



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA



MICAEL GIMENES DUARTE

**Análise estrutural de um engate de três pontos em um
trator elétrico voltado para agricultura familiar**

Campinas

2023

MICAEL GIMENES DUARTE

Análise estrutural de um engate de três pontos em um trator elétrico voltado para agricultura familiar

Trabalho de Conclusão de Curso TCC – Análise estrutural de um engate de três pontos em um trator elétrico voltado para agricultura familiar, utilizado como parte de avaliação da disciplina FA984 – Introdução ao Trabalho de Conclusão de Curso – sob Orientação do Professor Dr. Daniel Albiero e sob a Coorientação da MSc. em Engenharia Agrícola Jenyffer da Silva Gomes Santos.

Campinas

2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho especialmente ao meu pai, Antonio, por ser meu exemplo, por sempre me incentivar a entregar o meu melhor, e a minha mãe, Daniela, por ser meu abrigo e meu conforto durante todos esses anos dedicados a graduação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por sempre trilhar meu caminho, me guiando em cada decisão.

Agradeço a todo quadro docente da universidade e demais funcionários, por toda dedicação durante esta jornada. Em especial, gostaria de agradecer ao Prof.º Drº Daniel Albiero pela rica oportunidade de desenvolver este trabalho, e a M.Sc. Jenyffer da Silva Gomes Santos por todo apoio e colaboração.

Gostaria de agradecer meus pais, Antonio Duarte Leal Filho e Daniela Gimenes Duarte, por sempre me apoiarem na busca pelos meus sonhos e estarem do meu lado em cada conquista, sem vocês nada disso seria possível.

Por fim, gostaria de ressaltar as grandes amizades construídas ao longo destes seis anos compartilhados na graduação, vocês foram indispensáveis para chegar até aqui.

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo analisar por meio do método de elementos finitos um sistema de engate de três pontos de um trator elétrico de pequeno porte, destinado a agricultura familiar. A análise foi realizada tendo como base um engate de três pontos de um trator de pequeno porte, onde para escolha das forças exercidas sobre ele foi considerado um fator de segurança padrão de projetos de engenharia. As análises foram realizadas por meio de um software de análise dimensional, a fim de validar segurança e adequação do engate de três pontos para a agricultura familiar. Com os resultados obtidos é possível que seja utilizado o engate de três pontos para as operações que for requisitado.

ABSTRACT

This study aimed to analyze, using the finite element method, a three-point hitch system of a small electric tractor designed for family farming. The analysis was conducted based on a three-point hitch of a small tractor, where the forces exerted on it were chosen considering a standard safety factor in engineering design. The analyses were performed using dimensional analysis software to validate the safety and suitability of the three-point hitch for family farming. The results obtained indicate that the three-point hitch can be used for the required operations with confidence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Forças internas em uma seção qualquer do corpo

Figura 2. Deslocamentos devido a tensões de tração e compressão

Figura 3: Forças que geram uma energia de distorção

Figura 4: Superfície de falha de acordo com a Teoria da Energia de Distorção

Figura 5: Objeto com a divisão finita dos elementos

Figura 6: Sistema de um engate de três pontos

Figura 7: Pulverizador Jacto Arbus 200

Figura 8: Fluxograma das atividades

Figura 9: Deformação durante a operação

Figura 10: Deformação máxima na direção x durante a operação

Figura 11: Deformação máxima na direção y durante a operação

Figura 12: Deformação máxima na direção z durante a operação

Figura 13: Tensão de Von Misses gerada durante a operação

Figura 14: Deformação durante a situação de força vertical.

Figura 15: Deformação máxima na direção x durante a situação de força vertical.

Figura 16: Deformação máxima na direção y durante a situação de força vertical.

Figura 17: Deformação máxima na direção z durante a situação de força vertical.

Figura 18: Tensão de Von Misses gerada durante a situação de força vertical.

Figura 19: Braço superior original

Figura 20: Braço superior reforçado

Figura 21: Deformação máxima na direção x durante a situação de força vertical após reforço

Figura 22: Deformação máxima na direção y durante a situação de força vertical após reforço

Figura 23: Deformação máxima na direção z durante a situação de força vertical após reforço

Figura 24: Tensão de Von Misses gerada durante a situação de força vertical após o reforço no braço superior

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros definidos para cálculo da força de tração

Tabela 2. Parâmetros definidos para cálculo da força exercida pelo implemento

Tabela 3. Propriedades mecânicas do aço SAE1020

Tabela 4. Principais componentes do aço 1020 e suas respectivas concentrações

Tabela 5: Resultados obtidos perante a operação

Tabela 6: Resultados obtidos perante a situação de força vertical.

Tabela 7: Resultados obtidos após reforço no braço superior

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
OBJETIVOS	2
Objetivo Geral	2
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
Resistência dos materiais	2
Tensão e Deformação	3
Deslocamento	6
Teoria das Falhas e Von Misses.....	7
Análise Estrutural pelo Método de Elementos Finitos.....	10
Engate de três pontos(Three Point Hitch).....	11
METODOLOGIA	13
RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
CONCLUSÃO	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

1. INTRODUÇÃO

A análise estrutural pelo método dos elementos finitos é de extrema importância na indústria moderna, desempenhando um papel fundamental na otimização de projetos e na garantia de desempenho confiável de produtos. Este método tem sido cada vez mais reconhecido por seus benefícios substanciais, que incluem a redução de custos e de tempo de projeto, bem como a capacidade de otimizar e avaliar estruturas de maneira mais abrangente. Ao permitir uma tomada de decisão mais precisa e fornecer resultados de maior qualidade, a análise pelo método dos elementos finitos se estabeleceu como uma ferramenta de design indispensável.

Além disso, a tendência global na indústria é a adoção de métodos que aceleram o desenvolvimento de produtos, eliminando a necessidade de protótipos físicos caros e demorados. Nesse cenário, programas de CAD e CAE, como o Ansys, tornaram-se pilares essenciais. Com uma biblioteca abrangente de documentação online e uma comunidade industrial e acadêmica bem consolidada, esses programas são amplamente utilizados e valorizados.

Um dos principais benefícios da análise estrutural pelo método dos elementos finitos é sua capacidade de fornecer dados detalhados, como tensões, deformações e deslocamentos de uma estrutura. Essas informações são cruciais para avaliar a durabilidade de componentes, identificar pontos críticos de tensão e compreender o comportamento das estruturas sob diversas cargas. Isso, por sua vez, abre portas para a otimização de peças e produtos, antes mesmo de serem fabricados.

Neste contexto, este trabalho se concentra na aplicação prática dessa poderosa ferramenta no desenvolvimento de um engate de três pontos para tratores elétricos destinados à agricultura familiar. A análise estrutural do engate, utilizando o método dos elementos finitos e softwares de CAD/CAE, será abordada em detalhes nas etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento, para os cálculos estruturais e de projeção.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise estrutural do sistema de engate de três pontos de um trator elétrico voltado à agricultura familiar, com o intuito de determinar a viabilidade do uso do aço SAE1020 laminado como material para a construção desse sistema.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resistência dos Materiais

A Resistência dos Materiais é o ramo da mecânica que estuda as relações entre cargas externas aplicadas a um corpo deformável e a intensidade das forças internas que atuam dentro do corpo, abrangendo também o cálculo das deformações do corpo e o estudo da sua estabilidade, quando submetido a solicitações externas. (HIBBELER, 2004).

É estudado o comportamento de corpos sólidos submetidos a diversos tipos de carregamento, e seu principal objetivo é determinar as tensões, deformações e deslocamentos nas estruturas e seus componentes, devido às cargas que atuam sobre elas, compreendendo como diferentes materiais reagem sob diferentes condições de carregamento e fornecendo informações fundamentais para o projeto e a análise de uma ampla variedade de estruturas e componentes em aplicações tão diversas quanto a construção civil, engenharia mecânica, engenharia aeroespacial, engenharia naval e muitas outras áreas da engenharia, desempenhando um papel essencial na garantia da segurança e da eficiência de projetos e produtos em todo o mundo. (GERE et al. 2009)

Na época, estudos foram realizados, principalmente na França, baseados em aplicações da mecânica a corpos materiais, denominando-se o estudo de Resistência dos Materiais, e atualmente, no entanto, refere-se a esses estudos como mecânica dos corpos deformáveis ou simplesmente mecânica dos materiais, sendo uma disciplina fundamental na engenharia que investiga minuciosamente como materiais sólidos respondem a diferentes tipos de carregamento e tem evoluído continuamente para se tornar uma parte integral das práticas de projeto e análise em uma ampla variedade de campos da engenharia. (HIBBELER, 2004).

3.1.1 Tensão e deformação

Quando uma superfície interna é isolada, a força e o momento resultantes que atuam na superfície manifestam-se como distribuições de forças ao longo de toda a área, essas atuam em um ponto da superfície, são únicas, e terão componentes nas direções normal e tangencial denominadas, respectivamente, tensão normal e de cisalhamento tangencial. (Shigley et al 2011).

Na figura 1 podemos observar uma seção do objeto onde sua área foi subdividida em áreas infinitesimais ΔA . Uma força muito pequena, de intensidade ΔF age sobre a área ΔA . Se decomposmos as força ΔF , componentes nos sentidos dos eixos x , y e z , teremos três componentes, que serão tangentes e normal a área. Ao fazer com que ΔA tenda a zero, a força ΔF e suas componentes também se aproximaram de zero, porém o quociente entre a força e a área tendera a um limite finito. Esse quociente é chamado de tensão, assim descrevendo a intensidade de uma força interna que age sobre uma área (BEZERRA, 2018)

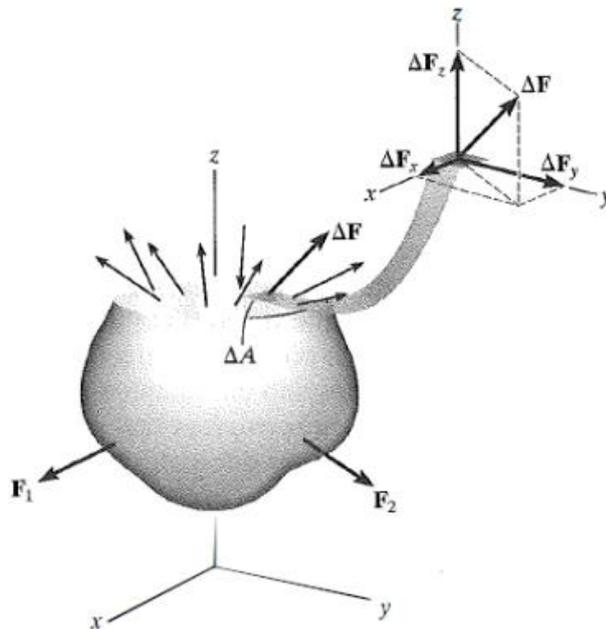


Figura 1. Forças internas em uma seção qualquer do corpo

Fonte: Hibbeler 2010

A intensidade da força que atua no sentido perpendicular à área é definida como tensão normal, sendo, assim, um parâmetro essencial na análise de estruturas e materiais. Se essa força puxa o elemento de área, ela é chamada de tensão de tração, caracterizando uma situação em que o material está sob extensão. No entanto, se essa força empurra o elemento, é denominada de tensão de compressão, indicando uma condição na qual o material sofre compressão. Ambas as tensões, tração e compressão, desempenham um papel crítico na determinação do comportamento e da integridade de componentes e estruturas submetidos a cargas externas variadas. (HIBBELER, 2010). Já as forças que atuam no sentido tangencial à área, exercendo uma influência significativa nas propriedades dos materiais e estruturas, são denominadas de tensões de cisalhamento ou de corte, desempenhando um papel fundamental na análise de como os materiais respondem às forças que tentam deslizar as partes adjacentes umas às outras, uma característica importante a ser considerada na engenharia e no projeto de componentes e sistemas. (CARVALHO,1979)

Sempre que uma força é aplicada a um corpo, esta tende a mudar a forma e o tamanho dele. Essas mudanças são denominadas deformações e podem ser altamente visíveis ou praticamente imperceptíveis se não forem utilizados equipamentos que façam medições precisas (HIBBELER, 2010).

A resistência de um material depende de sua capacidade de suportar tensões sem deformação permanente ou ruptura. Por outro lado, a rigidez de um material está relacionada com a deformação que este material apresenta para um dado nível de tensões. (BEER et al. 2013) Essas propriedades são inerentes ao próprio material e devem ser determinadas experimentalmente. (GUJEL et al. 2017)

O chamado diagrama tensão-deformação é um gráfico bidimensional que indica a relação da tensão, eixo das ordenadas, com a deformação, eixo das abcissas, e cada ponto desse gráfico expressa a leitura de tensão-deformação feito pelo equipamento durante o ensaio, e o final do mesmo mostra o ponto de ruptura do material. (BEER et al. 2013)

Segundo Saad (2005), o comportamento mecânico dos sólidos, que é crucial para a engenharia e para o projeto de estruturas e componentes, normalmente é definido por relações complexas entre tensões e deformações, estabelecendo uma ligação essencial entre como os materiais respondem às forças aplicadas e como eles se deformam sob essa influência, permitindo a análise e o projeto de estruturas com base em sólidos princípios da mecânica dos materiais. Construindo um gráfico da tensão em

função da deformação específica, à medida que aumentarmos a carga aplicada ao componente, obteremos um diagrama tensão-deformação específica para o material utilizado. (BEER, 2011)

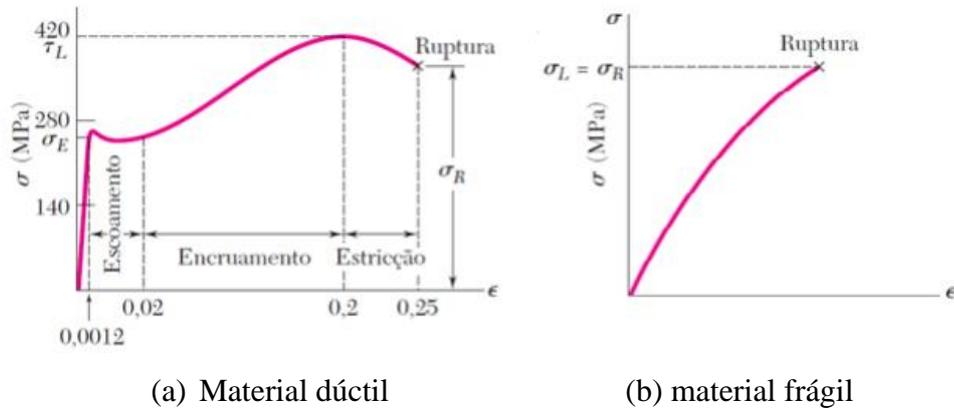


Gráfico 1. Tensão-deformação de material dúctil (a) e material frágil (b)

Fonte: Beer et al. (2011)

Através desse gráfico é possível definirmos se um material é dúctil ou frágil. Os materiais dúcteis, que desempenham um papel importante em diversas aplicações industriais, são aqueles que apresentam uma notável capacidade de deformação antes de se romperem, como é o caso da borracha, do aço e do alumínio, revelando propriedades mecânicas que permitem que esses materiais suportem cargas substanciais sem falhar prematuramente (BEER, 2013). Já os materiais frágeis, que contrastam com os materiais dúcteis em sua resposta ao carregamento, são aqueles que não suportam pequenas deformações e, portanto, se rompem de forma brusca, sem a extensa deformação visível que caracteriza materiais dúcteis, exemplificando-se claramente no caso do concreto, cuja quebra súbita é uma característica distintiva, tornando esses materiais adequados para certas aplicações (NASH; POTTER 2014).

Segundo Hibbeler (2010), os materiais dúcteis são caracterizados por sofrerem grandes deformações diante de pequenos incrementos de força quando submetidos a tensões superiores a um determinado valor, denominado tensão de escoamento. Nos materiais dúcteis, conforme Beer et al. (2011), as tensões de cisalhamento são as principais responsáveis pela falha no caso de carregamentos axiais, o que ocorre quando é atingida a tensão de ruptura ou tensão última.

De acordo com Callister e Rethwisch (2018), os engenheiros estruturais têm a responsabilidade de analisar e determinar as tensões, bem como as distribuições de tensão, presentes nos elementos sob cargas específicas. Essa análise é realizada através

de métodos experimentais de teste, juntamente com análises teóricas e matemáticas aplicadas ao estudo das tensões.

3.1.2 Deslocamento

Um corpo quando submetido a uma força normal de tração se alonga, mas também se contrai lateralmente, um belo exemplo é quando uma borracha é esticada, é possível observar que tanto a espessura quanto a largura diminuem. (BEER, 2013). Do mesmo jeito que se o corpo for submetido a uma força normal de compressão, lateralmente ele irá expandir. (HIBBELER, 2004)

O estudo do deslocamento em resistência dos materiais é crucial em diversas aplicações atuais, abrangendo desde a criação de estruturas civis até o design de componentes mecânicos e eletrônicos. Quando uma carga é aplicada a uma barra engastada, seja de tração ou compressão, é viável calcular tanto a deformação longitudinal quanto a deformação transversal dessa barra. Esse conhecimento não apenas contribui para a segurança e eficiência das estruturas, mas também para o desenvolvimento de materiais mais resistentes e a previsão do comportamento de sistemas sob diferentes condições de carga. (BOTELHO, 2017)

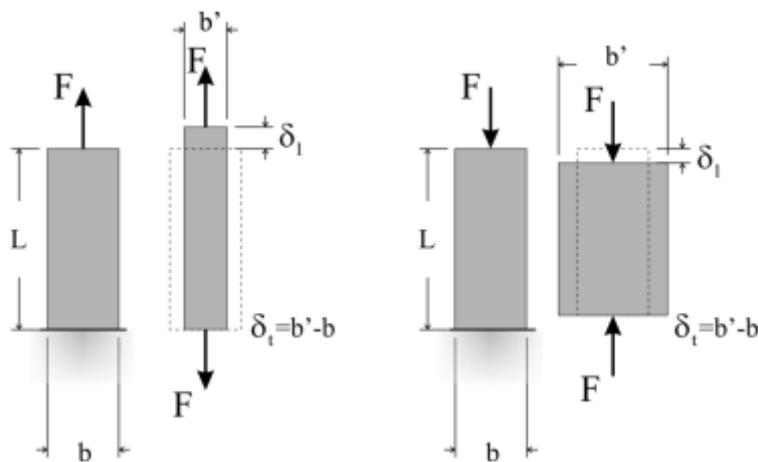


Figura 2. Deslocamentos devido a tensões de tração e compressão

Fonte: (Hibbeler, 2010)

3.2 Teoria das Falhas e Von Mises

Uma peça, seja ela em engenharia, construção ou qualquer outra aplicação, pode apresentar uma falha se suas deformações e distorções foram suficientemente grandes para que ela não funcione da maneira adequada, destacando a importância de compreender os limites de deformação dos materiais e das estruturas em projetos e aplicações práticas. (Norton, 2013).

O critério de tensão de Von Mises baseia-se na teoria de Mises-Hencky, também conhecida como a teoria de energia máxima distorção. A teoria diz que um material dúctil começa a falhar em um local em que o equivalente à tensão Von Mises atinge o limite de elasticidade do material. (Sternick et al, 2012).

Segundo Norton (2013), a teoria de Von Mises-Henky, que é uma das teorias fundamentais na mecânica dos materiais e na análise de tensões e deformações em materiais sólidos, postula que o deslizamento de átomos entre si, um fenômeno intrínseco a muitos materiais, ocorre devido à tensão de cisalhamento e é acompanhado pela distorção da peça, ilustrando como as tensões internas afetam a estrutura microscópica dos materiais, um princípio essencial na compreensão do comportamento mecânico dos sólidos.

A teoria da tensão máxima de cisalhamento afirma que a falha irá ocorrer quando a tensão máxima de cisalhamento em uma região exceder a tensão máxima de cisalhamento de um corpo de prova sob tração em escoamento, ou seja metade da tensão normal de escoamento (Norton, 2013).

As variáveis encontradas nas falhas por fadiga são repetidas, alternadas ou flutuantes e quando essa falha é gerada por uma sequência de tensões repetidas muitas vezes, esta é denominada falha por fadiga (Shigley, et al. 2005).

Em sua maioria, as falhas mecânicas em máquinas ocorrem devido a cargas que variam no tempo, não a esforços estáticos e essas falhas ocorrem, geralmente, em níveis de tensão significativamente inferiores aos níveis de escoamento dos materiais (Norton, 2013).

Originado a partir da observação de que materiais dúcteis tensionados hidrosticamente (igualdade de tensões principais) exibem tensões de escoamento bem acima dos valores esperados em ensaios simples de tração (Shigley et al 2011).

De acordo com Mendelson (1970), esta teoria considera que o escoamento se inicia quando a energia de distorção atinge o mesmo valor que a energia de distorção observada no ponto de escoamento por tração axial.

A teoria da energia de deformação é consequência da energia devido a mudança de volume, ou melhor a energia hidrostática mais a energia devido a distorção angular. Assim o escoamento é afetado principalmente pela energia de distorção (Shigley et al 2011).

A teoria da energia de deformação é consequência da energia devido a mudança de volume, ou melhor a energia hidrostática mais a energia devido a distorção angular. Assim o escoamento é afetado principalmente pela energia de distorção (Shigley et al 2011).

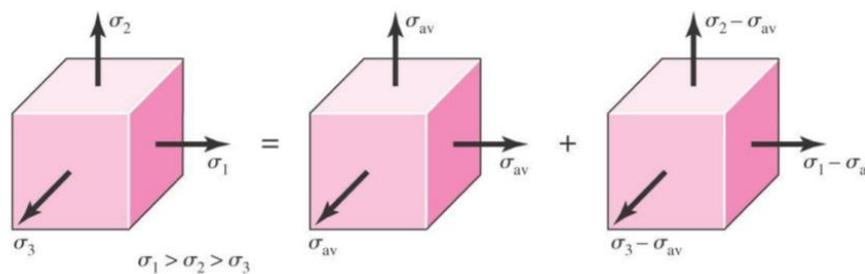


Figura 3: Forças que geram uma energia de distorção

Fonte: Shigley et al 2015

Segundo Collins (1993) esta teoria foi desenvolvida diante da constatação experimental de que a parte da energia total de deformação associada às tensões hidrostáticas, responsável por alterações de volume no sólido, e não em sua forma, não contribui significativamente para a falha dos materiais. O autor afirma que a parcela responsável pela mudança na forma do sólido, denominada energia de distorção, é a grande responsável pela falha, especialmente em materiais dúcteis.

Através da teoria de Von Mises, um elemento estrutural (dúctil) irá falhar se a energia associada à mudança de forma de um corpo, submetido a um carregamento multiaxial, ultrapassar a energia de distorção de um corpo de prova submetido a um ensaio de tração. (AZEVEDO, 2015).

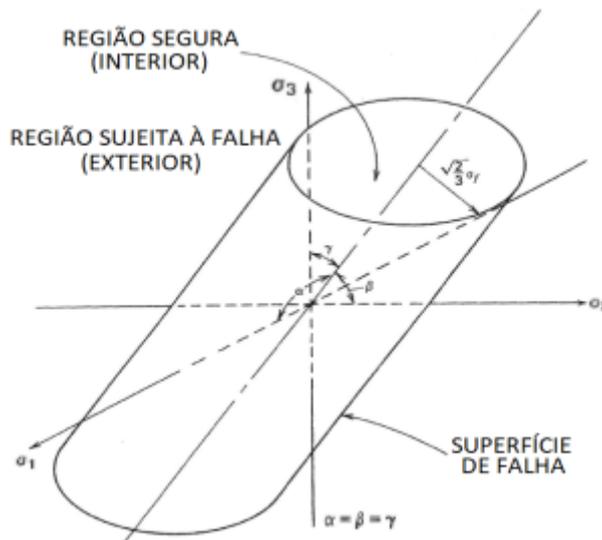


Figura 4: Superfície de falha de acordo com a Teoria da Energia de Distorção

Fonte: Collins 2013

A Teoria da Energia de Distorção, também conhecida como teoria de Von Mises, prevê o escoamento por uma tensão de cisalhamento puro cerca de 15% superior à prevista pela Teoria da Tensão de Cisalhamento Máxima, conforme indicado por Mendelson (1970). Além disso, Collins (1993) afirma que a Teoria da Energia de Distorção é bastante adequada para materiais isotrópicos cuja falha se dá por escoamento ou ruptura dúctil, evidenciando a relevância dessa abordagem na análise de materiais e estruturas sob cargas críticas.

Além disso, é importante ressaltar que, de acordo com as obras de Shigley (2006) e Branco (1985), o critério de Von Mises pode ser aplicado durante a etapa de projeto de equipamentos para ampliar a margem de segurança contra falhas mecânicas. Isso resulta em um potencial aumento no ciclo de vida útil do equipamento. Na vanguarda da indústria aeroespacial, engenheiros têm adotado e aprimorado a teoria de von Mises para otimizar a resistência e o desempenho de componentes cruciais. Recentemente, equipes de pesquisa da NASA e de empresas do setor têm aplicado essa teoria para aprimorar a fabricação de peças estruturais em aeronaves, como asas e estruturas de fuselagem.

3.3 Análise Estrutural pelo Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos tem como ideia central a subdivisão do domínio completo de um meio contínuo em elementos menores de geometrias simples, interligados entre si por pontos nodais que formam elementos e uma malha, denominada malha de elementos finitos, ou seja, faz-se a discretização do domínio objetivando facilitar a solução (AZEVEDO, 2003; SORIANO, 2003).

O sistema se subdivide em elementos de modo que a estrutura inteira é modelada por um agregado de estruturas simplificadas, conectadas por pontos conhecidos como nós, permitindo uma representação detalhada e precisa de sistemas complexos em engenharia e análises estruturais. (FILHO, 2000).

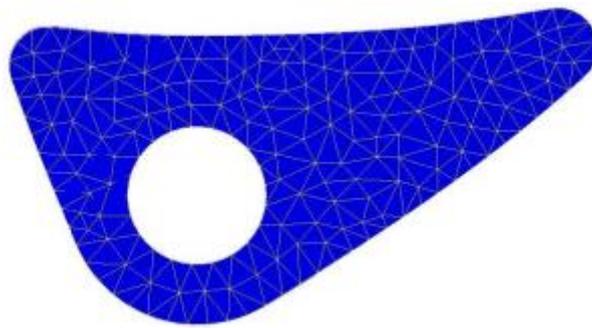


Figura 5: Objeto com a divisão finita dos elementos

Fonte: BARROSO et al. 2015

Este elemento deve ser definido adequadamente com a situação física, tornando-a bem modelada para que sejam desnecessárias as decisões de engenharia durante o processo computacional (FERNANDES, 2002).

O complexo de elementos unidos pelos nós e em formato variável de acordo com a situação física do sistema é conhecido como malha de elementos finitos e seus elementos podem ser escolhidos em diferentes formas geométricas permissíveis de acordo com a abrangência do software utilizado no estudo (Barroso et al. 2015)

A análise estrutural em máquinas-ferramenta utilizando o Método dos Elementos Finitos mostra-se como uma ferramenta importante para prever como a mesma irá comportar-se devido a disposição de seus componentes e da própria estrutura, podendo dessa forma avaliar a melhor configuração no que diz respeito a rigidez e deformações. (SANT'ANNA et al. 2009)

A utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) na Engenharia de Estruturas, um campo crucial para a segurança e eficiência de projetos, tem apresentado excelentes resultados para a análise dos estados de tensões e deformações de sólidos com geometrias variadas, proporcionando soluções extremamente satisfatórias e confiáveis, contribuindo assim para o avanço e a inovação contínuos na engenharia estrutural. (COTA et al. 2010)

3.4 Engate de Três Pontos (Three Point Hitch)

O trator é conectado aos implementos através de acoplamentos, desempenhando funções básicas que incluem transmitir forças, comandar o movimento e a posição do implemento em relação ao trator e permitir a troca de implementos por outro, sendo essenciais para a versatilidade e eficiência operacional desse equipamento fundamental na agricultura e em outras atividades industriais. (MACHADO et al. 2010).

Conforme Machado et al. (2010), os tratores adequados à agricultura familiar devem ser capazes de executar o maior número de tarefas possível dentro da propriedade.

Segundo a Norma Regulamentadora 12, trator agrícola é uma máquina autoprovelida de médio a grande porte, destinada a puxar ou arrastar implementos agrícolas. Consiste na principal fonte de potência na agricultura, sendo à base da mecanização, pois está envolvido em praticamente quase todas as operações realizadas (RUSSINI, 2009).

Para Mialhe (1980) trator agrícola é uma máquina autopropelida provida de meios que, além de lhe conferir apoio estável sobre uma superfície horizontal e impenetrável, capacitam-no a tracionar, transportar e fornecer potência mecânica, para movimentar órgãos ativos de máquinas e implementos agrícolas. No trator agrícola a energia gerada pela combustão é transformada em energia mecânica no motor.

Segundo ANFAVEA (1999), os tratores podem ser classificados em: leves (até 49 cv); médios (entre 50 e 99 cv); e pesados (acima de 100 cv). Silveira (2001), descreve outra classificação mais delimitada: pequenos (até 27 cv); leves (de 28 a 49 cv); médios (de 50 a 58 cv); semi-pesados (de 58 a 100 cv); pesados (de 100 a 165 cv); e super-pesados (acima de 165 cv).

Um dos órgãos de acoplamento do trator é o engate de três pontos e, segundo REIS et al. (2019), o engate de três pontos é considerado um dos sistemas mais

importantes, pois permite uma maior integração entre o implemento e o trator, desempenhando a função de levantar, tracionar, nivelar e ajustar os implementos montados ao trator, contribuindo significativamente para a versatilidade e eficácia operacional desses equipamentos na agricultura e em diversas outras aplicações industriais.

A maioria dos tratores vem com o engate de três pontos, empregando um par de braços inferiores e, um braço de estabilização superior, e esses braços são articuladamente montados no trator, de modo que podem ser regulados para acoplar diversos tipos de equipamentos. (SINIGAGLIA et al. 2017)

O sistema de engate de três pontos com acionamento hidráulico é equipamento padrão nos tratores agrícolas de rodas; e pode ser considerado como um dos seus sistemas mais importantes, pois transmite aos implementos, na maioria dos casos, a potência necessária à execução das tarefas agrícolas. (SVERZUT, 1995)

Com este sistema, o trator pode tirar o máximo proveito da força do solo sobre o implemento e da força da gravidade sobre a massa deste, aprimorando a tração de maneira eficiente e contribuindo para a eficácia operacional em atividades agrícolas e de transporte. (MORLING, 1979)

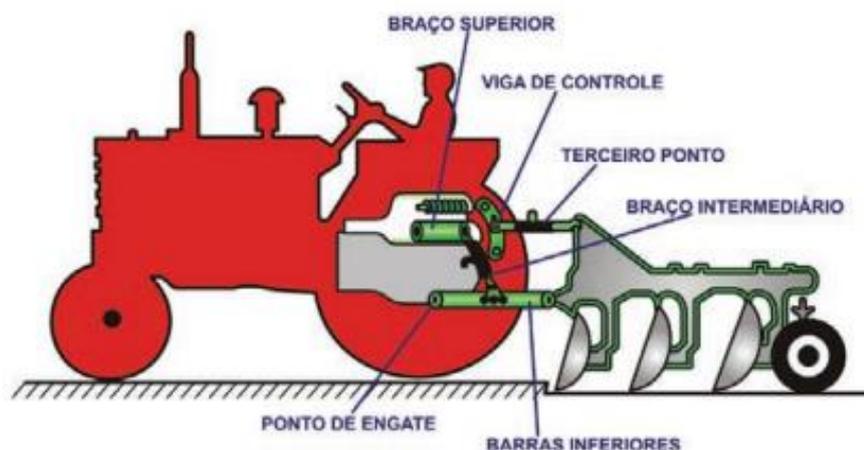


Figura 6: Sistema de um engate de três pontos

O sistema de engate de três pontos do trator, é muito empregado em implementos agrícolas, possibilitando fácil regulagem e acoplamento ao trator. (LIMA, 2019). Nesse sistema, o acoplamento é do tipo rígido, e as forças de reação do solo são transmitidas diretamente ao trator. (VARELLA,2012)

O engate de três pontos é constituído por três pontos de acoplamento, sendo eles: a barra de elevação esquerda (1º ponto), a barra de elevação direita (2º ponto) e o braço superior de engate (3º ponto). (SANTOS,2012)

4. METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as etapas referentes ao desenvolvimento do modelo e das simulações por elementos finitos, a fim de analisar estruturalmente o engate de três pontos, onde será avaliado em duas etapas: operação e força vertical.

Para a etapa de operação, com base na Norma ASABE EP497, será possível calcular a força de tração em Newtons que será puxada pelo trator (D). O cálculo leva em consideração largura do implemento (m) ou número de fileiras ou ferramentas (W), a profundidade de trabalho (T), sua velocidade durante a operação (S) e o solo em quem ele estaria operando (Fi). Os fatores A, B e C variam a depender do implemento selecionado. O cálculo é observado através da equação 1.

$$D = F_i * [A + B * (S) + C (S)^2] * W * T \quad (1)$$

Tabela 1. Parâmetros definidos para cálculo da força de tração

Fi	A	B	S (km/h)	C	W	T (cm)
1	294	0	3	2,4	2	30

Para esse cálculo foi considerado um subsolador de 60 centímetros de largura com 2 hastes como implemento, segundo estudos anteriores na área de agricultura, é amplamente reconhecido que entre os diversos implementos agrícolas utilizados nas operações de preparo do solo e cultivo, o subsolador é frequentemente citado como um dos equipamentos que requer a maior força de tração, devido à sua função de rompimento do solo em profundidade e à resistência oferecida pelo solo compactado.

Será considerado ainda o fator de projeto de 1,5, sendo então a força de tração que será puxada pelo trator equivalente a:

$$D_f = 1,5 * D \quad (2)$$

Já a força exercida pelo implemento no engate de três pontos (Di) será calculada levando em conta o ângulo de ataque das hastes do subsolador somado ao ângulo de atrito entre o solo e o metal.

$$\text{Tg } 68^{\circ} + 15^{\circ} = Df / Di \quad (3)$$

Tabela 2. Parâmetros definidos para cálculo da força exercida pelo implemento

Ângulo de ataque das hastes do subsolador	22°
Ângulo complementar	68°
Ângulo atrito solo metal	15°

Para a fase da força vertical, iremos utilizar o pulverizador Arbus 200 da marca Jacto, que está equipado com um reservatório de 200 litros e tem um peso de 170 kg.



Figura 7: Pulverizador Jacto Arbus 200

Para calcular o peso total do Jacto Arbus 200 com o tanque cheio do líquido de pulverização, é fundamental conhecer a densidade específica desse líquido. Isso nos permitirá determinar o peso do tanque cheio e, em seguida, somá-lo ao peso do implemento. A densidade da solução de pulverização pode variar dependendo da concentração e dos produtos químicos adicionados.

E será considerado ainda o fator de projeto de 1,5, visando garantir uma margem de segurança maior. Então o peso que o engate de três pontos precisará ser capaz de suportar durante a operação deverá ser igual a:

$$Df = 1,5 * D \quad (2)$$

O material selecionado para a análise de elementos finitos no engate de três pontos foi o aço SAE1020 laminado, e essa escolha baseou-se principalmente no seu excelente custo-benefício. Além disso, esse tipo de aço destaca-se por sua notável plasticidade e soldabilidade, tornando-o uma opção viável. Também é importante ressaltar sua maior capacidade de absorver impactos sem comprometer significativamente sua dureza, em comparação com outros tipos de aço e suas propriedades mecânicas foram obtidas através de Callister (2012), como mostra a Tabela 1.

Tabela 3. Propriedades mecânicas do aço SAE1020 laminado

Propriedades	Aço SAE 1020
Densidade	7850 kg/m ³
Módulo de Elasticidade	207 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Limite de escoamento	350 MPa
Limite de Resistência à Tração	420 MPa
Alongamento Percentual	15

Fonte: Callister, 2012

A seguir, o modelo computacional do engate de três pontos será exportado para o software Ansys, escolhido devido à sua adesão à tendência global de utilização desta ferramenta. Isso possibilitará o aceleração do desenvolvimento do produto por meio de testes em protótipos virtuais, onde serão inseridas as propriedades do material, as dimensões e o elemento que será utilizado, garantindo uma análise abrangente e precisa do desempenho estrutural do sistema.

As etapas para a realização do projeto serão de desenvolvimento do modelo numérico, pré-processamento da geometria, dividido em tratamento da geometria e discretização (desenvolvimento da malha) e então, pós-processamento, a qual inclui análise dos resultados.

A figura 8 representa o fluxograma das atividades que iremos desenvolver durante o decorrer do trabalho.

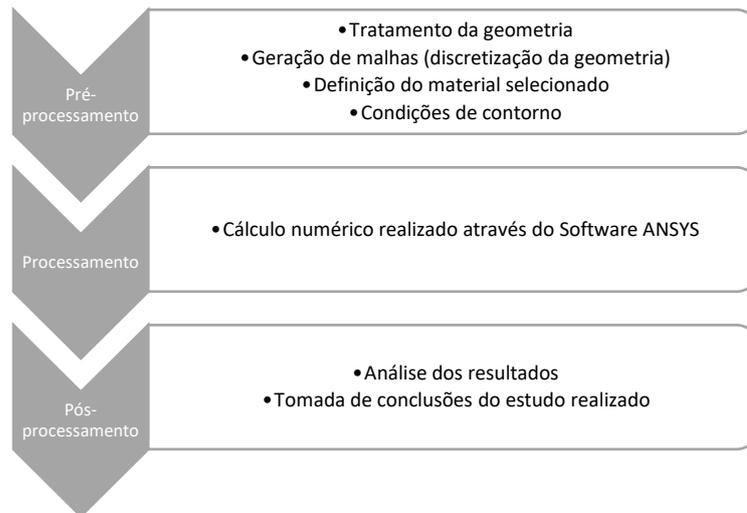


Figura 8: Fluxograma das atividades

Fonte: Autor

No ambiente virtual de pré-processamento, o engate de três pontos será submetido a análises que resultará nos limites da resposta de um sistema e tensões e deformações resultantes nos elementos do engate. Essa etapa será a com maior esforço, pois será especificado a propriedade do material e a geometria, além da geração da malha e as condições de contorno.

Por fim, através da análise de Von Misses, é possível realizar a verificação dos indícios de escoamento do material selecionado para o engate, o que tornará possível analisar a confiabilidade dele. E com isso, será possível a realização da análise estrutural pelo método dos elementos finitos de um engate de três pontos para um trator elétrico de agricultura familiar.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a etapa de operação e a partir da equação 1, segundo a norma ASABE EP497 foi possível realizar o cálculo da força de tração em Newtons que será puxada pelo trator (D).

$$D = 18,9 \text{ KN} \quad (4)$$

E, adotando um fator de projeto de 1,5, para garantir uma maior confiabilidade durante as análises, a força de tração que será puxada pelo trator é equivalente a:

$$D_f = 28,4 \text{ KN} \quad (5)$$

E para a força exercida pelo implemento no engate (D_i), foi obtido o valor de:

$$D_i = 3,5 \text{ KN} \quad (5)$$

Depois de estabelecidas as análises, as condições de engastamento para a força de 28,4 KN (força necessária para que o trator seja capaz de tracionar implementos) e de 3,5 KN (força exercida pelo implemento no engate de três pontos) foram aplicadas. Quando realizadas as simulações no software Ansys de Elementos Finitos, foi possível então obter as deformações no engate de três pontos. Tendo uma deformação máxima de 1,2131e-004 mm para a força de tração.

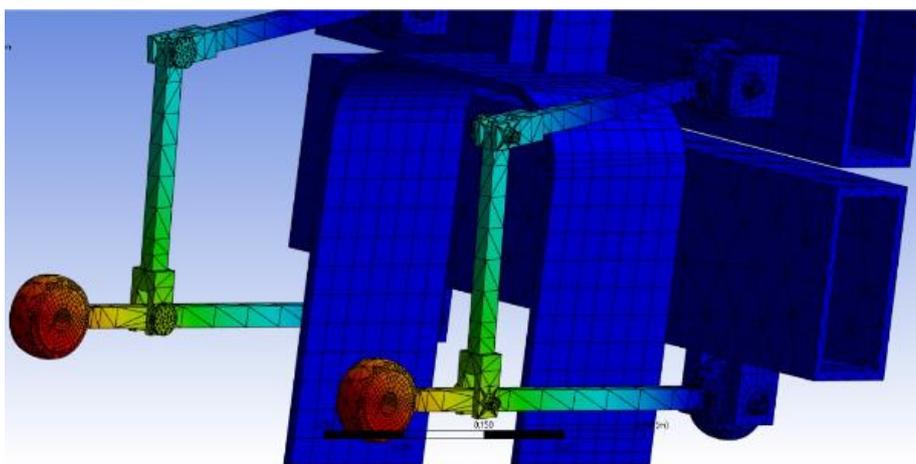


Figura 9: Deformação durante a operação

Fonte: Autor

Além dessa análise, é fundamental avaliar as deformações em cada eixo coordenado no conjunto completo do engate de três pontos, pois isso permite uma compreensão abrangente da resposta estrutural do sistema. Cada eixo coordenado (x, y e z) desempenha um papel específico na interação entre o trator, o implemento e o solo, e, portanto, merece atenção individual.

Na direção do eixo x, observamos uma deformação máxima de $9,2717e-007$ mm. Isso é crucial porque o eixo x está relacionado ao movimento longitudinal do trator e do implemento. Entender a deformação nesse eixo ajuda a garantir que o conjunto funcione sem problemas em terrenos irregulares, evitando danos tanto ao trator quanto ao implemento.

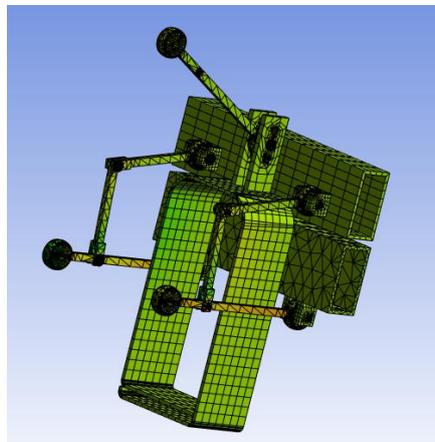


Figura 10: Deformação máxima na direção x durante a operação

Fonte: Autor

Na direção do eixo y, registramos uma deformação de $7,3242e-005$ mm. O eixo y está associado ao movimento lateral, o que é importante para manobrar o implemento em espaços estreitos ou para garantir que ele permaneça alinhado durante a operação. Avaliar a deformação nesse eixo assegura a estabilidade e o controle adequados.

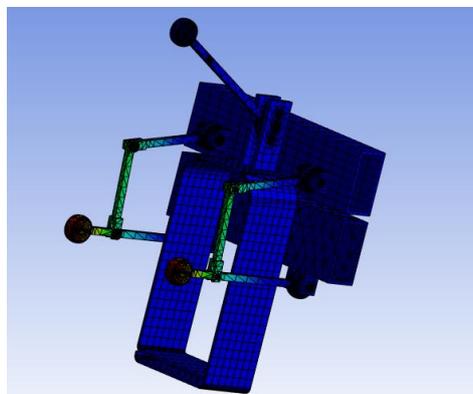


Figura 11: Deformação máxima na direção y durante a operação

Fonte: Autor

Por fim, na direção do eixo z, notamos uma deformação de $2,9848e-007$ mm. O eixo z corresponde ao movimento vertical, afetando a capacidade do engate de três pontos de ajustar a profundidade de trabalho do implemento no solo. O acompanhamento da deformação nesse eixo garante que o ajuste de profundidade seja preciso e consistente.

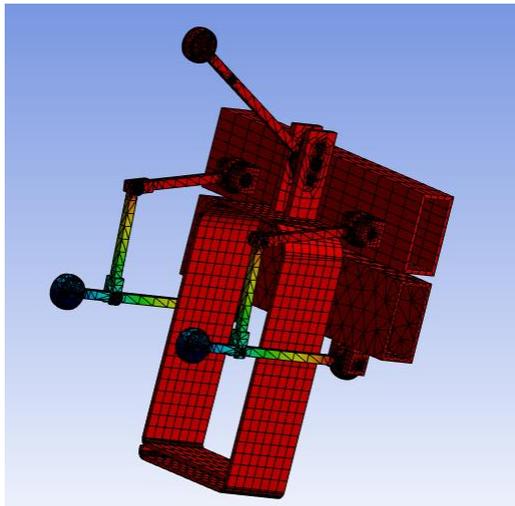


Figura 12: Deformação máxima na direção z durante a operação

Fonte: Autor

A avaliação minuciosa de cada eixo coordenado, portanto, é essencial para garantir a segurança, eficiência e confiabilidade operacional do engate de três pontos em uma variedade de condições de trabalho. Isso proporciona aos operadores a tranquilidade de que o sistema funcionará de forma consistente, independentemente dos desafios encontrados na agricultura e em outras atividades que envolvem o uso desses.

Com a tensão de Von Mises, é possível analisar o estado pleno de tensão do elemento e compará-lo com as tensões de escoamento do material. Dessa forma, torna-se possível verificar os indícios de escoamento do material selecionado e, com isso, avaliar o quão confiável é o projeto, proporcionando uma compreensão abrangente do comportamento estrutural e da segurança do sistema em análise. O resultado demonstrou que, sob as condições específicas da análise, a tensão de Von Mises máxima permaneceu abaixo do limite de escoamento do material, indicando uma margem de segurança adequada.

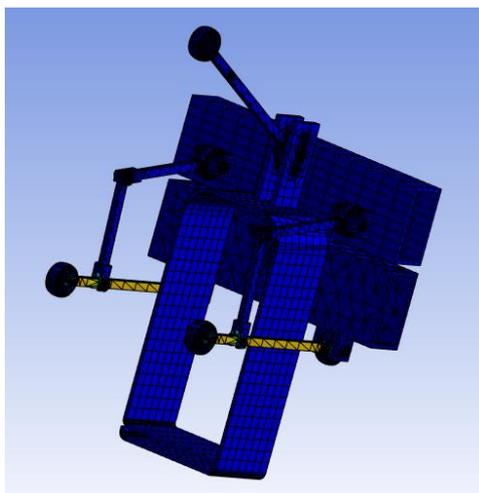


Figura 13: Tensão de Von Misses gerada durante a operação

Fonte: Autor

Tabela 5: Resultados obtidos perante a tração

Análises	Resultados
Deslocamento equivalente máximo [mm]	1,2131e-004
Deslocamento x [mm]	9,2717e-007
Deslocamento y [mm]	7,3242e-005
Deslocamento z [mm]	2,9848e-007
Tensão de Von Misses [Pa]	6,0591e+007

Já para a etapa de força vertical, onde será utilizado para as análises um pulverizador Arbus 200, vamos adotar uma densidade do líquido de 1,1 kg/litro, que corresponde à densidade da água com um incremento de 10%, para podermos definir o peso com o tanque totalmente preenchido de solução.

O cálculo é realizado da seguinte forma:

$$\text{Peso} = \text{Capacidade do Tanque (200 litros)} \times \text{Densidade do Líquido (1,1 kg/litro)}$$

$$\text{Peso} = 200 \text{ litros} \times 1,1 \text{ kg/litro}$$

$$\text{Peso} = 220 \text{ kg}$$

Isso nos dá um peso aproximado de 220 kg para o líquido que será utilizado na pulverização. Acrescentando isso aos 170 kg do implemento completo, chegamos a um

peso total de 390 kg. Esse será o peso total que o engate de três pontos precisará ser capaz de suportar durante a operação de pulverização.

Transformando a força de quilogramas (kg) para Newtons (N), teremos:

$$F = 390\text{kg} \times 9,81 = 3825,9 \text{ N}$$

E, adotando um fator de projeto de 1,5 a força que o engate de três pontos terá que ser capaz de levantar é de:

$$F = 5738,85 \text{ N} \quad (4)$$

Uma vez que as análises fundamentais foram estabelecidas, procedemos à aplicação das condições de engastamento para simular a força de 5738,85 N, que representa a força necessária para que o trator suporte o implemento na posição elevada. Utilizando o software de Elementos Finitos, realizamos simulações detalhadas, o que nos permitiu obter informações precisas sobre as deformações ocorridas no engate de três pontos. Como resultado, observamos uma deformação máxima de 2,3686e-002 mm sob a influência da força de tração aplicada.

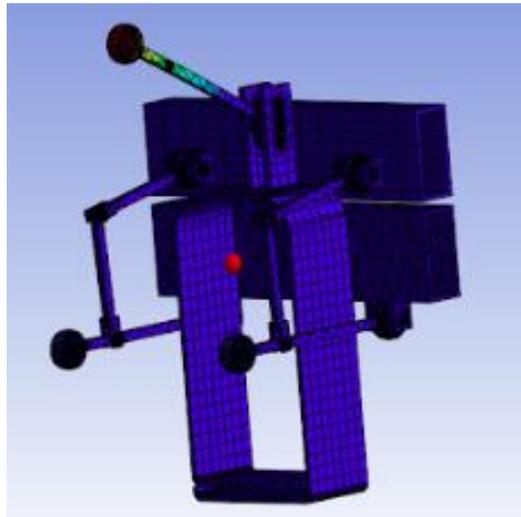


Figura 14: Deformação durante a situação de força vertical.

Fonte: Autor

A análise incluiu uma avaliação detalhada das deformações nas direções dos eixos X, Y e Z. Isso nos permitiu entender como a estrutura se comporta em resposta ao esforço de força vertical do implemento em diferentes direções. As deformações específicas nessas direções (1,2641e-005 mm em X; 1,1229e-005 mm em Y e 4,352e-

004 mm em Z) são cruciais para garantir a estabilidade e a segurança durante a situação de aplicação da força vertical.

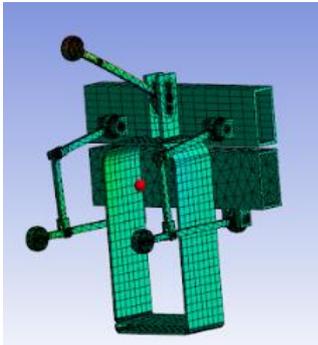


Figura 15: Deformação máxima na direção x durante a situação de força vertical.

Fonte: Autor

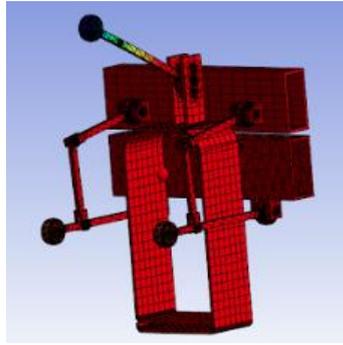


Figura 16: Deformação máxima na direção y durante a situação de força vertical.

Fonte: Autor

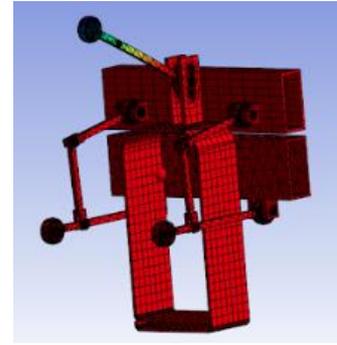


Figura 17: Deformação máxima na direção z durante a situação de força vertical.

Fonte: Autor

Com a análise da tensão de Von Mises foi possível detectar sinais de possível escoamento do material selecionado e, por conseguinte, avaliar a confiabilidade do projeto, oferecendo uma compreensão abrangente do comportamento estrutural e da segurança do sistema em análise.

Os resultados obtidos evidenciaram que, sob as condições específicas da análise, a tensão de Von Mises máxima excedeu o limite de escoamento do material. Essa constatação aponta para a necessidade de reforço no braço superior do engate de três pontos, onde se mostrou a maior concentração dos esforços.

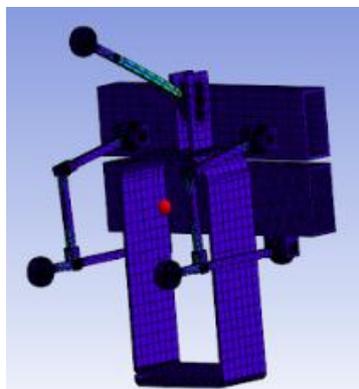


Figura 18: Tensão de Von Mises gerada durante a situação de força vertical

Fonte: Autor

Tabela 6: Resultados obtidos perante a situação de força vertical

Análises	Resultados
Deslocamento equivalente máximo [mm]	2,3686e-002
Deslocamento x [mm]	1,2641e-005
Deslocamento y [mm]	1,1229e-005
Deslocamento z [mm]	4,3520e-004
Tensão de Von Misses [Pa]	7,0435e+008

Após implementação de um reforço, tornando a haste mais espessa utilizando o próprio aço SAE1020 no braço superior do engate de três pontos, os resultados alcançados foram os seguintes:

Tabela 7: Resultados obtidos após reforço no braço superior

Análises	Resultados
Deslocamento equivalente máximo [mm]	2,4254e-003
Deslocamento x [mm]	4,3403e-006
Deslocamento y [mm]	6,3642e-006
Deslocamento z [mm]	4,3402e-004
Tensão de Von Misses [Pa]	1,7986e+008

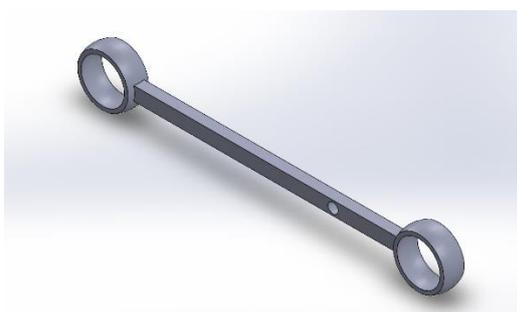


Figura 19: Braço superior original

Fonte: Autor

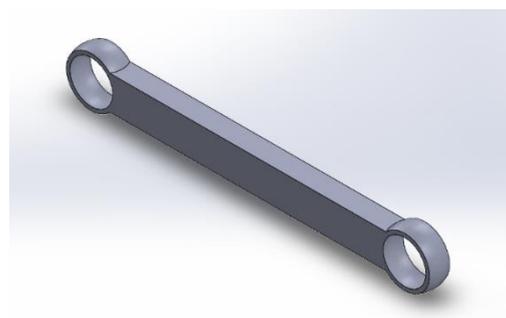


Figura 20: Braço superior reforçado

Fonte: Autor

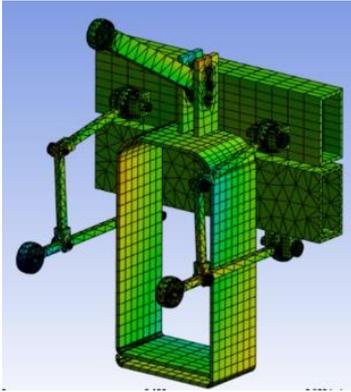


Figura 21: Deformação máxima na direção x durante a situação de força vertical após reforço

Fonte: Autor

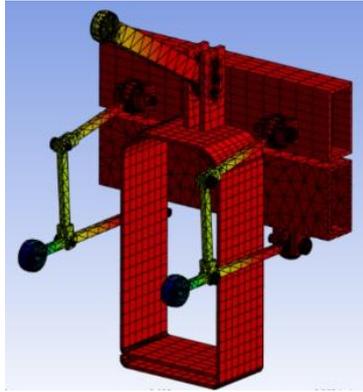


Figura 22: Deformação máxima na direção y durante a situação de força vertical após reforço

Fonte: Autor

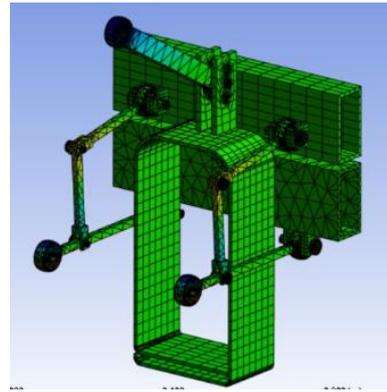


Figura 23: Deformação máxima na direção z durante a situação de força vertical após reforço

Fonte: Autor

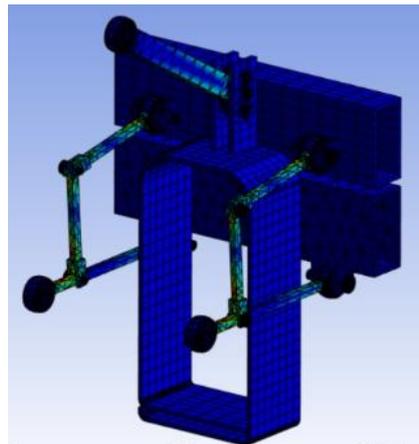


Figura 24: Tensão de Von Mises gerada durante a situação de força vertical após o reforço no braço superior

Fonte: Autor

Com base nas análises realizadas, podemos afirmar que o engate de três pontos fabricado com aço SAE1020 laminado apresenta um fator de segurança de 5,8 para a força de tração e de 1,95 quando está sujeito à força de carregamento, após a confecção do reforço no braço superior.

6. CONCLUSÃO

Com análises em conformidade do material aço SAE1020 laminado com normas e padrões, assegurando o atendimento aos requisitos de desempenho e segurança, validamos a segurança e adequação do engate de três pontos para a agricultura familiar, desde que seja realizado um reforço no braço superior, a fim de suportar o carregamento proveniente do pulverizador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HIBBELER, R. C., **Resistência dos Materiais**. Pearson Prentice Hall, 5ª edição, São Paulo, 2004.
- JAMES M. GERE e BARRY J. GOODNO, **Mechanics of Materials**, 2009.
- NASH, William A.; POTTER, Merle C. **Resistência dos Materiais-5**. Bookman Editora, 2014.
- BEZERRA, João Victor Alves Pinto. **Projeto e fabricação de um suporte parcial de peso de baixo custo com protótipo de um instrumento para medição de massa**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Hibbeler, R. C. **Resistências dos materiais**. 7 Ed. São Paulo: Pearson, 2010. 637p.
- CARVALHO, M. S. Resistência dos materiais. **Rio de Janeiro: Expansão**, 1979.
- GUJEL, D. A.; KAZMIERCZAK, C. S.; MASUERO, J. R. Diagrama tensão-deformação específica em concretos com agregados reciclados de concreto: análise da metodologia proposta pela NBR 8522. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, p. 547-567, 2017.
- BEER, F. P.; RUSSELL JR., E. J.; DeWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Estática e mecânica dos materiais**. Porto Alegre: AMGH, 2013
- BOTELHO, Manoel Henrique Campos. **Resistência dos materiais: para entender e gostar**. Editora Blucher, 2017.
- BEER, Ferdinand P. et al. **Mecânica dos materiais**. Porto Alegre: Amgh, 2011.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica**. 8ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman; 2013.
- STERNICK, Marcelo Back et al. **Relationship between rigidity of external fixator and number of pins: computer analysis using finite elements**. Revista Brasileira de Ortopedia, v. 47, n. 5, p. 646-650, 2012.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica**. 10ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

AZEVEDO, D. F. O., **Análise estrutural com Ansys Workbench**. Notas de Aula, Universidade de Mogi das Cruzes/UMC, Mogi das Cruzes, SP, Brasil, 2015.

MENDELSON, A. **Plasticity: Theory and Applications**. 2. ed. Nova York: The Macmillan Company, 1970.

COLLINS, J. A. **Failure of Materials in Mechanical Design – Analysis, Prediction, Prevention**. 2. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 1993.

SAAD, M. H. **Elasticity – Theory, Applications and Numerics**. Oxford: Elsevier, 2005.

Barroso, Darlan Almeida, et al. "ANÁLISE DO BALANÇIM DA SUSPENSÃO DO PROTÓTIPO FÓRMULA SAE POR MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS." *HOLOS* 5 (2015): 170-181.

FERNANDES, J. L. C. **Aplicação dos Elementos Finitos Singulares Híbridos na Mecânica da Fratura Linear Estática Bidimensional**. 2002. 89 f. Tese (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2002.

FILHO, A. A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 2.ed. São Paulo: Editora Érica, 2000.

AZEVEDO, Alvaro Ferreira Marques. **Método dos Elementos Finitos**. 1º Edição, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

Sant'Anna, Diego Rodrigues, Jacson Machado Nunes, and J. O. EGomes. "Análise estrutural de máquinas-ferramenta pelo método dos elementos finitos."

COTA, F. P. et al. **Análise estrutural de uma cadeira de rodas através do método de elementos finitos**. *CEP*, v. 36307, p. 352, 2010.

Sverzut, Claudio. "ANÁLISE ESPECTRAL DAS FORÇAS NO SISTEMA DE ENGATE DE TRÊS PONTOS DO TRATOR AGRÍCOLA." *Current Agricultural Science and Technology* 1.1 (1995).

- MORLING, Roy W. **Agricultural tractor hitches analysis of design requirements.**
In: ASAE Distinguished Lecture Series - Tractor design No.5, St. Joseph, MI, ASAE,
1979, 20p.
- MACHADO, A. L. T., REIS, A. V. DOS, MACHADO, R. L. T. **Tratores para agricultura familiar: guia de referência.** Pelotas: Ed. Universitária UFPEL, 2010
- REIS, A. V. DOS, MACHADO, A. L. T., TILLMANN, C. A. DA C., MEDEIROS, F. A. **Motores, tratores, combustíveis e lubrificantes.** 3 ed. Pelotas: Cópias Santa Cruz, 2019
- LIMA, Renato Meireles de. **Estudo de um sistema para abastecimento de sementes em semeadoras agrícolas.**
- Varella, Carlos. "**Introdução ao estudo dos tratores agrícolas.**" (2012).
- SANTOS, Jerffson Lucas. Mecanização Agrícola. **Apostila. Instituto Formação. Barra da Estiva, BA, 2012.**
- SINIGAGLIA, Tiago; ZIEGLER, Cristiano; FÖRSTER, Luan Marcel.
DESENVOLVIMENTO DE UMA EMPILHADEIRA ADAPTADA PARA UM TRATOR. *Engevista*, v. 19, n. 3, p. 713-729, 2017.
- COOK, Robert D. et al. **Concepts and applications of finite element analysis.** 4th ed. Madison: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- MIALHE, L.G. **Máquinas motoras na agricultura.** São Paulo: EPUEDUSP, 1980. v.1, 345
- CALLISTER Jr, W. D. C. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, p.7, 8ª Edição. 2012. 590 p.
- RUSSINI, A.; **Projeto, construção e teste de Instrumentação eletrônica para Avaliação do desempenho de tratores Agrícolas.** Santa Maria, RS, Brasil; 2009.
- MIALHE, L.G. **Máquinas motoras na agricultura.** v.2. São Paulo: EDUSP/USP, 1980. 367 p
- ANFAVEA – Associação Nacional dos fabricantes de veículos Automotores. Anuário 2011. Disponível em:< <http://www.virapagina.com.br/anfavea2012/> > Acesso em: 23 set. 2023.

SHIGLEY, J.; MISCHKE, C.; BUDYNAS, R. **Mechanical Engineering**. London: Macdonald & Co., 2006.

BRANCO, C. A. G. M. **Mecânica dos Materiais**. [S.l.]: Fundação Calouste Gulbenkian, 1985.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018