

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* AVANÇADO ARCOS  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Wesley Lúcio da Silva

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE MODIFICAÇÃO ESTRUTURAL NO PIVÔ  
INFERIOR DIANTEIRO DA MANGA DE EIXO DA RETROESCAVADEIRA *CASE*  
580N PARA AUMENTO DE LUBRIFICAÇÃO**

Arcos  
2022

WESLEY LÚCIO DA SILVA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE MODIFICAÇÃO ESTRUTURAL NO PIVÔ  
INFERIOR DIANTEIRO DA MANGA DE EIXO DA RETROESCAVADEIRA CASE  
580N PARA AUMENTO DE LUBRIFICAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - IFMG, *Campus* Avançado Arcos, para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Me. Luiz Augusto Ferreira de Campos Viana

Arcos  
2022

Catálogo na Fonte Biblioteca IFMG - *Campus Avançado Arcos*

S586e  
2022      Silva, Wesley Lúcio da.  
            Estudo da viabilidade de modificação estrutural  
            no pivô inferior dianteiro da manga de eixo da  
            retroescavadeira Case 580N para aumento de  
            lubrificação / Wesley Lúcio da Silva. - Arcos, 2022.  
            33 f. : il. color.

            Orientador: Luiz Augusto Ferreira de Campos  
            Viana.

            Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação  
            em Engenharia Mecânica.) - Instituto Federal de  
            Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais  
            - *Campus Avançado Arcos*.

            1. Pivô inferior (Engenharia Mecânica). I.  
            Viana, Luiz Augusto Ferreira de Campos  
            (orientador). II. Instituto Federal de Educação,  
            Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus*  
            *Avançado Arcos*. III. Título.

CDD: 620.1

Elaborada por Meriely Ferreira de Almeida- CRB-6/2960



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS**

**Campus Avançado Arcos**

**Diretoria de Ensino**

**Docentes Área Técnica**

Av. Juscelino Kubitschek, 485 - Bairro Brasília - CEP 35588000 - Arcos - MG

3733515173 - www.ifmg.edu.br

**Ata de Defesa de TCC do Curso de Bacharelado em**  
**Engenharia Mecânica, realizada em 22 de novembro de**  
**2022**

Aos vinte e dois dias do mês de novembro de dois mil e vinte e dois, às treze horas e quarenta minutos, se reuniu a banca avaliadora composta pelo Professor Cláudio Humberto Junqueira de Sousa, Professor Maurício Lourenço Jorge e Professor Luiz Augusto Ferreira de Campos Viana (orientador), para avaliar o trabalho intitulado “Estudo da Viabilidade de Modificação Estrutural no Pivô Inferior Dianteiro da Manga de Eixo da Retroescavadeira Case 580N para Aumento da Lubrificação”, apresentado pelo aluno Wesley Lúcio da Silva, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico. Após apresentação e arguição, emitiu-se o parecer “aprovado”, sendo a verificação das modificações sugeridas de responsabilidade do orientador. Para fins de registro na disciplina Trabalho Acadêmico Integrador X, a banca avaliadora emite, em consenso, o conceito final 95. Nada mais havendo a tratar, a defesa foi encerrada quatorze horas e trinta e cinco minutos e eu, Luiz Augusto Ferreira de Campos Viana, lavrei a presente ata que, após lida e aprovada, foi assinada por todos os avaliadores.

Arcos, 22 de novembro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Augusto Ferreira de Campos Viana, Professor**, em 22/11/2022, às 14:44, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Humberto Junqueira de Sousa, Professor Substituto**, em 22/11/2022, às 15:16, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Mauricio Lourenco Jorge, Professor**, em 22/11/2022, às 16:34, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **1385140** e o código CRC **5BB5B8F3**.

Dedico este trabalho em homenagem ao meu avô, Deusdade Pacheco da Silva e ao meu pai Wagner Lúcio da Silva, pois fica aqui registrada a engenhosidade de ambos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, porque Dele, e por meio Dele, e para Ele são todas as coisas. A Ele, pois, a glória eternamente. Amém!

Agradeço a minha família, a todos os meus familiares, aos amigos e colegas, que mesmo em meio às circunstâncias da vida, nunca mediram esforços para me apoiarem no que fosse preciso em todas as fases da minha vida.

Agradeço ao meu avô e ao meu pai, pois a modificação realizada por ambos, motivou a realização deste trabalho.

Agradeço a todos os profissionais do Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* Avançado Arcos pelo acolhimento, preparo e aprendizado.

Por fim, agradeço ao meu orientador, que prontamente atendeu à ideia, com muita atenção e dedicação.

“Ouve o conselho e recebe a instrução, para que sejas sábio nos teus dias por vir.

Muitos propósitos há no coração do homem, mas o desígnio do Senhor permanecerá.”

Provérbios 19:20-21

## RESUMO

Este trabalho trata da análise da viabilidade de modificação estrutural no pivô inferior dianteiro da manga de eixo da retroescavadeira CASE 580N, utilizando como ferramenta a aplicação do método dos elementos finitos (MEF), em uma análise de tensões de Von Mises, através do *software Autodesk Inventor 2019* versão estudante, na modelagem 3D do componente. A modificação tem como objetivo o aumento de fluxo de fluido lubrificante para a área de contato, diminuindo o desgaste do sistema. Para realização da modelagem tomou-se como exemplo um modelo real dos componentes envolvidos. Para fins de comparação, realizou-se a análise para os componentes nos estados original e modificado. As análises resultaram em um fator de segurança mínimo que poderia ser aplicado de 8,84, para os componentes originais, e 8,86 para os modificados, evidenciando que a modificação não compromete estruturalmente os componentes.

**Palavras-chave:** Pivô inferior, Modelagem 3D, CASE 580N, Elementos finitos.

## **ABSTRACT**

This work deals with the analysis of the feasibility of structural modification in the lower front king pin of the steering knuckle of the CASE 580N backhoe, by applying the finite element method (FEM), in a Von Misses stress analysis, through software Autodesk Inventor 2019 student version, in 3D modeling of the component. The modification aims to increase the lubricating fluid flow to the contact area, reducing system wear. To carry out the modeling, a real model of the components involved was taken as an example. For comparison purposes, the analysis was carried out for the components in the original and modified states. The analysis resulted in a minimum safety factor that could be applied of 8,84 for the original components and 8,86 for the modified ones, showing that the modification does not structurally compromise the components.

**Keywords:** King pin, 3D Modeling, CASE 580N, Finite Elements.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de classificação de pinos graxeiros . . . . .	9
Figura 2 – Localização do componente em análise . . . . .	12
Figura 3 – Componentes . . . . .	13
Figura 4 – Pino graxeiro e passagem de lubrificação da peça . . . . .	14
Figura 5 – Centro de gravidade - Case 580N . . . . .	15
Figura 6 – Cálculo do centro de massa . . . . .	16
Figura 7 – Definição do problema . . . . .	17
Figura 8 – DCL do problema . . . . .	17
Figura 9 – Linha de carga na rótula . . . . .	18
Figura 10 – Verificação da área de contato . . . . .	19
Figura 11 – Representação da área e força distribuída . . . . .	19
Figura 12 – Modelagem 3D do componente . . . . .	20
Figura 13 – Restrições . . . . .	22
Figura 14 – Esforços atuantes . . . . .	22
Figura 15 – Malha . . . . .	23
Figura 16 – Tetraedro de quatro nós . . . . .	23
Figura 17 – Tensão de Von Mises . . . . .	25
Figura 18 – Taxa de Convergência - Von Mises . . . . .	26
Figura 19 – Deslocamento . . . . .	26
Figura 20 – Taxa de convergência - Deslocamento . . . . .	27
Figura 21 – Fator de segurança . . . . .	27

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 1045 . . . . .	20
Tabela 2 – Composição química do aço SAE 52100 . . . . .	21
Tabela 3 – Propriedades mecânicas adotadas para os aços . . . . .	21
Tabela 4 – Parâmetros da malha . . . . .	24
Tabela 5 – Configurações de convergência . . . . .	24

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO . . . . .	6
2	JUSTIFICATIVA . . . . .	7
2.1	Objetivo geral . . . . .	7
2.2	Objetivos específicos . . . . .	7
3	REFERENCIAL TEÓRICO . . . . .	8
3.1	Lubrificação . . . . .	8
3.2	Pinos graxeiros . . . . .	8
3.3	MEF - Método dos Elementos Finitos . . . . .	9
3.4	Tensão equivalente de Von Mises . . . . .	10
3.4.1	<i>Coefficiente de segurança</i> . . . . .	10
3.4.2	<i>Cisalhamento puro</i> . . . . .	11
3.5	Refinamento H-P . . . . .	11
4	METODOLOGIA . . . . .	12
4.1	Localização dos componentes . . . . .	12
4.2	Pivô inferior dianteiro da manga de eixo . . . . .	13
4.2.1	<i>Passagem de lubrificação</i> . . . . .	13
4.3	Força de reação no componente . . . . .	14
4.3.1	<i>Cálculo do centro de gravidade</i> . . . . .	14
4.3.2	<i>Cálculo da força de reação no componente</i> . . . . .	16
4.3.3	<i>Força de reação no componente</i> . . . . .	18
4.4	Modelagem 3D . . . . .	19
4.5	Análise de tensões pelo Método dos Elementos Finitos . . . . .	20
4.5.1	<i>Material dos componentes</i> . . . . .	20
4.5.2	<i>Condições de contorno</i> . . . . .	21
4.5.2.1	Restrições . . . . .	21
4.5.2.2	Carregamentos . . . . .	22
4.5.3	<i>Geração de malha</i> . . . . .	23
4.5.4	<i>Configurações de convergência</i> . . . . .	24
5	RESULTADOS . . . . .	25
5.1	Tensão de Von Mises . . . . .	25
5.2	Deslocamento . . . . .	26
5.3	Fator de Segurança . . . . .	27
6	CONCLUSÃO . . . . .	28
	REFERÊNCIAS . . . . .	29
	APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO MECÂNICO . . . . .	31

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos trinta anos houve aumento significativo no número de estudos científicos voltados para o campo de otimização estrutural, alavancados pelo desenvolvimento computacional e de métodos de programação e elementos finitos no campo da matemática. Entretanto, esses métodos são utilizados com maior frequência em áreas que requerem alta assertividade, segurança e precisão, como as indústrias aeronáuticas, aeroespaciais, nucleares, navais e petroleiras, (LEGNANI *et al.*, 2000).

Segundo Batista *et al.* (2012), com o avanço da tecnologia e do desenvolvimento de novos *softwares*, a aplicação de melhorias e otimizações em componentes mecânicos tem ganhado espaço e notoriedade, com aplicação em parâmetros limitantes, como dimensionamento, peso, resistência, tensões e custos, requerendo conhecimentos teóricos numéricos e físicos no processo de modelagem do problema.

Conforme relata Legnani *et al.* (2000), a engenharia sempre esteve voltada para a melhoria de projetos, proporcionando segurança e otimização, em que antigamente esse processo era realizado de forma experimental no método empírico, contando com a aptidão e experiência dos engenheiros, o que tornava o processo tedioso e dispendioso. Entretanto, métodos matemáticos e científicos foram desenvolvidos e aperfeiçoados com o advento das ferramentas computacionais.

Para validação de uma nova estrutura mecânica, em termos de confiabilidade, segurança, economia e desempenho, priorizando o melhor, cabe como ferramenta a aplicação da otimização de estruturas (ZARICHTA; CARDOSO, 2003).

O presente trabalho apresenta uma análise da viabilidade de uma modificação estrutural no pivô inferior dianteiro da manga de eixo da retroescavadeira CASE 580N, que tem como finalidade proporcionar o aumento de lubrificação, reduzindo assim o desgaste que ocorre nos elementos envolvidos no local de atuação do componente, que dentre as denominações conhecidas, podem ser caracterizados como o mancal da rótula, rótula de contato angular, prensada juntamente com outro elemento, que é o pivô inferior dianteiro.

## 2 JUSTIFICATIVA

A motivação da escolha deste tema partiu do conhecimento de uma modificação realizada de forma prática em um componente da retroescavadeira *CASE 580N*, o pivô inferior dianteiro da manga de eixo, por mecânicos de máquinas pesadas na cidade de Iguatama-MG. Tornou-se necessária tal modificação, pois observou-se um desgaste prematuro no componente em questão por limitação na lubrificação do sistema.

O trabalho é importante porque investiga estruturalmente uma modificação que propicia um aumento de lubrificação em um sistema que gera atrito e desgaste em seus componentes.

Mostrando-se favorável à investigação quanto à estrutura dos componentes, a contribuição do presente trabalho apresenta-se como um passo para a validação de um novo formato estrutural, que propicia o aumento de lubrificação, e conseqüentemente maior vida útil para o conjunto dos componentes.

### 2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo verificar os efeitos de uma modificação estrutural no pivô inferior dianteiro da manga de eixo da retroescavadeira *CASE 580N*, que tem por finalidade o aumento de lubrificação no sistema.

### 2.2 Objetivos específicos

- Revisar a bibliografia acerca dos conceitos envolvidos na análise dos componentes;
- Definir esforços atuantes no componente em análise;
- Modelar tridimensionalmente o componente;
- Aplicar condições de contorno na peça modelada para realização do MEF (Método dos Elementos Finitos);
- Analisar tensões atuantes na peça.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Lubrificação

A lubrificação torna-se indispensável em áreas de contato e atrito, reduzindo o desgaste e conferindo durabilidade aos componentes.

Os lubrificantes podem ser líquidos, sólidos ou gasosos, e independente do estado físico, todos necessitam de duas propriedades essenciais em suas aplicações, que são a alta resistência a forças de compressão e baixa resistência ao cisalhamento. Tratando-se de um lubrificante líquido, a combinação dessas propriedades permitem, a incompressibilidade e o fácil cisalhamento em áreas de atrito entre componentes, proporcionando menor resistência no local de interação dos componentes e reduzindo o coeficiente de atrito, (NORTON, 2013).

Ainda segundo Norton (2013), os lubrificantes possuem a capacidade de agir como contaminantes das superfícies metálicas, mesmo que compatíveis, impedindo a adesão pela interferência de uma camada simples de moléculas, em que variados óleos lubrificantes recebem aditivos para reagir com os metais e gerar uma monocamada contaminante. Outra função intrínseca aos lubrificantes, se dá na retirada de calor das áreas de atrito, reduzindo a interação entre as superfícies dos componentes e conseqüentemente o desgaste.

As graxas enquadram-se na classificação dos lubrificantes líquidos, sendo estas mais espessas, o que garante funções específicas como melhor fixação em locais de difícil acesso, função essa, que também evita o acesso de produtos contaminadores, (JUVINALL; MARSHEK, 2000).










Conforme descrevem Juvinal e Marshek (2000), a graxa assemelha-se em suas funções aos óleos, exceto pela baixa fluidez, que por sua vez inibe a limpeza e a refrigeração para a área de contato. Sendo um fluido não-newtoniano, que flui após a aplicação de uma tensão cisalhante superior ao ponto de escoamento, a graxa proporciona um escoamento praticamente viscoso em que a viscosidade aparente torna-se decrescente conforme o aumento da taxa de cisalhamento.

O acesso do fluido lubrificante ao sistema ocorre por meio de um componente que é rosqueado ao pivô inferior dianteiro denominado pino graxeiro.

#### 3.2 Pinos graxeiros

O pino graxeiro é o componente responsável por permitir a passagem da graxa para lubrificação dos componentes, atuando como uma válvula. Conforme apresenta a Figura 1, esses componentes podem ser classificados de acordo com a dimensão e o ângulo de inclinação, os quais variam de acordo com a acessibilidade do local.

Figura 1 – Exemplo de classificação de pinos graxeiros

	1/4"	3/16"	3/8"
90°			
45°			
reto			

Fonte: Adaptado de Padovan *et al.* (2010)

A graxa é aplicada no pino graxeiro com o auxílio de uma bomba engraxadora manual ou sob pressão. Dentre os cuidados com esse componente, deve-se manter limpo e evitar a introdução de graxa em excesso para não ocorrer o rompimento de retentores (em casos específicos), possíveis contaminações (poeira, terra, água, entre outros) e desperdícios (PADOVAN *et al.*, 2010).

### 3.3 MEF - Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos é utilizado para muitas aplicabilidades, como tensões, deformações, impactos, fraturas, entre outros, em diferentes estruturas e componentes. Essa ferramenta torna-se necessária para análise em componentes de geometria complexa, quando não é possível a solução por meio de métodos analíticos (JUVINALL; MARSHEK, 2000).

De acordo com Filho (2007), o método dos elementos finitos pode ser entendido como uma simulação técnica de um meio sólido, líquido ou gasoso, onde o mesmo é dividido em pequenos elementos (retas ou formatos geométricos), que são conectados entre si por nós. As equações utilizadas neste tipo de análise são para elementos infinitesimais, o que justifica a dimensão pequena dos elementos, mas o tempo necessário para análise requer que os elementos sejam finitos, sendo que quanto menor forem os elementos, e conseqüentemente em maior quantidade, maior precisão haverá na análise.

Conforme relata Juvinal e Marshek (2000), com o apoio de um *software*, é possível seguir alguns passos para realização de uma análise pelo método dos elementos finitos. Inicia-se pela divisão do componente em análise em partes discretas (malha de discretização). Define-se para cada elemento as propriedades físicas específicas. Realiza-se a justaposição das matrizes de rigidez dos elementos. Aplica-se as cargas conhecidas nos nós. Determina-se os apoios do componente. E prossegue-se com a resolução do sistema de equações de forma simultânea e o cálculo das tensões de cada elemento, em que todas essas etapas se resumem de forma básica em discretização e aproximação.

### 3.4 Tensão equivalente de Von Mises

Para realização da análise de tensões por meio do Método dos Elementos Finitos, o *software Autodesk Inventor* calcula, entre outras, a Tensão Equivalente de Von Mises.

De acordo com Norton (2013), com relação a falha de materiais dúcteis sob carregamento estático, os materiais dúcteis rompem se tensionados estaticamente acima de suas tensões limite de ruptura, mas quando aplicados em peças mecânicas falham quando escoam sobre carregamento estático, em que o fato de a peça falhar não significa que a peça se rompeu. Para análise de tal situação a aplicação da teoria da energia de distorção de Von Mises-Hencky, torna-se mais precisa.

Segundo Hibbeler (2010), a teoria da energia de distorção máxima, demonstra que o escoamento em um material dúctil ocorre quando a energia de distorção por unidade de volume do material se iguala ou excede a energia de distorção por unidade de volume do mesmo material, quando submetido a escoamento em um ensaio de tração simples.

Com base na teoria da energia de distorção máxima, pode-se calcular a tensão equivalente de Von Mises, que consiste em uma representação de combinação de tensões normal e de cisalhamento, sendo definida como a tensão de tração uniaxial que provocaria a mesma energia de distorção que é criada pela combinação atual das tensões aplicadas. Com isso, é possível tratar como carregamento de tração pura, situações em que haja combinação de tensão multiaxial com tensões de cisalhamento (NORTON, 2013).

Conforme Norton (2013), a Equação 1 refere-se ao caso tridimensional do cálculo da tensão equivalente de Von Mises, em que os termos  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , referem-se às tensões principais.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3} \quad (1)$$

A Equação 2 refere-se à Equação 1, reescrita em termos das tensões aplicadas, em que o termo  $\tau$  representa a tensão de cisalhamento.

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)}{2}} \quad (2)$$

#### 3.4.1 Coeficiente de segurança

De acordo com Norton (2013), na Equação 3, o coeficiente de segurança ( $N$ ) pode ser calculado a partir da razão da tensão de escoamento ( $S_y$ ) pela tensão equivalente de Von Mises ( $\sigma'$ ).

$$N = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (3)$$

### 3.4.2 Cisalhamento puro

A relação da tensão de cisalhamento puro ( $S_{ys}$ ) com a tensão de escoamento ( $S_y$ ) se dá pela relação apresentada na Equação 4 (NORTON, 2013).

$$S_{ys} = 0,577S_y \quad (4)$$

Demonstrando que em situação de escoamento, a tensão máxima de cisalhamento no cisalhamento puro é  $\frac{\sqrt{3}}{3}$  menor com relação a tensão de escoamento para um caso de tensão simples.

### 3.5 Refinamento H-P

Para obter maior precisão nos resultados, o *software* faz o uso de técnicas de refinamento de malha.

Segundo Fernandes (2018), existem três tipos de metodologias de refinamento de malha, sendo elas o refinamento P, o refinamento H e os elementos de alta ordem. O Quadro 1 apresenta as vantagens e desvantagens das técnicas de refinamento combinadas pelo *software Autodesk Inventor*.

Quadro 1 – Características dos métodos de refinamento de malha

	<b>Refinamento H</b>	<b>Refinamento P</b>
<b>Convergência de resultados</b>	Lenta	Rápida
<b>Tempo de análise</b>	Rápido	Lento

Fonte: Adaptado de Fernandes (2018)

Conforme descrevem os autores Novotny e Fancello (1998), essas técnicas de refinamento de malhas não alteram a topologia da malha, alterando, portanto, a localização dos nós no refinamento H, com o aumento do número de elementos; no refinamento P, com o aumento da ordem polinomial dos elementos; ou com a combinação das duas técnicas, refinamento H-P.

O *software Autodesk Inventor* utiliza para refinamento de malha o refinamento H-P, em que o usuário interfere apenas nos parâmetros referentes ao refinamento H no processo de convergência, pois, a cada análise, o *software* aumenta automaticamente a ordem polinomial do refinamento P, aumentando consideravelmente o tempo de análise, (YOUNIS, 2010).

O objetivo de utilizar o refinamento H-P é combinar as vantagens de cada técnica, proporcionando melhor convergência e maior confiabilidade à simulação, em que o *software* realiza o refinamento de malha ao entorno dos locais de alta tensão, conferindo maior convergência aos resultados, (FERNANDES, 2018).

## 4 METODOLOGIA

A sequência metodológica do presente trabalho baseou-se na necessidade do conhecimento, definição e análise do esforço de reação atuante no componente, considerando o sistema estático, com peso operacional e carga máxima na caçamba dianteira. Para isso detalhou-se a localização e descrição dos componentes envolvidos. Calculou-se o centro de gravidade da máquina para cálculo da força de reação no componente. Realizou-se a modelagem 3D e aplicou-se a análise de tensões por meio do *software Autodesk Inventor* versão estudante.

### 4.1 Localização dos componentes

O pivô inferior dianteiro da manga de eixo da retroescavadeira *CASE 580N* fica localizado na ponta do eixo, atrás das rodas dianteiras, auxiliando no giro das rodas. Esse sistema é utilizado por tratar-se de uma máquina que possui tração nas quatro rodas, e portanto, possui tração no eixo dianteiro. A Figura 2 demonstra a localização na retroescavadeira *CASE 580N* dos componentes em análise.

Figura 2 – Localização do componente em análise

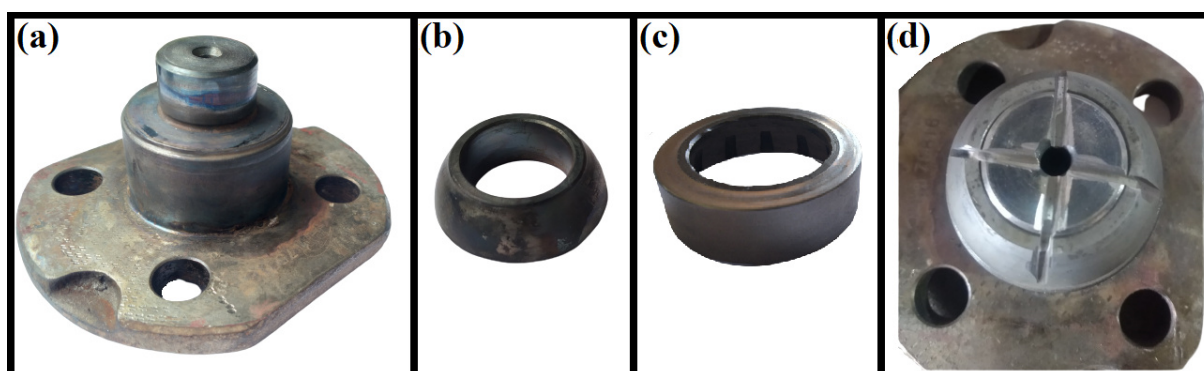


As Figuras 2(a) e 2(b) apresentam a localização dos componentes em análise. Na Figura 2(c) é possível observar os três elementos envolvidos neste estudo, sendo o pivô inferior, a rótula de contato angular (prensada na ponta do pivô inferior) e o mancal da rótula (que fica fixo a ponta do eixo, como é possível observar com detalhes na Figura 2(d)).

## 4.2 Pivô inferior dianteiro da manga de eixo

A Figura 3 apresenta a peça em análise juntamente com seus elementos.

Figura 3 – Componentes



Fonte: Próprio autor (2022)

A Figura 3(a) apresenta o pivô inferior dianteiro da manga de eixo (catalogada com o código 122264A1), que é o componente principal, responsável por proporcionar adequadamente o giro da roda.

A Figura 3(b) apresenta a rótula de contato angular, que vai prensada na ponta do pivô e recebe contato direto do mancal da rótula.

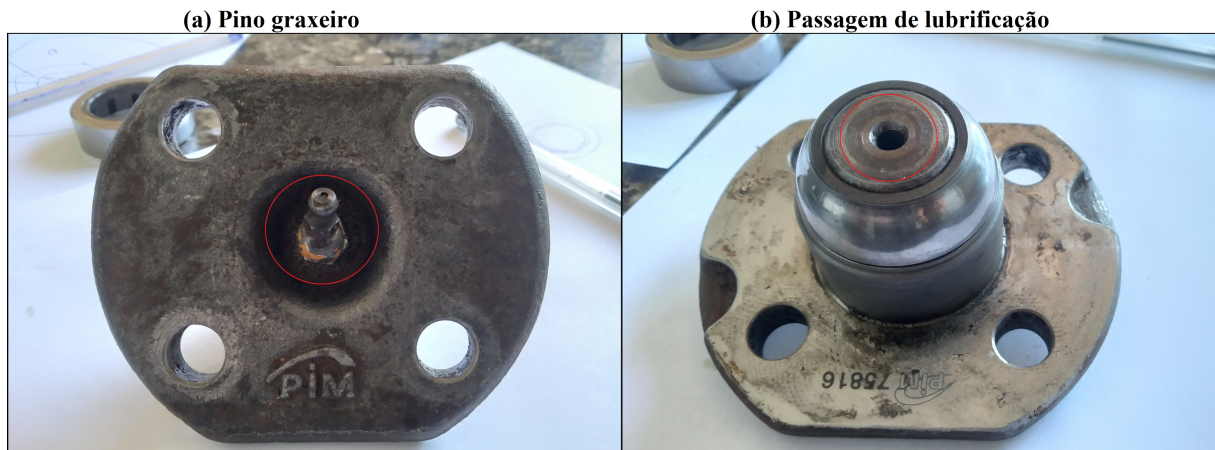
A Figura 3(c) apresenta o mancal da rótula, que fica fixo na ponta do eixo dianteiro da retroescavadeira, como pode ser visualizado na Figura 2(d). Esse elemento distribui o esforço sobre a rótula de contato angular e proporciona o giro do pivô, possuindo em sua face passagens para lubrificação e, em sua parte interna, aletas que auxiliam na passagem de lubrificação, transferência de calor e expulsão de contaminantes.

A Figura 3(d) apresenta o pivô com a rótula de contato angular acoplada, com a modificação já realizada, que consiste em um corte em cruz, na face dos dois elementos, criando canaletas para maior passagem de lubrificação. O objetivo do corte em cruz é facilitar e aumentar o fluxo de fluido lubrificante para o sistema de atuação dos componentes, conferindo conseqüentemente, maior vida útil ao sistema.

### 4.2.1 Passagem de lubrificação

A Figura 4 apresenta as localizações na peça (com a rótula acoplada, original, sem modificações), do pino graxeiro e da passagem de lubrificação respectivamente, circulos em vermelho.

Figura 4 – Pino graxeiro e passagem de lubrificação da peça



Fonte: Próprio autor (2022)

No caso em estudo é utilizado o pino graxeiro de dimensão 3/8", com inclinação de 45°.

### 4.3 Força de reação no componente

Para definição da força de reação realizada pelo componente em questão, foi adotado, como critério de análise, uma situação estática, com carga máxima suportada pela caçamba dianteira.

Utilizando conceitos do autor Hibbeler (2005), o primeiro passo para definição da força de reação no componente é definir o centro de gravidade da retroscavadeira.

#### 4.3.1 Cálculo do centro de gravidade

Segundo manual da fabricante CASE (2016), o modelo de retroscavadeira 580 N FPT F4GE9454K possui uma configuração de peso operacional (máquina pronta para uso), com tração nas quatro rodas, que faz com que o centro de gravidade da retroscavadeira fique localizado no centro do eixo das rodas traseiras, sem considerar a caçamba dianteira carregada, conforme observado na Figura 5.

Figura 5 – Centro de gravidade - Case 580N



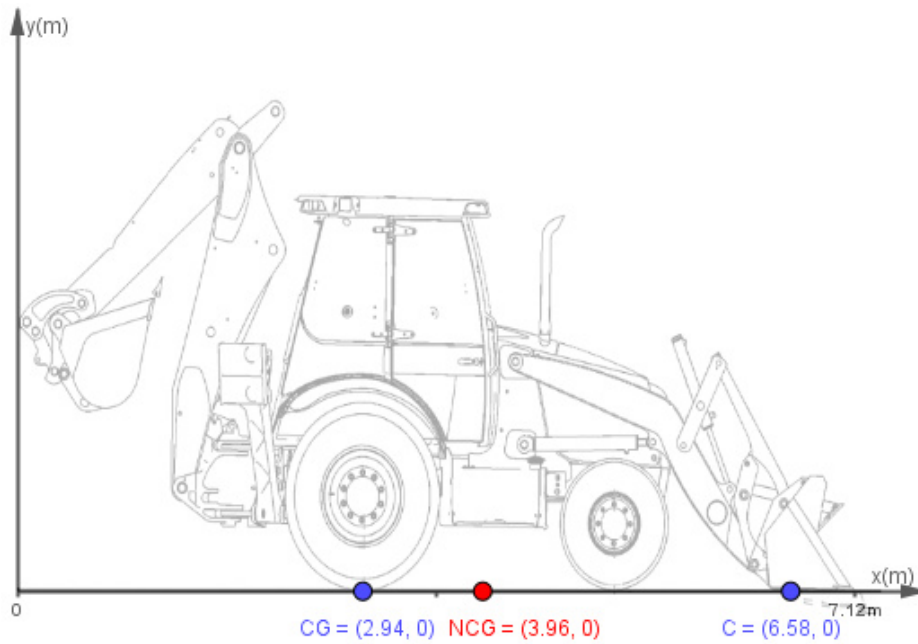
Fonte: Adaptado de CASE (2022)

Para considerar a massa faltante (caçamba dianteira carregada), torna-se necessário recalcular o centro de gravidade. Neste caso, o centro de gravidade coincide com o centro de massa, pois não há variação da gravidade na extensão da retroescavadeira. Para realização deste cálculo será considerado o acréscimo uniforme da massa faltante, não afetando o eixo  $z$ , em que para fins de cálculo, torna-se útil apenas a análise no eixo  $x$ . O centro de massa  $\bar{x}$  do sistema pode ser calculado pela Equação 5, dividindo a somatória da multiplicação das massas por suas respectivas localizações, pela soma das massas dos elementos envolvidos, partindo de um eixo referencial a ser definido.

$$\bar{x} = \frac{\int \bar{x} dm}{\int dm} \quad (5)$$

Tomando como base dados e informações obtidos no manual CASE (2016), com a utilização do *software* Geogebra, as massas, de acordo com as suas localizações, foram distribuídas em um plano cartesiano. Tomou-se como referência apenas o eixo  $x$ , como pode ser visto na Figura 6, que apresenta e ilustra no decorrer do comprimento da retroescavadeira os pontos CG (centro de gravidade da retroescavadeira, considerando a caçamba descarregada), com uma massa de 7.917 kg, C (centro de gravidade estimado da caçamba dianteira com o limite de massa suportada), com uma massa de 3.086 kg, e NCG (novo centro de gravidade, encontrado após o cálculo).

Figura 6 – Cálculo do centro de massa

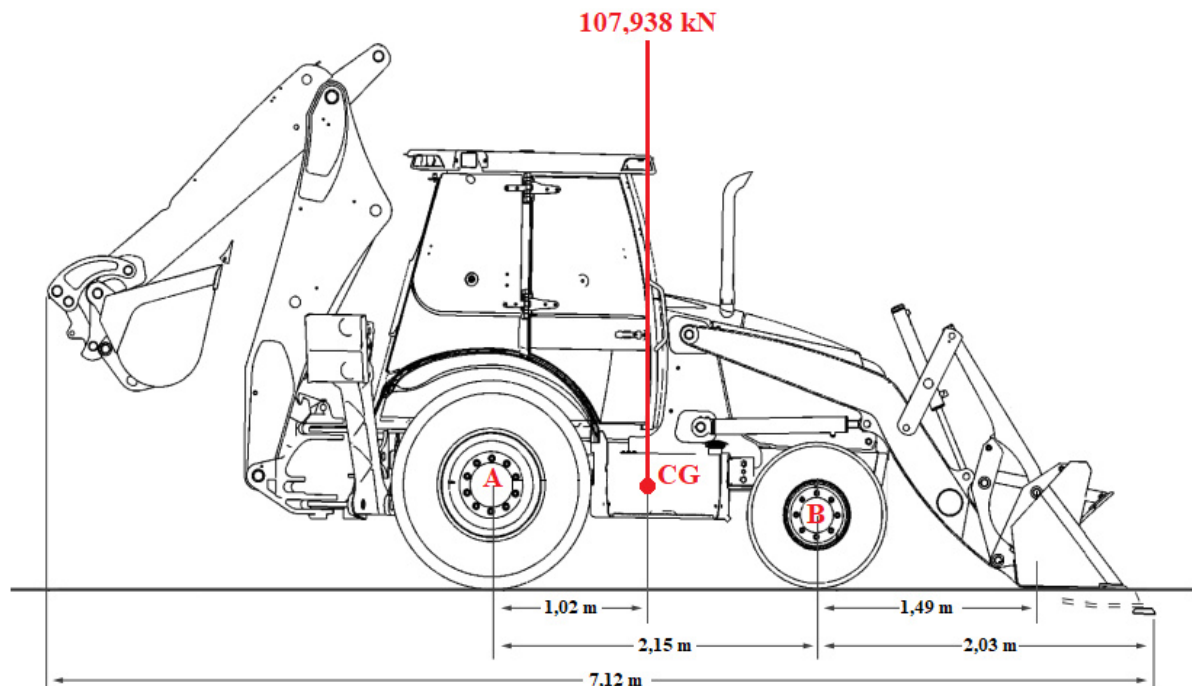


Fonte: Próprio autor (2022)

#### 4.3.2 Cálculo da força de reação no componente

Após a definição do novo centro de gravidade, pode-se calcular a força de reação exercida pelo componente. A Figura 7 aborda os dados obtidos até o momento na metodologia adotada, definindo o problema, com a concentração de todo o peso da retroscavadeira no novo centro de gravidade (CG), com pontos de referência para resolução do problema nos eixos traseiro e dianteiro (A e B), e suas respectivas localizações no corpo da máquina.

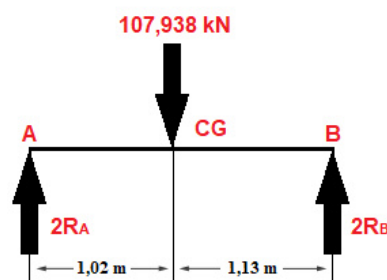
Figura 7 – Definição do problema



Fonte: Adaptado de CASE (2016)

Com a definição do problema, apresentada juntamente com os seus dados, o próximo passo para solução se dá na construção de um DCL (Diagrama de corpo livre), visto na Figura 8.

Figura 8 – DCL do problema



Fonte: Próprio autor (2022)

No DCL, o ponto A refere-se ao eixo das rodas traseiras, o ponto CG ao centro de gravidade da máquina e o ponto B ao local da peça. A reação no ponto B foi definida como  $2R_B$ , para identificação da reação em apenas um dos componentes dianteiros.

Para definição da reação no componente foi realizada a soma dos momentos, Equação 6, a partir do ponto A com sentido anti-horário positivo.

$$\circlearrowleft^+ \sum M_A = 0 \quad (6)$$

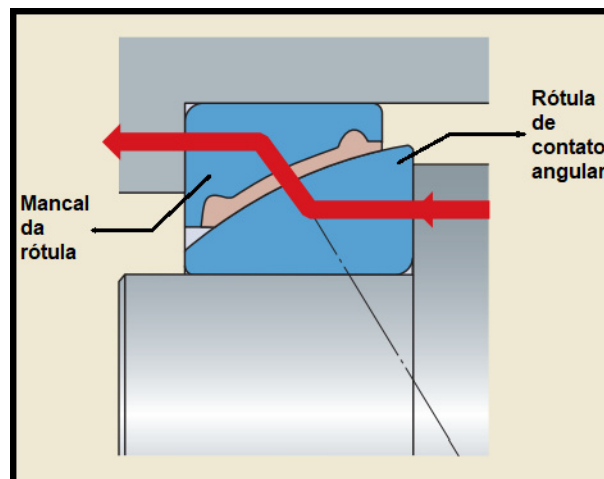
A reação encontrada foi de  $25,6 \text{ kN}$  no componente.

### 4.3.3 Força de reação no componente

O contato da força atuante no componente em análise é proporcionado pelo mancal da rótula (Figura 3(c)), o qual fica fixo na ponta do eixo dianteiro (Figura 2(d)).

De acordo com SKF (2013), as rótulas de contato angular possuem formato esférico com ângulo de inclinação, sendo portanto adequadas para suportarem cargas combinadas. A Figura 9 apresenta o comportamento da carga no corpo da rótula.

Figura 9 – Linha de carga na rótula



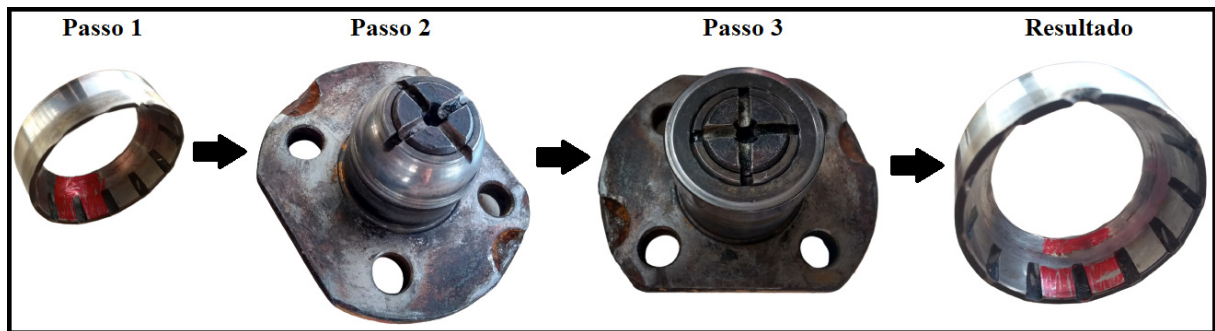
Fonte: Adaptado de SKF (2013)

Com o objetivo de obter a área na qual a força será distribuída na rótula, fez-se o seguinte experimento: tendo um conjunto de elementos já modificados que atuaram associados por um determinado período de tempo, verificou-se a teoria na prática, evidenciando a área de contato entre os elementos, conforme apresenta a Figura 10.

Para realização do experimento, pintou-se a área interna do mancal da rótula com uma tinta vermelha de fácil remoção (Passo 1, Figura 10). Esses elementos atuam sobrepostos, com a rótula acoplada ao pivô inferior (Passo 2, Figura 10), e ambos acoplados ao mancal da rótula (Passo 3, Figura 10). Portanto, fez-se a união desses elementos com a finalidade de simular o conjunto em operação. Para isso foi realizado o movimento de rotação entre os elementos manualmente.

Por fim, como resultado obteve-se uma faixa com ausência de tinta, na parte interior do mancal da rótula, indicando que o contato entre o mancal da rótula e a rótula, se dá de forma centralizada, conforme observado na teoria (Fig. 9).

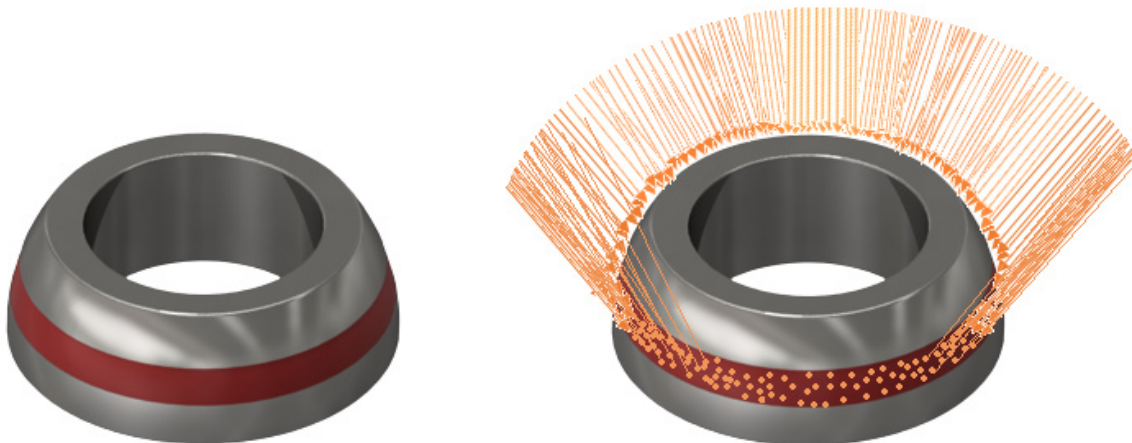
Figura 10 – Verificação da área de contato



Fonte: Próprio autor (2022)

Percebeu-se, com a realização deste ensaio, que o corte de modificação na rótula em questão, o qual possui profundidade de 2 mm, não atinge a área de contato detectada, que inicia-se a 3 mm abaixo da modificação. A força de reação encontrada para uma situação estática com carga máxima, de 25,6 kN, fica distribuída na área circular, evidenciada no mancal da rótula. Com utilização do *software Autodesk Inventor*, Figura 11, foi possível encontrar a área em questão na rótula angular, destacada em vermelho, que é de 512,091 mm<sup>2</sup>, com carga distribuída de 50 N/mm<sup>2</sup>.

Figura 11 – Representação da área e força distribuída

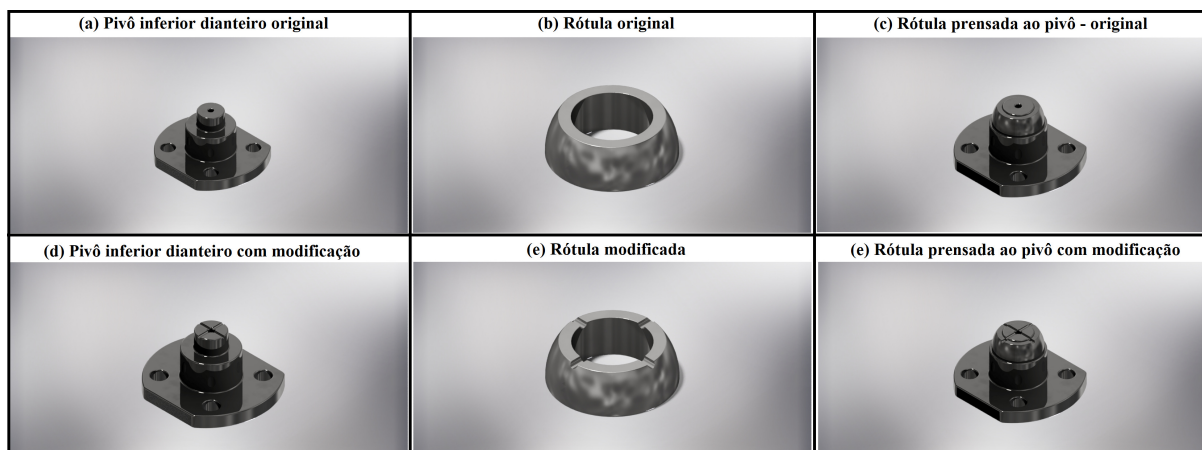


Fonte: Próprio autor (2022)

#### 4.4 Modelagem 3D

A Figura 12 apresenta a modelagem 3D realizada no *software Autodesk Inventor*, versão estudante, com vista em perspectiva, do componente em sua forma original e do componente com a modificação, para fins de comparação. A modelagem foi realizada a partir da medição de um exemplar da peça juntamente com seus componentes (a peça e seus componentes com a modificação podem ser vistos com mais detalhes no Apêndice A).

Figura 12 – Modelagem 3D do componente



Fonte: Próprio autor (2022)

#### 4.5 Análise de tensões pelo Método dos Elementos Finitos

Para realização da análise de tensões atuantes nos componentes pelo Método dos Elementos Finitos, no *software Autodesk Inventor*, foram definidos os materiais dos componentes e suas propriedades mecânicas, restrições e contatos dos componentes, esforços atuantes, geração de malha e configurações de convergência.

##### 4.5.1 Material dos componentes

Em consulta a fabricantes e revendedores, para o pino inferior dianteiro, definiu-se como material constituinte o aço SAE 1045, que é classificado como aço para construção mecânica. O aço passa pelo processo de forjamento a quente, que, de acordo com Filho *et al.* (1997), produz deformação plástica, que por sua vez confere dois efeitos ao metal. Tais efeitos são a mudança de forma e a melhoria das propriedades mecânicas, pois ocorre modificação e distribuição de seus constituintes, assim como o refinamento de grãos.

A Tabela 1 apresenta a composição química do aço SAE 1045, com o restante da concentração composto pelo elemento químico Ferro (Fe).

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 1045

Elemento químico	C	Mn	P	S
Concentração (%)	0,42 – 0,50	0,60 – 0,90	0,040 (máx)	0,050 (máx)

Fonte: Adaptado de LUZ (2017a)

De acordo com SKF (2022) as rótulas são constituídas de aço retificado de rolamento, com revestimento de cromo duro na superfície interna deslizante. Portanto, conforme referência, definiu-se, como material o aço SAE 52100, para análise. Sua composição química consta na Tabela 2, com o restante da concentração composto pelo elemento químico Ferro (Fe).

Tabela 2 – Composição química do aço SAE 52100

Elemento químico	Cr	Mn	C	Si	S	P
Concentração (%)	1,30 – 1,60	0,25 – 0,45	0,98 – 1,10	0,15 – 0,30	0,025 (máx)	0,025 (máx)

Fonte: Adaptado de LUZ (2017b)

Para análise, foram adotadas as propriedades mecânicas do aço SAE 1045 e SAE 52100 (Tabela 3), e criou-se os materiais na biblioteca do *software Autodesk Inventor*.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas adotadas para os aços

Aço	Comportamento	Mód. Young	Coef. Poisson	Mód. cisalhamento	Densidade	Lim. escoamento	Resist. tração
SAE 1045	Isotrópico	200 GPa	0,29	80 GPa	7,87 g/cm <sup>3</sup>	450 MPa	585 MPa
SAE 52100	Isotrópico	190 GPa	0,27	79,978 GPa	7,81 g/cm <sup>3</sup>	350 MPa	650 MPa

Fonte: Adaptado de LUZ (2017a, 2017b)

#### 4.5.2 Condições de contorno

As condições de contorno são entendidas como as restrições existentes na análise e os carregamentos impostos sobre a peça.

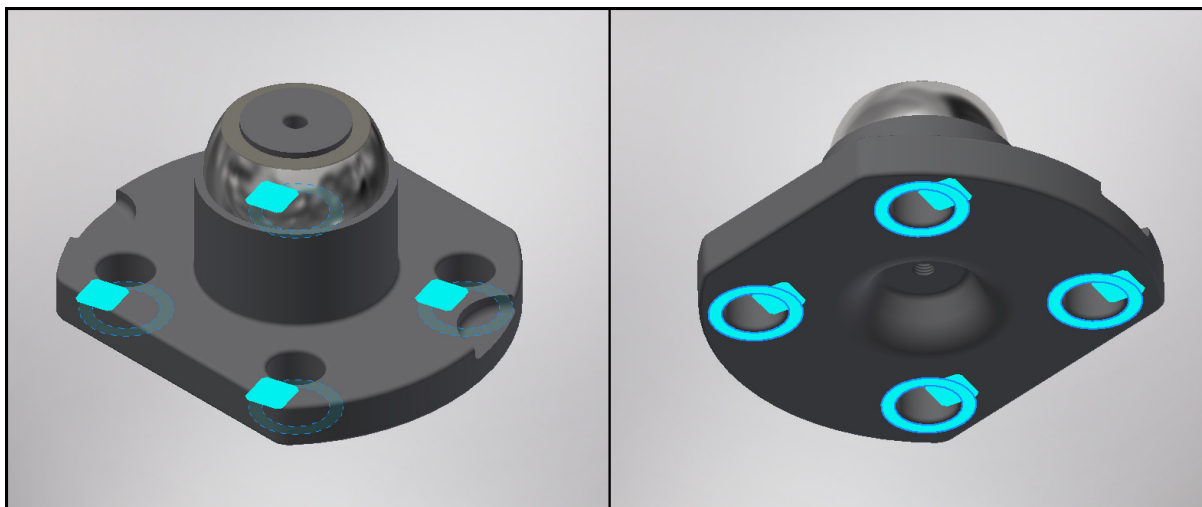
##### 4.5.2.1 Restrições

Após a definição dos materiais dos componentes e suas propriedades mecânicas, foram definidas as condições de contorno, como as restrições e o carregamento.

O contato entre a rótula de contato angular e o pivô inferior dianteiro foram definidos no *software* como *bonded*, ou seja, como contato vinculado, simulando uma união rígida entre as faces, entendendo como uma continuidade entre os elementos.

A restrição de movimento foi definida como fixa, ou seja, deixando a peça sem movimentação em nenhum dos eixos (x,y e z). Conforme demonstrado na Figura 13, a restrição foi posicionada em quatro áreas na parte inferior da peça. As áreas definidas simulam o contato entre a cabeça dos parafusos de fixação e a peça.

Figura 13 – Restrições



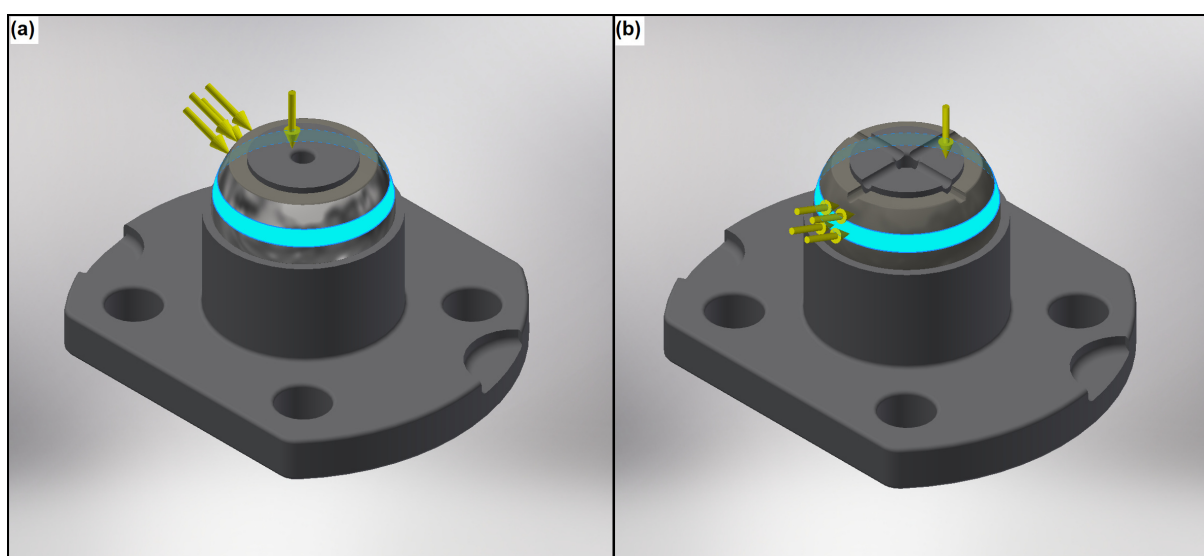
Fonte: Próprio autor (2022)

#### 4.5.2.2 Carregamentos

Dois esforços atuantes foram definidos na peça. A faixa azul na Figura 14 demonstra o local de aplicação da carga distribuída, sendo esta carga perpendicular à superfície destacada em azul. Conforme calculado na seção 4.3.3, o valor da carga é de 50 MPa.

O segundo esforço definido refere-se à força normal atuante na peça, demonstrada na Figura 14, pela seta vertical, na parte superior do corpo. O *software* registrou para a peça original (Figura 14(a)), uma massa de 0,985 kg, portanto, força normal de 9,66 N. Para a peça modificada (Figura 14(b)), foi registrada uma massa de 0,983 kg, portanto, força normal de 9,64 N.

Figura 14 – Esforços atuantes

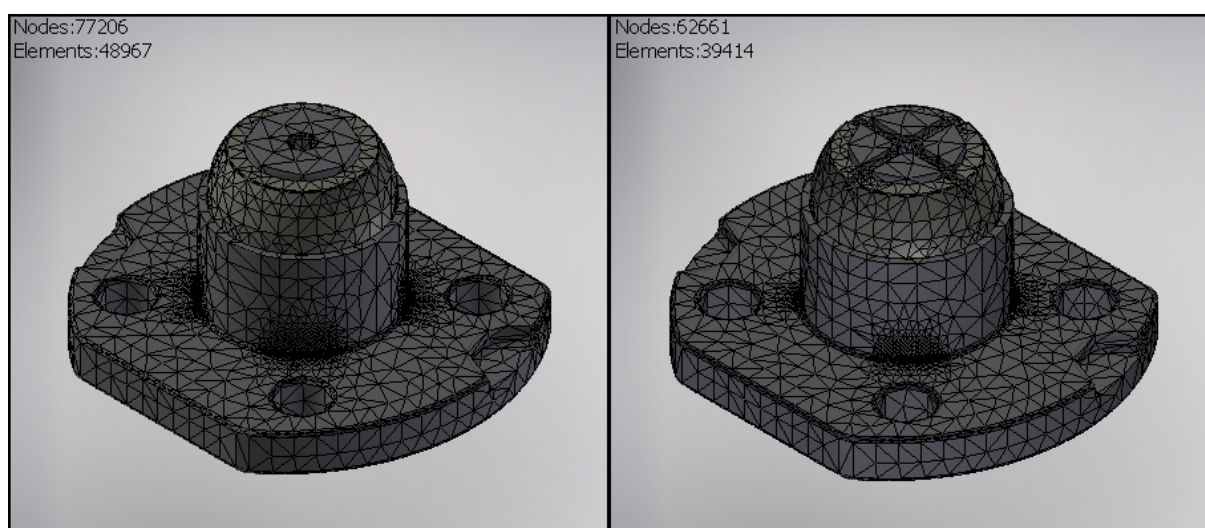


Fonte: Próprio autor (2022)

### 4.5.3 Geração de malha

A malha apresentada na Figura 15 foi elaborada de forma automática pelo *software*, gerando um total de 77.206 nós e 48.967 elementos para a peça original e 62.661 nós e 39.414 elementos para a peça modificada.

Figura 15 – Malha

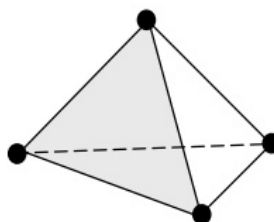


Fonte: Próprio autor (2022)

O elemento utilizado pelo *software* para análise é o tetraedro linear, que é rígido e formado por quatro nós, sendo um dos tipos de elementos utilizados para malhas sólidas tridimensionais, conforme Figura 16.

De acordo com Cook (1994 *apud* SCHAPPO *et al.*, 2017), este tipo de geometria possui em seus quatro nós três graus de liberdade translacional, tendo como vantagem uma boa representação no elemento das tensões constantes, e como desvantagem a perda de informações na ocorrência de momento fletor devido ao carregamento no elemento.

Figura 16 – Tetraedro de quatro nós



Fonte: Adaptado de Younis (2010)

Para a definição e geração da malha, o *software* adota critérios parametrizados, como o tamanho médio do elemento, que determina o tamanho do elemento com base no tamanho do modelo, o tamanho mínimo do elemento, em que o valor é relativo ao tamanho médio do elemento e permite o refinamento em áreas pequenas, o fator de nivelamento, determinando

o comprimento máximo das arestas de elementos adjacentes, e o ângulo máximo de giro, que implica na quantidade de elementos de superfícies curvas.

A Tabela 4 apresenta as configurações de geração de malha com a parametrização aplicada nas duas análises.

Tabela 4 – Parâmetros da malha

<b>Configuração de malha</b>	<b>Parâmetro</b>
Tamanho médio do elemento	0,1
Tamanho mínimo do elemento	0,2
Fator de nivelamento	1,5
Ângulo máximo de giro	60°
Criar elementos de malha curvo	Não
Usar medida baseada em peça para malha de montagem	Sim

Fonte: Próprio autor (2022)

#### 4.5.4 Configurações de convergência

A Tabela 5 apresenta as configurações de convergência aplicadas nas análises.

Tabela 5 – Configurações de convergência

<b>Configuração</b>	<b>Parâmetro</b>
Número máximo de refinamentos h	50
Critério de interrupção (%)	0,100
Limite de refinamento h (0 a 1)	0,750
Parâmetro a convergir	Tensão de Von Mises

Fonte: Próprio autor (2022)

O número máximo de refinamentos h indica a quantidade de ciclos de refinamento h para a convergência, em que o valor padrão é 0. Ao modificar o valor de h, altera-se o número de iterações de refinamento desejada. De acordo com Fernandes (2018), o refinamento ocorre de forma automatizada e na área que ocorre maior solicitação, satisfazendo o critério de parada o refinamento pode parar antes de completar o total de ciclos.

O critério de interrupção indica o valor em porcentagem referente a diferença dos dois últimos resultados, podendo ser interrompido com antecedência, caso não atinja o necessário até o término do número máximo definido de refinamentos h.

O limite de refinamento h aceita valores entre 0 e 1, em que o valor 0 inclui todos os elementos presentes na modelagem analisada como candidatos ao refinamento. O valor 1 exclui todos os elementos do processo de refinamento, ou seja, elimina o refinamento da análise. O valor padronizado e utilizado na análise é de 0,75, indicando que 25% dos elementos são candidatos ao refinamento.

## 5 RESULTADOS

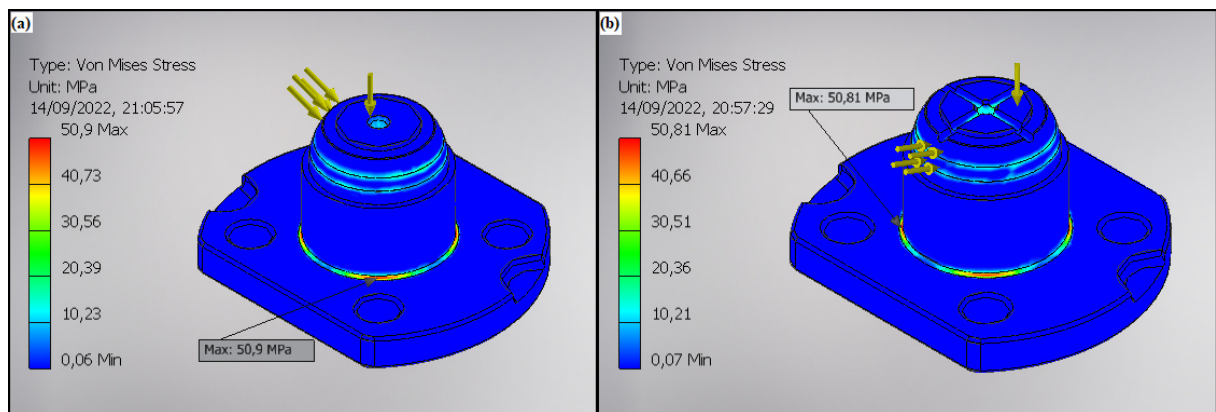
As seções a seguir apresentam os resultados obtidos através da análise de tensões por método dos elementos finitos pelo *software Autodesk Inventor*, abordando tanto para a peça original quanto para a peça modificada, a tensão de Von Mises e o deslocamento (acompanhados respectivamente de suas taxas de convergências), e o fator de segurança.

### 5.1 Tensão de Von Mises

Aplicando a carga de  $50,00 \text{ N/mm}^2$  (determinada na Seção 4.3.3), a peça original (Figura 17(a)), apresentou a tensão de Von Mises de  $50,90 \text{ MPa}$ . Já a peça modificada (Figura 17 (b)), apresentou uma tensão de  $50,81 \text{ MPa}$ . A coloração exibida no entalhe da peça modificada demonstra que a tensão no local da modificação não ultrapassou a faixa de  $30,51 \text{ MPa}$ .

A proximidade dos resultados evidencia que a modificação praticamente não surtiu efeitos quanto a tensão máxima sofrida pela peça. Conforme as propriedades mecânicas utilizadas para análise (Tabela 3), o limite de escoamento adotado para o pivô inferior dianteiro é de  $450 \text{ MPa}$ , e para a rótula de contato angular é de  $350 \text{ MPa}$ . A tensão máxima encontrada em ambas as peças (original e modificada), não ultrapassaram e nem se aproximaram do limite de escoamento dos componentes, eliminando assim o risco de falha.

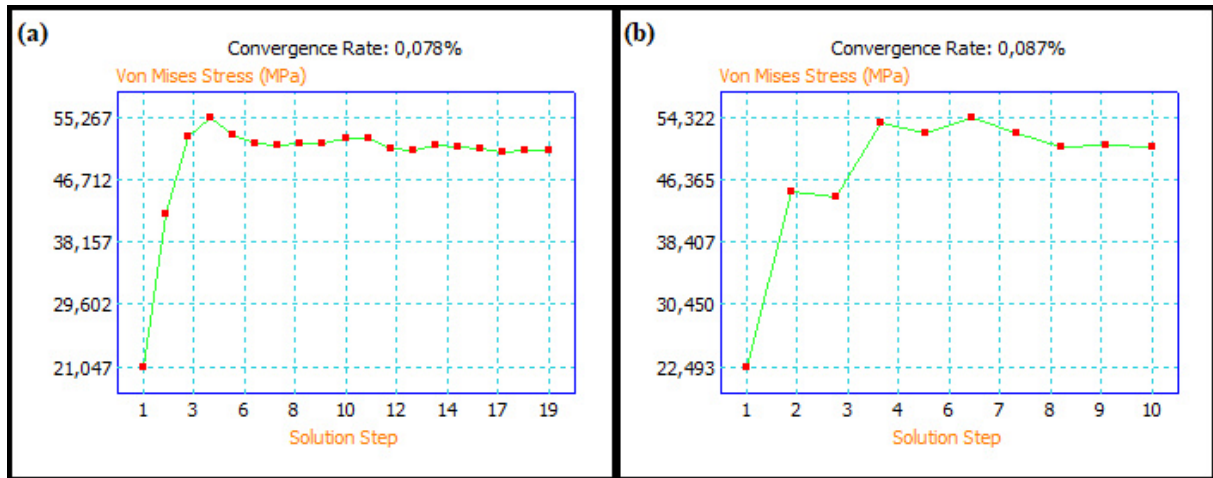
Figura 17 – Tensão de Von Mises



Fonte: Próprio autor (2022)

Conforme os parâmetros de convergência definidos na seção 4.5.4, o parâmetro a convergir com um critério de interrupção de  $0,1\%$ , é a tensão de Von Mises, em que, convergindo, interrompe o processo de análise para os outros resultados. A taxa de convergência para a peça original (Figura 18(a)), foi de  $0,078\%$ . A peça modificada (Figura 18(b)), teve uma taxa de convergência de  $0,087\%$ .

Figura 18 – Taxa de Convergência - Von Mises

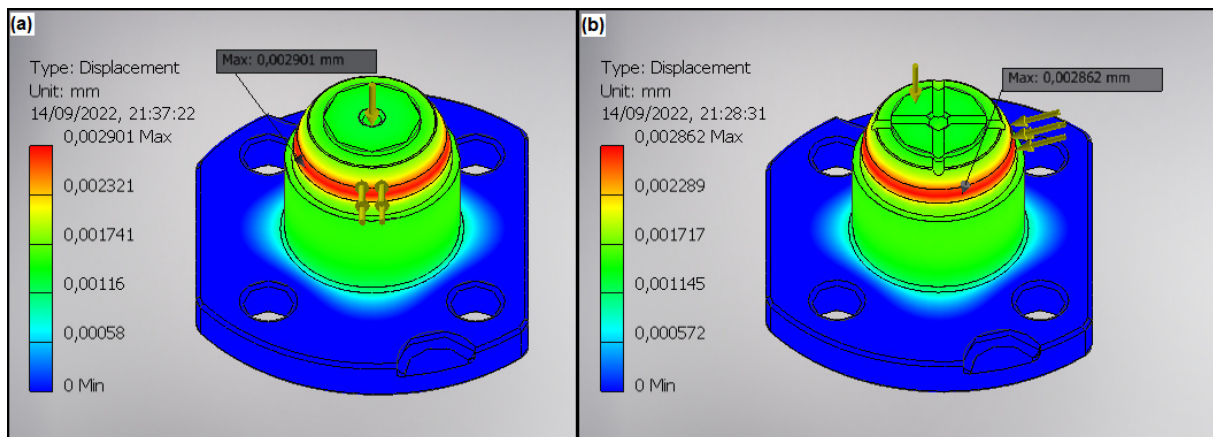


Fonte: Próprio autor (2022)

## 5.2 Deslocamento

Outro resultado apresentado pela análise refere-se ao deslocamento máximo sofrido pela peça. A peça original (Figura 19(a)), apresentou um deslocamento máximo de 0,002901 mm, na faixa de aplicação da força. A peça modificada (Figura 19(b)), apresentou um deslocamento de 0,002862 mm.

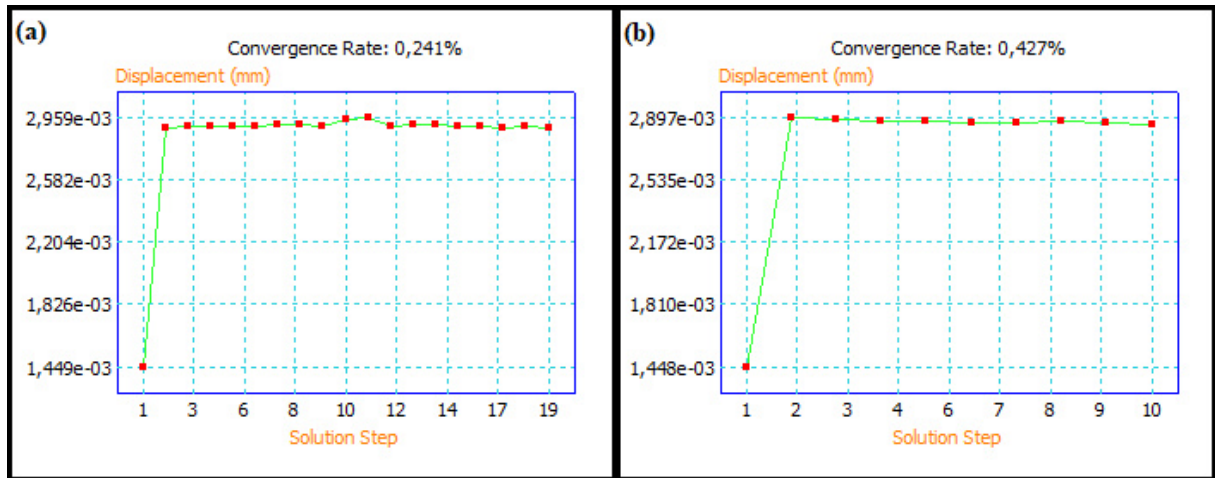
Figura 19 – Deslocamento



Fonte: Próprio autor (2022)

A taxa de convergência com relação ao deslocamento da peça original (Figura 20(a)), foi de 0,241%. Para a peça modificada (20(b)), a taxa de convergência foi de 0,427%.

Figura 20 – Taxa de convergência - Deslocamento



Fonte: Próprio autor (2022)

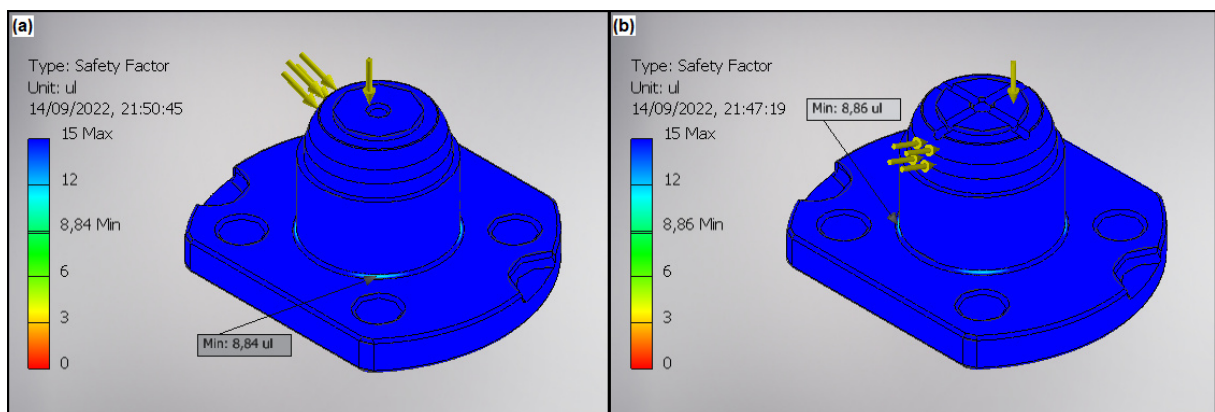
### 5.3 Fator de Segurança

Dentre os resultados apresentados pela análise, tem-se o fator de segurança.

De acordo com Fernandes (2018), com relação à tensão de Von Mises, torna-se necessário que o fator de segurança seja maior que 1 para evitar a ocorrência de falhas. O fator de segurança mínimo para a peça original (Figura 21(a)) foi de 8,84. Já o fator de segurança mínimo para a peça modificada (Figura 21(b)) foi de 8,86.

Dessa forma, visto que os resultados apresentados foram praticamente iguais, fica evidente que não haverá falha devido a modificação.

Figura 21 – Fator de segurança



Fonte: Próprio autor (2022)

## 6 CONCLUSÃO

O trabalho apresentado teve como finalidade analisar a viabilidade da modificação realizada no pivô inferior dianteiro da manga de eixo, em termos estruturais. Para isso foi definida a força de reação no componente através da análise de dados da retroescavadeira CASE 580N e experimentalmente da peça juntamente com seus componentes.

Realizou-se a modelagem 3D da peça no *software Autodesk Inventor* versão estudante 2019, definindo também o material dos componentes, suas restrições e contatos, os esforços atuantes, a geração de malha e as configurações de convergência, sendo possível aplicar a análise de tensões com o método dos elementos finitos por meio do *software*.

Foram obtidos os resultados quanto à tensão de Von Mises, o deslocamento e o fator de segurança, tanto para a peça original, quanto para a peça modificada.

Por fim, foi possível determinar, por meio dos resultados obtidos do fator de segurança, que para uma situação estática, com carga máxima suportada pela caçamba da retroescavadeira, a modificação realizada para aumento de lubrificação não oferece risco de falha para o componente.

Embora os resultados apresentados validem a modificação realizada para uma situação estática, torna-se possível o aperfeiçoamento do estudo, englobando também o sistema em estado dinâmico. Outro tema a ser explorado em trabalhos futuros, remete-se aos factíveis efeitos da temperatura de trabalho no sistema e na viscosidade do fluido lubrificante.

## REFERÊNCIAS

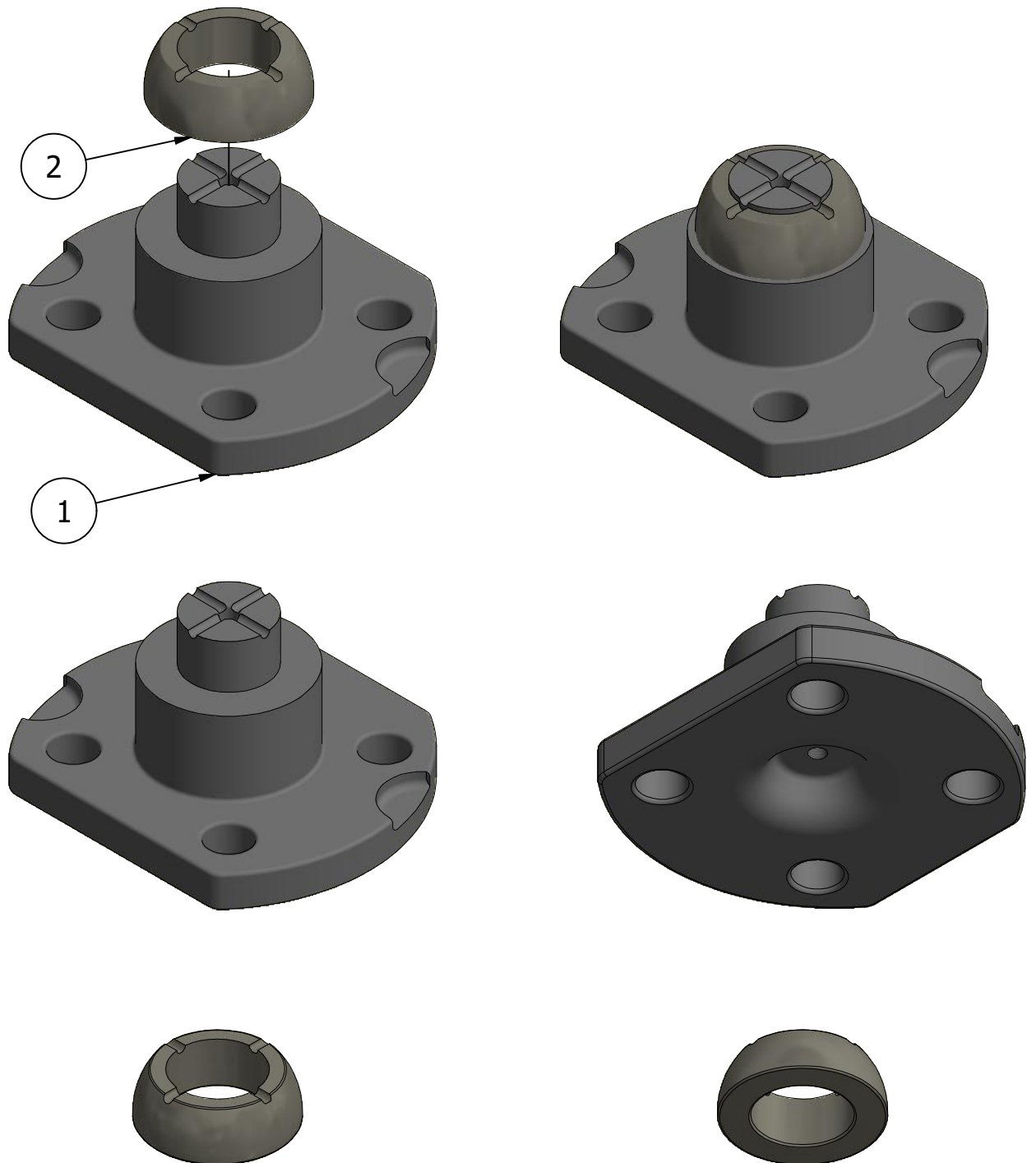
- BATISTA, F. A.; BRANT, L. F. V.; VIMIEIRO, C. B. S. Uso de técnicas de otimização de componentes mecânicos através de elementos finitos na indústria automotiva. **CONEM - VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2012.
- CASE. **Case Construction - 580N Backhoe Loader Tier 3 Certified**. [S.l.]: CASE Construction, 2016.
- CASE. **Equipamentos Retroescavadeira 580N**. 2022. Disponível em: <<https://www.casece.com/latam/pt-br/produtos/retroescavadeiras/retroescavadeiras/modelos/580N>>. Acesso em: 01 mai. 2022.
- COOK, R. D. **Modeling for Stress Analysis**. [S.l.]: New York: Wiley, 1994.
- FERNANDES, P. S. Projeto de estrutura para içamento e carregamento de chapas de aço. 2018.
- FILHO, E. B.; ZAVAGLIA, C.; BUTTON, S.; GOMES, E.; NERY, F. d. C. **Conformação plástica dos metais**. [S.l.]: Ed da Unicamp, 1997.
- FILHO, L. F. L. de M. **Análise estrutural e verificação da vida à fadiga de uma roda automotiva utilizando o Método dos Elementos Finitos**. Tese (Doutorado) — Master's thesis, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2007.
- HIBBELER, R. C. **Estática: mecânica para engenharia**. [S.l.]: Pearson Education do Brasil, 2005.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. [S.l.]: Pearson Educación, 2010.
- JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Projeto de Componentes de Máquinas**. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- LEGNANI, K. J. Z. *et al.* Procedimentos de otimização estrutural de componentes usando um programa comercial de elementos finitos. Florianópolis, SC, 2000.
- LUZ, G. Aço sae 1045 propriedades mecânicas e composição química. **Blog Materiais,[s. l]**, 2017.
- LUZ, G. Aço sae 52100 propriedades mecânicas e composição química. **Blog Materiais,[s. l]**, 2017.
- NORTON, R. L. **Norton, Projeto de máquinas, Uma abordagem integrada**. [S.l.]: Bookman e Artmed editora, 2013.
- NOVOTNY, A.; FANCELLO, E. Um refinamento h, pe hp adaptativo na análise de flexão de placas semi-espessas. Centro Internacional de Métodos Numéricos em Ingeniería, 1998.
- PADOVAN, L. A.; ANJOS, H. S.; NETTO, J. L. **Manutenção de tratores agrícolas**. [S.l.: s.n.], 2010.
- SCHAPPO, F. *et al.* Projeto estrutural de uma plataforma semissubmersível. 2017.
- SKF. **SKF spherical plain bearings and rod ends**. [S.l.]: SKF Group, 2013.

SKF. **Especificações do rolamento**. 2022. Disponível em: <<https://www.skf.com/br/products/plain-bearings/spherical-plain-bearings-rod-ends/angular-contact/bearing-data>>. Acesso em: 24 jun. 2022.

YOUNIS, W. **Up and running with Autodesk Inventor Simulation 2011: a step-by-step guide to engineering design solutions**. [S.l.]: Elsevier, 2010.

ZARICHTA, C.; CARDOSO, E. L. Aplicação da otimização de estruturas para componentes mecânicos. **Salão de Iniciação Científica (15.: 2003: Porto Alegre, RS). Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2003.**, 2003.

## APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO MECÂNICO



### LISTA DE COMPONENTES

ITEM	QUANTIDADE	PARTES	DESCRIÇÃO
1	1	Pino inferior dianteiro	Aço SAE 1045
2	1	Rótula	Aço SAE 52100

