set. 2014.
- MARCHI, J. **Navegação de robôs móveis autônomos: estudo e implementação de abordagens**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2001.
- MOREIRA, Junior Marques; ARCHILA, John Faber; BECKER, Marcelo. **MODELAGEM E ANÁLISE DOS ROVERS CRAB E SHRIMP PARA UTILIZAÇÃO NA AGRICULTURA**. 2014.
- PEPPER, Darrell W. HEINRICH, Juan C. **The Finite Element Method: Basic Concepts and Applications**. 3ª. London: CRC Press. 2017.
- SECCHI, H. A. **Una introducción a los robots móviles**, Instituto de Automática – INAUT, Universidade Nacional de San Juan – UNSJ – Argentina, 2008. p. 91.
- SERRALHEIRO, Casa do. **Como usar aço no setor agrícola**. Disponível em: <https://casaserralheiro.com.br/como-usar-aco-no-setor-agricola/>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- SOUSA, Rafael Vieira de. **Robô Agrícola Móvel (RAM): Uma arquitetura baseada em comportamentos hierárquicos e difusos para sistemas autônomos de guiagem e navegação**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- SORENSEN, C. A. G., PESONEN, L., BOCHTIS, D., VOUGIOUKAS, S. G., & SUOMI, P. **Functional requirements for a future farm management information system**. Computers and Electronics in Agriculture, 2011. p. 266-276.
- TABILE, R. A.; GODOY, E. P.; PEREIRA, R. R. D.; TANGERINO, G. T.; PORTO, A. J. V.; INAMASU, R. Y. (2011). **Design and development of the architecture of an agricultural mobile robot**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.31, n.1, p.130-142, jan./fev., 2011.
- TORRES, Clayton José. **Sistema de Controle e Supervisão para Robô Agrícola Móvel Baseado em Fusão de Dados Sensoriais**. São Carlos, 194 p. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.