

## ANÁLISE ESTRUTURAL DE REMONTADOR EM PÁ CARREGADEIRA

Cássio Fernandes Nascimento<sup>1</sup> – cassiocfn@hotmail.com

Rafael Alves Cotrim<sup>1</sup> – rafael.cotrim@unijorge.edu.br

Caio Eduardo Pinheiro Costa<sup>2</sup> – caio.costa@unijorge.edu.br

<sup>1</sup>Centro Universitário Jorge Amado, Campus Paralela – Salvador, BA, Brasil

**Resumo:** O uso do implemento remontador é muito importante na utilização de equipamentos móveis do tipo pá carregadeira, pois facilita no processo de amontoar material para novamente realizar o abastecimento dos recipientes ou máquinas de produção. Para garantir que o implemento projetado não apresente falha inesperada, foi feita a modelagem e um estudo virtual utilizando uma simulação com elementos finitos para identificar as reações e possibilidades de deformação e deslocamento da estrutura. Inicialmente foi feita modelagem da peça utilizando o software de modelagem 3D Solidworks, com este programa pudemos aplicar as propriedades mecânicas do material utilizado na fabricação do implemento. A partir da montagem da estrutura é definida a conexões, geração da malha e cargas ao qual a estrutura é submetida. A carga a qual a estrutura está sujeita é a própria carga interna quando o implemento é levantado durante operação, pois ela é engastada em apenas na base está em balanço na extremidade do empurrador.

**Palavras-chave:** Implemento, Simulação, Pá-carregadeira.

### 1. INTRODUÇÃO

*Pás-carregadeiras sobre rodas* são equipamentos móveis utilizados em diversos seguimentos da indústria; na química, por exemplo, podem otimizar o processo de fabricação de fertilizantes devido à sua alta capacidade de carga nos setores de granulação de matérias primas, alimentação de moegas, abastecimento de caminhões, mistura de grãos, etc. Em todo tipo de terreno elas apresentam bom desempenho fazendo com que sejam os mais cotados dentre as opções disponíveis no mercado.

Figura 1 - Pá Carregadeira de rodas KOMATSU WA200.

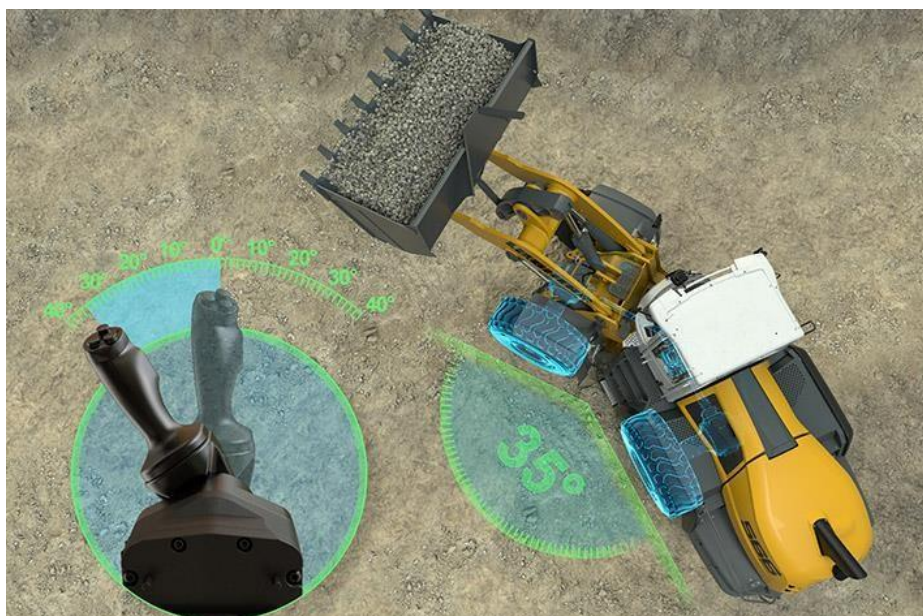


FONTE: Acervo do autor (2022).

A operação de equipamentos deste tipo requer algumas licenças e certificações, pois são máquinas robustas que exigem do operador atenção e responsabilidade (NR11, item 11.1.6). O operador deve conter habilitação na categoria B emitida pelo DETRAN e pode fazer a movimentação do equipamento dentro do complexo industrial, ou habilitação na categoria D podendo movimentar os equipamentos em rodovias. Além da licença emitida pelo órgão de trânsito brasileiro, o colaborador deve fazer a realização de curso de certificação de operador de equipamentos móveis do tipo pá-carregadeira e operação defensiva (NR11, item 11.1.6).

Estas máquinas pesadas, assim como os veículos, são compostas basicamente por um motor com sistema de arrefecimento, transmissão, eixos e cabine. Porém, a direção do equipamento é controlada através de um sistema hidráulico que aciona dois cilindros com fluidos de trabalho que de acordo com a necessidade do operador pode ir para a direita ou esquerda. Além disso, conta com uma estrutura de braço de levantamento (acionado pelo sistema hidráulico através de dois cilindros de levantamento) e articuladores que auxiliam na inclinação do implemento.

Figura 2 - Ilustração de mudança de direção de pá carregadeira.



FONTE: Revista OE (2019).

Os implementos são as principais ferramentas de trabalho de uma pá-carregadeira, e podem variar de acordo com a necessidade de operação. É muito frequente a variação entre caçamba e remontar com engate rápido, na operação de materiais granulados. O material espalhado durante carregamento pode ser novamente amontoado para um posterior carregamento com maior facilidade, acoplando rapidamente os implementos quando necessário.

O implemento do tipo remontador, principal objeto deste estudo, assim como a estrutura do equipamento, é submetido a cargas externas que geram tensões em pontos do seu corpo que podem superar os limites de escoamento do material levando-o a uma deformação plástica. O principal objetivo deste trabalho é apresentar um estudo que possibilite identificar possíveis pontos de melhoria no projeto do implemento ou ateste que o atual projeto de estrutura atenda às solicitações da ferramenta.

## 2. METODOLOGIA

Para realização das simulações e posteriormente os estudos das reações na estrutura, primeiro foi necessário o dimensionamento da estrutura (Figura 3) de modo que pudéssemos analisar as reações, deformação e deslocamento da estrutura diante das tensões aplicadas.

As medições para obter as dimensões do implemento foram feitas utilizando trena e paquímetro. Estes dados foram inseridos no Solidworks (software de modelagem 3D utilizado para projetos de peças mecânicas) e feita a modelagem da estrutura para a geração da malha e realizar os estudos de tensão, deslocamento e deformação da peça.

Figura 3 - Modelo de implemento utilizado nos estudos.



FONTE: Acervo do autor (2022).

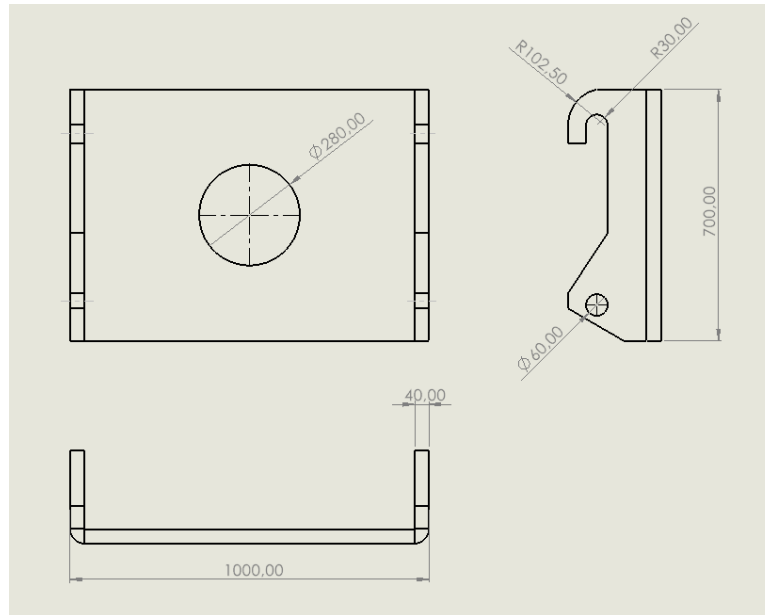
### 2.1. Dimensionamento da estrutura

Nesta seção será detalhada o dimensionamento e montagem dos componentes do implemento analisado. A estrutura é formada por três peças básicas, sendo elas: uma base formada por uma chapa de cortada e curvada em 90°, uma viga de seção tubular, e uma chapa

curvada que terá contato direto com o material remontado. Além disso no projeto foram adicionadas três chapas em formato triangular para reforçar a estrutura (Figura 7).

A base (Figura 4) do remontador é a peça que será engastada no engate rápido do equipamento. Ela terá uma restrição de movimento nas direções dos eixos de coordenada x e z definidos no Solidworks, garantindo que toda a movimentação do implemento será realizada na direção frontal do equipamento.

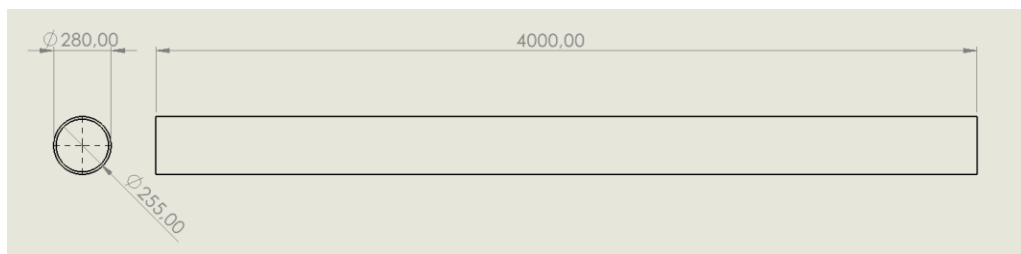
Figura 4 - Vista superior, frontal e lateral da base de engaste do implemento.



FONTE: Elaborado pelo autor (2022).

A viga de seção tubular com 25mm de espessura e 4m de comprimento (Figura 5) servirá para garantir mais segurança na operação permitindo que o material seja remontado sem que o equipamento esteja sob o material.

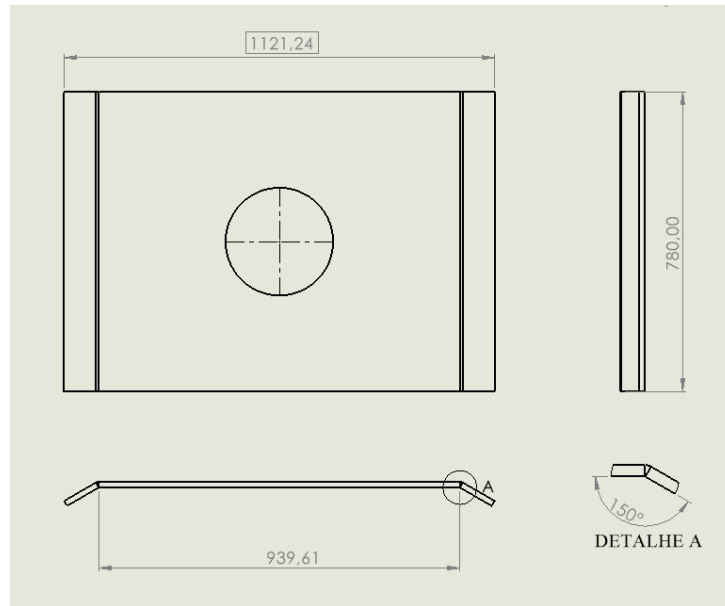
Figura 5 - Vista frontal e lateral da viga de seção tubular.



FONTE: Elaborado pelo autor (2022).

A pá (Figura 6) do remontador é a peça que terá contato direto com o material de trabalho do equipamento.

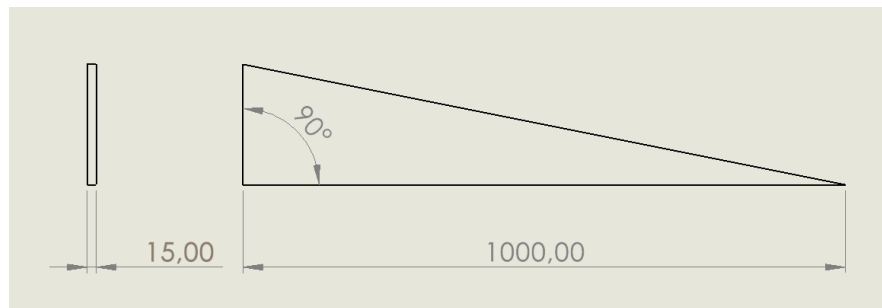
Figura 6 - Vista superior, frontal e lateral da pá do implemento.



FONTE: Elaborado pelo autor (2022).

A peça da Figura 7 foi utilizada para aumentar a resistência as tensões da estrutura.

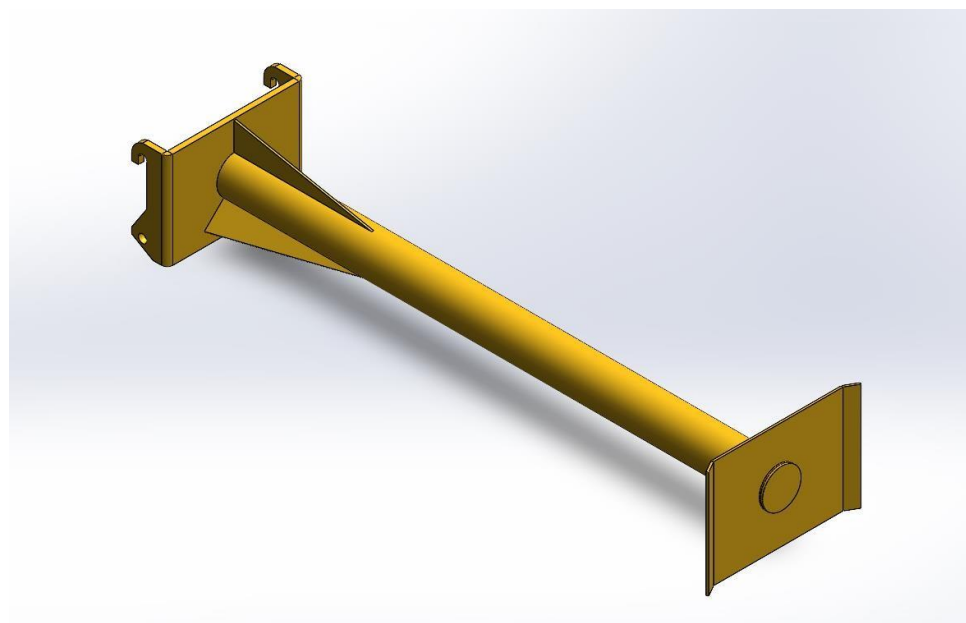
Figura 7 - Reforço da estrutura.



FONTE: Acervo do autor (2022).

Implemento montado se apresenta conforme Figura 8 em vista isométrica.

Figura 8 - Montagem dos componentes do implemento.



FONTE: Elaborador pelo autor (2022).

Após a modelagem das peças do implemento pudemos extrair as propriedades de massa podem ser verificadas abaixo na Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição de massa dos componentes do remontador.

Peça	Massa
Base de engaste	259,555 kg
Viga tubular	329,847 kg
Reforços	35,325 kg
Pá	97,434 kg
Tampas	14,500 kg
<b>TOTAL</b>	<b>736,661 kg</b>

Fonte: Cássio Fernandes Nascimento, Solidworks (2022)

## 2.2. Material e propriedades mecânicas

O material utilizado na construção do implemento foi uma liga de aço tendo como principais elementos ferro e carbono com especificação ASTM A36 (Luz, Gelson. 2017). As especificações de propriedades (Tabela 2) mecânicas do material utilizado na fabricação do implemento já são encontradas diretamente fornecidas no Solidworks e pode ser confirmada na American Society for Testing and Materials (2022).

Tabela 2 – Propriedades mecânicas da liga de aço ASTM A36.

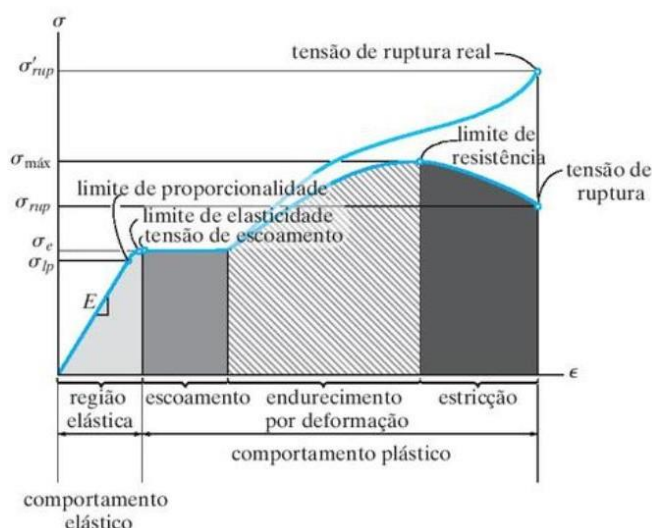
Peça	Massa
Limite de escoamento	250 MPa
Resistência a tração	400 MPa
Modulo de elasticidade	200 GPa
Coefficiente de Poisson	0,26

Fonte: Solidworks (2022) / ASTM.

Quando estudamos a disciplina de resistência dos materiais estamos buscando entender os efeitos internos da tensão e da deformação em um corpo maciço. A tensão está associada à resistência do material a partir do qual o corpo é feito, enquanto deformação é uma medida da alteração do corpo Hibbeler R. C. (p. 12017).

As propriedades mecânicas dos materiais nos apresentam os limites mecânicos que o corpo de prova suporta e associa essas tensões com a deformação ocasionada. Podemos perceber como normalmente se comportam os materiais submetidos a um carregamento analisando o diagrama de tensão-deformação.

Figura 9 - Diagrama de tensão-deformação convencional e real para material dúctil (aço).



Fonte: Hibbeler R.C. (2017)

Segundo Hibbeler R. C. (p. 91, 2017), dentro da faixa elástica, a razão entre as tensões longitudinal ou axial é uma constante e são proporcionais a força aplicada. Essa constante é denominada coeficiente de Poisson,  $\nu$  (lê-se, “nu”), e possui um valor numérico único para determinado material que seja homogêneo. Em termos matemáticos:

$$\nu = -\frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}} \quad (1.0)$$

Onde:

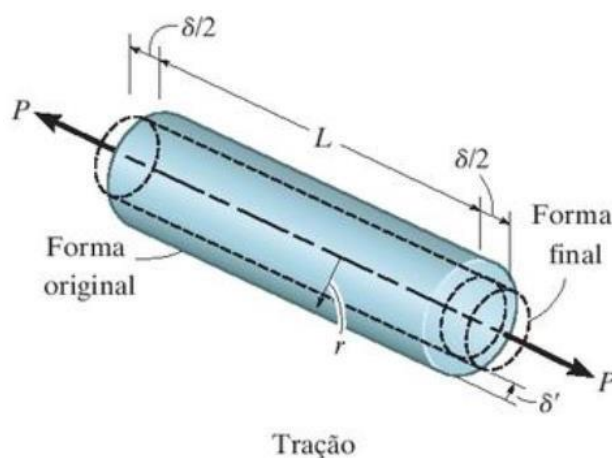
$\nu$  = coeficiente de Poisson

$\epsilon_{lat}$  = deformação lateral

$\epsilon_{long}$  = deformação longitudinal

O coeficiente de Poisson é uma quantidade adimensional, e o corpo deformável sujeito a uma força, não somente se alonga, mas também se contrai lentamente, e esse comportamento pode ser visualizado na

Figura 10 - alongamento e estreitamento de um corpo submetido a tração.



Fonte: : Hibbeler R.C. (2017).

## 2.3. Aplicação da malha

Para estudar as reações nos objetos sólidos através da simulação e utilização dos elementos finitos é necessária a definição de uma malha dentro do software escolhido para a realização do ensaio. A Tabela 3 fornece as especificações da malha gerada e sua qualidade. Nesse método de análise, uma região complexa definindo um meio contínuo é transformada em formas geométricas simples e discretas, chamadas de elementos finitos (Chandrupatla, Tirupathi R., p. 1 1944).

A análise de elementos finitos é um método para resolver equações diferenciais, que consiste em discretizar o sistema sob análise em vários elementos. Os elementos possuem nós que se deslocam com a aplicação de carregamento e podem fornecer respostas sobre o fenômeno que está se estudando (ENSUS, 2016).

A ideia do MEF (Metodo de Elementos Finitos) é dividir o corpo em elementos, conectados por nós, e obter uma solução aproximada (Jacob Fish & Ted Belytschko, p. 1, 2009). O método provê uma metodologia sistemática com a qual as reações às forças aplicadas podem ser determinadas por meio de um programa de computador, neste caso o Solidworks. Para isto é importante a definição da malha. Na Figura 11 temos a plotagem da qualidade da malha utilizada.

Tabela 3 – Informações sobre a malha aplicada no estudo.

Informações	
Tipo de malha:	Malha mista
Gerador de malhas usado:	Malha padrão

Pontos Jacobianos para  
malha de alta qualidade:

16 Pontos

Total de nós:

13938

Total de elementos:

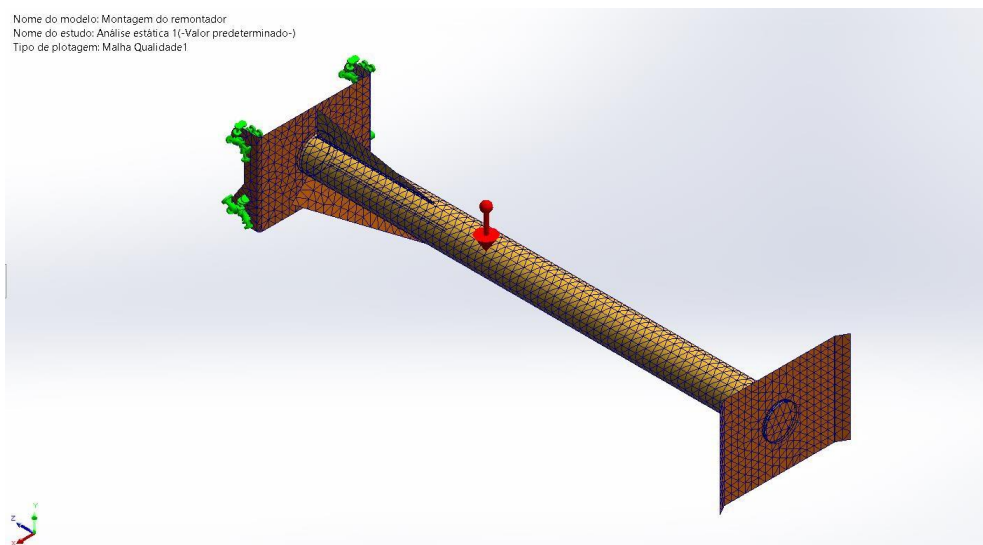
6753

Qualidade da malha:

Alta

Fonte: Geração de malha Solidworks (2022)

Figura 11 - Plotagem da qualidade da malha utilizada.



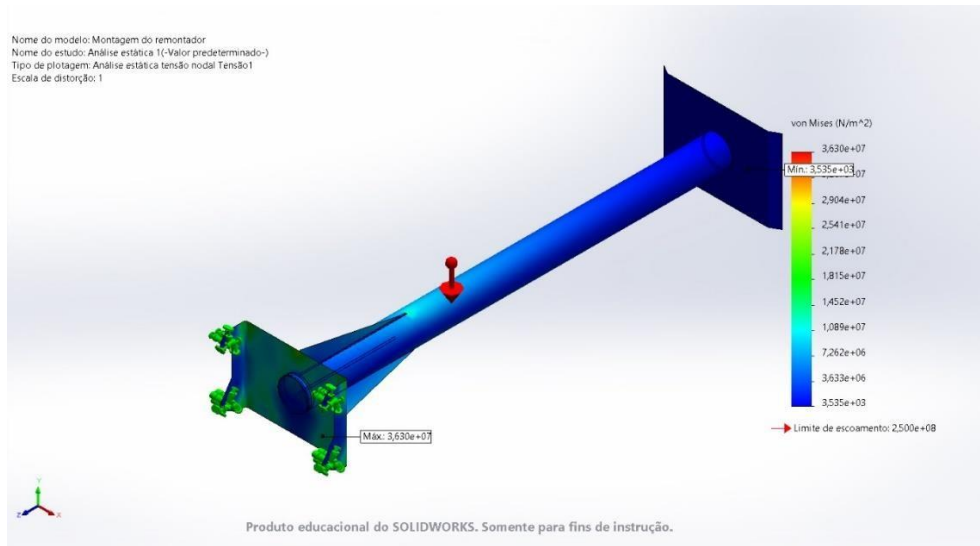
Fonte: Elaborador pelo autor (2022).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

É possível perceber, nas simulações, os pontos que sofrem com maiores solicitações nas seções da estrutura do remontador bem como a deformação e deslocamento ocasionados. Com base na análise obtida através de elementos finitos é possível visualizar através do gradiente de cores a reação da estrutura à carga aplicada.

Do diagrama de tensão apresentado na execução do estudo há a possibilidade de criar comparações entre o limite de escoamento e a tensão reativa após a aplicação das tensões no implemento, que define o máximo de tensão que pode ser suportado pela estrutura sem que haja deformação plástica.

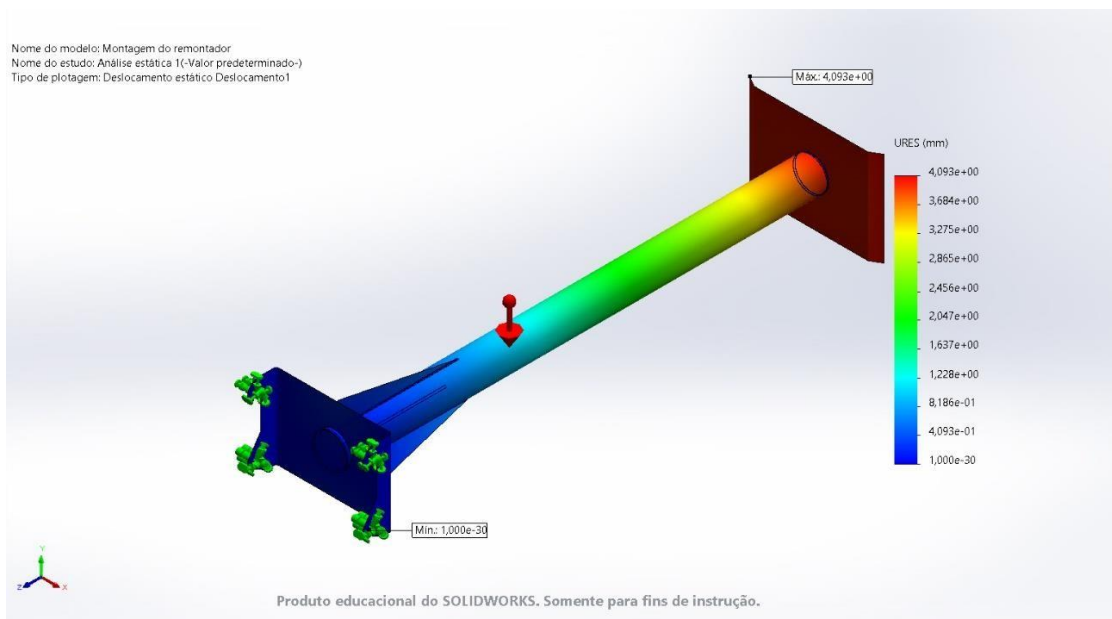
Figura 12 - Resultado dos estudos das tensões no corpo do remontador.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O deslocamento resultante obtido através da análise estática do implemento pode ser percebido avaliando a tonalidade do gradiente de cores apresentado à direita da Figura 13 e neste caso é obtido uma deflexão de 4,093mm. Cargas provocarão deformações em todos os corpos materiais e, como resultados, pontos no corpo sofrerão deslocamentos ou mudanças de posição conforme R.C. Hibbeler (2018, p. 57), que neste estudo se apresenta com valor considerável apenas nos componentes de y.

Figura 13 - Deslocamento estático

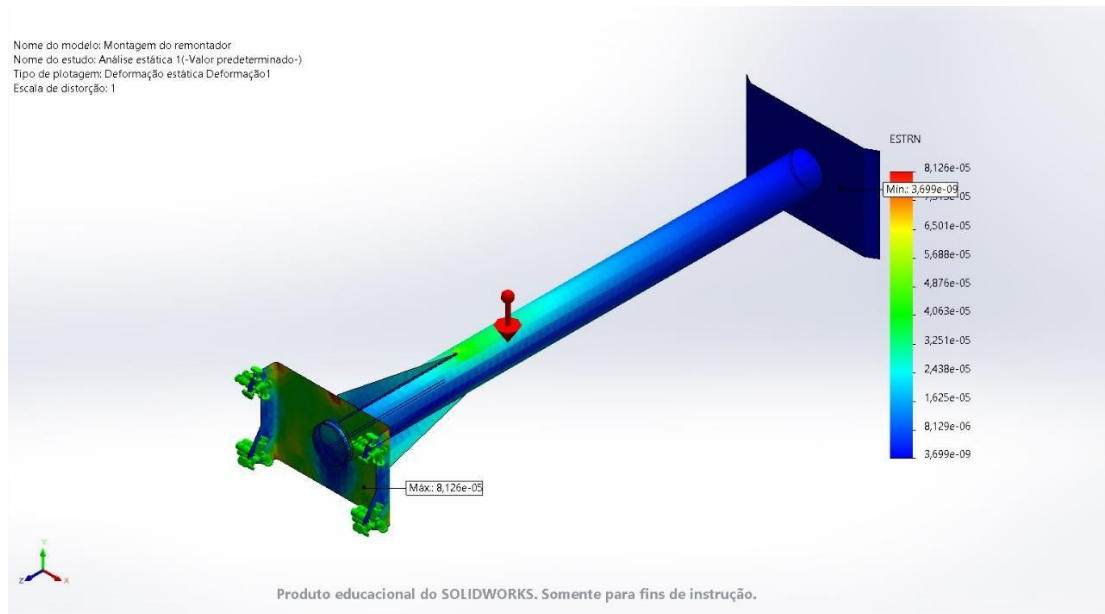


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

As deformações não só fazem que os segmentos de reta se alonguem ou contraíam, mas também que mudem de direção. Se selecionarmos dois segmentos de reta que estão originalmente perpendiculares um ao outro, a mudança de ângulo que ocorre entre eles é referida como deformação por cisalhamento segundo R.C. Hibbeler, (2018, p. 58). Dos estudos

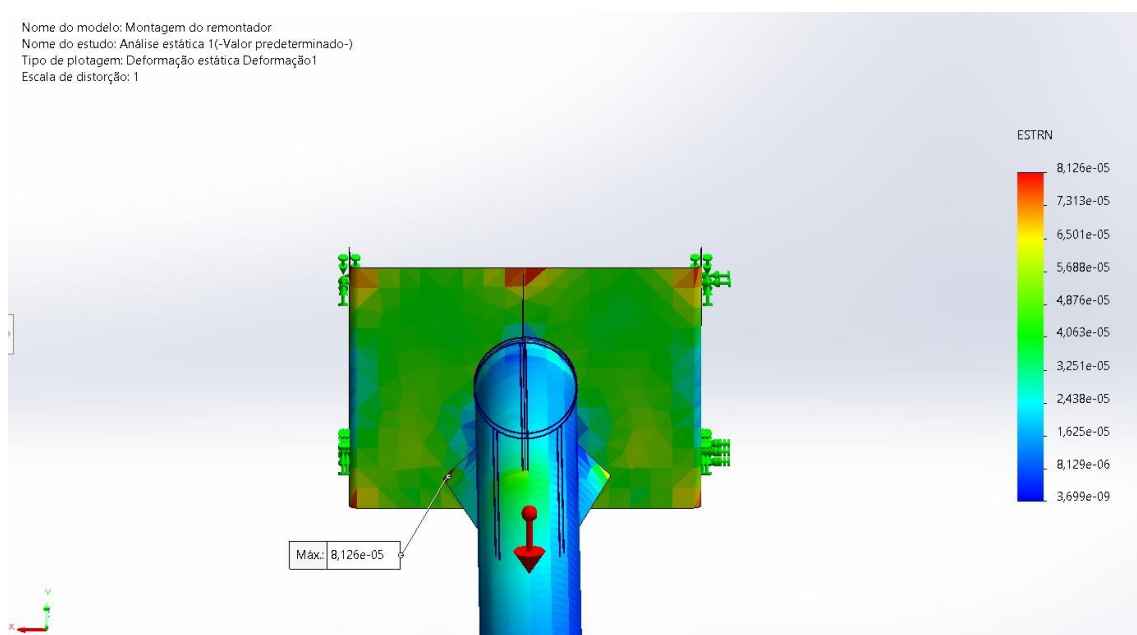
realizados com relação modificação na geometria da seção da peça é possível verificar uma variação na relação de dimensões da base da estrutura e na viga que, neste caso se apresenta com uma seção de área circular. A deformação máxima gerada pelas tensões atuantes no corpo está na chapa base nas extremidades dos reforços com grandeza de  $8,126 \cdot 10^{-5} \frac{m}{m}$  (Figura 14 e Figura 15).

Figura 14 - Análise estática de deformação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

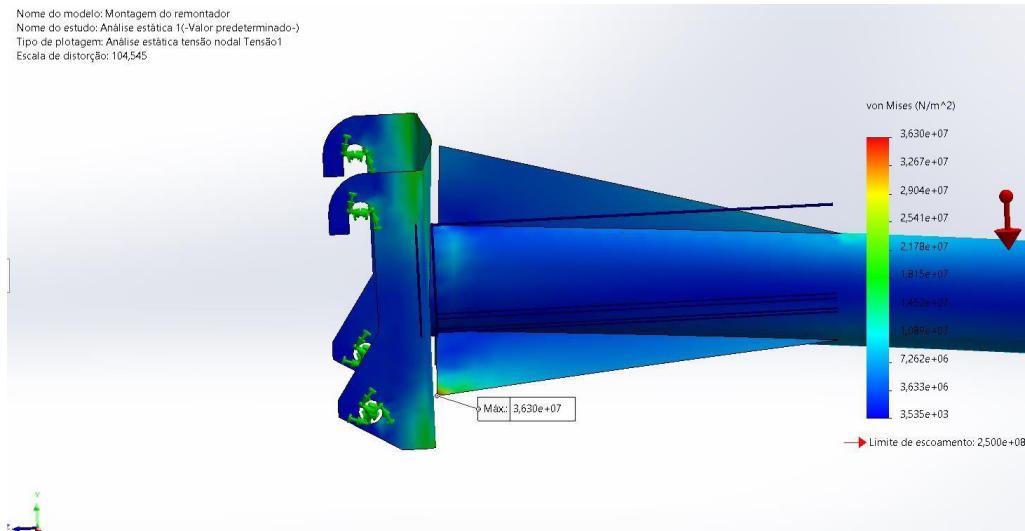
Figura 15 - Análise estática de deformação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

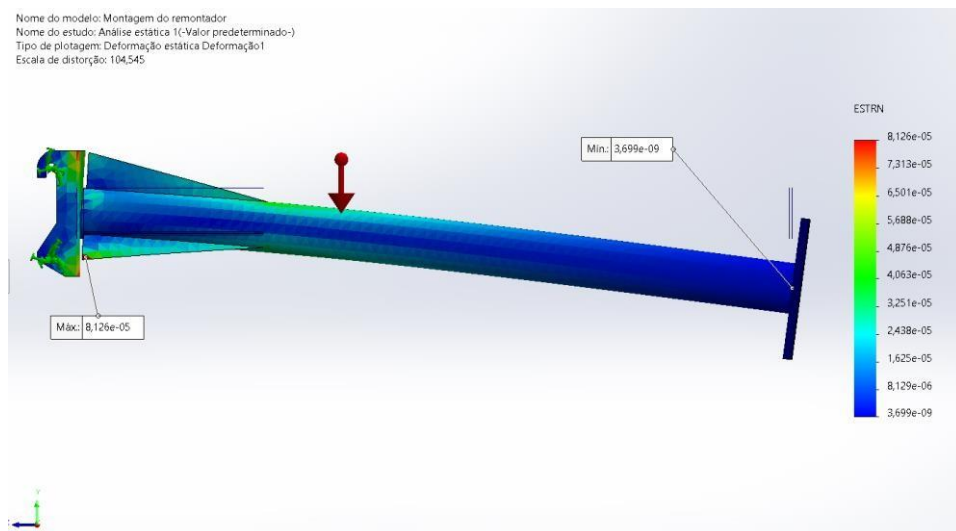
Aumentando a escala de distorção da simulação em 104 vezes, houve a possibilidade de perceber visualmente o comportamento da deformação e deslocamento ocasionados pelas tensões na estrutura conforme Figura 16 e Figura 17.

Figura 16 - Simulação de deslocamento com escala de distorção aumentada em 104x.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 17 - Deslocamento máximo da estrutura em escala aumentada em 104x.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

## 4. CONCLUSÃO

Após a obtenção dos resultados gerados pela simulação no Solidworks (2022), e feitos estudos e análises sobre as cargas que influenciam no desempenho do implemento e sua resistência, foi observado que após a aplicação da aceleração da gravidade as tensões geradas para desenvolver um deslocamento 4,093mm na extremidade oposta ao engaste da peça. E, ao observar o diagrama de deformação da estrutura, obtivemos  $8,126 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{m^2}$  como resultado.

Apesar de apresentar no diagrama os pontos que mais sofrem com as tensões (36,6MPa) é um valor que estão distantes de apresentarem um risco para a estrutura. Para serem percebidos na simulação foi necessário o aumento da escala, conforme Figura 17.

Ao analisar os resultados obtidos na simulação de deformação e deslocamento de material (Figura 16), é possível verificar a direção da reação dos reforços fazendo com que tenhamos uma tensão de cisalhamento na base do remontador, isto ocorre também nos reforços inferiores da peça, porém em direção contrária à do reforço superior. Numa situação reação essas tensões atuam quando o implemento está em levantamento, ou seja, quando não está apoiado no solo.

Com a análise estática de deformação da estrutura é possível identificar os locais que mais sofrem com as cargas e reforçá-las a fim de obter maior resistência. É percebido que o projeto do implemento suporta as cargas que serão submetidas, porém superdimensionada para o tipo de implemento que será utilizado para remonte de material.

## REFERÊNCIAS

ARMAC. Para que serve uma pá-carregadeira? Armac, 2020. Disponível em: <https://armac.com.br/blog/maquina/pas-carregadeiras/para-que-serve-uma-pa-carregadeira/>.

Acesso em: 09/12/2022.

HIBBELER, R.C. Resistência dos materiais. 10ª edição. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2018.

HIBBELER, R.C. Estática: mecânica para engenharia. 14ª edição. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2017.

ENSUS. Elementos Finitos – O que é? Quando utilizar? Quais são os benefícios? ENSUS, 2016. Disponível em: <https://ensus.com.br/elementos-finitos-quais-os-beneficios/>. Acesso em: 14/12/2022.

LUZ, Gelson. Aço ASTM A36 Propriedades Mecânicas e Composição Química. Blog Materiais, [s. l], 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/astm-a36-propriedades-mecanicas-e-composicao-quimica.html>. Acesso em: 15/12/2022.

CHANDRUPATLA, Tirupathi R; ASHOK D., Belegundu. Elementos Finitos. 4ª edição. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

COMISSÃO TRIPARTITE PARITÁRIA PERMANENTE (CTPP). NR 11: Transporte, Movimentação, Armazenamento e Manuseio de materiais: Portaria MTb nº 3.214. Rio de Janeiro, p. 24. 2002.

REVISTA O EMPREITEIRO. Bauma 2019: Liebherr apresenta nova direção por joystick intuitiva para carregadeiras. Revista OE, 2019. Disponível em: <https://revistaoe.com.br/bauma-2019-liebherr-3/>. Acesso em: 19/12/2022.