

**LUCAS HIDEKI SIQUEIRA**

**Análise modal dos rolamentos da bomba de circulação do reator de polimerização**

**Lucas Hideki Siqueira**

**Análise modal dos rolamentos da bomba de circulação do reator de polimerização**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| S619a | <p>Siqueira, Lucas Hideki</p> <p>Análise modal dos rolamentos da bomba de circulação do reator de polimerização / Lucas Hideki Siqueira. – Guaratinguetá, 2019.</p> <p>54 f. : il.</p> <p>Bibliografia: f. 53-54</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia de mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.</p> <p>Orientadora: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva</p> <p>1. Processos de fabricação 2. Análise modais 3. Análise de elementos finitos 4. Polietileno I. Título</p> <p>CDU: 67.02</p> |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Pâmella Benevides Gonçalves  
Bibliotecária CRB-8: 9203

**LUCAS HIDEKI SIQUEIRA**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

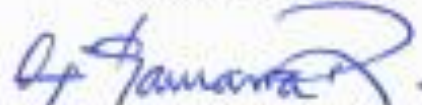
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**



Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA  
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. VICTOR ORLANDO GAMARRA ROSADO  
UNESP-FEG



Eng. GERALDO CESAR ROSARIO DE OLIVEIRA  
UNESP-FEG

## **DADOS CURRICULARES**

**LUCAS HIDEKI SIQUEIRA**

|                   |                                                                                                                                  |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>NASCIMENTO</b> | 14.04.1995 – São Caetano do Sul / SP                                                                                             |
| <b>FILIAÇÃO</b>   | Douglas Siqueira<br>Cristina Kazume Nakama Siqueira                                                                              |
| <b>2014/2019</b>  | Curso de Graduação em Engenharia Mecânica<br>Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”<br>Campus de Guaratinguetá |

Dedico este trabalho aos meus pais, Cristina e Douglas, por todos aprendizados e apoio para alcançar meus objetivos, e em memória de meus avós, Oscar, Maria Francisca Therezinha, Rioyer e Lúcia, que tiveram papel fundamental no desenvolvimento de meu caráter.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

aos meus pais *Cristina Kazume Nakama Siqueira e Douglas Siqueira*, que me educaram e sempre incentivaram meus estudos.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva* pela orientação, dedicação e auxílio, viabilizando o estudo aqui apresentado.

ao *Eng. Dr. Ulysses Padovani* pela orientação, auxílio e aprendizado sobre tecnologia em indústrias petroquímicas, contribuindo com o desenvolvimento deste trabalho.

aos funcionários da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Nós somos os representantes do cosmos;  
somos um exemplo do que os átomos de  
hidrogênio podem fazer, dados 15 bilhões de  
anos de evolução cósmica. ”

Carl Sagan

## RESUMO

Estudo de análise modal dos rolamentos da bomba de circulação do reator de polimerização para verificar se há risco de falha prematura por ressonância. Trata-se dos rolamentos de uma bomba de fluxo axial aplicada em um reator tipo *loop slurry* do processo de fabricação do polietileno de alta densidade. Na introdução, são apresentados a justificativa e o objetivo do trabalho. Na fundamentação teórica estão o descritivo do processo de fabricação do polietileno de alta densidade com reator *loop slurry*, conceitos utilizados na análise dos elementos finitos, análise modal e ressonância. A metodologia utilizou dados técnicos da bomba e dos rolamentos da mesma, espectros de frequência da análise de vibração dos mancais da bomba, ferramentas de modelagem CAD (Projeto auxiliado por computador) e de simulação CAE (Engenharia auxiliada por computador). O estudo se baseou no método dos elementos finitos para encontrar os modos de vibração e as frequências naturais do arranjo de rolamentos da bomba. A partir dos resultados da simulação e os espectros de frequência, foram calculados os fatores de amplificação do arranjo para conclusão do trabalho.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise modal. Método dos elementos finitos. MEF. CAD. CAE. Ressonância. Bomba de fluxo axial. Rolamentos. Processo de fabricação do polietileno de alta densidade.

## **ABSTRACT**

Modal analysis study of the polymerization reactor circulation pump bearings to verify if there is risk of premature resonance failure. These bearings belongs to an axial flow pump applied to a loop slurry reactor of the high density polyethylene manufacturing process. In the introduction, the rationale and purpose of the paper are presented. In the theoretical background, the descriptive process of manufacturing high density polyethylene with loop slurry reactor, concepts used in the finite element analysis, modal analysis and resonance are presented. The methodology used technical data of the pump and its bearings, frequency spectra of pump bearing vibration analysis, CAD (Computer Aided Design) and CAE (Computer Aided Engineering) simulation tools. The study was based on the finite element method to find the vibration modes and natural frequencies of the pump bearing assembly. From the simulation results and the frequency spectra, the amplification factors of the assembly to conclude the study were calculated.

**KEYWORDS:** Modal analysis. Finite element method. MEF. CAD. CAE. Resonance. Axial flow pump. Bearings. High density polyethylene manufacturing process.

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|           |                                                                                |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|
| CAD       | Projeto auxiliado por computador                                               |
| CAE       | Engenharia auxiliada por computador                                            |
| CAM       | Manufatura auxiliada por computador                                            |
| Empresa B | Empresa do ramo petroquímico que forneceu informações para conclusão do estudo |
| FEA       | Análise por elementos finitos                                                  |
| MEF       | Método dos elementos finitos                                                   |
| MRD       | Método da rigidez direta                                                       |
| 3D        | Tridimensional                                                                 |

## SUMÁRIO

|          |                                                                                                                    |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                                                                             | <b>11</b> |
| 1.1      | CONSIDERAÇÕES GERAIS.....                                                                                          | 11        |
| 1.2      | JUSTIFICATIVA .....                                                                                                | 11        |
| 1.3      | OBJETIVO .....                                                                                                     | 12        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                                                                                  | <b>13</b> |
| 2.1      | PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE<br>(PEAD) COM REATOR <i>LOOP SLURRY</i> .....              | 13        |
| 2.2      | ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS.....                                                                                  | 14        |
| 2.3      | PLANEJAMENTO DE UM TRABALHO DE ANÁLISE ESTRUTURAL.....                                                             | 17        |
| 2.4      | ANÁLISE MODAL.....                                                                                                 | 18        |
| 2.5      | RESSONÂNCIA .....                                                                                                  | 19        |
| <b>3</b> | <b>ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DE FALHA DOS ROLAMENTOS DA BOMBA<br/>DE CIRCULAÇÃO DO REATOR DE POLIMERIZAÇÃO .....</b> | <b>21</b> |
| 3.1      | CONTEXTO.....                                                                                                      | 21        |
| 3.2      | CONDIÇÕES DE CONTORNO.....                                                                                         | 21        |
| 3.3      | CLASSIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA E DISCUSSÕES .....                                                                | 21        |
| <b>4</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                                                                   | <b>25</b> |
| 4.1      | BOMBA DE CIRCULAÇÃO DO REATOR DE POLIMERIZAÇÃO.....                                                                | 25        |
| 4.2      | ROLAMENTOS DA BOMBA.....                                                                                           | 26        |
| 4.3      | ANÁLISE DE VIBRAÇÃO DA BOMBA.....                                                                                  | 29        |
| 4.4      | SOFTWARE <i>AUTODESK FUSION 360®</i> .....                                                                         | 31        |
| 4.5      | MODELAGEM E MONTAGEM DO CONJUNTO .....                                                                             | 32        |
| 4.6      | CARGAS APLICADAS.....                                                                                              | 38        |
| 4.7      | GERAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS .....                                                                        | 40        |
| 4.8      | TOLERÂNCIAS DE CONTATO .....                                                                                       | 42        |
| 4.9      | COMPONENTES CONSIDERADOS FIXOS .....                                                                               | 43        |
| 4.10     | MATERIAIS DOS COMPONENTES .....                                                                                    | 43        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                                                                                | <b>45</b> |
| 5.1      | MODOS DE VIBRAÇÃO DE FREQUÊNCIAS NATURAIS.....                                                                     | 45        |
| 5.2      | FATOR DE AMPLIFICAÇÃO.....                                                                                         | 51        |
| <b>6</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                                                                  | <b>53</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                                                            | <b>54</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A análise modal é usada em vários aplicativos de simulação e teste, incluindo cálculos de resposta de vibração, análise de causa raiz de problemas de vibração e detecção de danos. Os cálculos baseados em modos são muito eficientes e permitem a avaliação de novos projetos e alterações estruturais. (SIEMENS, 2019).

No ambiente industrial, a análise modal é muito utilizada na validação de alterações de projeto quando um componente será remodelado. Outra aplicação muito recorrente, principalmente por engenheiros de confiabilidade, é como ferramenta de suporte para análise de falhas. A análise modal consegue identificar os modos de falha. Para que uma análise de causa raiz seja bem sucedida, é fundamental conhecer os modos de falha da aplicação. Esta ferramenta consegue identificar as regiões que sofrem os maiores deslocamentos nodais, expondo as fragilidades da aplicação. Além disso, a ferramenta também fornece as frequências naturais para verificar se a ressonância pode ser considerada um modo de falha na aplicação. (PRÓPRIO AUTOR, 2019).

### 1.2 JUSTIFICATIVA

A faculdade de engenharia de Guaratinguetá está instalada longe dos pólos petroquímicos do estado de São Paulo. Portanto, o curso aborda mais exemplos de outros tipos de indústria. A experiência adquirida durante estágio supervisionado em uma planta petroquímica serviu de grande inspiração e conhecimento para escolha do tema.

Além disso, no curso de engenharia mecânica pouco não há matérias obrigatórias sobre ferramentas de simulação CAE, conhecimento indispensável para o engenheiro mecânico que deseja trabalhar na área industrial. Este trabalho complementa as habilidades técnicas do engenheiro mecânico, e também fornece conhecimento sobre sistemas produtivos da indústria petroquímica.

Durante experiência no departamento de manutenção e confiabilidade de uma empresa petroquímica, o autor participou de análises de causa raiz em equipamentos rotativos. Em um destes aprendizados, foi recomendado realizar uma análise modal para complementar o estudo. Este caso será citado no escopo deste trabalho.

### 1.3 OBJETIVO

Os principais objetivos deste trabalho são verificar se os rolamentos da bomba de circulação do reator abordados do estudo podem sofrer falha prematura por ressonância e se capacitar no uso de ferramentas CAE. Espera-se também obter conhecimento sobre máquinas rotativas de grande criticidade utilizadas em indústrias petroquímicas, além de aprender sobre o processo produtivo do polietileno de alta densidade.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (PEAD) COM REATOR *LOOP SLURRY*

O processo produtivo do polietileno é em operação contínua que polimeriza o etileno na presença de um catalisador dentro de um reator. Trata-se de uma reação exotérmica. O diluente isobutano e a bomba de circulação do reator são utilizados para manter o catalisador e o polímero em suspensão turbulenta. O isobutano é utilizado também tanto para remover o calor gerado pela reação como veículo de suprimento de etileno e hidrogênio para o reator. O reator opera em uma faixa de temperatura entre 78 e 108 °C e aproximadamente 45,9 Kg/cm<sup>2</sup> de pressão manométrica na descarga da bomba de circulação do reator.<sup>1</sup>

Figura 1 – Reator tipo *loop slurry* utilizado para polimerização de olefinas.



Fonte: Flowserve Corporation (2014).

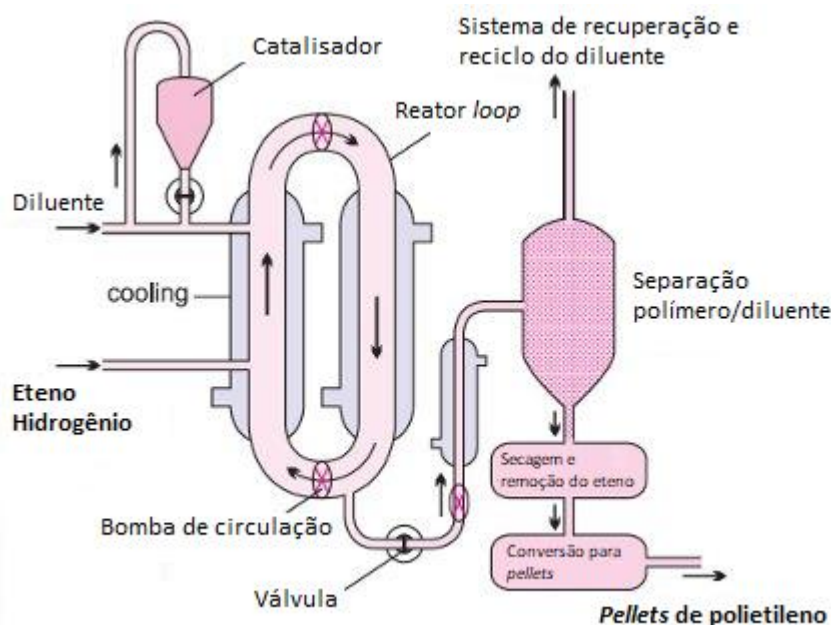
No reator há uma mistura de líquido e polímero em forma de felpas, conhecida como *slurry*. Parte do conteúdo do reator é continuamente transferido para um vaso separador, onde

---

<sup>1</sup> Informações obtidas pelo manual de operação da empresa B, a qual solicitou para não ser identificada.

a maioria da mistura é separada do polímero a partir do aquecimento e redução da pressão. As felpas e o hidrocarboneto remanescente escoam por gravidade para a coluna de purga e são separados por uma corrente de nitrogênio aquecido. O hidrocarboneto separado é condensado e bombeado para o sistema de recuperação, e em seguida retornam para o reator. O polímero em forma de felpa é transferido para composição e finalização onde aditivos químicos são adicionados. As felpas são fundidas em uma extrusora e é realizada a extrusão através de uma matriz submersa em água para formação dos *pellets* (pequenos grãos de polietileno). Os *pellets* são transferidos por um equipamento de transporte pneumático para os silos da extrusão e finalmente chegarem no ensaque do produto.<sup>2</sup>

Figura 2 – Esquema simplificado do processo de fabricação do polietileno de alta densidade.



Fonte: Essential Chemical Industry (2017).

Neste caso, esta unidade possui apenas um reator e uma extrusora, e tem capacidade de produção de 300 KTPA (mil de toneladas de polietileno por ano) com uma taxa de produção de 22.800 a 32.600 kg/h, variando de acordo com o tipo de resina que está sendo produzida.<sup>3</sup>

## 2.2 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

<sup>2 3</sup> Informações obtidas pelo manual de operação da empresa B, a qual solicitou para não ser identificada.

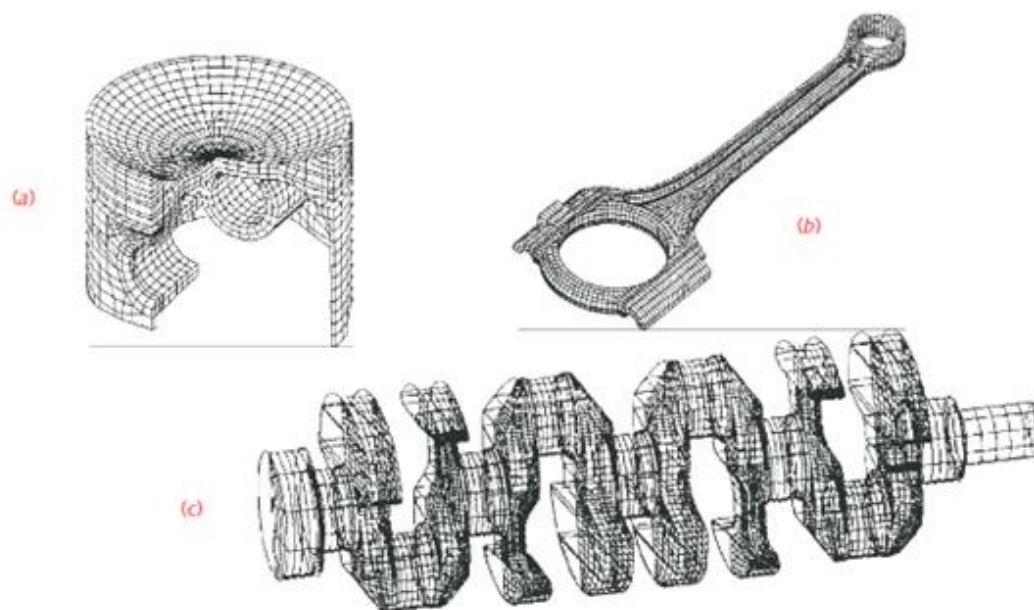
Os sistemas CAD para modelagem 3D geralmente oferecem uma interface para um ou mais programas de análise de elementos finitos e permitem transferência direta da geometria do modelo para o programa de simulação para análise de tensões, vibrações e transferência de calor. Alguns sistemas de CAD já incluem a capacidade de geração de malhas que cria uma malha de elementos finitos automaticamente antes de enviar os dados para o software de simulação. (NORTON, 2013).

Existe um risco em se utilizar dessas técnicas sem uma compreensão sólida da teoria por trás delas. Esses métodos sempre levarão a alguns resultados. Porém, esses resultados podem ser incorretos se o problema não for bem formulado ou se não tiver uma malha adequada com os limites corretamente aplicados. Ser capaz de reconhecer os resultados incorretos de uma solução encontrada com o auxílio do computador é extremamente importante para o sucesso de qualquer projeto. (ALVES FILHO, 2000).

É próprio da mente humana subdividir os sistemas em seus componentes individuais, ou em seus elementos. Desta forma, a partir do entendimento do comportamento de cada elemento, é possível entender o comportamento do conjunto, ou seja, compreender o todo entendidas as partes. Esse raciocínio tem implicações também nos métodos matemáticos utilizados para a descrição do comportamento dos sistemas. A questão é como identificar os elementos de um sistema. (ALVES FILHO, 2000).

As tensões variam através do contínuo de qualquer componente. Dividindo esse componente em um número finito de elementos discretos conectados pelos seus nós (chamados de malha), pode-se obter uma aproximação das tensões e deformações, em qualquer parte do componente, para um dado conjunto de condições de contorno e de cargas aplicadas em alguns nós da estrutura. A aproximação pode ser melhorada pelo uso de mais elementos de tamanho menor, ao custo do aumento do tempo de processamento. Com as atuais velocidades de processamento (que continuarão aumentando no futuro) o problema será menor do que nos primeiros dias de uso do FEA. Parte do problema do analista é escolher o tipo apropriado, o número e a distribuição de elementos para otimizar o dilema entre precisão e o tempo de processamento. Os elementos de maior tamanho podem ser usados em regiões da peça onde o gradiente (inclinação) de tensão varia suavemente. Nas regiões onde o gradiente de tensão muda rapidamente, próximo a concentrações de tensão ou cargas aplicadas, por exemplo, uma malha mais fina (refinada) é necessária. (NORTON, 2013).

Figura 3 – Modelos de elementos finitos para pistão (a), biela (b) e virabrequim (c) de um motor.



Fonte: Cortesia da General Motors. Co. (2013).

O método dos elementos finitos não é limitado à análise estrutural. Ele também é utilizado em problemas de mecânica dos fluidos, transferência de calor, acústica, eletromagnetismo e outros problemas mais especializados. É possível trabalhar com sistemas não lineares nos quais as deformações ultrapassam os limites assumidos para a análise linear estática, as propriedades dos materiais são não lineares ou o contato entre as superfícies deve ser modelado. Neste trabalho só será abordado seu uso em problemas de análise estrutural linear. O FEA fornece informações sobre tensões, deformações, deflexão, frequências naturais e modos de vibração (autovalores e autovetores), impacto e vibrações estruturais transientes ou em regime permanente. (NORTON, 2013).

Muitas formulações matemáticas diferentes têm sido propostas e utilizadas desde 1956, quando o método dos elementos finitos foi programado pela primeira vez. A abordagem utilizada pela maioria dos softwares comerciais é o Método da rigidez direta (MRD), que utiliza a rigidez do elemento para calcular os deslocamentos nodais e as forças internas resultantes de um conjunto de cargas externas aplicadas e das condições de contorno. As deformações são calculadas a partir dos deslocamentos e as tensões pela lei de Hooke. (NORTON, 2013).

Os conceitos mecânicos utilizados na análise de elementos finitos são os seguintes:

- Equilíbrio de forças

Considerando a condição de equilíbrio da estrutura, podemos aplicar as equações de equilíbrio do estudo da mecânica a cada um dos elementos isoladamente. A condição de equilíbrio pode ser aplicada internamente a cada elemento. Se o elemento está em equilíbrio, uma parte dele também se encontra em equilíbrio. (ALVES FILHO, 2000).

- Compatibilidade de deslocamentos

Os elementos conectados por um nó mantêm-se conectados no mesmo nó na condição deformada. As extremidades dos elementos conectados por um nó estão sujeitas aos mesmos componentes de deslocamentos. (ALVES FILHO, 2000).

- Lei de comportamento do material

Ao transmitir os esforços ao longo da estrutura, os elementos se deformam. Os esforços são transmitidos pelos elementos por intermédio de esforços internos. Quando o nível dos esforços não for muito elevado, as forças internas crescem proporcionalmente às deformações. Essa relação linear constitui a Lei de Hooke. (ALVES FILHO, 2000).

- Matriz rigidez de uma estrutura

Nas estruturas reais temos muitos componentes de deslocamento e muitos componentes de rigidez. A relação geral linear entre todas as forças externas e todos os deslocamentos nodais é melhor expressa em notação matricial. (ALVES FILHO, 2000).

$$\{F\} = [K]. \{U\} \quad (1)$$

Onde:

$\{F\}$  = Matriz coluna com todas as cargas nodais

$[K]$  = Matriz quadrada contendo os coeficientes de rigidez

$\{U\}$  = Matriz coluna com todos os deslocamentos nodais

## 2.3 PLANEJAMENTO DE UM TRABALHO DE ANÁLISE ESTRUTURAL

É recomendado realizar os passos seguintes para evitar retrabalhos quando for iniciar um novo estudo de engenharia CAE. (ALVES FILHO, 2000).

- Estabelecer os objetivos da Análise. Que tipo de resposta o modelo investiga?
- Determinar a parte da estrutura a ser modelada.
- Definir as cargas e os pontos de vinculação da estrutura.
- Avaliar as expectativas de comportamento, ou seja, existe algum comportamento esperado e que deva ser refletido pelo modelo ao obter resultados?

- Definir a malha de elementos finitos a ser utilizada, com base no conhecimento dos elementos disponíveis, e no tipo de estrutura a ser analisada. Estabelecer a correspondência entre o comportamento físico da estrutura e os elementos formulados para representar esse comportamento. Criar os dados de entrada no software de elementos finitos.
- Verificar o modelo em elementos finitos construído.
- Processar a análise pelo método dos elementos finitos
- Verificar os resultados obtidos e avaliar a sua coerência com as expectativas de comportamento estabelecidas no início do processo de análise
- Caso a estrutura não atenda aos critérios estabelecidos, modificar o modelo proposto em função das alterações geométricas introduzidas na estrutura e reiniciar a análise.

## 2.4 ANÁLISE MODAL

A análise modal é o processo constituído de técnicas teóricas e experimentais que possibilitam a construção de um modelo matemático representativo do comportamento dinâmico do sistema em estudo, a fim de determinar os seus parâmetros modais: as frequências naturais, os modos de vibração e os fatores de amortecimento modal. Tais parâmetros são frequentemente determinados por métodos teóricos, por exemplo, utilizando-se o Método dos Elementos Finitos. Em outras situações, o modelo matemático sequer existe; assim, os parâmetros modais podem ser determinados experimentalmente. Ou, mesmo que ele exista, a abordagem experimental pode servir para a verificação e validação dos resultados do modelo analítico. As frequências naturais indicam a taxa de oscilação livre da estrutura, após cessada a força que provocou o seu movimento. Em palavras similares, representa o quanto a estrutura vibra quando não há força aplicada sobre ela. Esta frequência é função direta da rigidez, e inversa da massa da estrutura, sendo designada por um número real positivo. Uma estrutura possui diversas frequências naturais pois ela pode vibrar livremente (após ter sido excitada por uma força) em diversas direções. A frequência natural mais importante é a primeira, menor entre todas, designada por fundamental. Os modos de vibração são a forma como a estrutura vibra, relacionada a cada uma de suas frequências naturais. Ou seja: para cada frequência natural existe um modo de vibração específico, ou um perfil de vibração. O amortecimento da estrutura é a sua propriedade interna de dissipar energia. Uma estrutura posta para vibrar, após cessada a força oscilará algumas vezes e voltará ao repouso. A taxa de amortecimento dissipará aquela energia cinética inerente ao movimento até parar.

Matematicamente, pela via teórica, o problema de calcular as frequências naturais e os modos de vibração da estrutura, considerando-a já discretizada por nós e não amortecida, pode ser formulado pela expressão a seguir. (NÓBREGA; DE HANAI, 2005).

$$(K - \omega^2 M) \phi = 0 \quad (2)$$

Este é um típico problema de autovalores e autovetores, e cada um dos termos significa:

$K$  = matriz de rigidez da estrutura conhecida;

$M$  = matriz de massa da estrutura, conhecida;

$\omega$  = autovalores, as frequências naturais, números reais positivos, a serem calculados;

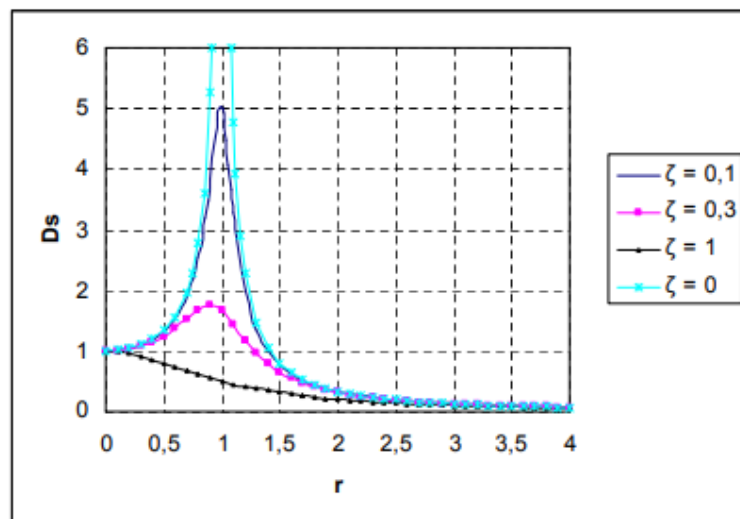
$\phi$  = autovetores, os modos de vibração, vetores, a serem calculados;

## 2.5 RESSONÂNCIA

Uma análise dinâmica tem objetivo de afastar as frequências naturais das frequências de excitação, mantendo as amplitudes de vibração com valores admissíveis e evitando o fenômeno de ressonância. (ASSUNÇÃO, 2009).

O fenômeno de ressonância ocorre apenas em sistemas não amortecidos. O gráfico abaixo representa o fator de amplificação ( $D_s$ ) versus razão frequência de excitação/frequência natural ( $r$ ). Observa-se que para  $r = 1$  e amortecimento ( $\zeta$ ) = 0, o valor  $D_s$  tende ao infinito. Essa situação é o fenômeno de ressonância. (ASSUNÇÃO, 2009).

Figura 4 – Fator de amplificação versus razão de frequência de excitação/frequência natural.



Fonte: Assunção (2009).

O fator de amplificação é definido como a razão da amplitude da resposta ( $U$ ) e a deflexão estática ( $U_0$ ):

$$Ds = \frac{U}{U_0} = \frac{1}{\sqrt{[(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2]}} \quad (3)$$

### **3 ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DE FALHA DOS ROLAMENTOS DA BOMBA DE CIRCULAÇÃO DO REATOR DE POLIMERIZAÇÃO**

#### **3.1 CONTEXTO**

A bomba de circulação do reator do estudo apresentou falha prematura em um dos rolamentos axiais autocompensadores de rolos projetados no conjunto rotativo (lado do rotor). Os rolamentos operaram por aproximadamente 10.000 horas, tempo de vida considerado insatisfatório pelo fabricante. O evento ocorreu durante uma partida de planta, quando os mancais atingiram temperaturas em torno de 100°C. Os laudos anteriores de análise de vibração não indicavam falha no rolamento. Neste estudo foram abordados tanto a análise de falha do rolamento, quanto os resultados de uma simulação efetuada com o arranjo dos rolamentos.<sup>4</sup>

#### **3.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO**

- Rotação 1792 rpm;
- Potência do motor 2 MW;
- Pré carga por molas 9,3 kN;
- Rigidez da mola 147 N/mm;
- Folga axial do arranjo após a montagem 0,127-0,203 mm;
- Forças axiais 71-80 kN;
- Efeitos térmicos e dinâmicos não incluídos;
- Componentes considerados rígidos;
- Temperatura operacional: anel interno 60 °C, anel externo 50 °C, caixa de mancal 45 °C, eixo 55 °C;
- Massas dos componentes consideradas: rotor 84 kg, eixo 315 kg;
- Forças radiais apenas provenientes da massa do eixo e rotor.

#### **3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA E DISCUSSÕES**

A seguir figuras dos componentes do arranjo obtidas durante investigação da falha.

---

<sup>4</sup> Todas as informações deste capítulo foram fornecidas pela empresa B em estudo, a qual solicitou para não ser identificada.

Figura 5 – Gaiola do rolamento SKF 29326E.



Fonte: Empresa B. (2016).<sup>5</sup>

Figura 6 – Anel externo do rolamento SKF 29326E.



Fonte: Empresa B. (2016).<sup>6</sup>

---

<sup>5 6</sup> Imagens concedidas pela empresa B em estudo, a qual solicitou para não ser identificada.

Figura 7 – Molas utilizadas na montagem do rolamento SKF 29326E.



Fonte: Empresa B. (2016).<sup>7</sup>

Figura 8 – Anel interno do rolamento SKF 6224.



Fonte: Empresa B. (2016).<sup>8</sup>

---

<sup>7 8</sup> Imagens concedidas pela empresa B em estudo, a qual solicitou para não ser identificada.

Pelo desenho do arranjo dos rolamentos, o diâmetro externo dos rolamentos axiais autocompensadores de rolos não deve ter contato com a caixa de mancal, garantindo assim somente esforços axiais. Porém, foi possível confirmar o contato do diâmetro externo do rolamento com a caixa de mancal. A figura 6 apresenta desgaste abrasivo e fadiga subsuperficial no anel externo, a figura 5 apresenta deformação plástica e fratura por sobrecarga da gaiola deste rolamento, confirmando esta hipótese. Foi recomendado que a folga entre o diâmetro externo do rolamento e a caixa de mancal seja aumentada para 2,5 mm (atual 0,50-0,55 mm) no diâmetro.

A figura 7 apresenta molas de pré-carga dos rolamentos 29326E, a mola à esquerda é nova enquanto a mola à direita foi utilizada na falha e está deformação permanente. A figura 8 apresenta uma trinca causada por fratura térmica no anel interno do rolamento 6224. Ambos efeitos foram ocasionados pelas altas temperaturas atingidas no decorrer da falha.

O estudo concluiu que a vida em fadiga dos rolamentos pode ser considerada satisfatória, sendo superior a 175.000 horas em ambas condições de carga (71 kN e 80 kN). Vale lembrar que a vida em fadiga não necessariamente indica a vida em serviço do rolamento, apenas se o mesmo é adequado a aplicação.

A rotação do rolamento 29326E está um pouco acima da velocidade admissível. Isto pode ser corrigido com um sistema de lubrificação eficiente. O sistema apresenta uma boa lubrificação, considerando o conceito de circulação de óleo e a temperatura de operação dos mancais.

Com base na análise efetuada e na classificação dos modos de falha, indicam-se como prováveis causas de falha para o rolamento 29326E (lado rotor):

- A) Ajuste inadequado do rolamento, existem sintomas de fadiga subsuperficial nas pistas e nos rolos, os mesmos são características de sobrecarga.
- B) O colapso da gaiola após a repartida da planta, fatores que contribuem para esse fenômeno são a folga entre o diâmetro externo e a caixa de mancal, além da rigidez das molas. Não foi descartada a hipótese de um evento operacional ter potencializado a falha.

Adicionalmente, recomendou-se realizar um estudo de análise modal com objetivo de avaliar as frequências principais e modos de vibrar da bomba.<sup>9</sup>

---

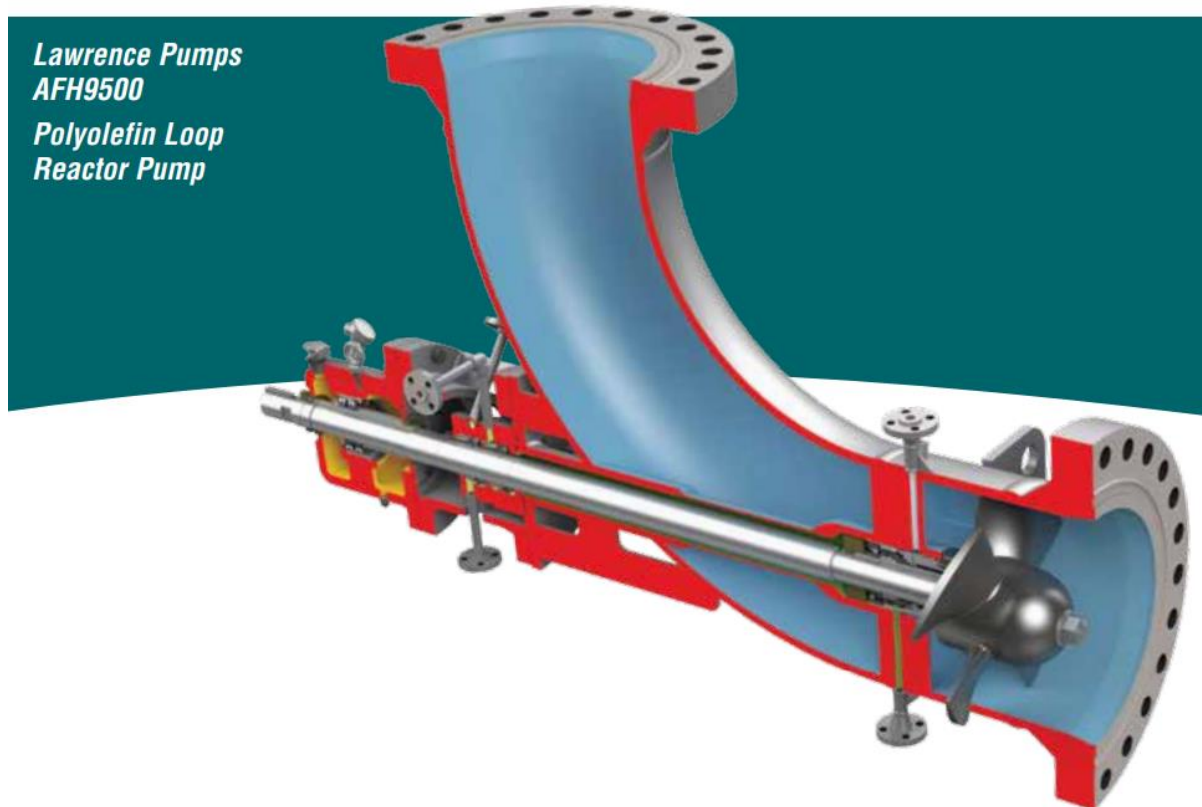
<sup>9</sup> Todas as informações deste capítulo foram fornecidas pela empresa B em estudo, a qual solicitou para não ser identificada.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 BOMBA DE CIRCULAÇÃO DO REATOR DE POLIMERIZAÇÃO

Neste estudo está sendo abordada uma bomba de fluxo axial de um reator tipo *loop slurry* de poliolefinas. Sua função é manter o catalisador e o polímero em suspensão turbulenta. A bomba opera com uma velocidade de 1792 rpm, altura manométrica de até 56,7 metros e tem capacidade de 10586 m<sup>3</sup>/h. A bomba é acoplada horizontalmente a um motor elétrico com potência de 2064 kW através de um acoplamento elástico. A figura 9 apresenta uma bomba similar à do estudo.<sup>10</sup>

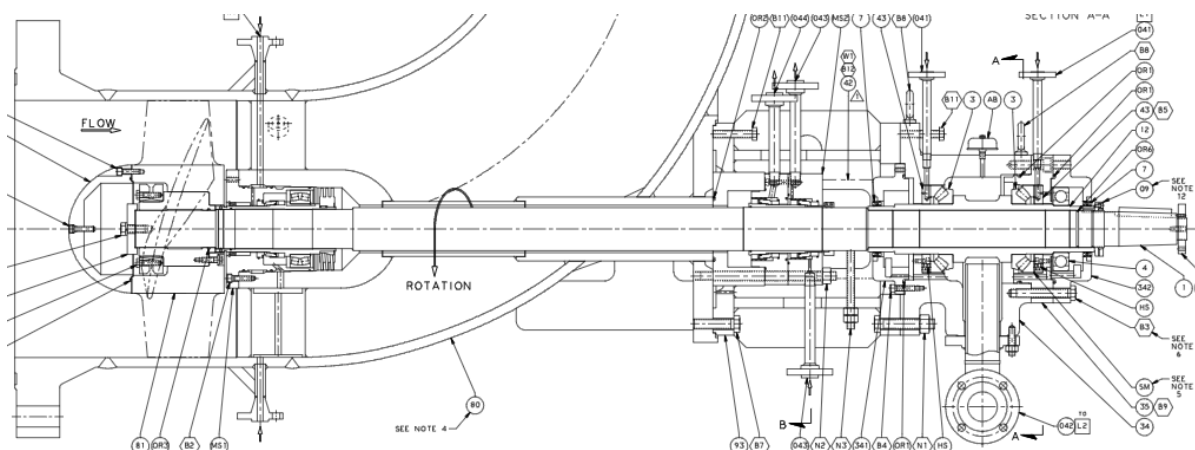
Figura 9 – Bomba de fluxo axial *Lawrence Pumps®* da série 9500.



Fonte: Flowserve Corporation (2014).

<sup>10</sup> Informações concedidas pela empresa B em estudo, a qual solicitou para não ser identificada.

Figura 10 - Desenho em corte da Bomba de Circulação do Reator.

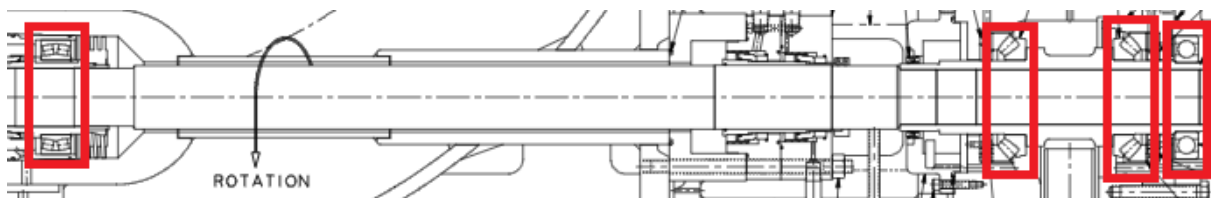


Fonte: Empresa B. (2016).<sup>11</sup>

## 4.2 ROLAMENTOS DA BOMBA

A bomba prevê em projeto 4 rolamentos para suportar as cargas axiais e radiais no conjunto rotativo. Para os esforços radiais, provenientes do peso do eixo e rotor e das forças vibracionais, são utilizados um rolamento rígido de esferas no mancal do lado acoplado e um rolamento autocompensador de rolos no mancal do lado oposto ao acoplado. Para os esforços axiais, são utilizados dois rolamentos axiais autocompensadores. Os rolamentos axiais autocompensadores possuem uma folga entre o mancal e o anel externo para sofrer cargas puramente axiais. A figura 11 destaca os rolamentos do conjunto rotativo no desenho de montagem da bomba. As figuras 12,13 e 14 apresentam os dados técnicos destes rolamentos, estas informações foram utilizadas para modelar o conjunto no software.

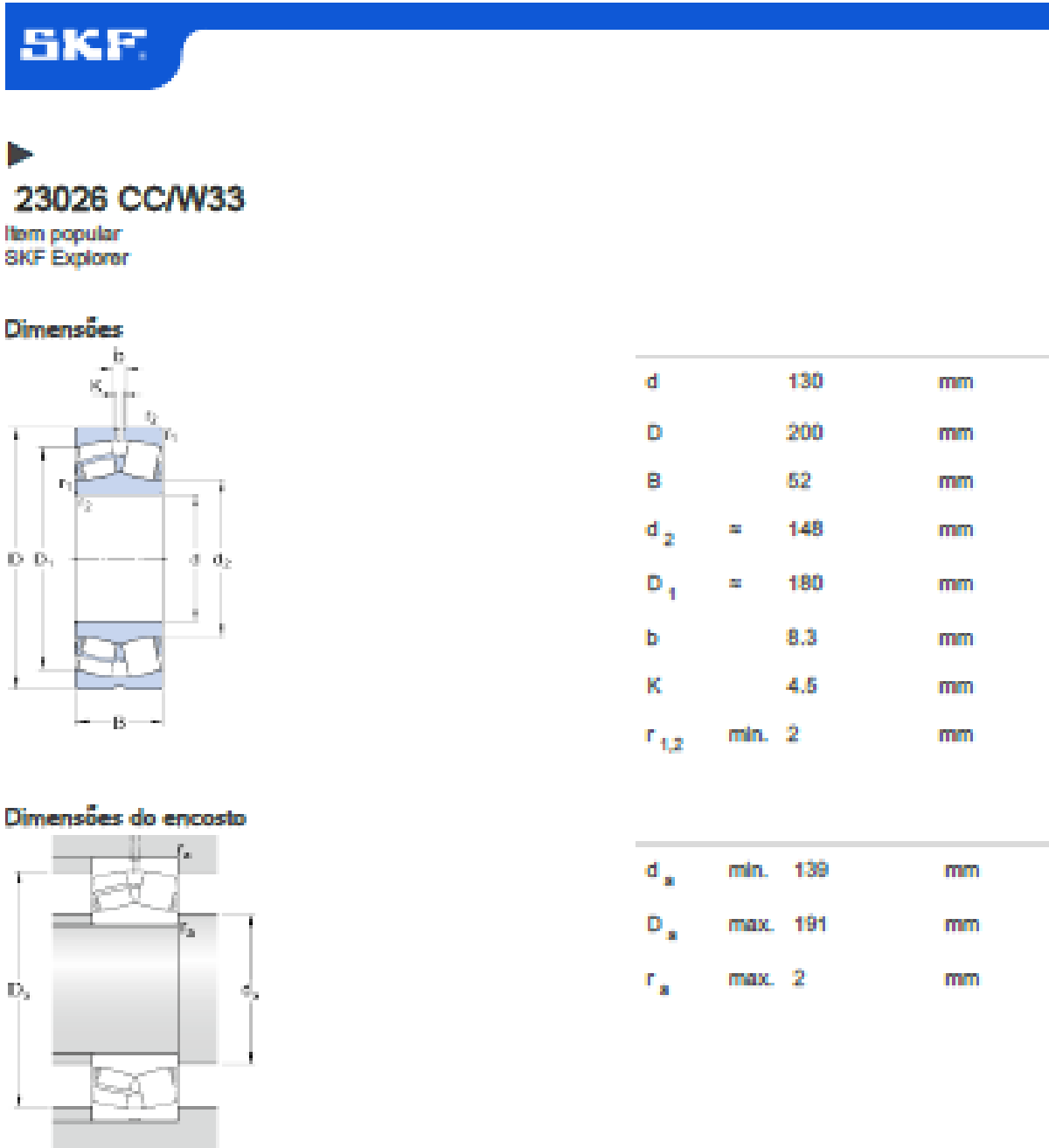
Figura 11 - Desenho em corte da Bomba de Circulação do Reator (2).



Fonte: Empresa B. (2016).<sup>12</sup>

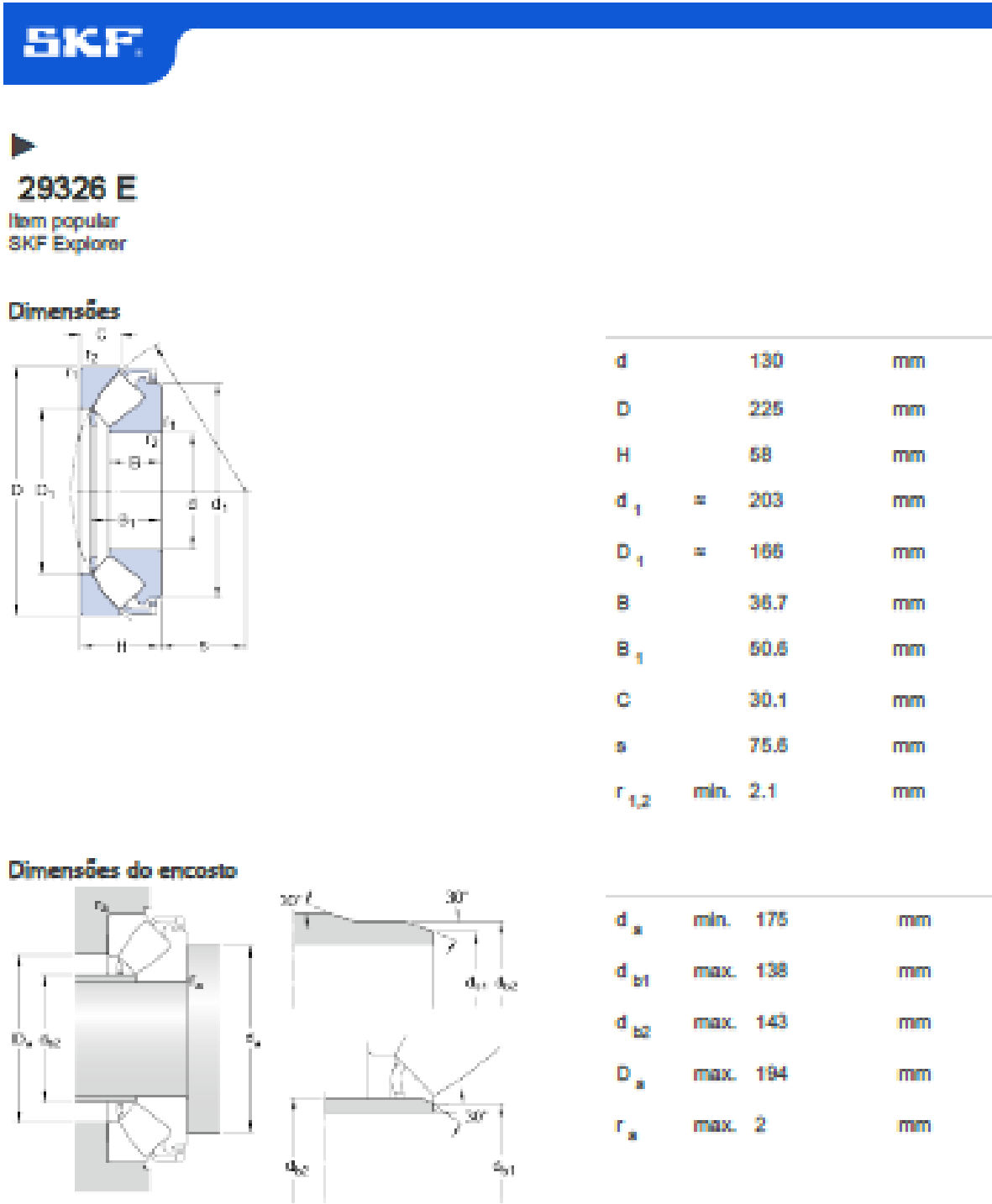
<sup>11 12</sup> Imagens concedidas pela empresa B em estudo, a qual solicitou para não ser identificada.

Figura 12 - Folha de dados do rolamento SKF 23026 CC/W33.



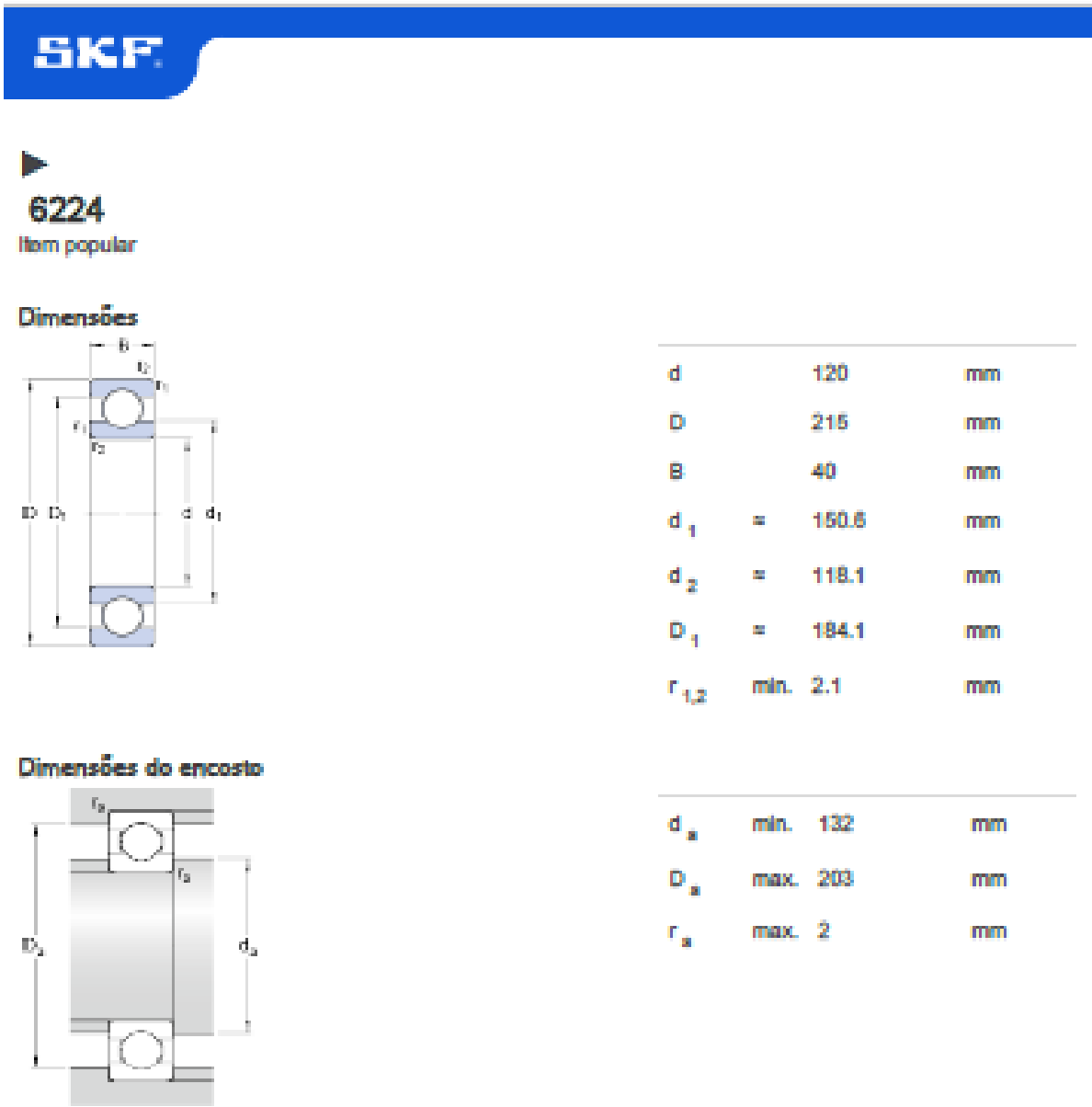
Fonte: SKF (2019).

Figura 13 - Folha de dados do rolamento SKF 29326 E.



Fonte: SKF (2019).

Figura 14 - Folha de dados do rolamento SKF 6224.



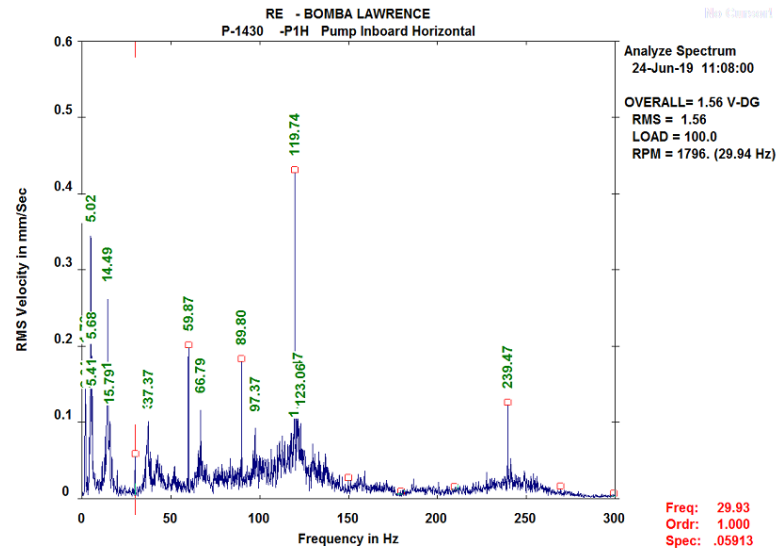
Fonte: Catálogo SKF (2019).

4.3 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO DA BOMBA

Foram disponibilizados pela empresa B os espectros de frequência dos mancais da bomba. A coleta de dados foi testemunhada em campo, o técnico utilizou um coletor de vibração para medir as vibrações no sentido radial horizontal e vertical e também no sentido axial. A figura 15 apresenta picos de vibração nas frequências de entrada (5,02 Hz e 14,49 Hz) e na frequência 119,74 Hz. A figura 16 apresenta picos de vibração na frequência de

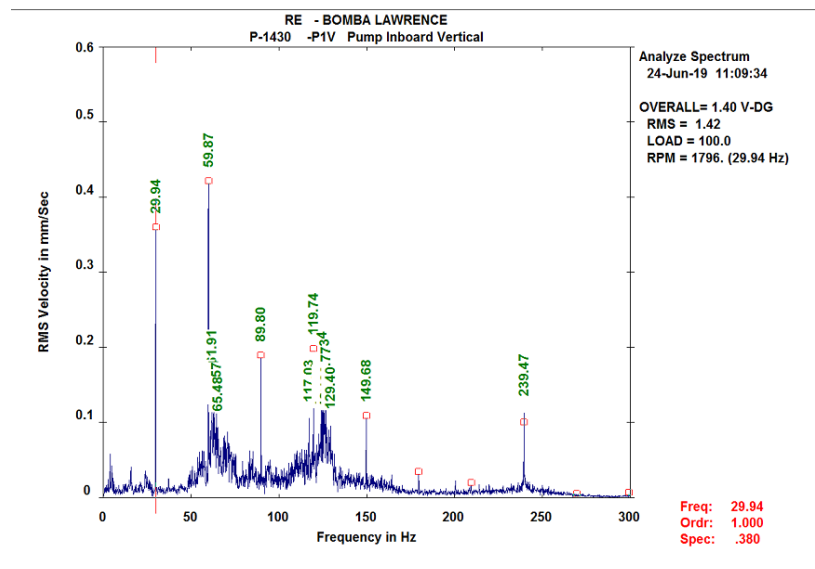
operação da bomba (29,94 Hz) e na frequência 59,87 Hz. A figura 17 apresenta um pico de vibração na frequência 119,74 Hz. Estes dados foram utilizados para encontrar as principais frequências de excitação do arranjo.

Figura 15 - Espectro de frequência da bomba coletado no sentido radial horizontal.



Fonte: Empresa B. (2019).<sup>13</sup>

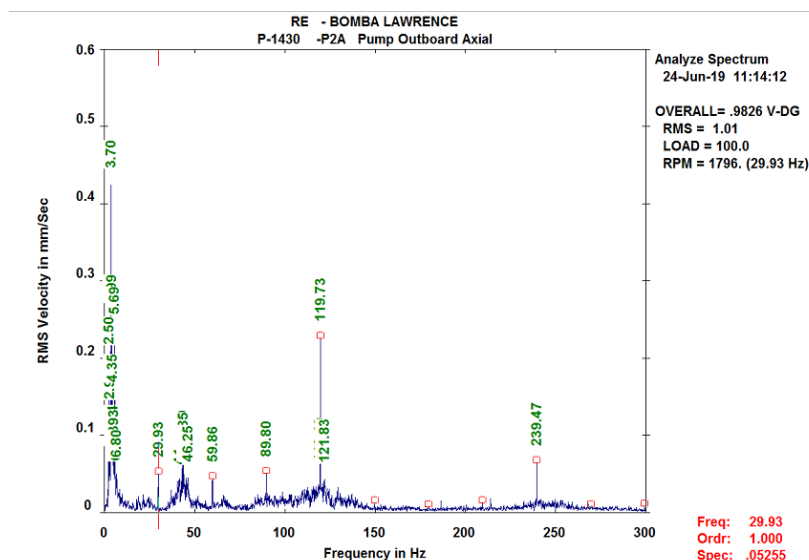
Figura 16 - Espectro de frequência da bomba coletado no sentido radial vertical.



Fonte: Empresa B. (2019).<sup>14</sup>

<sup>13 14</sup> Imagens concedidas pela empresa B em estudo, a qual solicitou para não ser identificada.

Figura 17 - Espectro de frequência da bomba coletado no sentido axial.



Fonte: Empresa B. (2019).<sup>15</sup>

#### 4.4 SOFTWARE AUTODESK FUSION 360®

O software *Autodesk Fusion 360*® é atualmente o mais versátil do mercado, além de ter licença gratuita para estudantes e professores. Este software combina as funcionalidades de projeto mecânico, simulação e maquinagem com as ferramentas CAD, CAE e CAM integradas no mesmo ambiente. Com o ambiente integrado, o software não tem perdas de informação causados na necessidade de migrar um arquivo de um software CAD para outro software CAE. Além disso, a navegação do software é realizada de forma prática, sendo necessário poucos passos para alternar de ferramenta. (AUTODESK, 2019.)

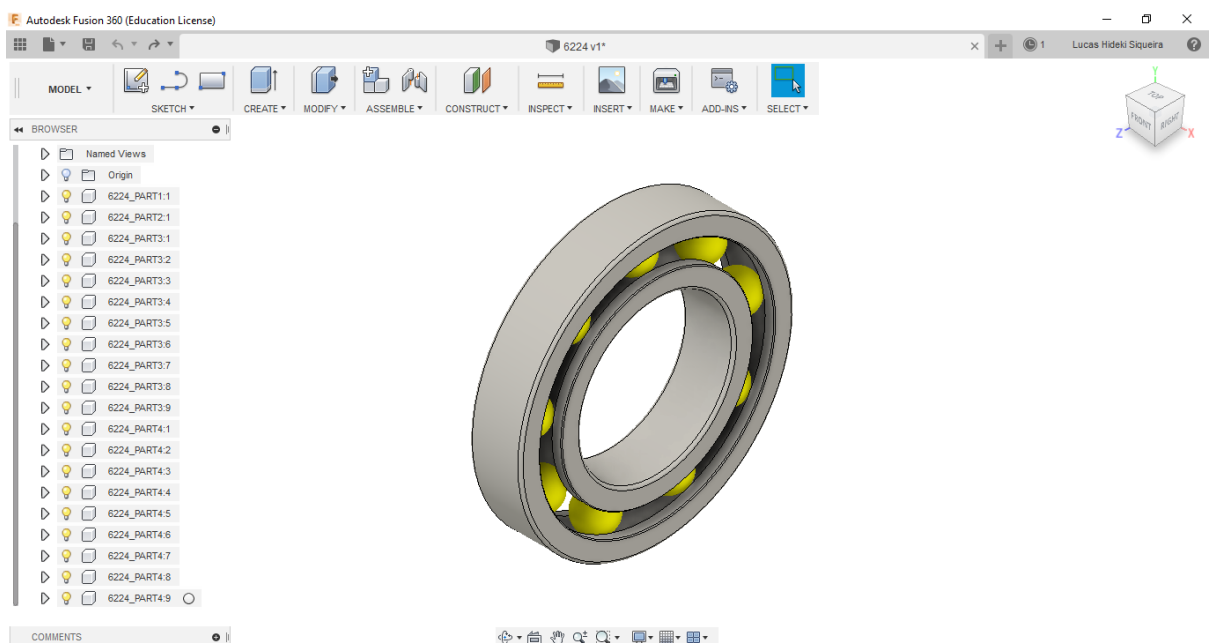
A modelagem CAD é realizada a partir de esboços bidimensional da peça, e em seguida é feito o modelo sólido. Caso o estudo tenha mais de um componente, é necessário realizar a montagem do conjunto, aplicando as relações de movimento entre as peças. A ferramenta CAE utiliza o modelo sólido para gerar a malha de elementos finitos. É possível configurar o refino da malha a partir da configuração de malha, porém para ter uma maior quantidade elementos finitos da malha é necessário ter um computador com maior poder de processamento de dados. Com a malha gerada e as condições de contorno inseridas no software, é possível fazer o processamento da simulação e obter os resultados. (AUTODESK, 2019.)

<sup>15</sup> Imagem concedida pela empresa B em estudo, a qual solicitou para não ser identificada.

#### 4.5 MODELAGEM E MONTAGEM DO CONJUNTO

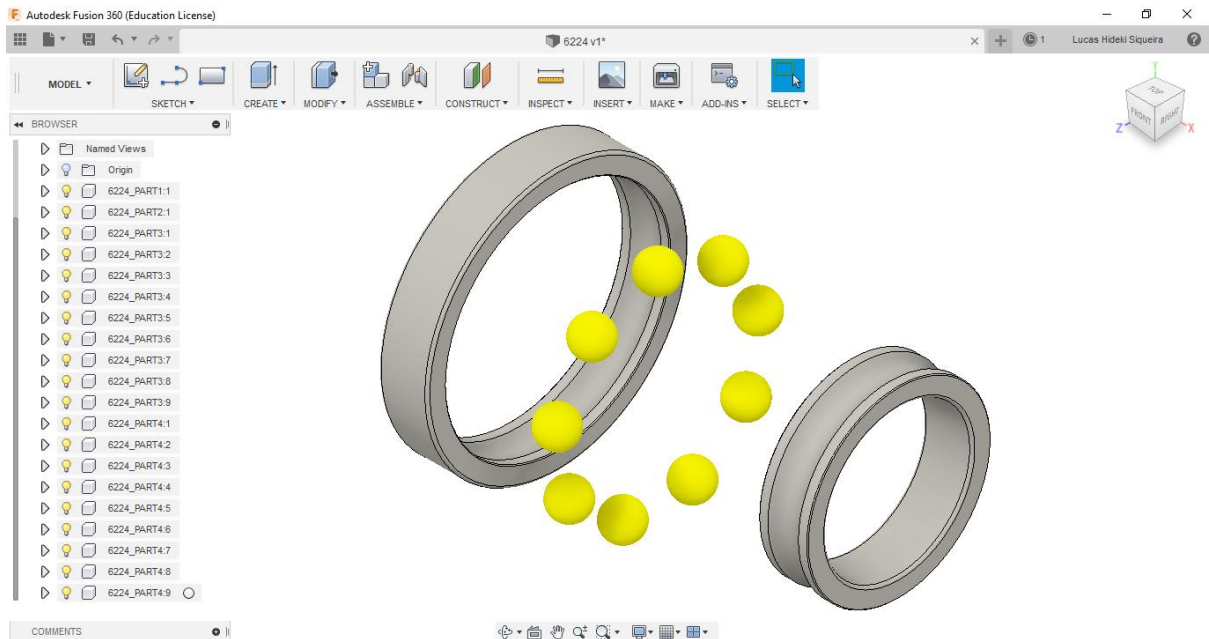
Os modelos sólidos dos rolamentos do arranjo foram obtidos através do site do fornecedor de rolamentos, apenas para o eixo foi realizada a modelagem. A modelagem do eixo é necessária para aplicar as cargas do estudo posteriormente. Contudo, foi necessário realizar a montagem dos componentes de cada rolamento pois os modelos não continham nenhuma relação de movimento. Os procedimentos desta etapa foram realizados com as ferramentas do layout *Model* do software *Autodesk Fusion 360*®.

Figura 18 - Modelo sólido do rolamento SKF 6224.



Fonte: Próprio autor. (2019).

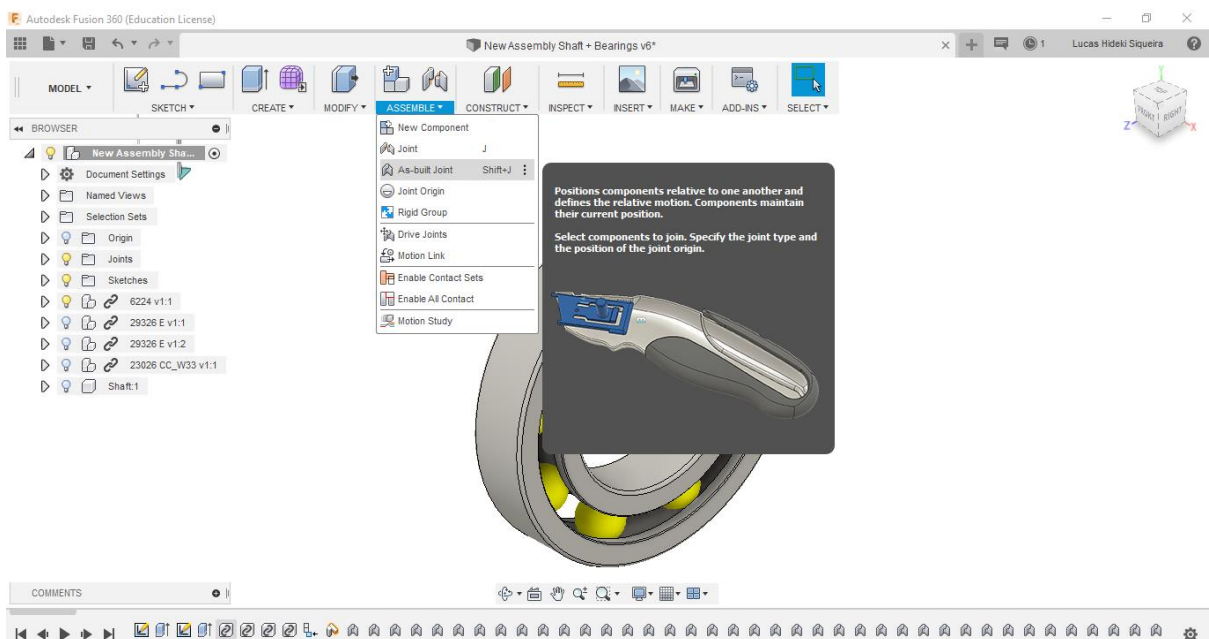
Figura 19 - Modelo sólido do rolamento 6224 (2).



Fonte: Próprio autor. (2019).

A seguir o procedimento para implementar as relações de movimento dos componentes do rolamento rígido de esferas 6224, foi utilizado o recurso *As-built Joint*. O mesmo procedimento foi realizado para os outros rolamentos do arranjo.

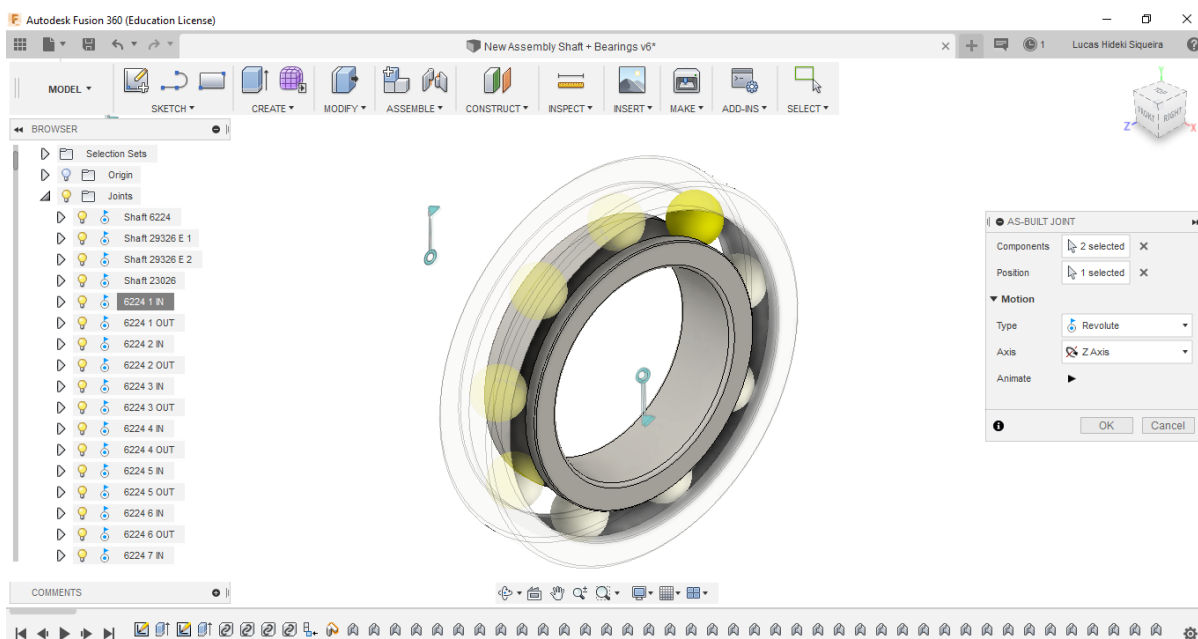
Figura 20 - Recurso *As-built Joint*.



Fonte: Próprio autor. (2019).

Ao utilizar este recurso, é necessário selecionar os componentes que serão unidos. No exemplo abaixo, foram selecionados a esfera e a pista interna do rolamento. O tipo de relação entre os dois componentes é de revolução, então é necessário selecionar também uma referência e o eixo que a esfera realizará a rotação. A referência selecionada foi o canal da pista interna e o eixo z.

Figura 21 - União entre a esfera e a pista interna do rolamento.

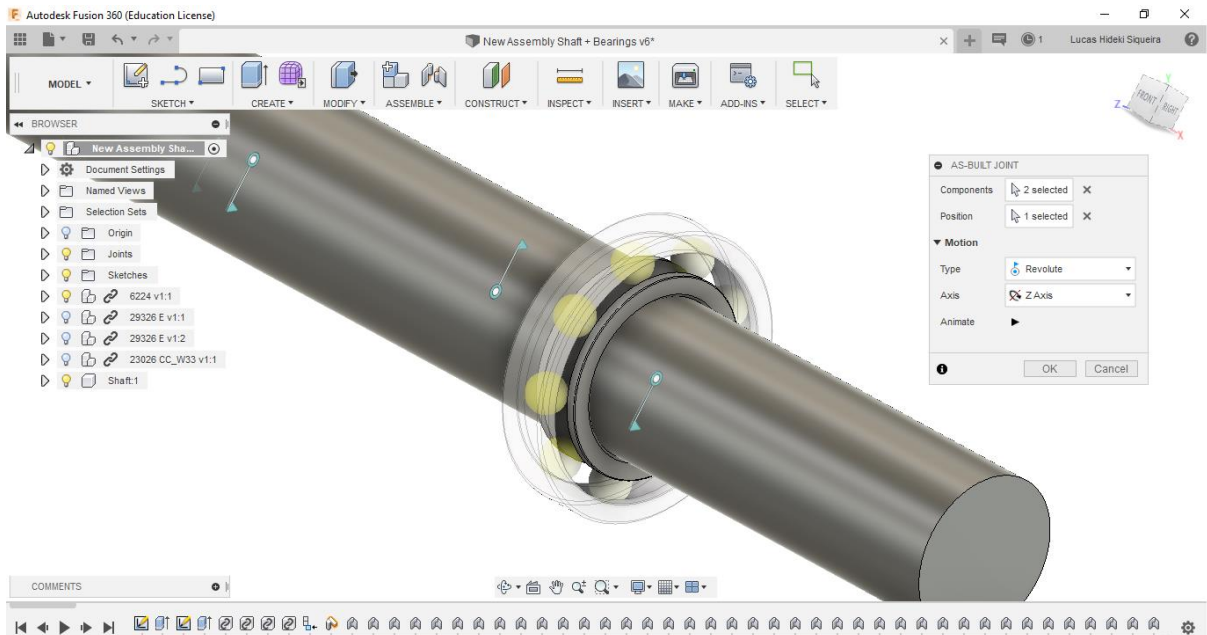


Fonte: Próprio autor. (2019).

O mesmo procedimento foi realizado para todas as esferas do rolamento 6224. A relação de movimento entre as esferas e a pista externa foi realizada da mesma forma. Os outros rolamentos 29326 E e 23026 CC/W33 passaram pelos mesmos procedimentos de montagem para unir seus elementos rolantes com suas pistas interna e externa.

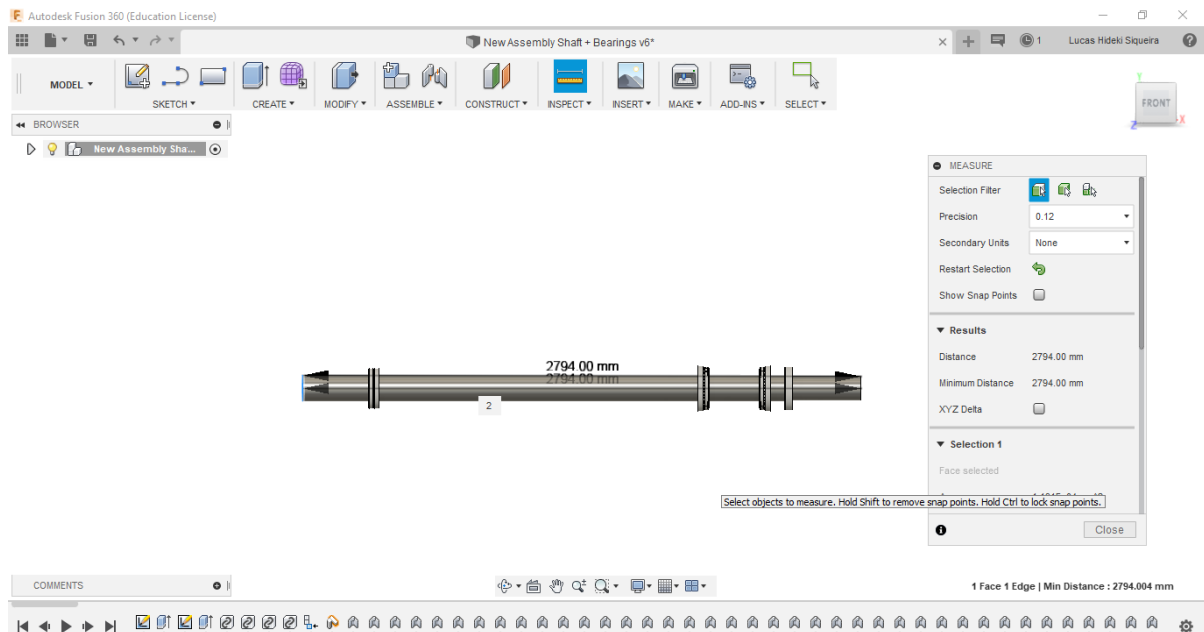
Para unir o eixo com os rolamentos foi realizado o mesmo procedimento, selecionando as pistas internas dos rolamentos e o eixo. O comprimento do eixo e a distância entre os rolamentos foram retirados do manual do fabricante da bomba de circulação do reator.

Figura 22 – União entre a pista interna do rolamento 6224 e o eixo.



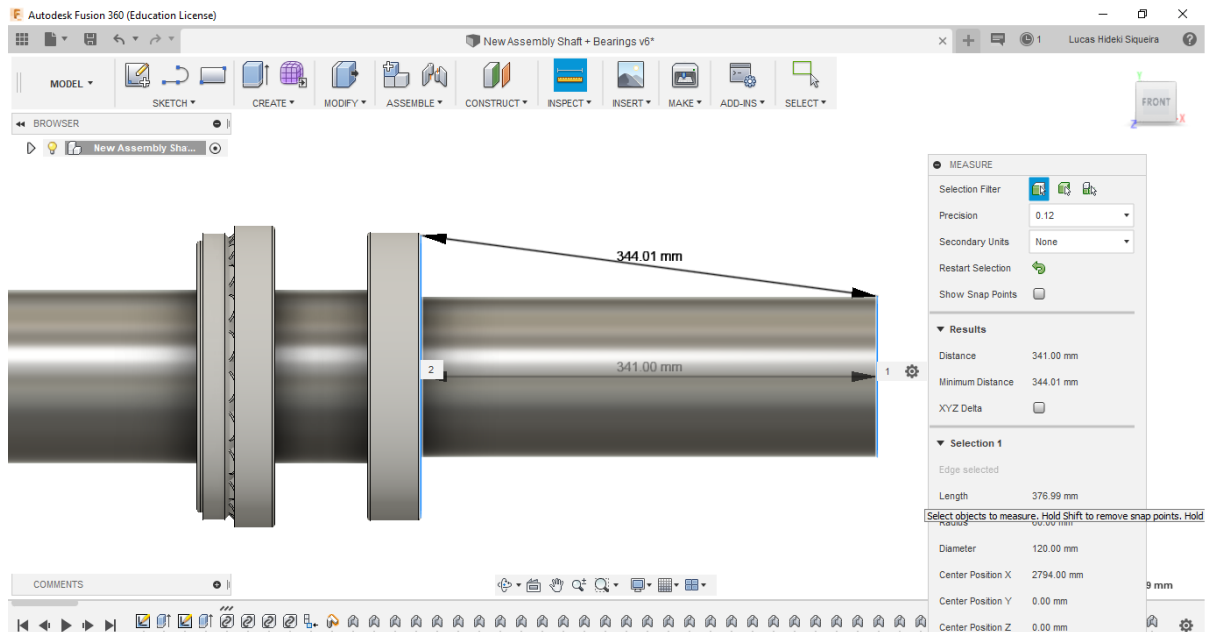
Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 23 - Comprimento total do eixo (2794,00 mm).



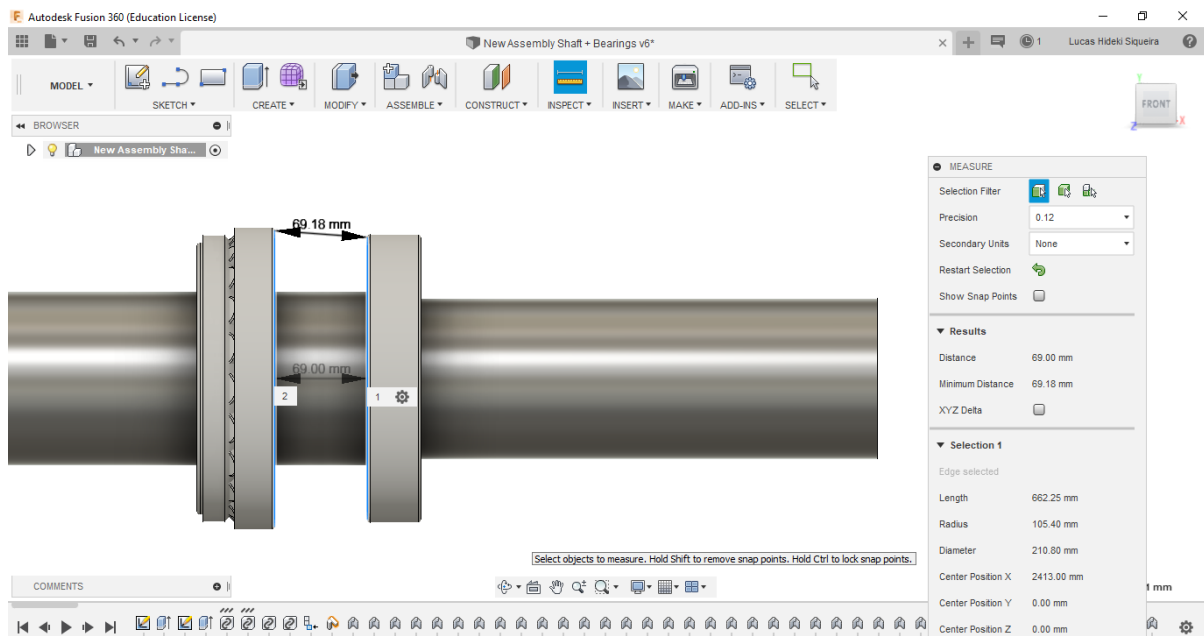
Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 24 - Distância entre o rolamento 6224 e o acoplamento elástico (341,00 mm).



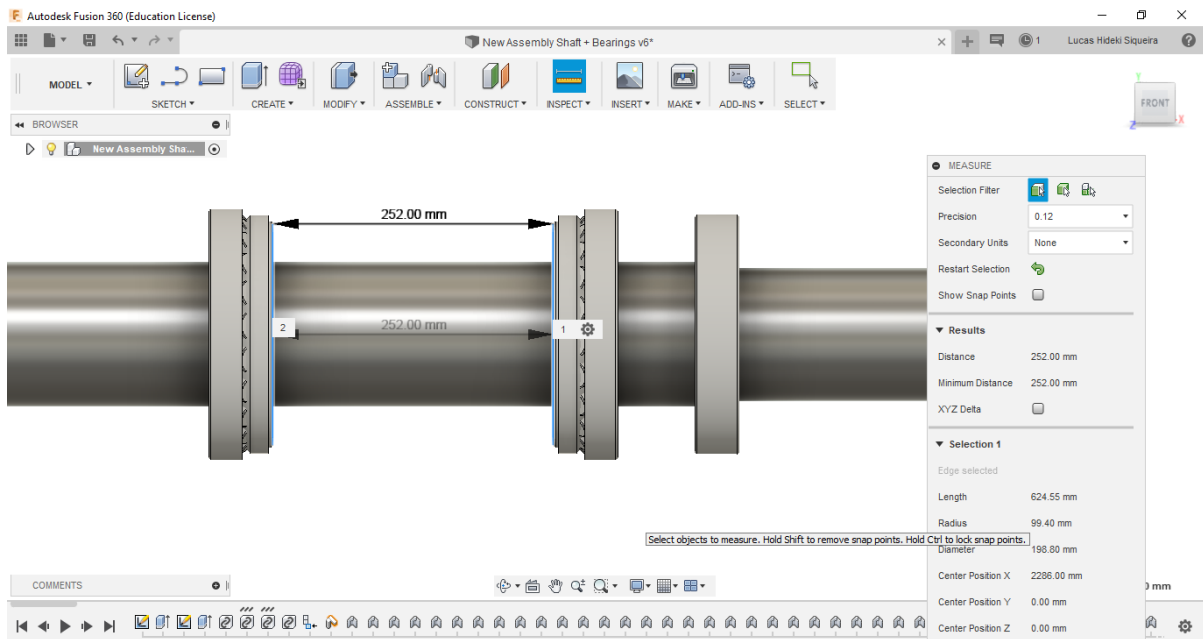
Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 25 - Distância entre o rolamento 6224 e o rolamento 29326 E lado acoplado (69,00 mm).



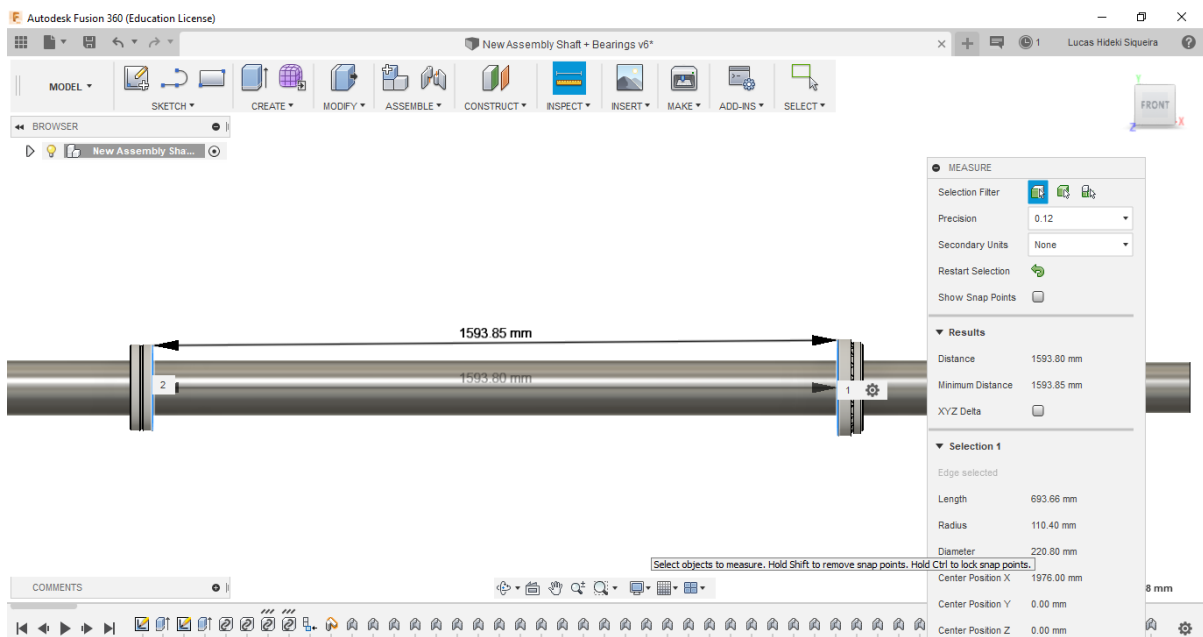
Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 26 - Distância entre o rolamento 29326 E lado acoplado e o rolamento 29326 E lado oposto ao acoplado (252,00 mm).



Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 27 - Distância entre o rolamento 29326 E lado oposto ao acoplado e o rolamento 23026 CC/W33 (1593,80 mm).



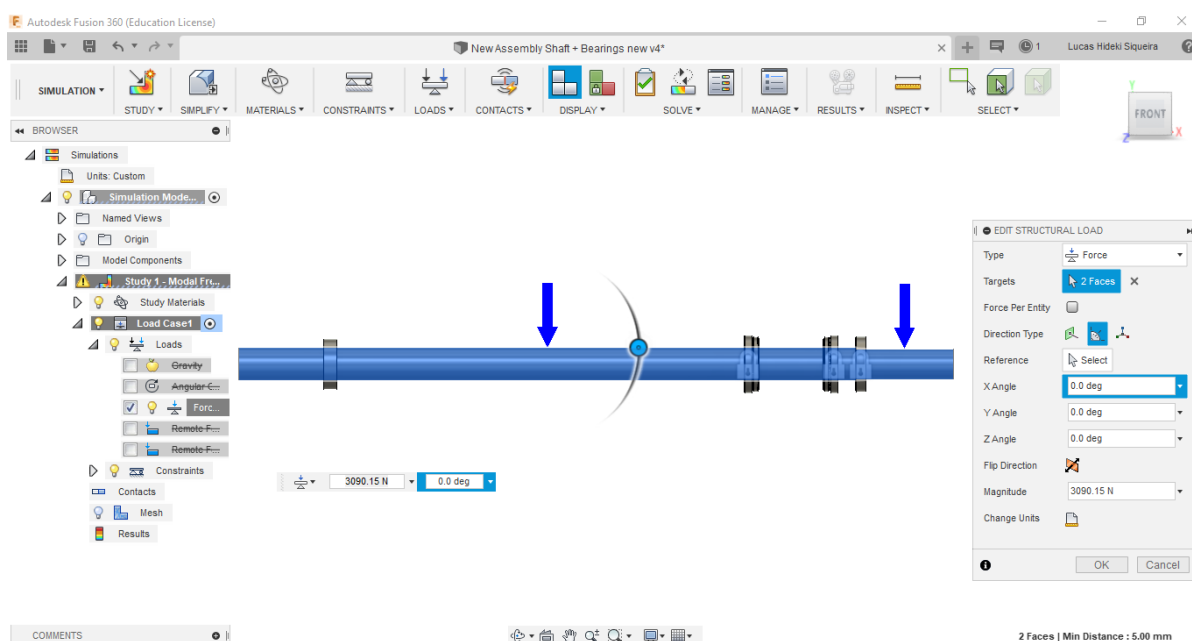
Fonte: Próprio autor. (2019).

## 4.6 CARGAS APLICADAS

As cargas consideradas no estudo foram provenientes do peso do eixo e do rotor, da vibração no acoplamento e da rotação do eixo. As cargas são aplicadas utilizando o recurso *Load* do layout *Simulation* do software *Autodesk Fusion 360*®.

As massas do eixo e do rotor são, respectivamente, 315 kg e 84 kg. A rotação da bomba é de 1792 rpm e a força proveniente da vibração do acoplamento foi estimada sendo o produto da massa do eixo e três vezes o valor da aceleração da gravidade ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ). Os esforços causados pelo escoamento do fluido não foram considerados pois os mancais do conjunto rotativo não estão expostos ao fluxo.<sup>16</sup>

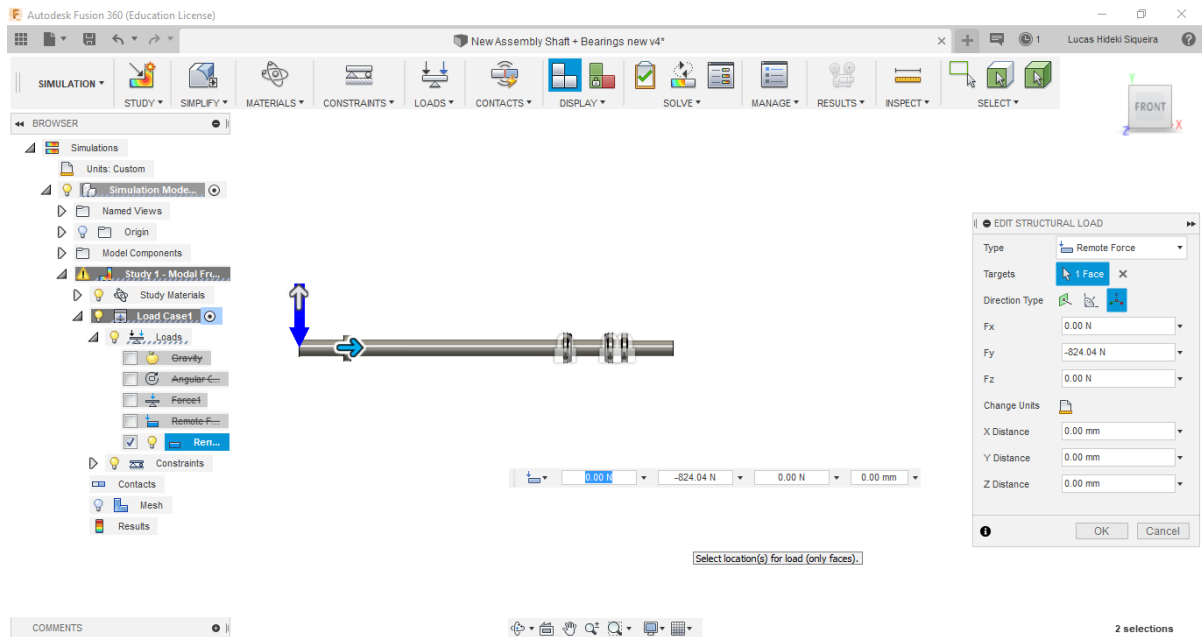
Figura 28 - Aplicação do peso do eixo.



Fonte: Próprio autor. (2019).

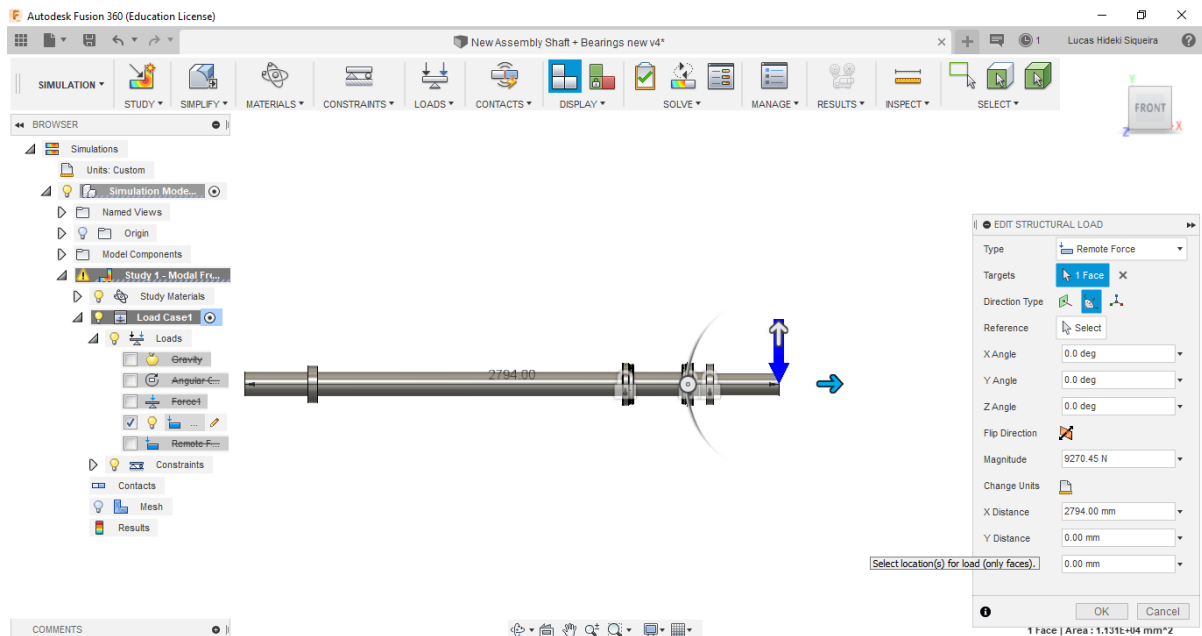
<sup>16</sup> Informações fornecidas pela empresa B, a qual solicitou para não ser identificada.

Figura 29 - Aplicação do peso do rotor.



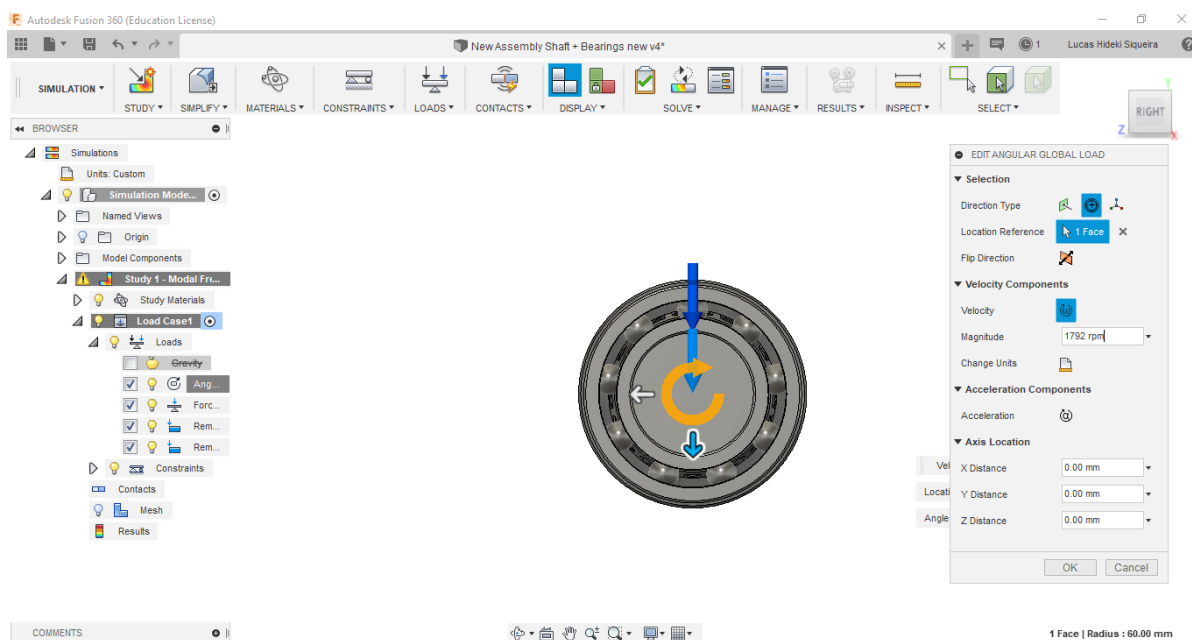
Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 30 - Aplicação da força de vibração do acoplamento estimada.



Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 31 - Aplicação da rotação do eixo na face acoplada.

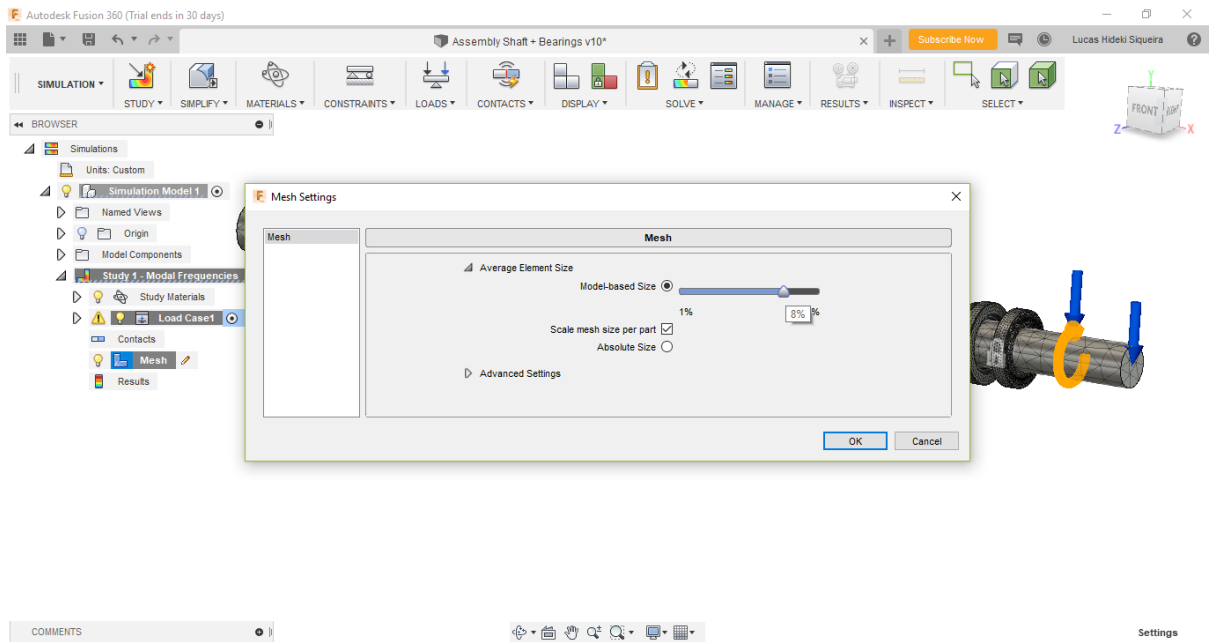


Fonte: Próprio autor. (2019).

#### 4.7 GERAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

A partir desta etapa, devem ser utilizadas as ferramentas do layout *Simulation*. Primeiro foram ajustadas as configurações de malha, o software consegue gerar a malha automaticamente dependendo apenas do ajuste do tamanho médio dos elementos. Este ajuste tem uma escala de tamanho baseada no modelo de 1% à 10%, e quanto menor a faixa escolhida mais refinada será a malha. Porém, vale ressaltar que é necessário ter um hardware com alto poder de processamento para processar uma malha muito refinada. Neste caso, foi escolhido 8% na escala.

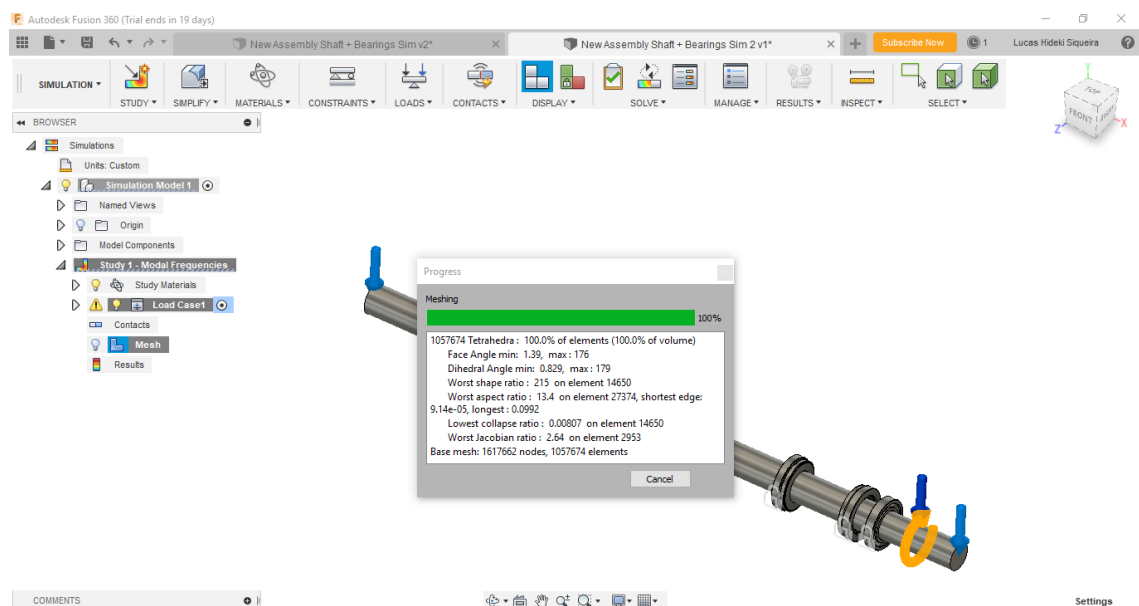
Figura 32 - Configuração da malha de elementos finitos.



Fonte: Próprio autor. (2019).

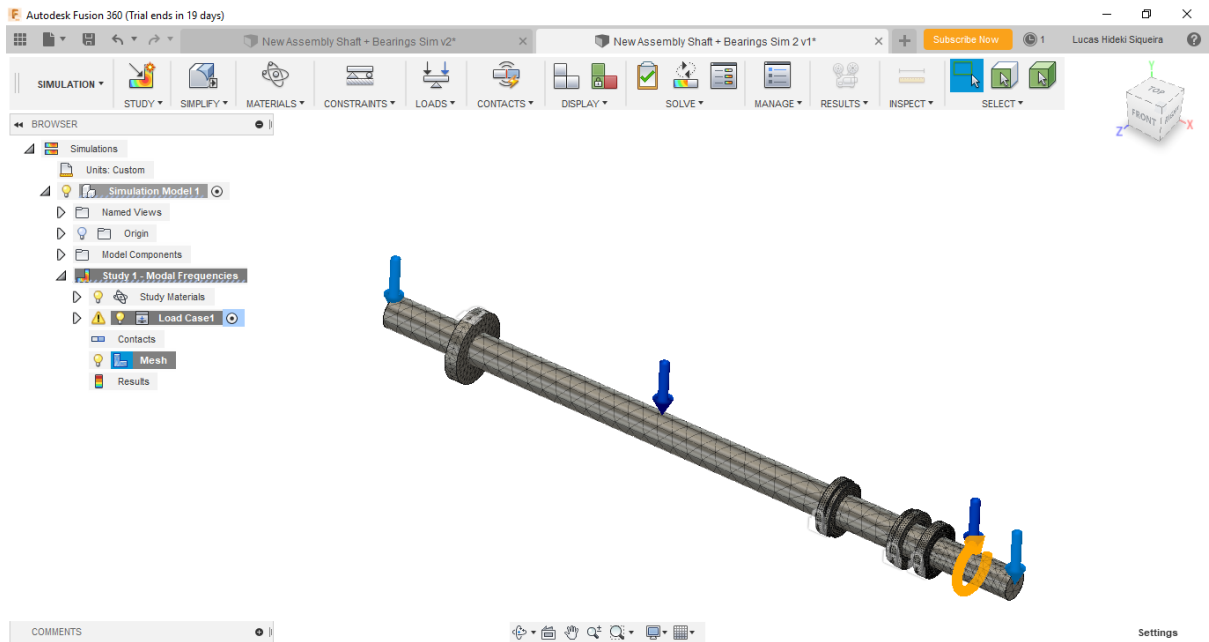
Feita a configuração da malha, a mesma pode ser processada. O rolamento 23026 CC/W33 teve sua pista externa simplificada, removendo suas arestas e furos. O software não conseguiu processar a malha por causa de sua geometria, após esta alteração a malha foi processada. O software utilizou elementos tetraédricos para discretizar o modelo, no total de 1057674 elementos e 1617662 nós.

Figura 33 - Processamento da malha de elementos finitos.



Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 34 - Malha de elementos finitos gerada.

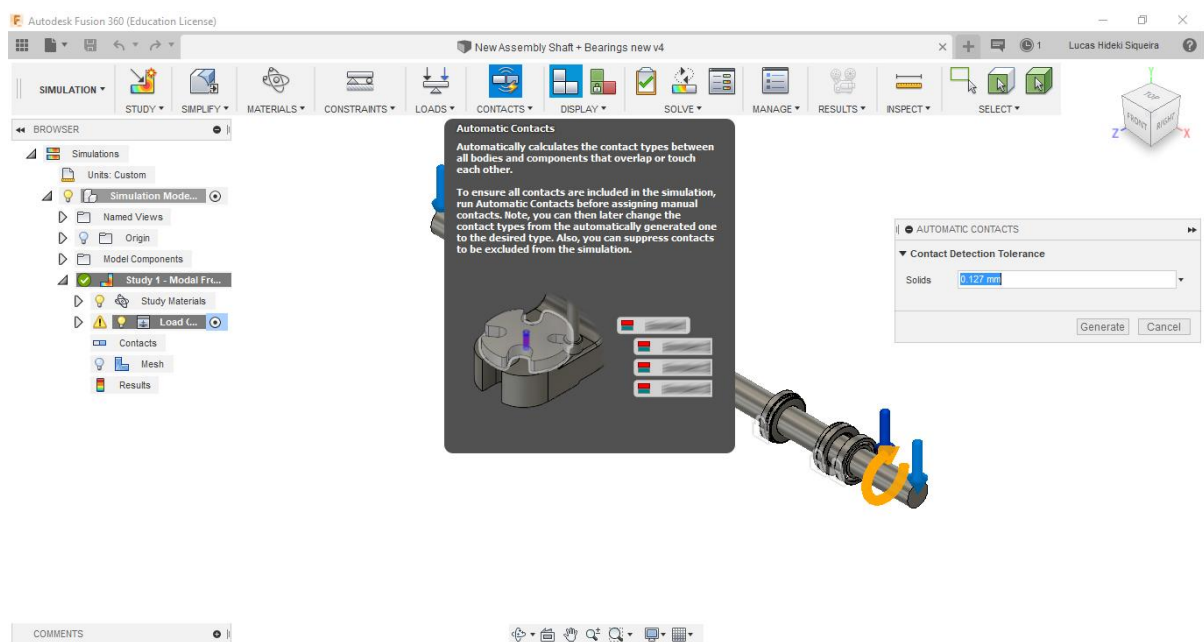


Fonte: Próprio autor. (2019).

#### 4.8 TOLERÂNCIAS DE CONTATO

Foi adotada uma tolerância de 0,127 mm entre os componentes do arranjo, da mesma forma que foi adotada no estudo de caso.

Figura 35 - Configuração da folga entre componentes.

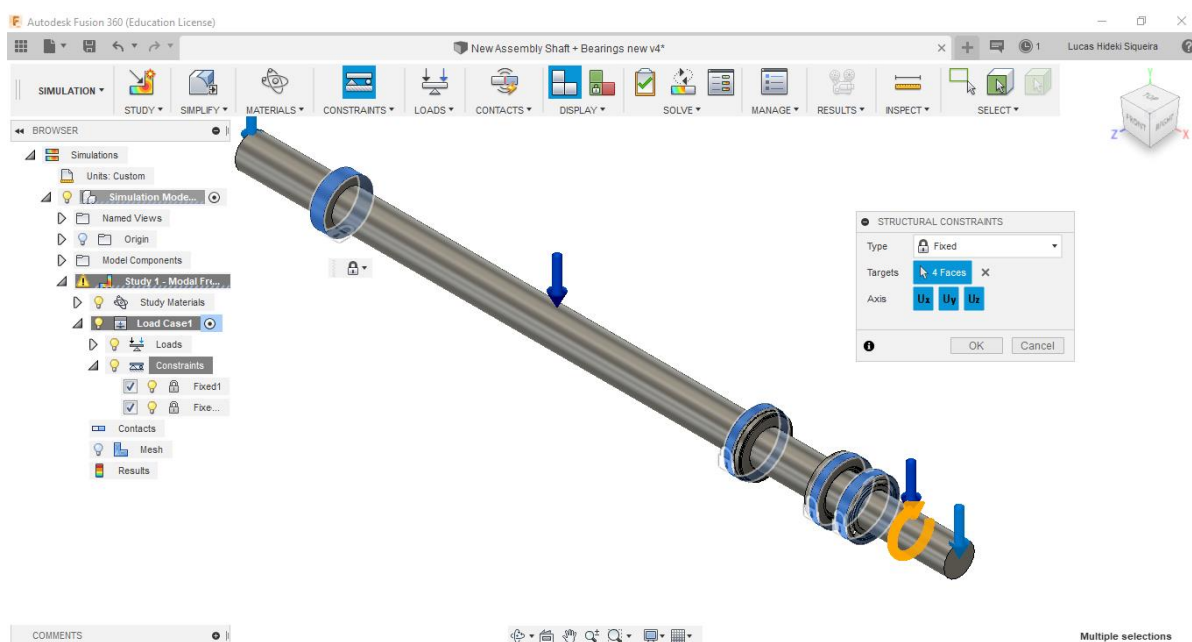


Fonte: Próprio autor. (2019).

#### 4.9 COMPONENTES CONSIDERADOS FIXOS

As pistas externas de todos os rolamentos foram consideradas isentas de deslocamento radiais e axiais. Para fixar os componentes, deve ser selecionado o recurso *Structural Constraints*, selecionando os componentes a serem fixados e os eixos que os mesmos terão deslocamento considerado nulo.

Figura 36 - Pistas externas dos rolamentos consideradas fixas nos eixos x,y e z.



Fonte: Próprio autor. (2019).

#### 4.10 MATERIAIS DOS COMPONENTES

Foi adotado um aço padrão para os componentes dos rolamentos e um aço aeronáutico AISI 4340 para o eixo. Foi utilizado o recurso *Study Materials* para realizar a seleção.

Figura 36 - Propriedades dos materiais utilizados na simulação.

☐ **Steel**

|                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Density                       | 7.85E-06 kg / mm <sup>3</sup> |
| Young's Modulus               | 210000 MPa                    |
| Poisson's Ratio               | 0.3                           |
| Yield Strength                | 207 MPa                       |
| Ultimate Tensile Strength     | 345 MPa                       |
| Thermal Conductivity          | 0.056 W / (mm C)              |
| Thermal Expansion Coefficient | 1.2E-05 / C                   |
| Specific Heat                 | 480 J / (kg C)                |

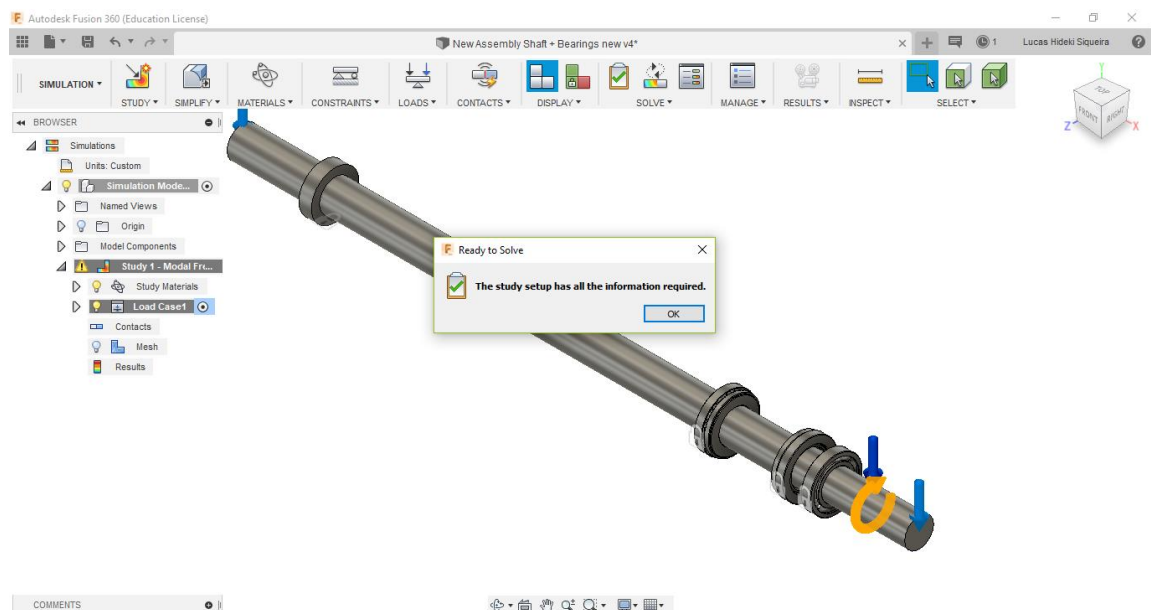
☐ **Steel AISI 4340 350A QT**

|                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Density                       | 7.85E-06 kg / mm <sup>3</sup> |
| Young's Modulus               | 207000 MPa                    |
| Poisson's Ratio               | 0.33                          |
| Yield Strength                | 1102 MPa                      |
| Ultimate Tensile Strength     | 1171 MPa                      |
| Thermal Conductivity          | 0.0445 W / (mm C)             |
| Thermal Expansion Coefficient | 1.23E-05 / C                  |
| Specific Heat                 | 475 J / (kg C)                |

Fonte: Próprio autor. (2019).

Após colocadas todas as condições de contorno, foi realizada a pré-checagem para verificar se é possível processar a simulação. O procedimento confirmou que todas as informações necessárias foram adicionadas no estudo.

Figura 37 - Pré-checagem da simulação.



Fonte: Próprio autor. (2019).

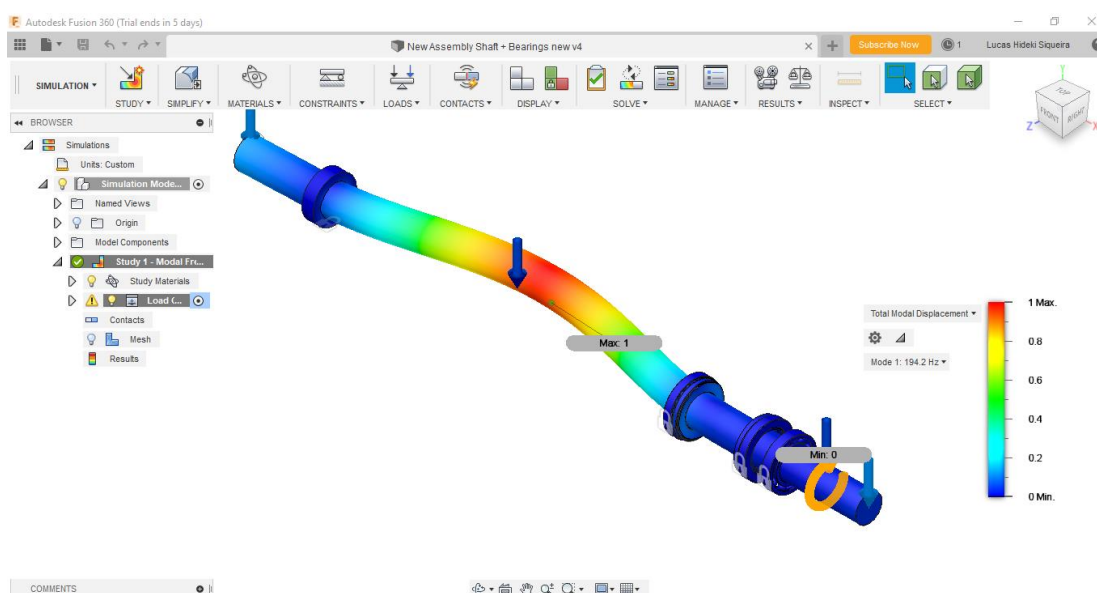
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 MODOS DE VIBRAÇÃO DE FREQUÊNCIAS NATURAIS

O estudo foi processado pelo software e foram obtidos os modos de vibração, as frequências naturais e os deslocamentos nodais do arranjo. O foco dos resultados foi direcionado para os deslocamentos nodais dos componentes dos rolamentos, e não do eixo.

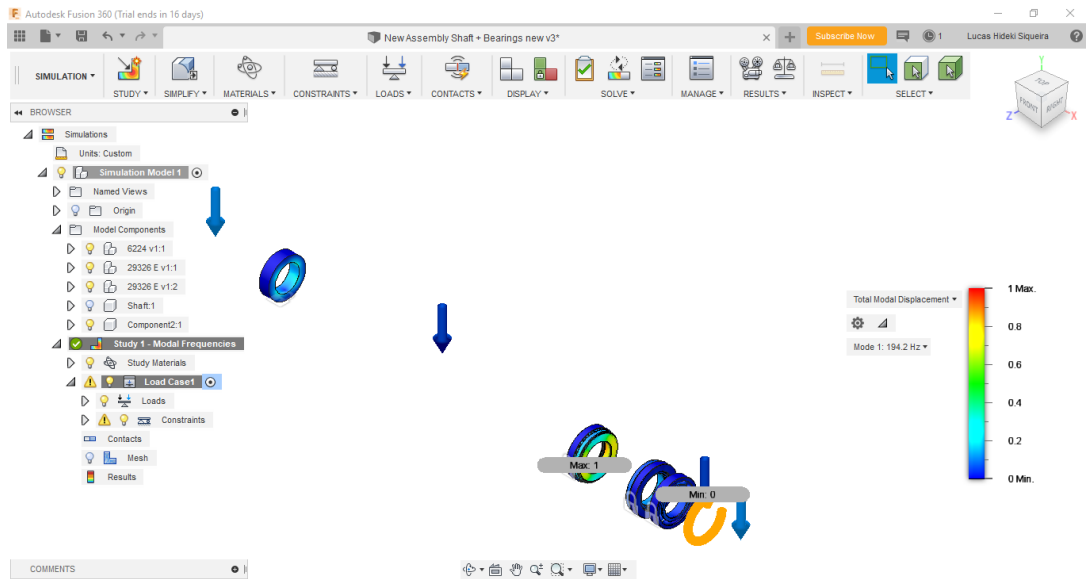
As figuras 38, 39 e 40 apresentam o primeiro modo de vibração com frequência natural de 194,2 Hz. As figuras 41 e 42 o segundo modo de vibração, frequência natural de 197 Hz. As figuras 43 e 44 o terceiro modo de vibração, frequência natural de 512,6 Hz. As figuras 45 e 46 o quarto modo de vibração, frequência natural 521,9 Hz. As figuras 47 e 48 o último modo de vibração, frequência natural 549,9 Hz. As figuras 40, 42, 44 e 46 destacam o deslocamento nodal da pista interna do rolamento 29326E – lado rotor.

Figura 38 - Modo de vibração 1.



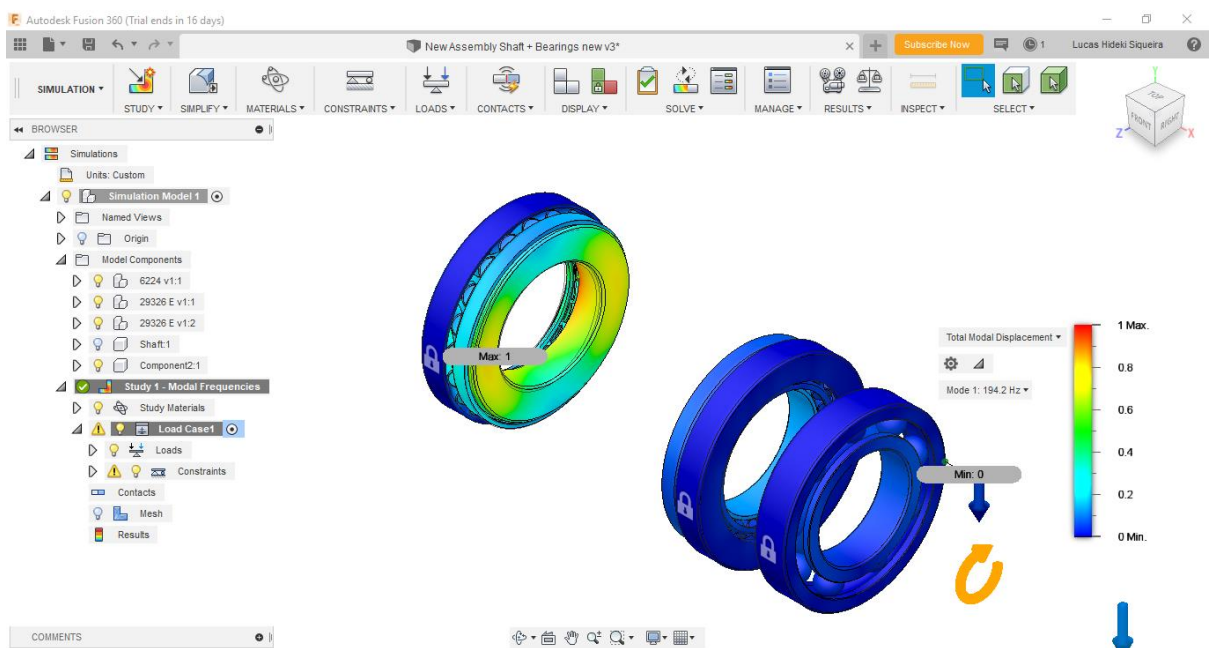
Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 39 – Modo de vibração 1 (2).



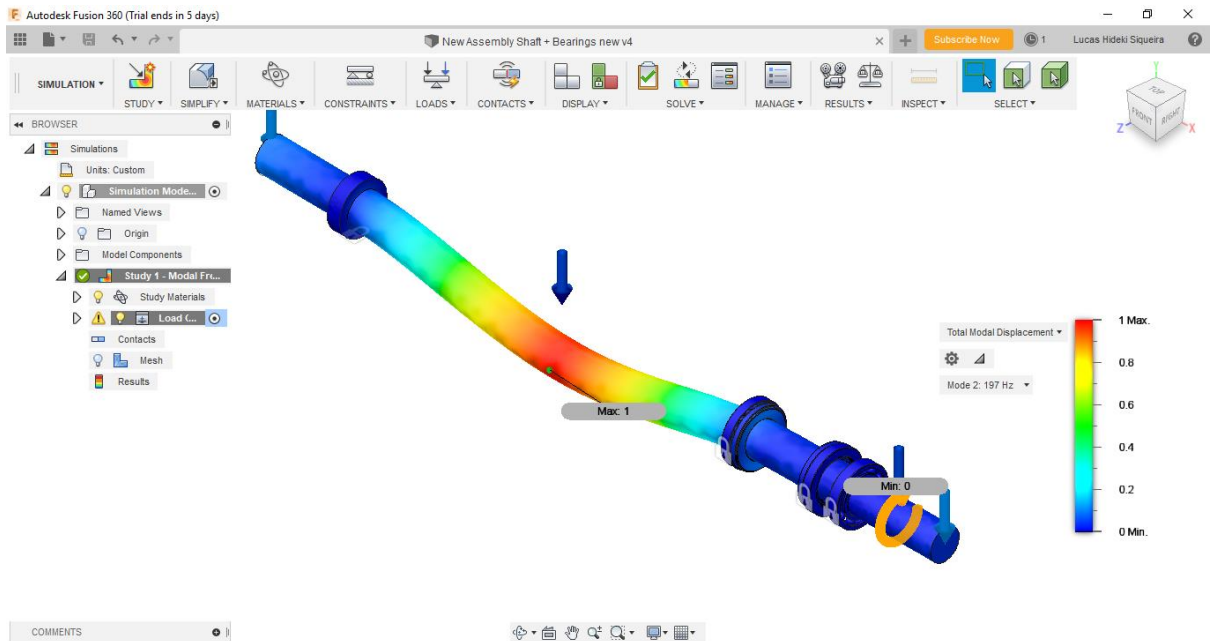
Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 40 - Modo de vibração 1 (3).



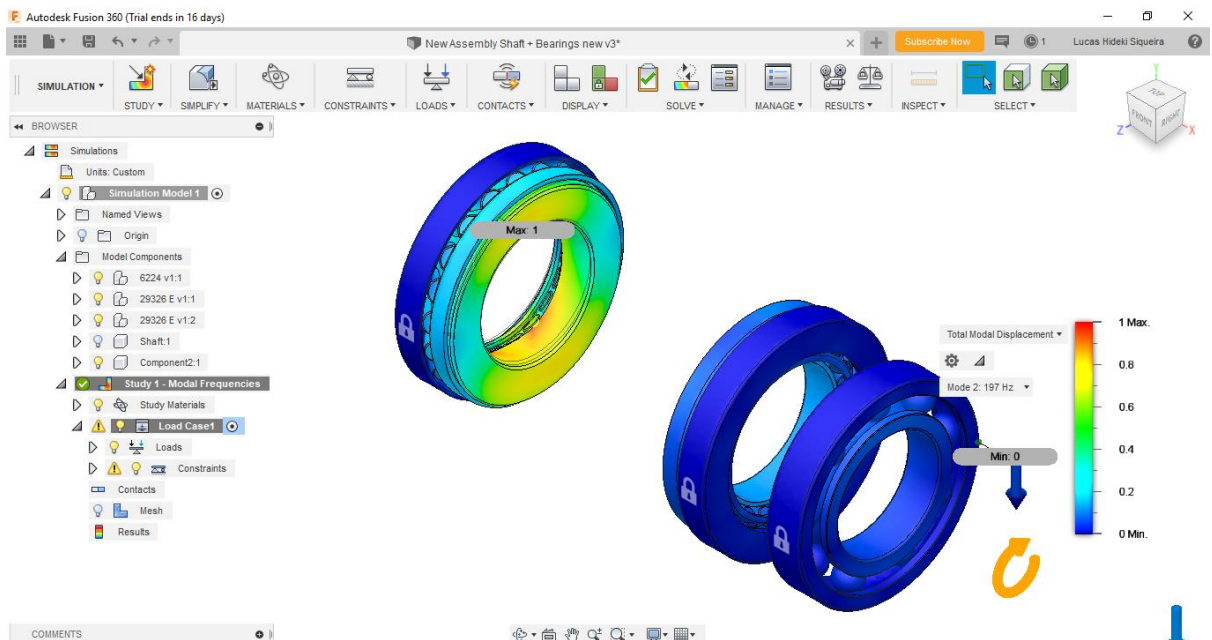
Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 41 - Modo de vibração 2.



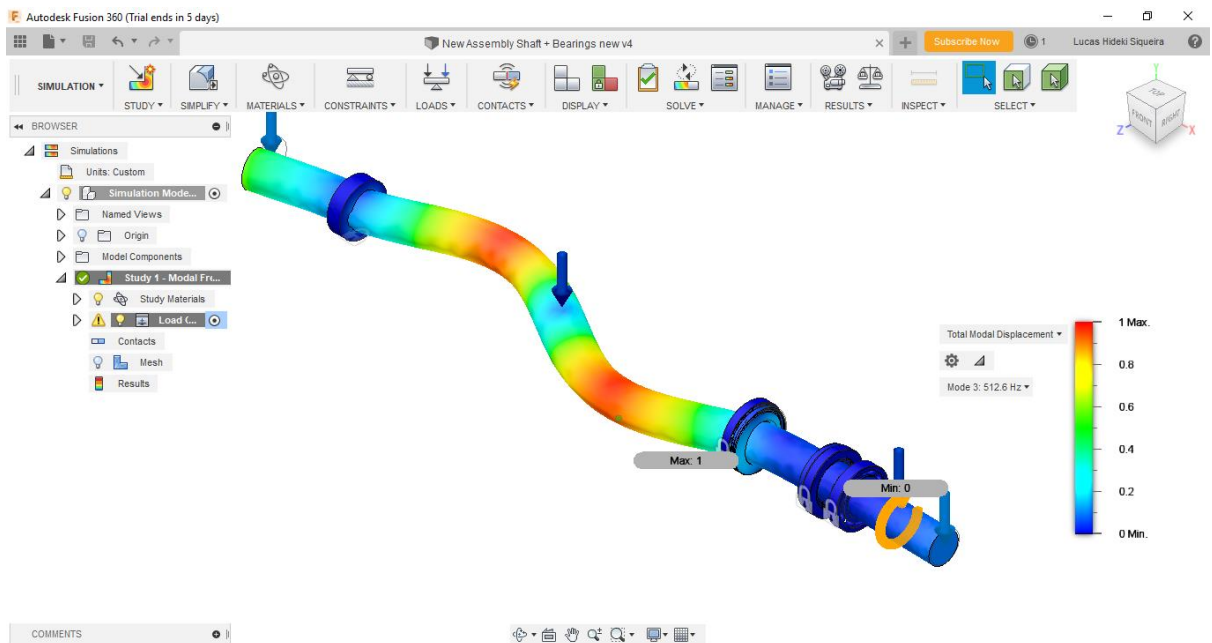
Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 42 - Modo de vibração 2 (2).



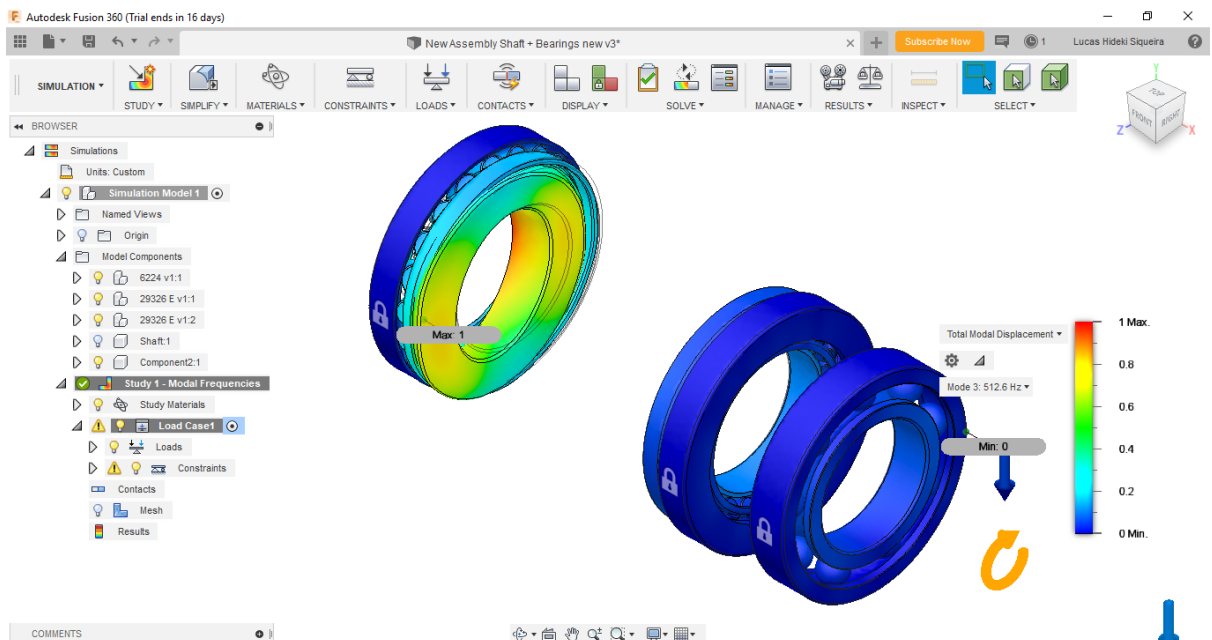
Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 43 - Modo de vibração 3.



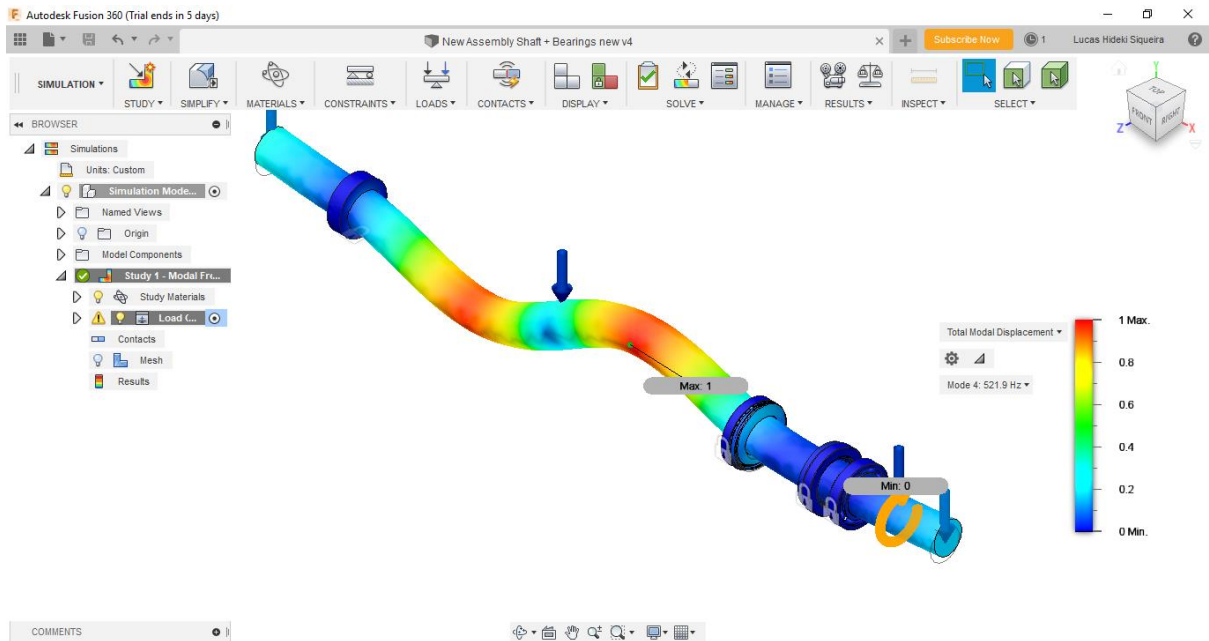
Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 44 - Modo de vibração 3 (2).



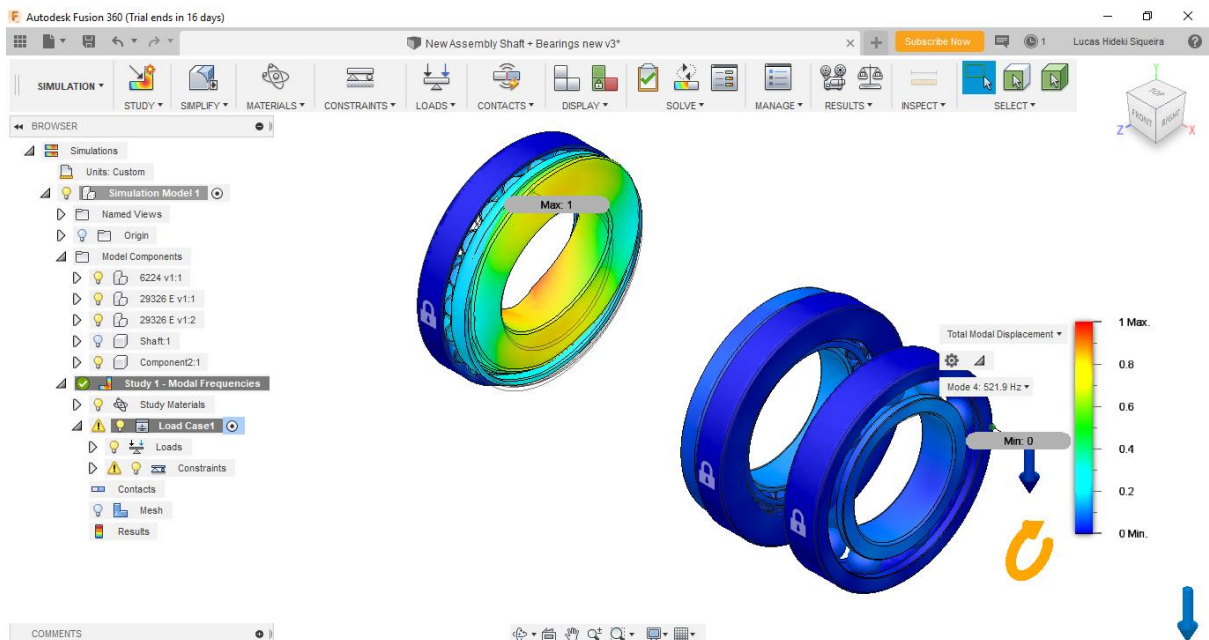
Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 45 – Modo de vibração 4.



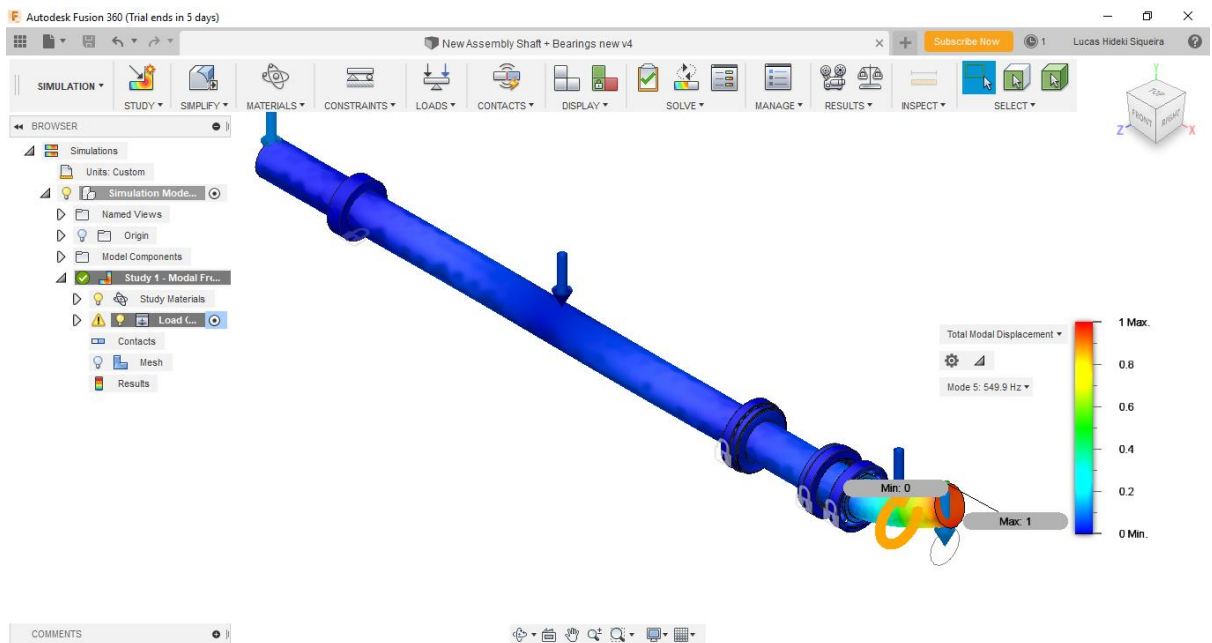
Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 46 - Modo de vibração 4 (2).



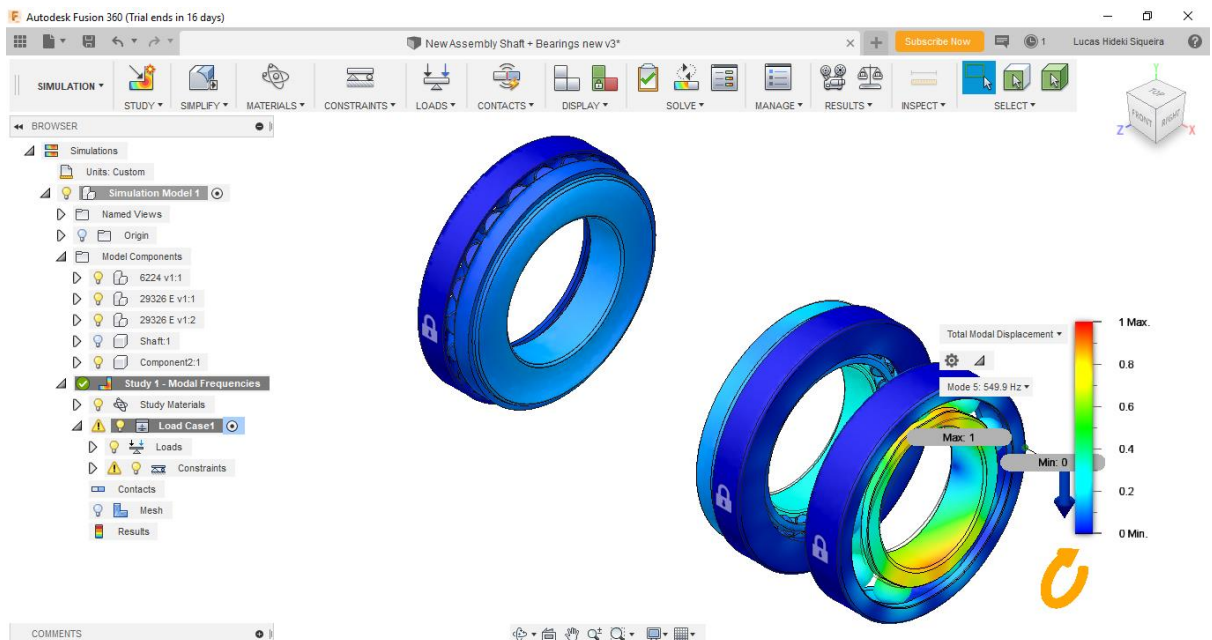
Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 47 - Modo de vibração 5.



Fonte: Próprio autor. (2019).

Figura 48 - Modo de vibração 5 (2).



Fonte: Próprio autor. (2019).

Tabela 1 - Resumo dos resultados da simulação, dimensões em milímetros.

☐ **Result Summary**

| Frequency        | Participation X | Participation Y | Participation Z |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Mode 1: 194.2 Hz | 0               | 0.346700009     | 38.0461991      |
| Mode 2: 197 Hz   | 0.0001          | 38.3210987      | 0.342399999     |
| Mode 3: 512.6 Hz | 0.0004          | 0.002           | 0.440499978     |
| Mode 4: 521.9 Hz | 0.001           | 0.211700005     | 0.0011          |
| Mode 5: 549.9 Hz | 0.0004          | 5.76100014      | 0.127500005     |

Fonte: Próprio autor. (2019).

Os dois primeiros modos de vibração possuem frequências naturais mais próximas das frequências harmônicas da bomba, 194,2 Hz e 197 Hz, respectivamente. As demais frequências naturais já estão distantes da realidade.

É possível perceber que os maiores deslocamentos nodais estão presentes na pista interna do rolamento 29326 E – lado rotor, com exceção do modo de vibração 5 onde a pista interna do rolamento 6224 possui os maiores deslocamentos nodais. A pista interna do rolamento 29326 E - lado rotor foi o componente que teve falha prematura e iniciou o colapso do estudo de caso apresentado anteriormente.

Os maiores deslocamentos nodais estão orientados no eixo y e z, o que pode ser atribuído pelas magnitudes dos esforços radiais e axiais que o arranjo é submetido em operação.

## 5.2 FATOR DE AMPLIFICAÇÃO

Na teoria, a sexta e a sétima frequência harmônica do arranjo são as mais próximas das frequências naturais encontradas nos dois primeiros modos de vibração, considerando a rotação nominal da bomba (1792 rpm). Porém, os espectros de frequência obtidos pela análise de vibração indicam que a frequências harmônicas sem velocidade de vibração desprezível mais próximas das frequências naturais são a quarta e a quinta, 119,74 Hz e 149,68 Hz. Portanto, foi calculado o fator de amplificação apenas com as frequências de excitação encontradas na análise de vibração. Considerou-se o sistema como não amortecido ( $\zeta = 0$ ), que é a condição mais severa.

Para  $f_n = 194,2$  Hz e  $\Omega = 119,74$  Hz:

$$r = \frac{119,74}{194,2} = 0,62$$

$$Ds = \frac{1}{\sqrt{[(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2]}} = \frac{1}{\sqrt{[(1-0,62^2)^2 + (2 \times 0 \times 0,62)^2]}} = 1,62$$

Para  $f_n = 194,2$  Hz e  $\Omega = 149,68$  Hz:

$$r = \frac{149,68}{194,2} = 0,77$$

$$Ds = \frac{1}{\sqrt{[(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2]}} = \frac{1}{\sqrt{[(1-0,77^2)^2 + (2 \times 0 \times 0,77)^2]}} = 2,46$$

Para  $f_n = 197$  Hz e  $\Omega = 119,74$  Hz:

$$r = \frac{119,74}{197} = 0,61$$

$$Ds = \frac{1}{\sqrt{[(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2]}} = \frac{1}{\sqrt{[(1-0,61^2)^2 + (2 \times 0 \times 0,61)^2]}} = 1,59$$

Para  $f_n = 197$  Hz e  $\Omega = 149,68$  Hz:

$$r = \frac{149,68}{197} = 0,76$$

$$Ds = \frac{1}{\sqrt{[(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2]}} = \frac{1}{\sqrt{[(1-0,76^2)^2 + (2 \times 0 \times 0,76)^2]}} = 2,37$$

Os cálculos dos fatores de amplificação de vibração apresentaram valores baixos, mesmo com o fator de amortecimento nulo. O maior valor encontrado foi  $Ds = 2,46$ , considerado o primeiro modo de vibração ( $f_n = 194,2$  Hz) e frequência de excitação  $\Omega = 149,68$  Hz.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se concluir que o estudo obteve os resultados esperados e os objetivos do trabalho foram alcançados. Os fatores de amplificação calculados com as frequências naturais da simulação e as frequências de excitação dos espectros de vibração comprovam que não há risco de falha prematura por ressonância, mesmo no cenário considerando o sistema não amortecido.

Nota-se também que as maiores deformações apresentadas na simulação estão presentes na pista interna do rolamento 29326E – lado rotor nos primeiros quatro modos de vibração. Este componente foi o que apresentou falha prematura e iniciou o colapso do conjunto do estudo de caso.

As informações do manual do fabricante da bomba, o manual de operação da empresa B e o estudo de caso apresentados foram suficientes para obter os resultados da simulação e para conhecimento do processo de fabricação do polietileno de alta densidade com reator tipo *loop slurry*.

Concluiu-se também que as etapas mais importantes para realizar uma simulação com método dos elementos finitos são a modelagem e montagem dos componentes no software e a aplicação das condições de contorno. Com estas etapas sendo cumpridas corretamente, o estudo terá resultados coerentes e próximos da realidade. Recomenda-se também seguir o planejamento da análise estrutural da literatura.

## REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. São Paulo: Érica, 2000.

ASSUNÇÃO, T. M. R. C. **Considerações sobre efeitos dinâmicos e carregamentos induzidos por fontes de excitação em estruturas industriais**. 2009. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

AUTODESK, Inc. **Fundamentos básicos para uso do Software Autodesk Fusion 360®**. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/get-started>. Acesso em: 29 jul. 2019.

ESSENCIAL CHEMICAL INDUSTRY. **Poly(ethene)**. Disponível em: <http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polyethene.html>. Acesso em: 29 jul. 2019.

FLOWSERVE CORPORATION. **Catálogo Flowserve: Lawrence Pumps® AFH9500 polyolefin loop reactor pump**. Disponível em: [https://www.flowserve.com/sites/default/files/2016-07/ps-90-23-ea4\\_4.pdf](https://www.flowserve.com/sites/default/files/2016-07/ps-90-23-ea4_4.pdf). Acesso em: 29 jul. 2019.

NÓBREGA, P. G. B.; HANAI, J. B. A análise modal na avaliação de estruturas de concreto pré-moldado. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO, 1., 2005, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos, 2005. Disponível em: [http://www.set.eesc.usp.br/1enpppcpm/cd/conteudo/trab\\_pdf/132.pdf](http://www.set.eesc.usp.br/1enpppcpm/cd/conteudo/trab_pdf/132.pdf). Acesso em: 29 jul. 2019.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

SIEMENS AG. **Análise modal**. Disponível em: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt/our-story/glossary/modal-analysis/13172>. Acesso em: 29 jul. 2019.

SKF Ferramentas S.A.; SKF do Brasil. **SKF tecnologia de rolamentos**, 2015.

SKF Ferramentas S.A.; SKF do Brasil. **Folha de dados e modelo 3D do rolamento SKF 29326E**. Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/roller-bearings/spherical-roller-thrust-bearings/spherical-roller-thrust-bearings/index.html?designation=29326%20E>. Acesso em: 29 jul. 2019a.

SKF Ferramentas S.A.; SKF do Brasil. **Folha de dados e modelo 3D do rolamento SKF 23026 CC/W33**. Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/roller-bearings/spherical-roller-bearings/spherical-roller-bearings/index.html?designation=23026%20CC%20FW33>. Acesso em: 29 jul. 2019b.

SKF Ferramentas S.A.; SKF do Brasil. **Folha de dados e modelo 3D do rolamento SKF 6224**. Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/ball->

bearings/deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html?designation=6224  
Acesso em: 29 jul. 2019c.