

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO – IFSP

DANIEL COPPEDÉ

**ANÁLISE POR SIMULAÇÃO DE ROTORES DE MATERIAIS CONJUGADOS
PARA BATERIAS ELETROMECCÂNICAS**

SÃO PAULO

2018

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO – IFSP

MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DANIEL COPPEDÉ

**ANÁLISE POR SIMULAÇÃO DE ROTORES DE MATERIAIS CONJUGADOS
PARA BATERIAS ELETROMECCÂNICAS**

Dissertação apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Frajuca

Coorientador: Prof. Dr. Fabio da Silva Bortoli

São Paulo

2018

Catálogo na fonte
Biblioteca Francisco Montojos - IFSP Campus São Paulo
Dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C785a	Coppedé, Daniel Análise por simulação de rotores de materiais conjugados para baterias eletromecânicas / Daniel Coppedé. São Paulo: [s.n.], 2018. 182 f. il. Orientador: Prof. Dr. Carlos Frajuca Co-orientador: Prof. Dr. Fábio da Silva Bortoli Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2018. 1. Bateria Eletromecânica. 2. Elementos Finitos. 3. Flywheel. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo II. Título. CDD 620.1
-------	---

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

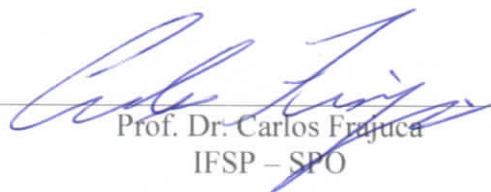
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**“ANÁLISE POR SIMULAÇÃO DE ROTORES DE MATERIAIS CONJUGADOS PARA
BATERIAS ELETROMECCÂNICAS”**

Autor: Daniel Coppede

Orientador: Prof. Dr. Carlos Frajuca

A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou essa dissertação:



Prof. Dr. Carlos Frajuca
IFSP – SPO



Prof. Dr. Givanildo Alves dos Santos
IFSP – SPO



Prof. Dr. Sergio Turano de Souza
FATEC - SP

São Paulo, 03 de março de 2018

DEDICATÓRIA

Dedico a Deus, em sua infinita bondade e justiça, sem sua permissão, nada seria feito.

A memória de meu pai, Nelson Coppedé, e de minha mãe, Maria Aparecida Batistella Coppedé, que me deram em suas vidas exemplos de caráter e virtudes, sempre sentirei saudades.

A minha mulher Katia, meus filhos Isabella e Rafael, minha tia-mãe Prudência Coppedé, que estiveram sempre ao meu lado mesmo quando, por força das tarefas, eu não estava ao lado deles.

A minha família, irmã, tias e tios, avós e avôs, todos os amigos e colegas que participaram, participam e participarão da minha vida.

Ao trabalho, ao mérito do esforço, pois qualquer recompensa não se faz justa sem eles.

“Nada resiste ao trabalho”

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares e amigos pelo apoio e incentivo que me deram ao longo do desenvolvimento desse trabalho e toda a paciência e compreensão que tiveram com minhas faltas.

Agradecimentos mais que especiais aos meus orientadores, Prof. Dr. Carlos Frajuca e Prof. Dr. Fabio da Silva Bortoli, por toda a orientação e paciência.

Ao programa de pós-graduação do IFSP, representado pelo Prof. Dr. Givanildo Alves dos Santos, pelos momentos compartilhados sem esmorecimento e a todos os professores que fizeram parte desse caminhar.

Enfim, a todos aqueles que de uma maneira ou de outra contribuíram para que este percurso pudesse ser concluído.

EPÍGRAFE

“Deixe o futuro dizer a verdade e avaliar cada um de acordo com seu trabalho e suas conquistas”.

Nicola Tesla

Resumo

O trabalho apresenta um estudo voltado a um tipo específico de roda de inércia, conhecida como *Flywheel*, capaz de acumular energia cinética quando em movimento. Foram realizadas análises computacionais sobre a geometria e a proporção de materiais conjugados para o rotor. Estas rodas são utilizadas em baterias eletromecânicas que detém uma maior vida útil se comparada com outros tipos de bateria comercialmente conhecidas. Este estudo visa à análise de uma roda de inércia girando a uma velocidade de rotação de até 150.000 rpm, assim concentrando maior quantidade de energia e reduzindo dimensões e custos de material. Para tanto, neste trabalho foram criados e simulados, pelo Método de Elementos Finitos, vários tipos de geometrias de rodas de inércia, com a intenção de verificar o comportamento das tensões de resistência mecânica do material na sua elevada velocidade de rotação. Com estes dados escolheu-se a geometria e o material que juntos obtiveram o melhor desempenho para o desenvolvimento de uma roda de inércia de baixo custo e elevado rendimento, com resultados obtidos de rotações acima dos 170.000 rpm.

Palavras-chave: *Flywheel*, Bateria Eletromecânica, Elementos Finitos.

Abstract

The work presents a study focused on a specific type of inertia wheel, known as Flywheel, capable of accumulating kinetic energy when in motion. Computational analyzes were performed on the geometry and proportion of conjugate materials for the rotor. These wheels are used in electromechanical batteries which holds a longer life span compared to other commercially known types of battery. This study aims at analyzing a rotating inertia wheel at a rotational speed of up to 150,000 rpm, thus concentrating more energy and reducing material dimensions and costs. For this purpose, several types of inertia wheel geometries were created and simulated by the Finite Element Method, with the intention of verifying the behavior of the tensile strengths of the material at its high speed of rotation. With this data the geometry and the material that together obtained the best performance for the development of a wheel of inertia of low cost and high yield with results obtained of rotations beyond 170,000 rpm was chosen.

Keywords: Flywheel, Electromechanical Battery, Finite Elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Volante de inércia	19
Figura 2- Volante de inércia atuando em um motor à explosão.....	20
Figura 3 – Gyrobus 1ª geração	23
Figura 4- Volante de Inércia Gyrobus 1ª geração.....	24
Figura 5- Gyrobus 3ª geração	25
Figura 6 - Representação de bateria eletromecânica	26
Figura 7 – Modelo de <i>Flywheel</i> em Aço Revestido	27
Figura 8 - Banco de Baterias	28
Figura 9 - Destroços de Rotor Rompido.....	29
Figura 10 – Modelo CAD de uma peça e sua representação em malha.	34
Figura 11- Demonstração de malha para análise em MEF.....	36
Figura 12- Componentes de Tensão em Três Dimensões	37
Figura 13 - Diagrama Sistema Ativo e Passivo.....	42
Figura 14 - Analise Simulation.....	46
Figura 15- Graus de Liberdade	48
Figura 16 - Modelo de Rotor de Bateria Eletromecânica.....	61
Figura 17- Geometria indicada no estudo IFSP.....	61
Figura 18- Modelo 01 em corte	64

Figura 19- Resultado da análise do Modelo 01 em aço.....	65
Figura 20- Modelo 02 em corte	66
Figura 21 – Resultado da análise do Modelo 02 em aço	67
Figura 22 - Modelo 03 em corte	68
Figura 23- Resultado da análise do Modelo 03 em aço.....	69
Figura 24 - Modelo 04 em corte	70
Figura 25- Resultado da análise do Modelo 04 em aço.....	71
Figura 26 - Modelo 05 em corte	72
Figura 27- Resultado da análise do Modelo 05 em aço.....	73
Figura 28- Modelo 06 em corte	74
Figura 29- Resultado da análise do Modelo 06 em fibra de carbono	75
Figura 30- Modelo 07 em corte	76
Figura 31- Resultado da análise do Modelo 07 em aço.....	77
Figura 32- Modelo 08 em corte	78
Figura 33 - Resultado da análise do Modelo 08 em aço.....	79
Figura 34- Rotor em Aço <i>Maraging</i> sem Recobrimento.....	85
Figura 35 – Resultado da Análise do Rotor em aço <i>Maraging</i>	86
Figura 36- Rotor com FC espessura 5 mm	87
Figura 37 – Resultado da Análise do Rotor de 95 mm sem Revestimento	88
Figura 38- Resultado da Análise do Rotor de 95 mm com Revestimento de 5 mm	88

Figura 39- Rotor com FC espessura 10 mm	89
Figura 40 - Resultado da Análise do Rotor de 90 mm sem Revestimento.....	90
Figura 41 - Resultado da Análise do Rotor de 90 mm com Revestimento de 10 mm ...	90
Figura 42- Rotor com FC espessura 15 mm.....	91
Figura 43 - Resultado da Análise do Rotor de 85 mm sem Revestimento.....	92
Figura 44 - Resultado da Análise do Rotor de 85 mm com Revestimento de 15 mm ...	92
Figura 45- Rotor com FC espessura 20 mm.....	93
Figura 46 - Resultado da Análise do Rotor de 80 mm sem Revestimento.....	94
Figura 47- Resultado da Análise do Rotor de 80 mm com Revestimento de 20 mm	94
Figura 48- Rotor com FC espessura 25 mm.....	95
Figura 49 - Resultado da Análise do Rotor de 75 mm sem Revestimento.....	96
Figura 50 - Resultado da Análise do Rotor de 75 mm com Revestimento de 25 mm ...	96
Figura 51- Rotor com FC espessura 30 mm.....	97
Figura 52 - Resultado da Análise do Rotor de 70 mm sem Revestimento.....	98
Figura 53 - Resultado da Análise do Rotor de 70 mm com Revestimento de 30 mm ...	98
Figura 54- Rotor em Fibra de Carbono	99
Figura 55 - Resultado da Análise do Rotor em Fibra de Carbono	100
Figura 56- Rotor Maciço	104
Figura 57- Rotor Parcialmente Preenchido	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Densidade de energia e potência por massa.	22
Tabela 2 - Grau de Vácuo.....	40
Tabela 3 - Tipos de Fibra de Carbono	51
Tabela 4 - Resistência à tração dos materiais selecionados.....	55
Tabela 5- Dimensões dos Modelos.....	62
Tabela 6 - Características modelo 01	64
Tabela 7 - Características modelo 02	66
Tabela 8 - Características modelo 03	68
Tabela 9 – Características modelo 04.....	70
Tabela 10 – Características modelo 05.....	72
Tabela 11 - Características modelo 06	74
Tabela 12 - Características modelo 07	76
Tabela 13 - Características modelo 08	78
Tabela 14 - Características e resultados rotor aço	85
Tabela 15 - Características e resultados rotor com FC 5 mm:	87
Tabela 16 – Características e resultados rotor com FC 10 mm:.....	89
Tabela 17 - Características e resultados rotor com FC 15 mm:	91
Tabela 18 - Características e resultados rotor com FC 20 mm:	93

Tabela 19 - Características e resultados rotor com FC 25 mm:	95
Tabela 20 - Características e resultados rotor com FC 30 mm:	97
Tabela 21 - Características e resultados do rotor de fibra de carbono:.....	99
Tabela 22 – Valores obtidos de Rotação Máxima e Energia.....	101
Tabela 23- Materiais para Pesquisas Futuras	105

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Cálculo de energia cinética rotacional 21

Equação 2 – Cálculo de momento de inércia de um cilindro maciço 21

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1– Rotação Máxima dos Modelos Analisados	80
Gráfico 2 – Energia Rotacional dos Modelos Analisados	81
Gráfico 3- Comparação entre rotores com raios internos de 65 e 60 mm - Rotação Máxima.....	83
Gráfico 4 - Comparação entre rotores com raios internos de 65 e 60 mm – Energia Rotacional.....	84
Gráfico 5- Rotação Máxima dos Rotores Revestidos.....	102
Gráfico 6- Energia Rotacional dos Rotores Revestidos	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer-Aided Design</i> – Desenho Auxiliado por Computador
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i> – Engenharia Auxiliada por Computador
CPTM	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
FEA	<i>Finite Element Analysis</i> – Análise por Elementos Finitos
HD	<i>Hard Disk</i> – Disco Rígido
IFSP	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
MAV	Máquina de Alta Velocidade
MEC	Método dos Elementos de Contorno
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Denominação de Norma da ABNT
PVC	Problema de Valores de Contorno
SSD	<i>Solid-State Drive</i> – Unidade de Estado Sólido
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i> - Fonte de Energia Ininterrupta

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Justificativa	23
1.2. Objetivo Geral.....	29
1.3. Objetivos Específicos	29
1.4. Organização da Dissertação	30
2. METODOLOGIA	31
2.1. Definição de estudo de Caso.....	31
2.2. Definição de Caráter Exploratório	32
2.3. Método Quantitativo	32
2.4. Método Qualitativo	33
2.5. Método dos Elementos Finitos	33
2.6. Tensor de Tensão de Cauchy –Graus de liberdade.....	36
2.7. Limite de Escoamento de von Mises	38
3. INFORMAÇÕES TECNOLÓGICAS	39
3.1. Mancais.....	39
3.1.1. Mancais Magnéticos.....	41
3.2. <i>SolidWorks</i>	44
3.2.1. <i>SolidWorks Simulation</i>	45
3.2.1. <i>SolidWorks Motion</i>	47
4. ANÁLISE DE MATERIAIS.....	49
4.1. Fibra de Carbono	49
4.2. Aço <i>Maraging</i>	52
4.3. Materiais Seleccionados	55

5. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	56
6. GEOMETRIAS A SEREM ANALISADAS	57
6.1. Análise Geométrica.....	57
6.2. Modelos	60
6.2.1. Modelo de Referência.....	60
6.2.2. Validação dos Modelos	62
6.2.3. Geometrias Analisadas	62
6.2.4. Modelo 01.....	64
6.2.5. Modelo 02.....	66
6.2.6. Modelo 03.....	68
6.2.7. Modelo 04.....	70
6.2.8. Modelo 05.....	72
6.2.9. Modelo 06.....	74
6.2.10. Modelo 07	76
6.2.11. Modelo 08	78
6.3. Resultados.....	80
7. MODELOS CONJUGADOS.....	82
7.1. Rotor em aço.....	85
7.2. Rotor com Revestimento em FC de 5mm.....	87
7.3. Rotor com Revestimento em FC de 10 mm.....	89
7.4. Rotor com Revestimento em FC de 15 mm.....	91
7.5. Rotor com Revestimento em FC de 20 mm.....	93
7.6. Rotor com Revestimento em FC de 25 mm.....	95

7.7. Rotor com Revestimento em FC de 30 mm.....	97
7.8. Rotor em Fibra de Carbono	99
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	101
8.1. Trabalhos Futuros	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
APÊNDICE A – SIMULAÇÃO MODELO 01 EM AÇO <i>MARAGING</i>	111
APÊNDICE B – SIMULAÇÃO MODELO 01 EM FIBRA DE CARBONO	114
APÊNDICE C – SIMULAÇÃO MODELO 02 EM AÇO <i>MARAGING</i>	117
APÊNDICE D – SIMULAÇÃO PEÇA 02 EM FIBRA DE CARBONO.....	120
APÊNDICE E – SIMULAÇÃO MODELO 03 EM AÇO <i>MARAGING</i>	123
APÊNDICE F – SIMULAÇÃO MODELO 03 EM FIBRA DE CARBONO.....	126
APÊNDICE G – SIMULAÇÃO MODELO 04 EM AÇO <i>MARAGING</i>	129
APÊNDICE H – SIMULAÇÃO MODELO 04 EM FIBRA DE CARBONO.....	132
APÊNDICE I – SIMULAÇÃO MODELO 05 EM AÇO <i>MARAGING</i>	135
APÊNDICE J – SIMULAÇÃO MODELO 05 EM FIBRA DE CARBONO	138
APÊNDICE K – SIMULAÇÃO MODELO 06 EM AÇO <i>MARAGING</i>	141
APÊNDICE L – SIMULAÇÃO MODELO 06 EM FIBRA DE CARBONO	144
APÊNDICE M – SIMULAÇÃO MODELO 07 EM AÇO <i>MARAGING</i>	147
APÊNDICE N – SIMULAÇÃO MODELO 07 EM FIBRA DE CARBONO.....	150
APÊNDICE O – SIMULAÇÃO MODELO 08 EM AÇO <i>MARAGING</i>	153
APÊNDICE P – SIMULAÇÃO MODELO 08 EM FIBRA DE CARBONO.....	156
APÊNDICE Q – SIMULAÇÃO ROTOR COM REVESTIMENTO DE 5 MM.....	159

APÊNDICE R – SIMULAÇÃO ROTOR COM REVESTIMENTO DE 10 MM	162
APÊNDICE S – SIMULAÇÃO ROTOR COM REVESTIMENTO DE 15 MM.....	165
APÊNDICE T – SIMULAÇÃO ROTOR COM REVESTIMENTO DE 20 MM	168
APÊNDICE U – SIMULAÇÃO ROTOR COM REVESTIMENTO DE 25 MM.....	171
APÊNDICE V – SIMULAÇÃO ROTOR COM REVESTIMENTO DE 30 MM.....	174
APÊNDICE W – SIMULAÇÃO DO ROTOR COM RAO 65 MM EM AÇO <i>MARAGING</i>	177
APÊNDICE X – SIMULAÇÃO DO ROTOR COM RAO DE 65 MM EM FIBRA DE CARBONO.....	180

1. INTRODUÇÃO

O conceito de utilização de um volante de inércia (Figura 1) é notório e foi largamente empregado na civilização moderna, com uma ampla adoção desde o período da revolução industrial.

O princípio é o armazenamento de energia cinética no movimento rotativo do volante para consumo posterior, uniformizando o movimento do volante uma vez que a energia não se altera abruptamente com a aplicação de forças limitadas. Esta energia é disposta em oposição as acelerações ocorridas em determinados momentos da operação rotativa (movimento circular).



Figura 1- Volante de inércia

Fonte: SCPOLIAS

Como exemplos podem ser citados o momento de deformação ou corte que ocorre na operação de uma prensa mecânica, igualmente o movimento do virabrequim de um motor à explosão, o uso do volante no motor amortece os impulsos bruscos dos pistões e origina uma rotação relativamente suave ao virabrequim (Figura 2). Este sistema simples é conhecido como *Flywheel* de 1ª geração (STEPHAN, 2008), cujo

objetivo principal é manter ou colocar em movimento por meio da energia armazenada, um determinado eixo ou mecanismo.

Com o desenvolvimento tecnológico ocorrido nos diversos campos da engenharia, passou a ser objeto de estudo novas utilizações do volante de inércia, bem como novas formas construtivas e conceituais, inclusive com o advento de novas solicitações do equipamento. A ideia de um volante com uma grande massa evoluiu para um volante de massa menor, porém com uma velocidade muito maior (RIBEIRO, 2008).

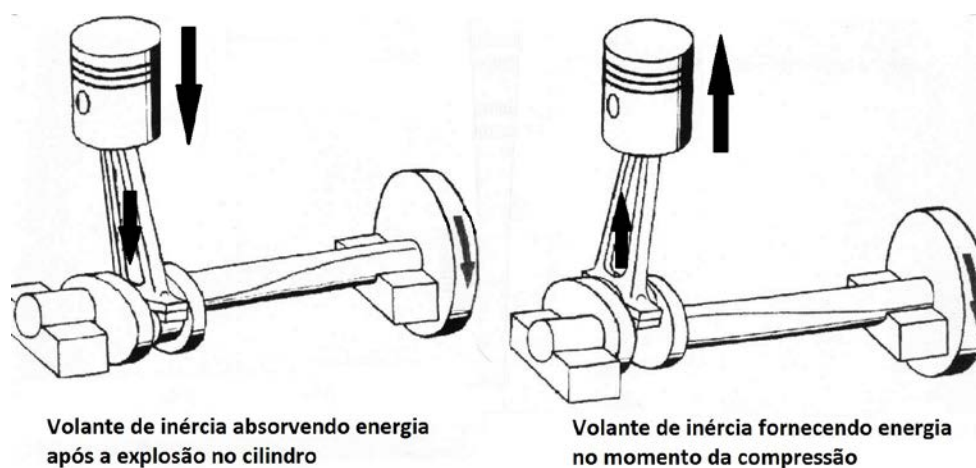


Figura 2- Volante de inércia atuando em um motor à explosão

Fonte: AVIAÇÃO EXPERIMENTAL

Para utilizar o volante de inércia como uma bateria eletromecânica, o princípio de funcionamento é muito simples: trata-se de colocar basicamente uma roda (volante) a girar em situações em que não esteja sujeita a qualquer força de atrito ou a qualquer outra ação exterior (JUNLING, 2004). É uma forma extremamente simples de armazenar energia mecânica, em que facilmente se converte energia mecânica em energia elétrica e vice-versa, utilizando um simples motor gerador elétrico.

A equação 1 demonstra que a energia cinética armazenada é proporcional ao momento de inércia I e ao quadrado da velocidade angular ω , demonstrando nitidamente a vantagem do novo conceito:

Equação 1 – Cálculo de energia cinética rotacional

$$E_c = \frac{I\omega^2}{2}$$

Em que:	E_c	Energia Cinética (J)
	I	Momento de Inércia (kg.m ²)
	ω	Velocidade Angular (Rad/s)

Pela observação da fórmula, fica evidente que ao aumentar a velocidade angular do volante, a energia cinética armazenada será aumentada na metade do quadrado desta variação, o que favorece em muito o objetivo de armazenar a energia cinética com a diminuição considerada da massa do rotor. Como exemplo para o cálculo do momento de inércia, segue a equação:

Equação 2 – Cálculo de momento de inércia de um cilindro maciço

$$I = \frac{mR^2}{2}$$

Em que:	I	Momento de Inércia (kg.m ²)
	m	Massa (kg)
	R	Raio em torno do eixo (m)

Porém, as perdas por atrito de contato nos mancais mecânicos, intensificadas em função da alta velocidade, e o aumento das tensões mecânicas nas partes girantes do sistema, eram algumas das limitações encontradas nos *Flywheel* de 2ª geração,

limitações que acabavam por prejudicar a eficiência do sistema, mas que já podem ser suplantadas devido:

- Ao desenvolvimento de novos materiais compósitos, como a fibra de carbono;
- Ao emprego de sistemas de vácuo, que reduzem as perdas por atrito;
- À utilização de mancais magnéticos, que eliminam o atrito por contato;
- À evolução da microeletrônica, que permitiu sistemas de controle mais sofisticados e de menor custo.

A reunião destes fatores, resultado de uma evolução tecnológica recente, está possibilitando o desenvolvimento e a implementação dos *Flywheel* de 3ª geração, que possuem desempenho muito superior à geração anterior, e cuja velocidade de rotação pode atingir dezenas de milhares de rpm. Desta forma, cresce o número de possibilidades para o emprego de *Flywheels*, visto que, esta nova geração possui densidades de energia e potência superiores às baterias, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Densidade de energia e potência por massa.

Dispositivo Armazenador de Energia	Densidade de Energia (Wh/kg)	Densidade de Potência (W/kg)
Baterias Eletroquímicas	35	150
<i>Flywheel</i> 2ª Geração	5,5	730
<i>Flywheel</i> 3ª Geração	56	670

Fonte: RIBEIRO, 2008

1.1. Justificativa

O conceito de bateria eletromecânica data da década de 1940, quando foi desenvolvido e implantado um novo modelo de ônibus elétrico, o *Gyrobús* (Figura 3), pela empresa suíça Maschinenfabrik Oerlikon, na cidade de Yverdon-les-Bains, patenteado pelo engenheiro Bjarne Storsand em 1946. Os primeiros sistemas foram desenvolvidos utilizando-se mancais mecânicos, mas, em função do baixo rendimento do conjunto, motivado pela perda de energia por meio do atrito e da dificuldade em se obter rotações elevadas, esses primeiros sistemas se mostraram inviáveis.



Figura 3 – Gyrobús 1ª geração

Fonte: PROAKTIVA

Foram construídos dois protótipos do Gyrobús. Para sua fabricação foram utilizados chassis de caminhões FBW (*Franz Brozincevic & Cie*, Wetzikon - Suíça), modelo de 1932. O volante foi posicionado no centro deste chassi e entre os eixos. Este volante pesava 1.500 kg e possuía um diâmetro de 1,6 m, era posicionado em uma câmara estanque preenchida com gás hidrogénio a uma pressão reduzida de 70 kPa para

diminuir a resistência do ar. O volante girava a uma velocidade máxima de 3.000 rpm (Figura 4).



Figura 4- Volante de Inércia Gyrobus 1ª geração
Fonte: PROAKTIVA

Ocorreram outras duas tentativas de implantação de sistema *Gyrobus*, uma em Léopoldville, no Congo Belga (atual República Democrática do Congo), com 12 veículos em uma linha de 20 km, a maior linha já implantada de *Gyrobus* e a última tentativa de implantação em 1956, na cidade de Merelbeke, Bélgica, com três veículos que prestaram serviços até 1959 (Figura 5). Um destes veículos se encontra preservado no Museu do Bonde de Antuérpia (*Tram Museum*), Bélgica.

O desenvolvimento de mancais magnéticos e de novos dispositivos digitais microprocessados, possibilita a aplicação de rotações elevadas ao rotor de massa, da ordem de 150.000 rpm, viabilizando novos projetos de baterias eletromecânicas. Com isso, a possibilidade de utilização da bateria eletromecânica (Figura 6), seja como uma UPS, como um gerador auxiliar ou como um estabilizador da tensão e frequência, se mostra plenamente viável. Esta velocidade angular, maior que 10.000 rad/s, transforma

o objeto de estudo deste trabalho, a construção do rotor para bateria eletromecânica, em um grande desafio que deverá fazer uso dos recentes avanços tecnológicos na área de tecnologia dos materiais.



Figura 5- Gyrobus 3ª geração

Fonte: LAGUERRI

O estudo deste rotor deve ser considerado como o estudo de uma MAV, citado por FERNANDES (2015) como: “Máquinas de alta velocidade são produtos ou sistemas que operam a velocidades que desafiam os atuais métodos e tecnologias convencionais” (WATSON, 1999).

A evolução do projeto levará a aquisição de conhecimento sobre esta forma alternativa e sustentável de armazenamento de energia. Conhecer o comportamento e a tecnologia desta bateria eletromecânica é fator preponderante para viabilizar o armazenamento de energia por meio do movimento, ou seja, energia cinética.

Esta pesquisa permitirá avaliar de forma mais abrangente a otimização entre os materiais utilizados para a fabricação do rotor do sistema e poderá ser objeto de futuros investimentos na área de geração de energia elétrica renovável por meio da conservação da energia cinética.

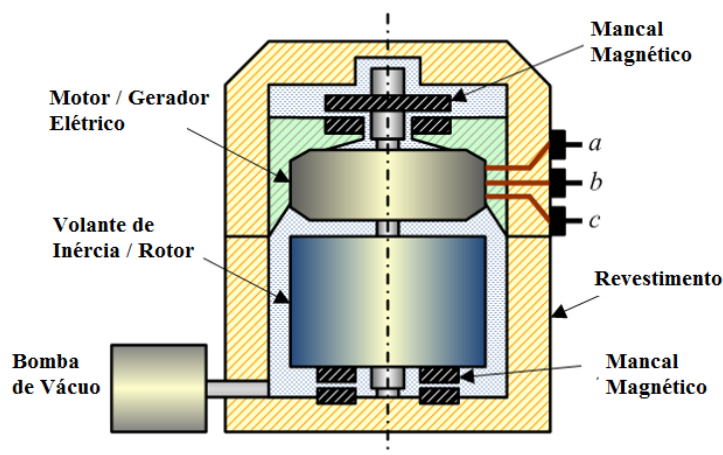


Figura 6 - Representação de bateria eletromecânica

Fonte: INTECHOPEN

Atualmente o planeta apresenta sinais evidentes de mudanças climáticas, especialmente o aquecimento da atmosfera, conforme relatório publicado pela ONU recentemente (IPCC, 2014). Este aquecimento pode gerar inúmeras consequências danosas a dinâmica dos ecossistemas. As mudanças climáticas globais são atribuídas, em grande parte, ao lançamento na atmosfera de grandes quantidades de carbono até então armazenadas sob a crosta terrestre na forma de combustíveis fósseis como o petróleo e carvão mineral. Estima-se que a concentração de gás carbônico aumentou em 31% nos últimos 250 anos, sendo que 75% desse carbono foi proveniente da queima de combustíveis fósseis.

A sociedade está passando por um grande avanço científico e tecnológico, e este avanço está consumindo os recursos do planeta, nesse contexto o trabalho em novas fontes de energia (principalmente limpas) e racionalização do consumo de energia tem importância fundamental.

O homem sempre necessitou de fontes energéticas. A necessidade de armazenar a energia para utilização posterior existe porque essas fontes não estão disponíveis a todo o momento. Agora debate-se o problema de armazenar a energia de uma forma rápida e eficaz, que não seja prejudicial ao ambiente e que atenda ao pico de demanda.

As indústrias poderiam armazenar energia durante o período da noite, quando seu custo é menor em relação ao período diurno. Hoje em dia utilizam-se acumuladores químicos bastante eficazes (na figura 8 pode ser observado um banco de baterias da CPTM - Estação Suzano), embora a sua razão densidade de energia por unidade de peso esteja longe dos objetivos pretendidos com a bateria eletromecânica. Além disso, mostram-se agressivos ao meio ambiente devido às substâncias que os compõem (zinco, chumbo, cádmio, mercúrio, ácidos, bases, etc.) e também perdem a sua carga ao longo do tempo (mesmo sem estarem em utilização). Para mitigar estes inconvenientes, a sociedade necessita de novas soluções, soluções que talvez tenham seu início em novas utilizações de dispositivos conhecidos desde os primórdios da sua existência, como a roda. Assim surge a oportunidade de emprego da bateria eletromecânica.



Figura 7 – Modelo de *Flywheel* em Aço Revestido

Fonte: KINECT

A bateria eletromecânica tem um enorme campo de aplicação, entre eles: instalações de emergência, instalações industriais, centrais de energia elétrica, elevadores e guindastes, freio regenerativo e veículos híbridos (FLYNN, 2008).



Figura 8 - Banco de Baterias

Fonte: Arquivo do autor

Caso o dimensionamento não seja executado com perfeição, a ruptura do rotor pode ser catastrófica, houve um caso no ano de 1985, quando a empresa *Test Devices, Inc* (<http://www.testdevices.com>) estava testando um rotor de aço maciço, com massa de 272 kg e raio de 380 mm em um sistema de ensaio de rotação, que rompeu quando estava se movimentando a 14.000 rpm, aproximadamente (Figura 9). Alguns dos danos causados foram: estilhaços que romperam as paredes do laboratório, o arremesso da porta do laboratório e as vigas estruturais do edifício danificadas.



Figura 9 - Destroços de Rotor Rompido

Fonte: COURSEHERO

1.2. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo analisar diferentes geometrias entre os materiais constituintes do rotor que otimize o funcionamento do sistema de armazenamento de energia cinética de uma bateria eletromecânica.

1.3. Objetivos Específicos

- Estudar os possíveis tipos de materiais que resistam à solicitação decorrente da elevada rotação do sistema e definir uma combinação de materiais mais viável a ser implantada;
- Estudo da proporção e geometria de interface dos diferentes materiais integrantes do rotor utilizando o modelo de geometria proposto, que resista à solicitação decorrente da elevada rotação do sistema;
- Simular por meio de *software* dedicado as tensões e resistências destes materiais.
- Estudar estruturas com matérias conjugados.

1.4. Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em 8 capítulos, assim estruturados:

O presente capítulo introduz o contexto e a relevância deste trabalho, bem como apresenta a justificativa, o objetivo, e a estrutura desta dissertação.

O Capítulo 2 apresenta a metodologia do trabalho e expõe conceitos que são importantes para o desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 3 aborda informações sobre mancais e *softwares* de computação gráfica.

O Capítulo 4 disserta sobre a análise de matérias para utilização no rotor.

O Capítulo 5 indica as geometrias analisadas, suas características e desempenho.

O Capítulo 6 trata dos equipamentos utilizados para as análises computacionais.

O Capítulo 7 apresenta os resultados das análises dos rotores conjugados.

O Capítulo 8 expõe os resultados obtidos e as conclusões do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2. METODOLOGIA

Essa pesquisa foi baseada em uma investigação de caráter exploratório por meio de estudo de casos. O trabalho se valeu da utilização de análises efetuadas com o *software SolidWorks* a partir de uma geometria e materiais previamente selecionados.

A escolha do *SolidWorks* para ser o *software* utilizado neste estudo se deve a razões descritas em subitem posterior.

Para cada razão e geometria foi analisado, por meio do *SolidWorks*, o comportamento mecânico do material como, por exemplo, a resistência à tração e ainda, a capacidade de acumular energia, pelo Método de Elementos Finitos.

Foram utilizados, para análise da geometria e material, como *softwares* dedicados, as ferramentas *SolidWorks Simulation* e o *SolidWorks Motion* da *SolidWorks*.

2.1. Definição de estudo de Caso

Segundo TRIVIÑOS (1987), definição de estudo de caso “é uma categoria de pesquisa cujo objeto é uma unidade que se analisa aprofundadamente”. É um método de pesquisa qualitativa que consiste em analisar um dado de forma mais rigorosa com muita particularidade que exige objetividade, precisão para não correr o risco de se formar opiniões equivocadas, tentando esclarecer decisões a serem tomadas a respeito do caso observado, partindo do seu contexto real.

De acordo com SEVERINO (2007) o estudo de caso utiliza um caso particular, que deve ser representativo, para poder “fundamentar uma generalização em situações análogas, autorizando inferências.” Será de fundamental importância que o pesquisador faça anotações altamente rigorosas e com máximo de precisão com a realidade observada, realizando registros e devendo apresentar os resultados obtidos em forma de relatórios. As elaborações de todos os registros e fatos levantados devem ser realizadas com muita clareza e precisão, com o propósito de retratar a realidade do estudo observado e que venha a contribuir para a resolução de problemas semelhantes.

2.2. Definição de Caráter Exploratório

É uma pesquisa que tem como objetivo proporcionar maior familiaridade e conhecimento com o problema, trazendo um grande entendimento sobre os determinados fatos em estudo, com o objetivo de deixar claramente explícitas as informações.

2.3. Método Quantitativo

Segundo RICHARDSON (1989), este método tem a característica de adequar-se a quantificação, tanto nas modalidades de coleta de dados e informações, quanto no tratamento dos dados por meio de técnicas estatísticas, desde as mais modernas até as mais complexas. Possui como diferencial a intenção de assegurar a precisão dos trabalhos realizados, levando a um resultado com poucas chances de distorções.

2.4. Método Qualitativo

Este método é oposto, em princípio, do quantitativo, à medida que não emprega um instrumental estatístico como conceito na análise de um problema, não pretendendo medir ou numerar categorias (RICHARDSON, 1989). O estudo de campo qualitativo não é tão importante em outras áreas em que sejam utilizados. Para alguns, todos os estudos de campo são certamente qualitativos e, mais ainda, como já comentados, identificam-se com a observação participante.

2.5. Método dos Elementos Finitos

O conceito do Método de Elementos Finitos (MEF) teve suas origens no final do século XVIII, quando Gauss (Johann Carl Friedrich Gauss, matemático e físico alemão) propôs a utilização de funções de aproximação para a solução de problemas matemáticos. Durante mais de um século, diversos matemáticos desenvolveram teorias e técnicas analíticas para a solução de problemas, entretanto, pouco se evoluiu devido à dificuldade e à limitação existente no processamento de equações algébricas. O desenvolvimento prático desta análise ocorreu somente mais tarde em consequência dos avanços tecnológicos, por volta de 1950, com o advento da computação. Isto permitiu a elaboração e a resolução de sistemas de equações complexas (GALLAGHER, 1975).

Em 1956, Turner, Clough, Martins e Topp, trabalhando em um projeto de aeronaves para a *Boeing*, propuseram um método de análise estrutural, similar ao MEF. Mais tarde, em 1960, estes autores utilizaram pela primeira vez o nome de Método dos Elementos Finitos, descrevendo-o. A partir de então, seu desenvolvimento foi

exponencial, sendo aplicado em diversas áreas da Engenharia, Medicina, Odontologia e áreas afins. Em linhas gerais, pode-se definir o MEF como um método matemático, no qual um meio contínuo é discretizado (subdividido) em pequenos elementos que mantêm as propriedades de quem os originou. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos para que sejam obtidos os resultados desejados. (LOTTI, 2006)

Para a obtenção de um modelo experimental por meio do MEF, é necessário definir o objeto de pesquisa, confeccionar uma representação gráfica por meio de programa de computador específico, como o *SolidWorks* e, por intermédio da discretização do modelo, criar uma estrutura composta de pequenos elementos, então denominados elementos finitos. Quanto maior o número de elementos, mais preciso será o modelo (KIM, 2011). Nas extremidades de cada elemento será inserido um ponto ou nó, que será conectado com outros nós de outros elementos, formando uma malha. A figura 10 demonstra a criação de uma malha a partir de um modelo em CAD de uma peça.

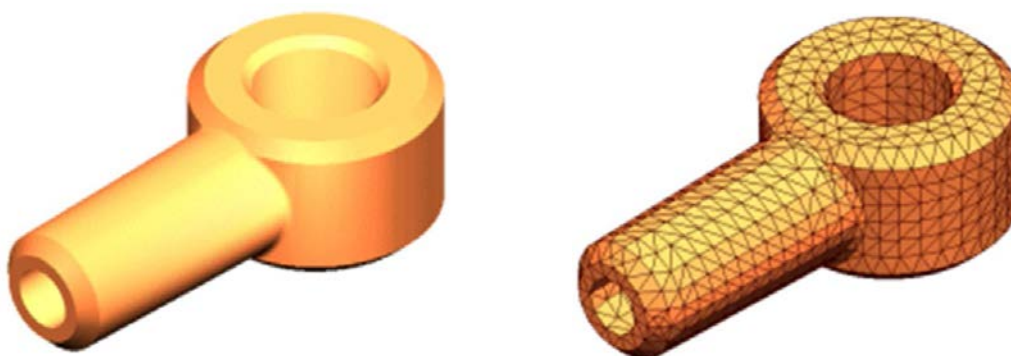


Figura 10 – Modelo CAD de uma peça e sua representação em malha.

Fonte: SOLIDWORKS

Por meio destes nós, as informações são passadas entre os elementos. Cada nó possui um número definido de graus de liberdade, que caracterizam a forma como o nó irá deslocar-se no espaço. Este deslocamento pode ser descrito em três dimensões espaciais (X, Y e Z) no caso de modelos tridimensionais, ou duas direções (X e Y) em modelos bidimensionais.

Modelos tridimensionais possuem vantagens sobre os bidimensionais, uma vez que somente no primeiro é possível analisar corretamente os esforços solicitados às estruturas (RUBIN, 1983).

Sendo assim, para a solução do problema em elemento finitos, deve ser obedecida uma sequência lógica, podendo ser resumidas nas etapas que serão discutidas a seguir (SADD, 2005):

1º Processamento – Inicialmente é gerado o modelo do problema, sendo geralmente empregado para este fim *software* do tipo CAD ou CAE. Posteriormente o modelo deve ser importado para o *software* de elementos finitos, onde então, pode-se iniciar a discretização do modelo, definindo o tipo e o tamanho do elemento a ser analisado, gerando a malha. Nesta fase, também são determinadas as propriedades mecânicas de cada estrutura constituinte do modelo. Esta etapa é muito importante para se obter fidelidade dos resultados, uma vez que cada característica de cada componente do modelo influenciará o comportamento das respostas às aplicações das forças.

2º Processamento – Feito a estruturação do problema basta resolvê-lo, procedimento que é realizado inteiramente pelo *software* de elementos finitos. É montada a matriz de

rigidez da estrutura por meio da superposição da matriz de rigidez de cada elemento sendo então montado um sistema de equações lineares, juntamente com as condições de contorno. Então, o sistema é resolvido obtendo os parâmetros necessários. No caso de análise estrutural, são obtidos os deslocamentos de cada nó dos elementos.

3º Pós-Processamento – Finalmente, pode-se realizar a análise dos resultados obtidos, que em geral são indicados de forma gráfica (Figura 11). Os deslocamentos obtidos podem ser convertidos em deformação e tensão, por meio da relação constitutiva do material, facilitando a aplicação de critérios de falha.

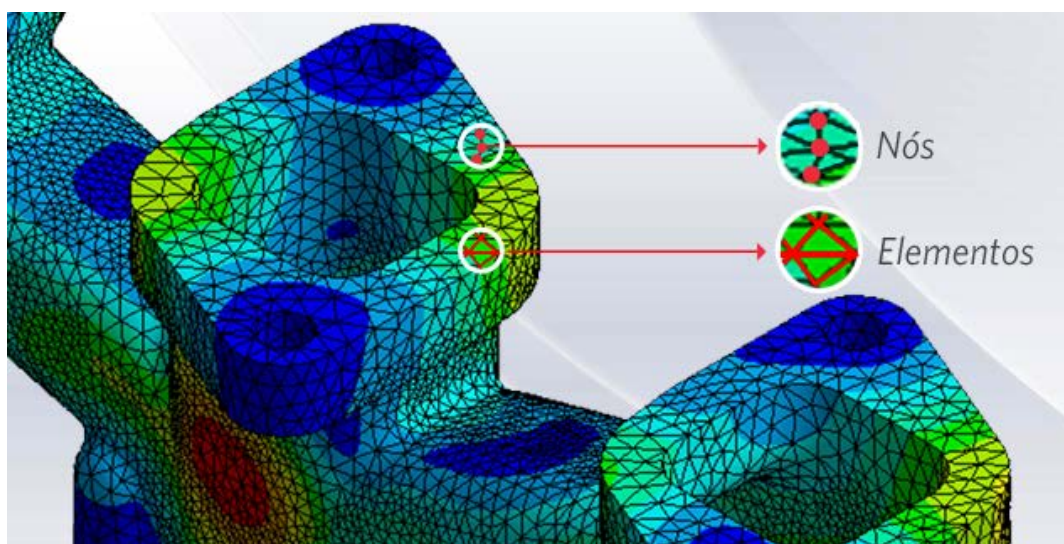


Figura 11- Demonstração de malha para análise em MEF

Fonte: ESSS

2.6. Tensor de Tensão de Cauchy –Graus de liberdade

Na mecânica do contínuo, o tensor de tensão de Cauchy, denominado em memória de Augustin-Louis Cauchy, representado universalmente pelo símbolo σ , é um tensor tridimensional de segunda ordem, com nove componentes σ_{ij} , que define

completamente o estado de tensão em um ponto no domínio de um corpo material em sua configuração deformada. O tensor relaciona um vetor diretor de comprimento unitário $\mathbf{n}$ com o vetor tensão $\mathbf{T}$ sobre uma superfície imaginária perpendicular a $\mathbf{n}$.

O tensor tensão de Cauchy é usado para a análise de tensões de corpos materiais submetidos a pequenas deformações e obedece a lei de transformação de tensores sobre uma mudança de sistema de coordenadas. É um conceito central da teoria da elasticidade linear. Para grandes deformações, também denominado teoria das deformações finitas, outras medidas de tensão são necessárias, tais como o tensor tensão de Piola-Kirchhoff.

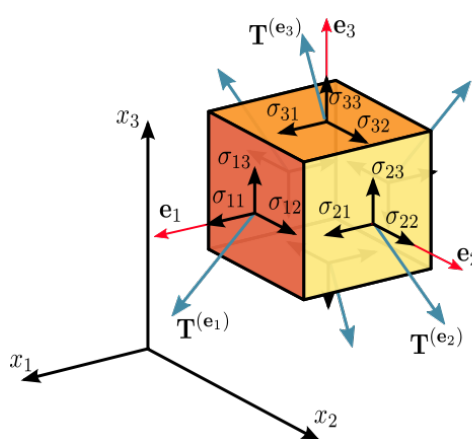


Figura 12- Componentes de Tensão em Três Dimensões

Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Cauchy_stress_tensor

De acordo com o princípio da conservação do momento linear, se o corpo contínuo está em equilíbrio estático pode ser demonstrado que as componentes do tensor tensão de Cauchy em todo ponto material do corpo satisfaz as equações de equilíbrio (equações de movimento de Cauchy para aceleração nula). Ao mesmo tempo, de acordo com o princípio da conservação do momento angular, o equilíbrio requer que a soma dos momentos em relação a um ponto arbitrário seja nula, o que leva à

conclusão de que o tensor tensão é simétrico, havendo assim somente seis componentes independentes de tensão, ao invés das nove originais.

Há alguns invariantes associados ao tensor tensão, cujos valores não dependem do sistema de coordenadas usado, ou da área do elemento sobre a qual o tensor tensão atua. Estes são os três autovalores do tensor tensão, que são denominadas tensões principais.

2.7. Limite de Escoamento de von Mises

O limite de escoamento de von Mises, desenvolvido pelo matemático e engenheiro mecânico austríaco Richard Edler von Mises, também conhecido como tensão equivalente de von Mises, é um valor escalar de tensão que pode ser determinado a partir do tensor tensão de Cauchy.

Sob este critério, um material é dito estar em estado de início de escoamento quando sua tensão equivalente de von Mises atinge um valor crítico denominado tensão de escoamento. A tensão equivalente de von Mises é usada para prevenir escoamento do material quando submetido a qualquer condição de carregamento a partir de resultados obtidos de testes de tração simples. A tensão equivalente de von Mises satisfaz a propriedade de que dois estados de tensão com mesma energia de distorção tem a mesma tensão equivalente de von Mises. Esta análise representa a média das tensões em todas as direções. Os resultados nessa situação permitem a localização dos pontos de maior tensão.

3. INFORMAÇÕES TECNOLÓGICAS

Este capítulo aborda informações sobre mancais e *softwares* de computação gráfica.

3.1. Mancais

As máquinas rotativas têm no mancal um elemento fundamental para guiar o movimento de rotação. Sua característica principal é minimizar o atrito de deslizamento entre as superfícies do eixo, a fim de reduzir as perdas de energia (SHIGLEY; MISCHKE e BUDYNAS, 2004).

Podem fazer uso de mancais mecânicos convencionais como mancais de elementos rolantes ou mancais hidrostáticos a óleo. Mancais capazes de suportar cargas elevadas ou altas velocidades de rotação encontram-se entre as principais necessidades de sistemas mecânicos e eletromecânicos, no entanto, existem limitações de difícil transposição. A ideia de um mancal sem contato, suportado por forças elétricas ou magnéticas de atuação à distância, em condição de superar os limites de peso e velocidade atingidos pelos mancais com contato, só pôde se tornar realidade comercial com a disponibilidade industrial de (STEPHAN, 2013):

- Dispositivos semicondutores de potência capazes de condicionar sinais de corrente e tensão para produzir eficientemente as forças eletromagnéticas necessárias;

- Processadores digitais de baixo custo capazes de supervisionar, controlar e simular a operação de mancais magnéticos;
- Sensores e transdutores capazes de colocar precisamente e em termos de sinais elétricos as informações de posição e velocidade de eixos girantes.

Porém, algumas aplicações requerem o uso de mancais alternativos, como é o caso de sistemas de alto vácuo, com atmosfera explosiva, de elevada rotação ou com controle de vibrações (SCHWEITZER, 2009), por exemplo. Para tais aplicações, pode-se pensar no emprego de mancais baseados em levitação, como os eletromagnéticos.

Tabela 2 - Grau de Vácuo

Grau de Vácuo	Intervalo de Pressão (Pa)	Número de moléculas por cm^3
Baixo	$10^5 > p > 3,3 \times 10^3$	Menos que 2×10^{19}
Médio	$3,3 \times 10^3 \geq p > 10^{-1}$	3×10^{13}
Alto	$10^{-1} \geq p > 10^{-4}$	3×10^{10}
Muito Alto	$10^{-4} \geq p > 10^{-7}$	3×10^8
Ultra Alto	$10^{-7} \geq p > 10^{-10}$	3×10^7
Extremo Ultra Alto	$10^{-10} > p \geq 0$	Menos que 3 moléculas
Espaço Sideral	$10^{-9} > p > 10^{-15}$	Menos que 1 átomo
Vácuo Absoluto	0	0

Fonte: STEMPNIAK (2002), O'HANLON (2003)

3.1.1. Mancais Magnéticos

Os mancais magnéticos têm sido desenvolvidos tanto acadêmica quanto industrialmente devido às necessidades citadas anteriormente. Podem ser tanto do tipo axial quanto do tipo radial. No entanto, um mancal magnético (constituído com determinada tecnologia, por exemplo), que faça uso de supercondutores, pode ser mais adequado ao uso quando construído com mancais axiais (HULL, 2000).

Sistemas eletromecânicos, como o mancal magnético, podem ser projetados para operarem utilizando diferentes técnicas. Dessa forma, podem ser encontrados sistemas ativos, passivos ou híbridos.

Nos sistemas ativos há a necessidade de uma malha de controle, com sensores, reguladores e atuadores. Com isso, apresenta vantagem no domínio da dinâmica do sistema, com possibilidade de rejeitar perturbações, rastrear valores de referência e impor transitórios. Todavia, seu emprego geralmente está associado ao uso de fontes de alimentação e outros componentes para o funcionamento do controlador, como por exemplo, quando é implementado por meio de eletrônica embarcada. Neste caso, o sistema de controle é constituído por chaves eletrônicas, circuitos integrados, componentes elétricos etc. Por este motivo, este deve ocupar maior volume devendo, a sua aplicação, ser avaliada em casos específicos. Por exemplo, quando houver dificuldade ou restrição de fontes de alimentação, necessidade de maior confiabilidade, etc. Outro fato importante a ser destacado é o custo de produção de um sistema ativo, que também deve ser analisado e comparado ao de um sistema passivo.

O sistema passivo é autocontrolado. Ele emprega o comportamento físico natural determinado ao sistema via projeto, gerando estabilidade e o desempenho desejado. Sistemas passivos são geralmente mais simples que os ativos. Sua maior dificuldade é observada no desenvolvimento da geometria, isto é, na usinagem do produto para que o sistema desenvolvido tenha um comportamento mais próximo ao esperado. Sendo assim é possível, em muitos casos, desenvolver um sistema de baixo custo e de grande confiabilidade, devido tanto ao menor número de componentes demandados quanto ao menor número de sistemas encadeados, como alimentação elétrica, dispositivos eletrônicos e programa de controle.

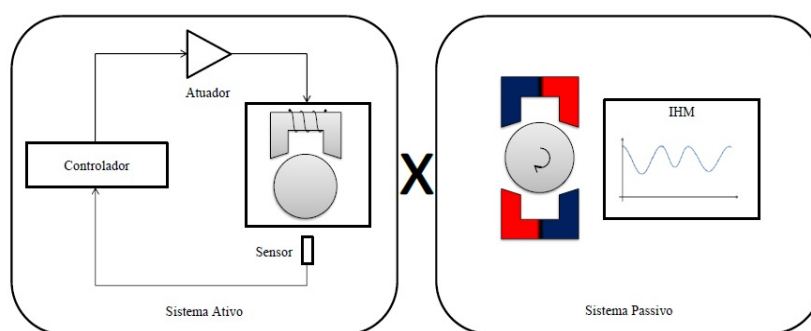


Figura 13 - Diagrama Sistema Ativo e Passivo

Fonte: LOPES, 2014

Os sistemas híbridos são uma alternativa a quem necessita de maior controle do sistema, mas ao mesmo tempo não deseja grande investimento em aparelhagem para o desenvolvimento do controle, ou necessita reduzir o volume do sistema mancal. Com a proposta híbrida, a parcela do sistema que é passiva pode contribuir com a maior parte da demanda de potência necessária ao controle, enquanto a parcela ativa representaria a menor participação. Sendo assim, consegue-se um desempenho satisfatório com baixo

custo. Na figura 13 é mostrado um pequeno diagrama comparativo entre o sistema ativo e passivo (LOPES, 2014).

Dentre os vários tipos de mancais existentes, optou-se por utilizar mancais magnéticos a fim de diminuir o atrito por contato presente nos mancais mecânicos. Podem ser utilizados os seguintes tipos de mancais magnéticos:

- Mancais Eletromagnéticos (MEM): são os mais utilizados, porém requerem um complexo sistema de controle, e são sensíveis a distúrbios eletromagnéticos;
- Mancais de Ímãs Permanentes (MIP): apresentam menor custo, porém não provém sustentação estável em todas as dimensões e, portanto, podem ser utilizados somente como mancais auxiliares; e
- Mancais Magnéticos Supercondutores (MMS): são auto estáveis, porém necessitam de refrigeração criogênica, o que eleva o custo do sistema. Entretanto, a descoberta de novos materiais supercondutores e recentes desenvolvimentos em isolamento criogênica tem diminuído o custo com a refrigeração, tornando seu emprego cada vez mais viável.

Quando não é necessário o controle da dinâmica do sistema de levitação, o mancal magnético passivo pode ser adotado. Portanto, se fará uso somente de ímãs permanentes dispostos no rotor e no estator de maneira que haja repulsão entre eles. O problema encontrado nesta técnica é a instabilidade estática, conforme aponta o Teorema de Earnshaw (EARNSHAW, 1842). Este teorema, fruto do estudo de Samuel Earnshaw em 1842, demonstra matematicamente a impossibilidade de equilíbrio

mecânico entre duas cargas magnéticas pontuais, quer estejam em situação de atração ou de repulsão (CARDOSO, 2015). Logo, um sistema completamente suspenso, isto é, sem contato mecânico, que possui levitação passiva, não é estável quando estático. É importante destacar que os ímãs permanentes podem ser empregados na construção de outros tipos de mancal, ou seja, mancais magnéticos com outras técnicas de levitação (LOPES, 2014).

3.2. *SolidWorks*

Os desenhos aplicados a engenharia existem há tempos remotos como um meio de definir um produto graficamente antes que ele seja confeccionado e utilizado pelos consumidores. Anteriormente, o processo de elaborar o desenho envolvia ferramentas como: lápis, canetas nanquim, esquadros, réguas T, régua paralela, etc., para poder visualizar a ideia no papel antes de produzir um protótipo, podendo então, realizar correções anteriores à produção e produzir cópias heliográficas para a distribuição ao setor executor de cada etapa. A habilidade de construir esses desenhos em um computador pode ser uma revolução inovadora, porém os princípios e fundamentos do desenho aplicado à engenharia continuam os mesmos.

O *SolidWorks* é um dos principais *softwares* da computação gráfica, sendo utilizado por diversos profissionais ligados as áreas de projetos de: engenharia, designers, tubulação, projetistas, enfim, todos os profissionais que antes se valiam do desenho tradicional (papel, lápis e prancheta) para a apresentação do produto do seu trabalho.

SolidWorks é um *software* de CAD, desenvolvido pela *SolidWorks Corporation*, adquirida em 1997 pela *Dassault Systèmes S.A.*, e que funciona nos sistemas operacionais Windows. A sua estreia foi em 1993, mostrando-se um concorrente do *PRO-Engineer*, *AutoCAD*, *Inventor* e *SolidEdge*.

O *SolidWorks* é um *software* de modelagem sólida, paramétrica, criando formas tridimensionais a partir de formas geométricas elementares, baseado em recursos ou etapas (*Features*) e totalmente integrado ao Windows. No ambiente do programa, a criação de um sólido ou superfície começa com a definição de topologia em um esboço 2D ou 3D. Você pode criar modelos totalmente associativos com ou sem relações (*constraints*), enquanto utiliza relações automáticas ou definidas pelo usuário para criar a intenção do projeto ou desenho (*design intent*).

3.2.1. *SolidWorks Simulation*

O *SolidWorks Simulation* é uma ferramenta totalmente integrada ao *SolidWorks* e destinada ao mundo das análises por elementos finitos (FEA), do inglês *Finite Elements Analysis*, trabalhando com peças e conjuntos e todas as condições de contorno necessárias, tais como: carregamentos, fixações, contato entre componentes, elementos de fixação, etc. Como resultado, fornece informações acerca das tensões, deslocamentos, deformações e fator de segurança, os usuários podem tomar decisões sobre otimizações e assim desenvolver projetos melhores. Um dos objetivos é propiciar um tempo menor para lançamento de um produto, por intermédio da redução do tempo gasto com protótipos, bem como minimizar os custos dessa etapa desenvolvendo projetos ainda mais confiáveis. (SILVA, 2009)

Com uma característica abrangente, o *SolidWorks Simulation* permite a criação de protótipos digitais, além de proporcionar uma ótica valiosa sobre o contexto de todo o projeto e assim otimizar o desenvolvimento com a redução de custos relativos a materiais, durabilidade por meio de cálculos de fadiga, enfim estudar alternativas para reduzir os custos de desenvolvimento e garantir que as necessidades do cliente e do escopo do projeto sejam alcançadas. (ISTSISTEMAS, 2015)

A utilização destes programas se justifica quando a geometria das peças é complexa ou se tem a interação de matérias diferentes, pois o método usado pelo computador é o método numérico e não o método analítico. O programa mostra os resultados graficamente na tela permitindo identificação visual da geometria e resultados, facilitando a interpretação do que está ocorrendo na peça ou conjunto (Figura 14).



Figura 14 - Analise Simulation
Fonte: CADWORKS

O *SolidWorks Simulation* será utilizado nas simulações dos rotores para definição dos valores máximos de rotação adotados utilizando a indicação dos valores máximos de tensão.

3.2.1. *SolidWorks Motion*

O *SolidWorks Motion* é uma ferramenta de prototipagem virtual para engenheiros e designers interessados em compreender o desempenho de suas montagens.

O *SolidWorks Motion* simula e analisa com precisão o movimento de uma montagem, enquanto incorpora os efeitos de elementos de Estudo de Movimento (incluindo forças, molas, amortecedores e atrito), com a utilização de *solvers* cinemáticos robustos e considera nos cálculos as propriedades dos materiais, além da massa e da inércia. Um estudo de Análise de Movimento combina elementos do estudo de movimento com posicionamentos nos cálculos de movimentos. Consequentemente, as restrições de movimento, propriedades do material, massa e contatos dos componentes são incluídos nos cálculos.

Os estudos de movimento são simulações gráficas dos movimentos de modelos de montagens, podendo incorporar propriedades visuais como iluminação e perspectiva de câmera nos estudos de movimento.

Os estudos de movimento não alteram o modelo da montagem nem suas propriedades e simulam o movimento prescrito para o modelo, que deve usar posicionamentos para restringir o movimento dos componentes da montagem quando o modelo é movido.

Um corpo rígido sem restrições no espaço tem seis graus de liberdade: três translacionais e três rotacionais. Ele pode se mover ao longo dos seus eixos X, Y e Z e rotação em torno dos seus eixos X, Y e Z (Figura 15). Quando é adicionada uma restrição, como um posicionamento concêntrico, entre dois corpos, esta restrição remove graus de liberdade entre eles. Os dois corpos permanecem restritos,

posicionados em relação um ao outro, sejam quais forem os movimentos ou forças no mecanismo.

Por exemplo, um posicionamento concêntrico remove dois graus de liberdade translacional e dois graus de liberdade rotacional entre dois corpos rígidos. Adicionar um posicionamento de distância ou coincidente a faces remove o grau de liberdade translacional final. Se cada corpo rígido tiver um ponto na junção na linha de centro do posicionamento concêntrico, estes dois pontos permanecem com a mesma distância entre eles. Eles podem girar somente com relação um ao outro em torno de um eixo, a linha de centro do posicionamento concêntrico. Esta combinação de posicionamentos gera uma junção de um só grau de liberdade, pois permite uma única rotação entre os corpos rígidos. (CADWORKS, 2017)

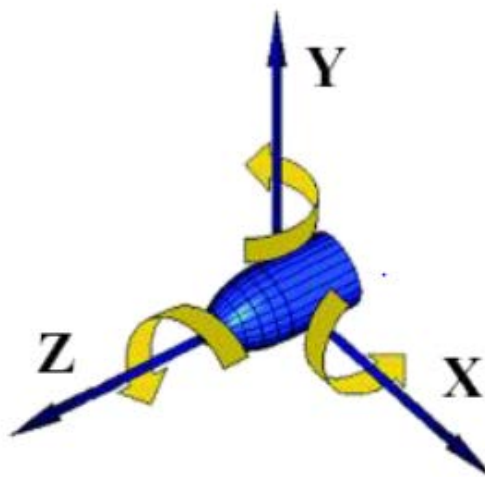


Figura 15- Graus de Liberdade

Fonte: CADWORKS

O *SolidWorks Motion* será utilizado nas simulações dos rotores para obtenção dos valores de energia de rotação e do momento de inércia de cada rotor.

4. ANÁLISE DE MATERIAIS

Este capítulo apresentará os materiais selecionados para as simulações, um breve histórico e algumas características.

4.1. Fibra de Carbono

As fibras de carbono, como as fibras de vidro, foram os primeiros reforços utilizados para aumentar a rigidez e resistência de materiais compósitos avançados leves, comumente utilizados em aeronaves, equipamentos de recreação e aplicações industriais. A expressão “fibra de carbono” geralmente se refere a uma variedade de produtos filamentosos compostos por mais de 90% de carbono e filamentos de 5 a 15 μm de diâmetro, produzidos pela pirólise da poliacrilonitrila (PAN), piche ou rayon (Lubin,1982).

Fibras de carbono são referidas normalmente como fibras de grafite, entretanto somente fibras de carbono de elevado módulo de elasticidade com estrutura de grafite tridimensional podem ser denominadas propriamente fibras de grafite. Em virtude de as fibras de carbono possuírem elevados valores de resistência à tração, módulo de elasticidade extremamente elevado e baixa massa específica, comparadas com outros materiais de engenharia, são utilizadas predominantemente em aplicações críticas envolvendo redução de massa. As fibras de carbono comercialmente disponíveis podem duplicar seus valores de módulo de elasticidade em relação às outras fibras de reforço, tais como aramida e vidro S, e exceder os metais em resistência à tração. Quando se utilizam materiais compósitos de fibras de carbono, a sua resistência e módulo de

elasticidade podem ser orientados de modo otimizado para minimizar a massa final. Além da resistência e rigidez, as fibras de carbono possuem excelente resistência à fadiga, características de amortecimento de vibrações, resistência térmica e estabilidade dimensional. As fibras de carbono possuem também boa resistência elétrica e térmica e são quimicamente inertes, exceto quanto à oxidação (CALLISTER, 2012).

Thomas Edson foi o primeiro a produzir intencionalmente filamentos de carbono pela pirólise do algodão para filamentos de lâmpadas incandescentes em 1878. Mais de 80 anos depois, o excelente desempenho de suas propriedades mecânicas foi demonstrado pelo crescimento de *whiskers* de grafite com resistência à tração de 2,0 GPa e módulo de rigidez de 800 GPa (LUBIN, 1982). A primeira fibra contínua comercial foi produzida nos anos de 1950 pela carbonização de *rayon* sintético para aplicações em mísseis em temperaturas elevadas. Entretanto a conversão do *rayon* em fibra de carbono não foi eficiente por causa do baixo rendimento de carbono, além de resultar em fibras com baixas propriedades mecânicas.

Em meados da década de 1960, no Japão e na Inglaterra foi desenvolvido um processo mais eficiente de produção de fibras de carbono utilizando-se poliacrilo-nitrila (PAN). Este processo é utilizado hoje em dia em mais de 90% da produção de fibras de carbono comercial. Durante as últimas décadas, o processo tem sido melhorado em sua eficiência para aumentar a resistência das fibras, o seu módulo, resistência à manipulação e diminuir deformações e falhas (WIEBECK, 2005).

Durante os anos de 1970, os esforços visavam à redução do custo das fibras com o uso do precursor piche, menos dispendioso. A *Union Carbide* comercializou

fibras de carbono derivadas do piche de baixo módulo, baseado no precursor piche isotrópico e uma família de alto módulo de fibras de carbono, baseado no precursor cristal líquido do piche. Infelizmente, deficiências na resistência à compressão destas fibras e o alto custo na purificação do líquido cristalino do piche precursor (LUBIN,1982) têm limitado a aceitação e crescimento de uso das fibras de carbono de alto módulo.

A classificação das fibras de carbono é bastante peculiar ao material, a partir do qual são obtidas. Sendo elas os tipos I - Alto módulo II – Médio Módulo e III - Baixo Módulo. Os tipos são convenientemente explicados por meio da tabela 3.

Tabela 3 - Tipos de Fibra de Carbono

Tipo	Propriedades e Características
I - Alto módulo	Obtidas a partir do PAN e do piche mesofase, apresentam resistência mecânica e a tensão, usada principalmente na indústria de autos, e na pesquisa eletroanalítica.
II - Médio Módulo	Obtidas principalmente a partir do PAN, resistência mecânica à tensão, baixa Massa específica, utilizada comumente na indústria aeroespacial, carros de corrida e na construção civil.
III - Baixo Módulo	Obtenção a partir do <i>rayon</i> e piche isotrópico apresentam resistência mais baixa principalmente à mecânica, massa específica um pouco mais elevada, é utilizada como enchimento de plásticos e como aditivo de concreto, custo baixo.

Pesquisas recentes, visando o desenvolvimento de fibras de carbono de baixo custo, incluem o crescimento dos filamentos de carbono pela deposição de carbono de gases, tais como monóxido de carbono, metano, ou benzeno sobre um metal catalisador. Na Alemanha cientistas têm empregado o laser infravermelho na fabricação de fibras de carbono ao invés de submeter as ligas a fornos com alto gasto de energia. Este promissor instrumento permitirá a rápida e barata obtenção do material, sem que haja inconvenientes como a formação de deformidades decorrente de bolhas ocasionadas pelo manuseio do material em presença de ar, que terminam por reduzir a resistência. Esta nova tecnologia promete fabricar fibras até 100 vezes mais resistentes do que o aço, evidentemente bem mais leves.

4.2. Aço *Maraging*

O mais importante desenvolvimento metalúrgico, na década de 1950, foi sem dúvida a criação de uma família de aços de altíssima resistência mecânica, os chamados aços *maraging*. O desenvolvimento desses aços foi feito por Clarence George Bieber na *International Nickel Company (Inco Ltd)*. O trabalho resultou no desenvolvimento dos dois primeiros aços *maraging*, o aço 25%Ni e o 20%Ni. A temperatura de transformação da austenita para martensita dessas ligas era controlada somente com o ajuste do conteúdo do níquel. São aços martensíticos de baixo carbono, altamente ligados, nos quais o endurecimento é atingido por meio de um tratamento térmico de envelhecimento, durante o qual ocorre a precipitação de compostos intermetálicos (PADIAL, 2002). A denominação *maraging* é derivada dos termos **MAR**tensite e **AGING**, termos que em inglês significam, respectivamente, martensita e

envelhecimento. Sua elevada resistência mecânica é obtida, em especial, pela precipitação de compostos intermediários em matriz martensítica (LOPES, 2007).

Aços *maraging* são ligas quaternárias Ni-Co-Mo-Ti de ultra alta resistência, são utilizados em aplicações que vão desde a indústria bélica, nuclear, componentes aeronáuticos, vasos de pressão até a indústria esportiva. Estes aços eram endurecidos por precipitação a temperaturas entre 425°C e 510°C. Valores de dureza de até 67 HRC eram então obtidos e, boas combinações entre resistência e ductilidade a níveis de dureza de 53-56 HRC eram reportados. Porém estas composições foram abandonadas devido ao seu alto grau de fragilização. Passou-se então a utilizar ligas Ni-Co-Mo com 18% de níquel. São classificados em função da sua tensão de ruptura (em klb/pol²) em algumas classes como 200, 250, 300 e 350. Atualmente estes aços vêm sendo estudados para utilização em rotores de alta velocidade de motores de histerese (SILVA, 2005).

Os aços *maraging* apresentam algumas vantagens em comparação a outros tipos de aços e ligas, pois apresentam níveis de resistência mecânica extremamente elevada, excelente conformabilidade no estado solubilizado e grande capacidade de endurecer por envelhecimento. Dentre outras características, os aços *maraging* podem ser soldados sem preaquecimento tanto na condição solubilizado quanto na condição envelhecido. Possui também resistência à fragilização por hidrogênio, são suscetíveis a corrosão sob tensão e apresentam, ainda, resistência a fadiga (REIS, 2014).

Os elementos de liga utilizados nos aços *maraging* estão diretamente relacionados ao seu mecanismo de endurecimento. Estes elementos podem ser

classificados de acordo com sua influência neste endurecimento como fortes (Be, Ti), moderados (Al, Nb, Mn, Mo, Si, Ta, V e W) e fracos (Co, Cu, Zr).

Devido ao alto custo dos elementos de liga (cobalto e titânio) presentes na composição e as técnicas utilizadas para seu processamento faz com que o aço *maraging* tenha um preço muito elevado, sendo este um fator limitante para aplicação em larga escala do aço *maraging*. Um aço *maraging* livre de cobalto foi desenvolvido na década de 1970 em razão do alto custo deste elemento.

Estes aços apresentam um alto limite de escoamento, elevada tenacidade, usinabilidade ideal para aplicações diversas. Além das propriedades mencionadas, outras características que sugerem a aplicação destes aços são: mínima variação dimensional após tratamento térmico e boa soldabilidade, em função do teor de carbono baixo. O carbono na realidade é uma impureza nestes aços, portanto deve ser mantido o mais baixo possível para se evitar a formação de filmes de TiC e Ti (C,N).

As ligas comerciais dos aços *maraging* são projetadas para atingirem limite de escoamento entre 1030 e 2420 MPa (150 a 350 kpsi). Os aços *maraging* experimentais têm limite de escoamento entre 2800 MPa (400 kpsi) e 3450 MPa (500 kpsi). Normalmente esses aços possuem alto teor de níquel, cobalto e molibdênio e baixo teor de carbono.

4.3. Materiais Selecionados

Após deliberações com os professores orientadores, seguindo estudo prévio do IFSP (FERNANDES, 2015) foram selecionados para as simulações os seguintes materiais:

Tabela 4 - Resistência à tração dos materiais selecionados

Material	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Massa específica (g / cm³)
Aço <i>Maraging</i> – AISI 18 Ni 350	2.395	2.395	8,08
Fibra de Carbono – Hexcel UHM 12.000 F	3.730	3.500	1,87

5. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para a realização das simulações foram adquiridos dois computadores com uma média capacidade de processamento, um computador portátil (notebook) para simulações remotas e deliberações com o orientador e coorientador e uma workstation dedicado ao processamento de maior capacidade. Levando em conta a disponibilidade de recursos, realizou-se a montagem de um workstation provido de:

- Memória RAM 16 GB;
- SSD 240 GB;
- HD 1 TB;
- Placa de Vídeo NVIDIA GeForce GT 730 com 4 GB;
- Processador AMD FX 4300 Quad Core 3,80 GHz.

As especificações do notebook são:

- Memória RAM 8 GB;
- HD 1 TB;
- Placa de Vídeo NVIDIA GeForce 920 MX com 2 GB;
- Processador Pentium Intel Core I7 6500 2,59 GHz.

6. GEOMETRIAS A SEREM ANALISADAS

6.1. Análise Geométrica

A análise geométrica tem como propósito prever o comportamento das estruturas, buscando uma otimização entre o uso de material, métodos construtivos e desempenho da estrutura. Para isso, em um projeto estrutural os resultados da análise geométrica são usados com o intuito de se conhecer a adequabilidade e os méritos relativos aos diversos projetos alternativos em relação a critérios de projetos estabelecidos (SCHMIT, 1984). Por exemplo, na análise de tensão de reatores nucleares pelo código ASME (1989), as intensidades de tensão devem ser calculadas pelo Critério de Tresca (CALLADINE, 1969) e depois de adequadamente classificadas devem ser limitadas a valores admissíveis - valores estes que dependem do material e das condições operacionais para as quais o componente nuclear está sendo projetado. Do ponto de vista de tensões, um projeto de um componente será considerado melhor quanto mais próximos (inferiormente) estiverem os valores das intensidades de tensão dos respectivos valores admissíveis. A existência de métodos numéricos genéricos e confiáveis em conjunção com o contínuo aumento do poder de computação digital a preços cada vez mais baixos e velocidades cada vez maiores, nos levou naturalmente a um significativo incremento nas pesquisas em otimização estrutural.

Entretanto, dentro da otimização estrutural, surge um tipo de problema conhecido como otimização de forma (*shape optimization*) que consiste em maximizar uma função objetivo variando a forma da estrutura, mais especificamente, a forma do

contorno da estrutura. Como é conhecido, todo processo de otimização é caracterizado por uma função objetivo e por variáveis de projeto. Neste caso as variáveis de projeto do processo de otimização são parâmetros que controlam a forma geométrica da estrutura ou do componente estrutural (BARRA, 1990).

A questão que surge é: qual a configuração ideal de um suporte para um determinado componente que deve trabalhar sob determinadas condições?

A resposta a tal pergunta seria de grande ajuda para um engenheiro projetista, notadamente se tal resposta fosse obtida de forma rápida e independente da experiência do projetista. Na prática, quando um projetista lança mão das facilidades computacionais e analisa diversas concepções estruturais e seleciona, digamos, aquela cuja tensão em determinado ponto seja menor, porém o mais próximo possível, que a resistência mecânica, ele está otimizando seu projeto segundo um critério (ROBALINHO, 1998).

Convém notar que o problema de otimização de forma pode ser aplicado tanto para estruturas discretas - aquelas formadas por barras (uma dimensão prevalece sobre as demais), como pórticos de edifícios e treliças (ou para estruturas contínuas), entendidas aqui como aquelas definidas por superfícies ou volumes (uma dimensão não predomina sobre as outras) como, por exemplo, um vaso de pressão de um reator nuclear. Existem diferenças (VANDERPLAATS, 1984) e similaridades na formulação matemática para tratar a otimização de uma ou de outra estrutura, contudo é bom ressaltar que basicamente utilizam-se, em ambos os casos, formulações com métodos numéricos tais como o Método dos Elementos Finitos (MEF) ou, mais recentemente, o

Método dos Elementos de Contorno (MEC). A aplicação destes métodos geralmente é associada a técnicas de otimização. Cada método apresenta, naturalmente, vantagens e desvantagens peculiares, dependendo obviamente do caso a ser analisado. A formulação dos problemas de otimização de forma as vezes difere da formulação clássica de um Problema de Valores de Contorno (PVC). Na forma clássica, um PVC apresenta seu domínio matemático Q , inclusive sua fronteira T , além dos valores de contorno impostos na fronteira T sempre bem definidos do ponto de vista matemático. Observa-se que na Física Matemática tais problemas "bem definidos" são considerados problemas bem-postos (*well-posed*) e diretos. Quando se deseja otimizar uma forma estrutural a fim de se obter deslocamentos (deformações ou tensões) específicos em determinados pontos, além do desconhecimento matemático de Q (e consequentemente F), valores extras (que podem ser valores internos ou de superfície) são geralmente especificados.

Na otimização de forma das estruturas desejamos encontrar domínios (e fronteiras) que levem determinadas respostas (outputs) a valores ótimos em relação a um conjunto de valores ou critérios de projeto estabelecidos. Estamos, portanto, interessados em conhecer o domínio ou parte do domínio matemático Q do problema e neste caso dizemos que se trata de um problema de identificação geométrica. Este tipo de problema geralmente não é bem-posto ou direto e é conhecido na literatura como problema inverso de identificação (BAUMEISTER, 1981). Portanto, neste caso tratamos de um problema de identificação de uma geometria desconhecida, conhecendo-se não só as condições de contorno como adicionalmente alguns outros valores de referência em pontos específicos.

Este trabalho trata, portanto, da otimização da geometria entre diferentes materiais para elaboração de um rotor que será utilizado em uma bateria eletromecânica, composto por dois materiais diferentes previamente sugeridos por meio de trabalhos anteriores (MURGER, 2016) e de deliberações com o professor orientador, constituído de um núcleo de aço *maraging* revestido de fibra de carbono, objetivando a melhor relação entre massa e a integridade do conjunto.

6.2. Modelos

Neste capítulo serão descritos os modelos de rotores que foram analisados, os resultados obtidos e, finalmente, indicar o modelo que foi utilizado para as análises seguintes.

6.2.1. Modelo de Referência

A forma do rotor, que se acredita ter influência no comportamento eficiente do conjunto de bateria eletromecânica para execução deste estudo, será definida após avaliações das geometrias indicadas no trabalho anterior desenvolvido no IFSP, que teve como finalidade a otimização geométrica de um rotor para bateria eletromecânica, juntamente com outras geometrias propostas em deliberações com os professores orientadores.

Após a escolha da geometria, o prosseguimento do trabalho será realizado com ensaios de rotores conjugados de aço *maraging* e fibra de carbono.

O conceito construtivo que será utilizado neste estudo, conforme figura 16, obedece uma configuração compacta, com a coroa permitindo a montagem do estator em seu interior, otimizando o espaço do conjunto.

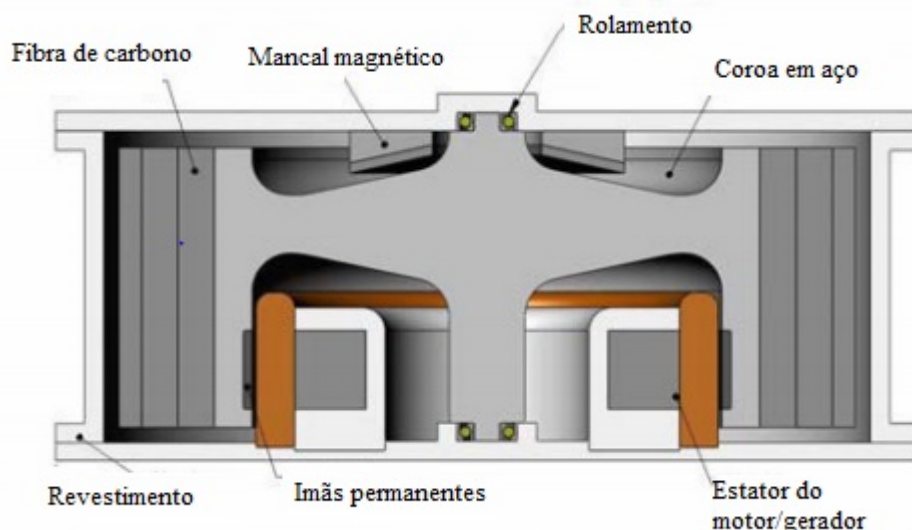


Figura 16 - Modelo de Rotor de Bateria Eletromecânica

Fonte: HEARN, 2007

O modelo indicado (Figura 17) no trabalho anterior, foi avaliado juntamente com outras geometrias propostas em deliberações com os professores orientadores.

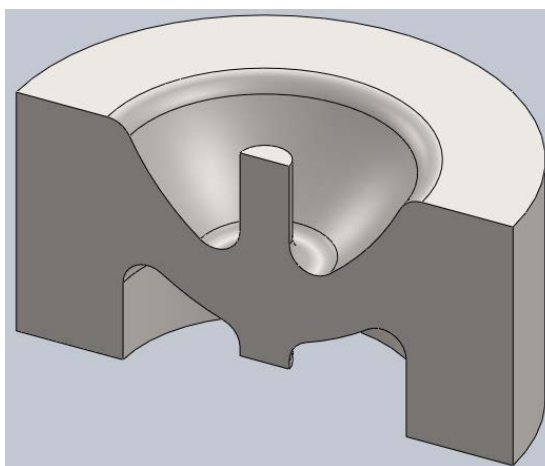


Figura 17- Geometria indicada no estudo IFSP

Fonte: MURGER, 2016

6.2.2. Validação dos Modelos

Para dirimir qualquer dúvida a respeito da escolha correta da geometria do rotor, foram refeitos os ensaios anteriormente realizados otimização geométrica de um rotor para bateria eletromecânica no trabalho do IFSP para otimização geométrica de um rotor para bateria eletromecânica, juntamente com outras geometrias propostas em deliberações com os professores orientadores.

6.2.3. Geometrias Analisadas

As geometrias analisadas, exibidas a seguir, tem medidas padrão de diâmetro e altura para efeito de cálculos e simulações, conforme tabela 5.

Tabela 5- Dimensões dos Modelos

Diâmetro externo da coroa	200 mm
Diâmetro interno da coroa	120 mm
Altura do rotor	100 mm

Fonte: O autor

Os modelos podem ser divididos basicamente em três partes, são elas:

- Coroa: Parte externa do rotor, com medidas padrão de diâmetro externo (200 mm) e interno (120 mm) para todos os modelos. A coroa tem como principal função armazenar a energia rotacional, a maior parte da massa do conjunto se encontra na coroa

- Eixo: Parte interna do rotor, com medidas padrão de diâmetro (30 mm) e altura (100 mm), tem como função guiar o movimento de rotação;
- Disco: Elemento de ligação entre o eixo e a coroa. Foi o objeto deste estudo visto que as alterações em seus formatos influenciaram os resultados, como será demonstrado.

6.2.4. Modelo 01

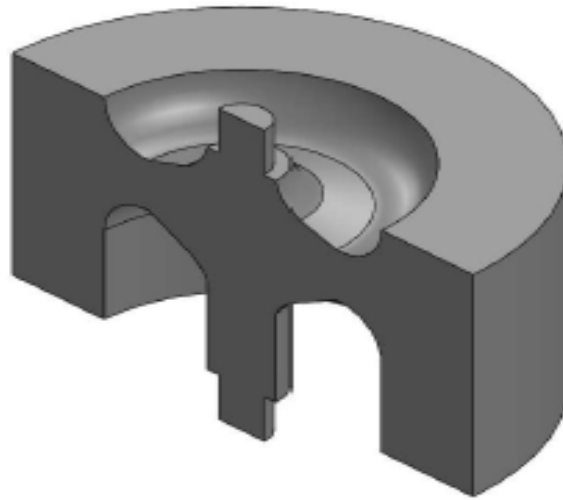


Figura 18- Modelo 01 em corte

O modelo 01 possui as características descritas na tabela 6:

Tabela 6 - Características modelo 01

Material	<i>Aço Maraging</i>	Fibra de Carbono
Massa do rotor	19,664 kg	4,551 kg
Rotação máxima admitida	53.200 rpm	134.450 rpm
Energia de rotação em rotação máxima	1.797.534 J	2.657.086 J

Fonte: O autor

Resumo da Análise

O modelo 01 teve sua geometria extraída do artigo *Low Cost Flywheel Energy Storage*, (HEARN, 2007). Tem como característica a ligação entre o eixo e a coroa realizada por um disco descentralizado transversalmente ao eixo. O disco apresenta espessura variável, tendo uma menor espessura na conexão com a coroa, em raio, aumentando de forma gradativa até a ligação com o eixo, realizada em raio.

Este modelo apresentou como pontos críticos a seção da coroa oposta à ligação com o disco (Figura 19), que apresentou uma tendência de deformação centrífuga, bem como o estreitamento do disco, o pescoço. Esse comportamento foi verificado tanto nas análises realizadas em aço *maraging* como nas análises realizadas com fibra de carbono.

A concentração de tensões nessa seção limitou o estudo a uma rotação máxima de 53.200 rpm quando as análises foram realizadas com aço *maraging* e 134.450 rpm com as análises realizadas com fibra de carbono. As duas análises estão apresentadas com maiores detalhes nos apêndices A e B.

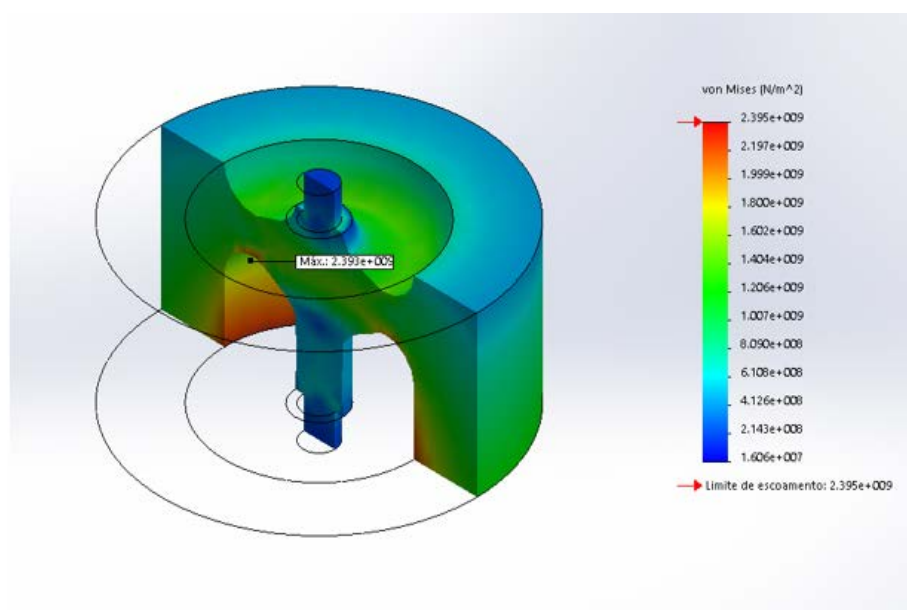


Figura 19- Resultado da análise do Modelo 01 em aço.

6.2.5. Modelo 02

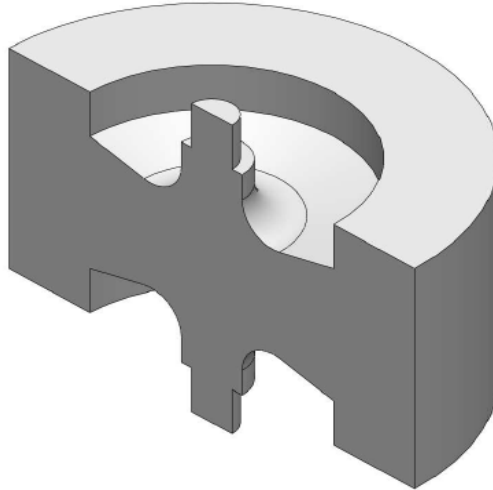


Figura 20- Modelo 02 em corte

O modelo 02 possui as características descritas na tabela 7:

Tabela 7 - Características modelo 02

Material	<i>Aço Maraging</i>	Fibra de Carbono
Massa do rotor	21,528 kg	4,982 kg
Rotação máxima admitida	61.900 rpm	158.500 rpm
Energia de rotação em rotação máxima	2.512.087 J	3.811.906 J

Fonte: O autor

Resumo da Análise

O modelo 02 tem como principal característica a ligação entre o eixo e a coroa realizada por um disco que possui espessura variável, tendo uma espessura de 60mm na conexão com a coroa, diminuindo de forma gradativa até a ligação com o eixo, realizada em raio de 5 mm. O modelo é transversalmente simétrico. Esta configuração do disco é propositalmente a inversa do modelo 01.

Este modelo apresentou como ponto crítico a seção próxima ao eixo, ver figura 21, de menor espessura, esse comportamento foi verificado tanto nas análises realizadas em aço *maraging* como nas análises realizadas com fibra de carbono.

A concentração de tensões nessa seção limitou o estudo a uma rotação máxima de 61.900 rpm quando as análises foram realizadas com aço *maraging* e 158.500 rpm com as análises realizadas com fibra de carbono. As duas análises estão apresentadas com maiores detalhes nos apêndices C e D.

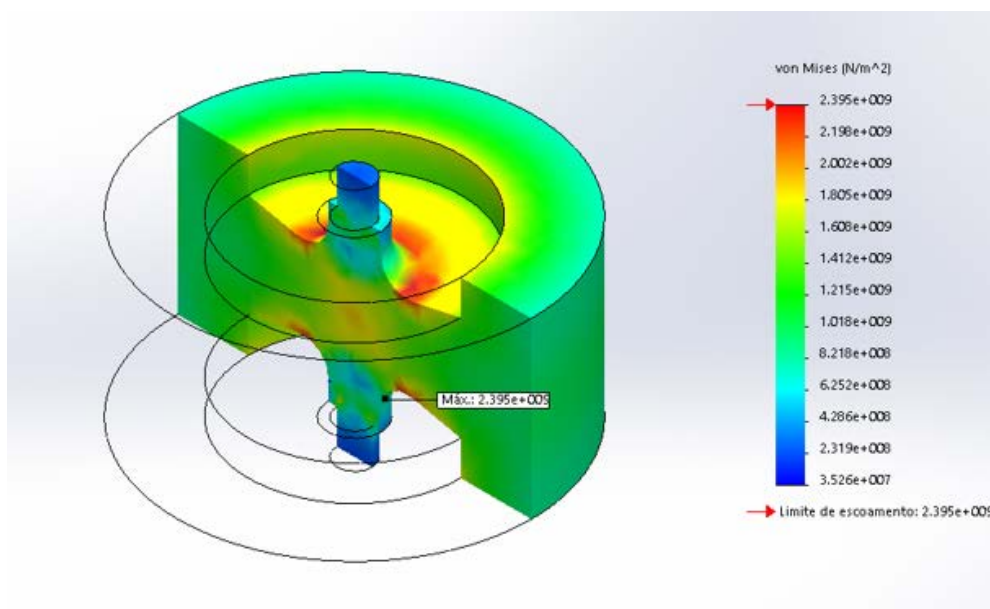


Figura 21 – Resultado da análise do Modelo 02 em aço

6.2.6. Modelo 03

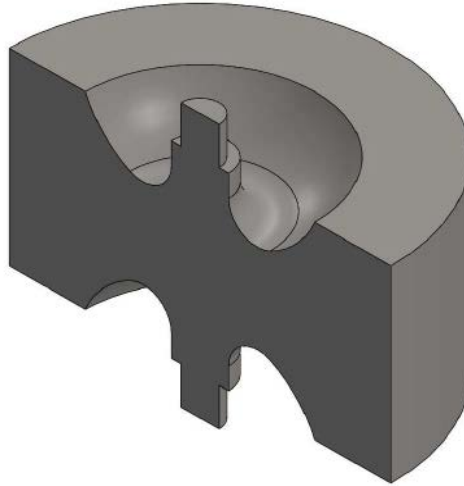


Figura 22 - Modelo 03 em corte

O modelo 03 possui as características descritas na tabela 8:

Tabela 8 - Características modelo 03

Material	<i>Aço Maraging</i>	Fibra de Carbono
Massa do rotor	22,417 kg	5,188 kg
Rotação máxima admitida	57.370 rpm	145.980 rpm
Energia de rotação em rotação máxima	2.205.161 J	3.304.362 J

Fonte: O autor

Resumo da Análise

O modelo 03 tem como principal característica a ligação entre o eixo e a coroa realizada por um disco que possui espessura variável em curva, tendo uma espessura de 100 mm na conexão com a coroa, diminuindo gradativamente sua espessura e, antes da conexão com o eixo, volta a aumentar a espessura. O modelo é transversalmente simétrico. Este modelo apresentou como ponto crítico o pescoço de menor espessura do disco (Figura 23). Esse comportamento foi verificado tanto nas análises realizadas em aço *maraging* como nas análises realizadas com fibra de carbono.

A concentração de tensões nessa seção limitou o estudo a uma rotação máxima de 57.370 rpm quando as análises foram realizadas com aço *maraging* e 145.980 rpm com as análises realizadas com fibra de carbono. As duas análises estão apresentadas com maiores detalhes nos apêndices E e F.

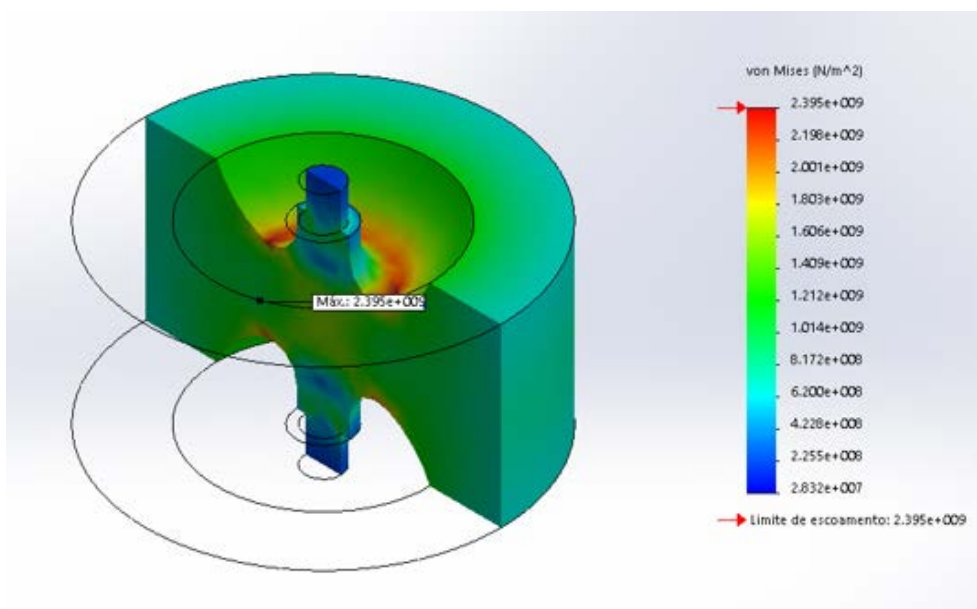


Figura 23- Resultado da análise do Modelo 03 em aço

6.2.7. Modelo 04

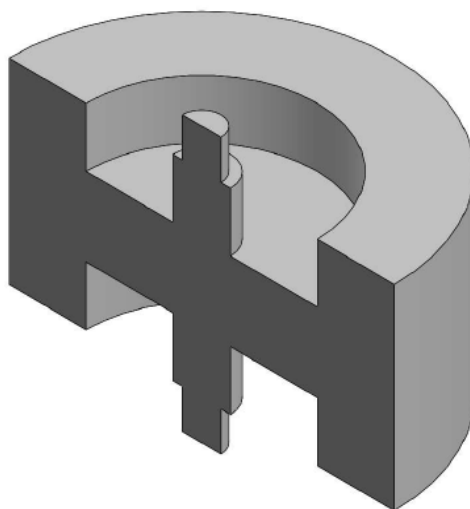


Figura 24 - Modelo 04 em corte

O modelo 04 possui as características descritas na tabela 9:

Tabela 9 – Características modelo 04

Material	<i>Aço Maraging</i>	Fibra de Carbono
Massa do rotor	20,345 kg	4,709 kg
Rotação máxima admitida	62.940 rpm	160.810 rpm
Energia de rotação em rotação máxima	2.543.418 J	3.842.560 J

Fonte: O autor

Resumo da Análise

O modelo 04 tem como principal característica a ligação entre o eixo e a coroa realizada por um disco plano com espessura constante de 40 mm. O modelo é transversalmente simétrico.

Este modelo apresentou uma excelente distribuição de tensão, o que ficou demonstrado na máxima rotação admitida do modelo. As tensões estavam distribuídas de mesma forma pelo disco e parte interna da coroa (Figura 25). Esse comportamento foi verificado tanto nas análises realizadas em aço *maraging* como nas análises realizadas com fibra de carbono.

O limite de escoamento ocorreu a uma rotação máxima de 62.940 rpm quando as análises foram realizadas com aço *maraging* e 160.810 rpm com as análises realizadas com fibra de carbono. As duas análises estão apresentadas com maiores detalhes nos apêndices G e H.

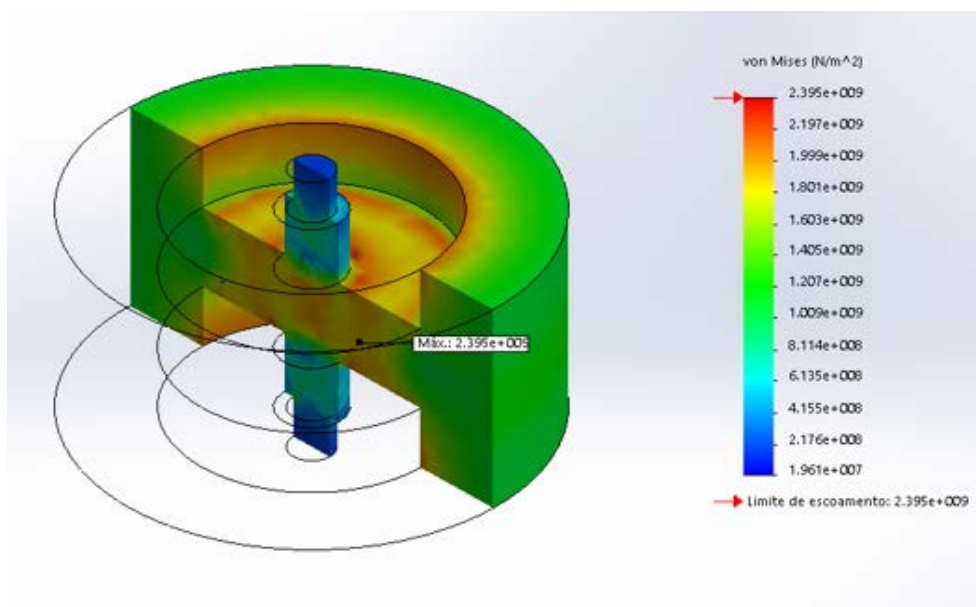


Figura 25- Resultado da análise do Modelo 04 em aço

6.2.8. Modelo 05

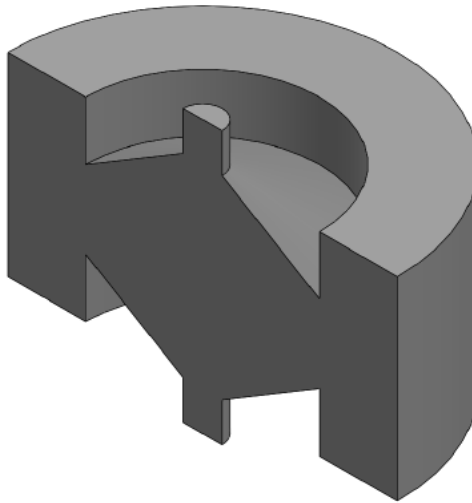


Figura 26 - Modelo 05 em corte

O modelo 05 possui as características descritas na tabela 10:

Tabela 10 – Características modelo 05

Material	<i>Aço Maraging</i>	Fibra de Carbono
Massa do rotor	22,186 kg	5,134 kg
Rotação máxima admitida	65.290 rpm	162.450 rpm
Energia de rotação em rotação máxima	2.791.346 J	3.999.352 J

Fonte: O autor

Resumo da Análise

O modelo 05 tem como principal característica a ligação entre o eixo e a coroa realizada por um disco apresenta, em corte, um perfil trapezoidal. O modelo surgiu a partir de deliberação com os professores orientadores, de forma a melhorar o desempenho do modelo 04. O modelo é transversalmente simétrico.

Este modelo apresentou como ponto crítico as extremidades da coroa afastadas do disco, com o melhor desempenho do disco dentre os modelos analisados (Figura 27). Esse comportamento foi verificado tanto nas análises realizadas em aço *maraging* como nas análises realizadas com fibra de carbono.

A concentração de tensões nessa seção limitou o estudo a uma rotação máxima de 65.290 rpm quando as análises foram realizadas com aço *maraging* e 162.450 rpm com as análises realizadas com fibra de carbono. As duas análises estão apresentadas com maiores detalhes nos apêndices I e J.

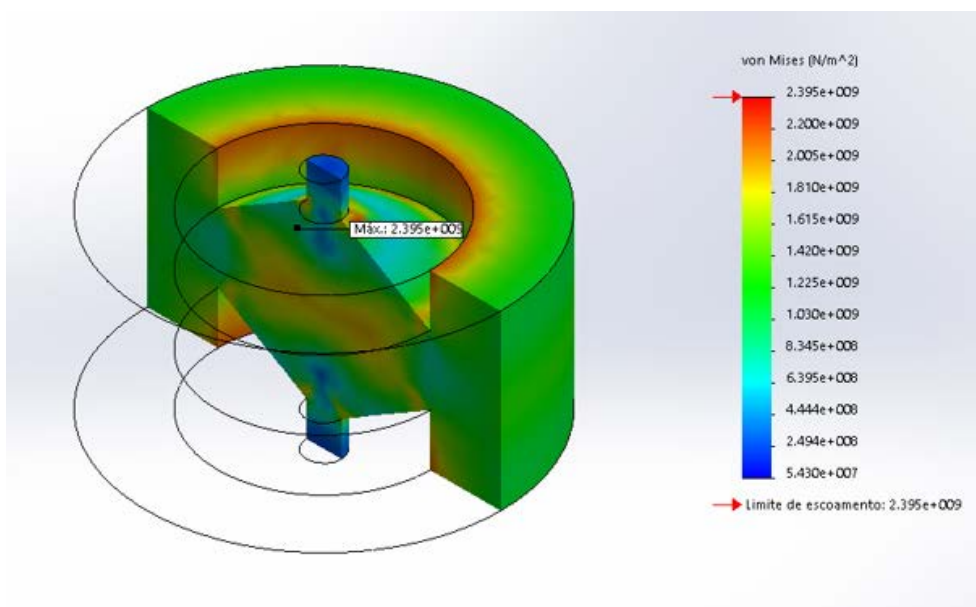


Figura 27- Resultado da análise do Modelo 05 em aço

6.2.9. Modelo 06

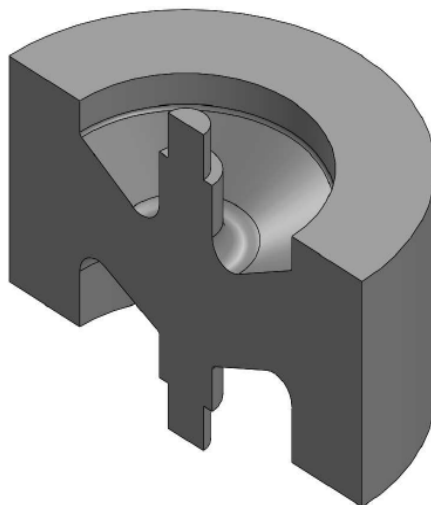


Figura 28- Modelo 06 em corte

O modelo 06 possui as características descritas na tabela 11:

Tabela 11 - Características modelo 06

Material	<i>Aço Maraging</i>	Fibra de Carbono
Massa do rotor	20,822 kg	4,819 kg
Rotação máxima admitida	47.720 rpm	121.020 rpm
Energia de rotação em rotação máxima	1.434.202 J	2.197.332 J

Fonte: O autor

Resumo da Análise

O modelo 06 foi proposto em estudo anterior realizado no IFSP (MURGER 2016), tem como principal característica a ligação entre o eixo e a coroa realizada por um disco em forma de cone raso, com uma espessura constante.

Este modelo apresentou como pontos críticos as conexões do disco com o eixo e com a coroa que possuíam ângulo agudo. Apesar do incremento de um raio nessa ligação, para diminuir a concentração de tensão nesses pontos, os resultados não foram promissores (Figura 29).

Esse comportamento foi verificado tanto nas análises realizadas em aço *maraging* como nas análises realizadas com fibra de carbono.

A concentração de tensões nessa seção limitou o estudo a uma rotação máxima de 47.720 rpm quando as análises foram realizadas com aço *maraging* e 121.020 rpm com as análises realizadas com fibra de carbono. As duas análises estão apresentadas com maiores detalhes nos apêndices K e L.

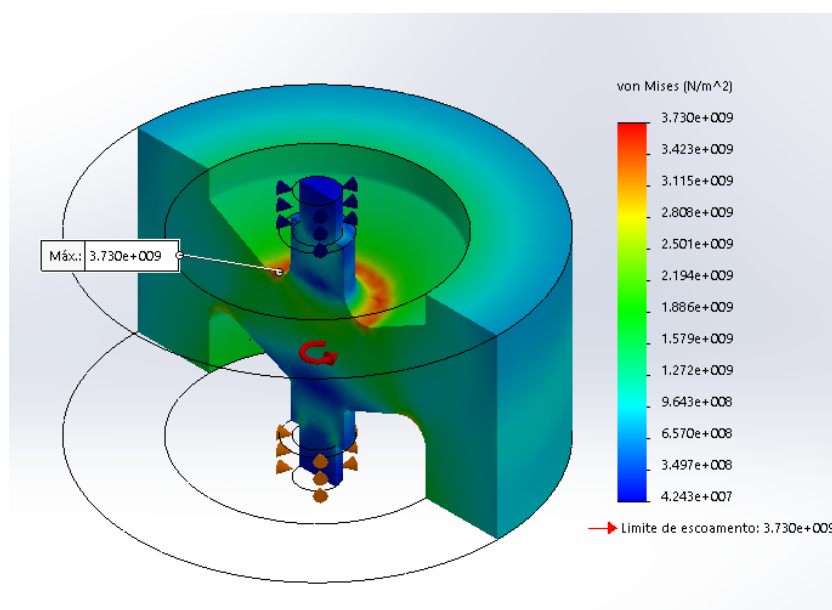


Figura 29- Resultado da análise do Modelo 06 em fibra de carbono

6.2.10. Modelo 07



Figura 30- Modelo 07 em corte

O modelo 07 possui as características descritas na tabela 12:

Tabela 12 - Características modelo 07

Material	<i>Aço Maraging</i>	Fibra de Carbono
Massa do rotor	19,0078 kg	4,399 kg
Rotação máxima admitida	50.890 rpm	131.740 rpm
Energia de rotação em rotação máxima	1.626.719 J	2.522.972 J

Fonte: O autor

Resumo da Análise

O modelo 07 estava proposto no estudo anterior realizado no IFSP, tem como principal característica a ligação entre o eixo e a coroa realizada por um cone que se inicia junto a coroa e se une ao eixo no limite inverso. Essa geometria previa uma pequena deformação do cone, de forma a absorver as tensões geradas pelo movimento.

Este modelo apresentou como ponto crítico a seção próxima a coroa, ver figura 31, esse comportamento foi verificado tanto nas análises realizadas em aço *maraging* como nas análises realizadas com fibra de carbono.

A concentração de tensões nessa seção limitou o estudo a uma rotação máxima de 50.890 rpm quando as análises foram realizadas com aço *maraging* e 131.740 rpm com as análises realizadas com fibra de carbono. As duas análises estão apresentadas com maiores detalhes nos apêndices M e N.

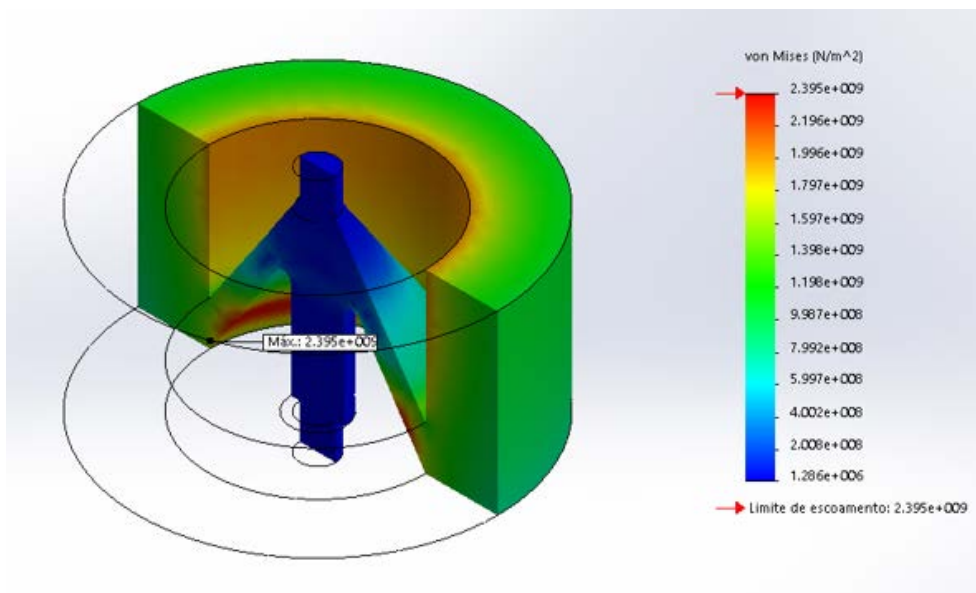


Figura 31- Resultado da análise do Modelo 07 em aço

6.2.11. Modelo 08

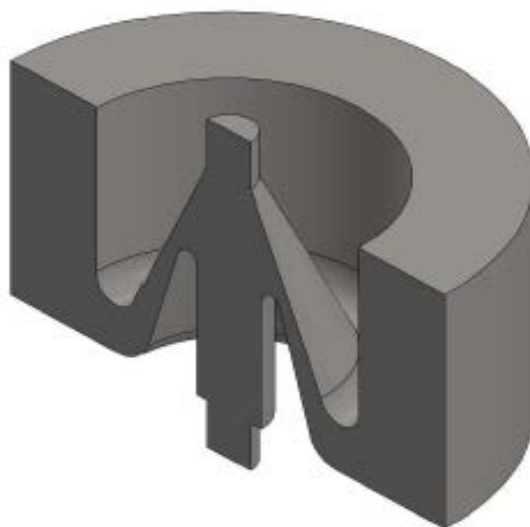


Figura 32- Modelo 08 em corte

O modelo 08 possui as características descritas na tabela 13:

Tabela 13 - Características modelo 08

Material	<i>Aço Maraging</i>	Fibra de Carbono
Massa do rotor	18,829 kg	4,357 kg
Rotação máxima admitida	50.710 rpm	131.380 rpm
Energia de rotação em rotação máxima	1.610.591 J	2.501.998 J

Fonte: O autor

Resumo da Análise

O modelo 08 foi concebido para mitigar a concentração de tensão apresentada no modelo 07, tornando o cone de ligação entre o eixo e a coroa mais delgado, projetando a coroa em sentido do eixo nesta união com o cone (Figura 33).

Não houve, porém, nenhuma melhora significativa na performance, com os resultados obtidos muito próximos do modelo anterior, modelo 07.

A concentração de tensões nessa seção limitou o estudo a uma rotação máxima de 50.710 rpm quando as análises foram realizadas com aço *maraging* e 131.380 rpm com as análises realizadas com fibra de carbono. As duas análises estão apresentadas com maiores detalhes nos apêndices O e P.

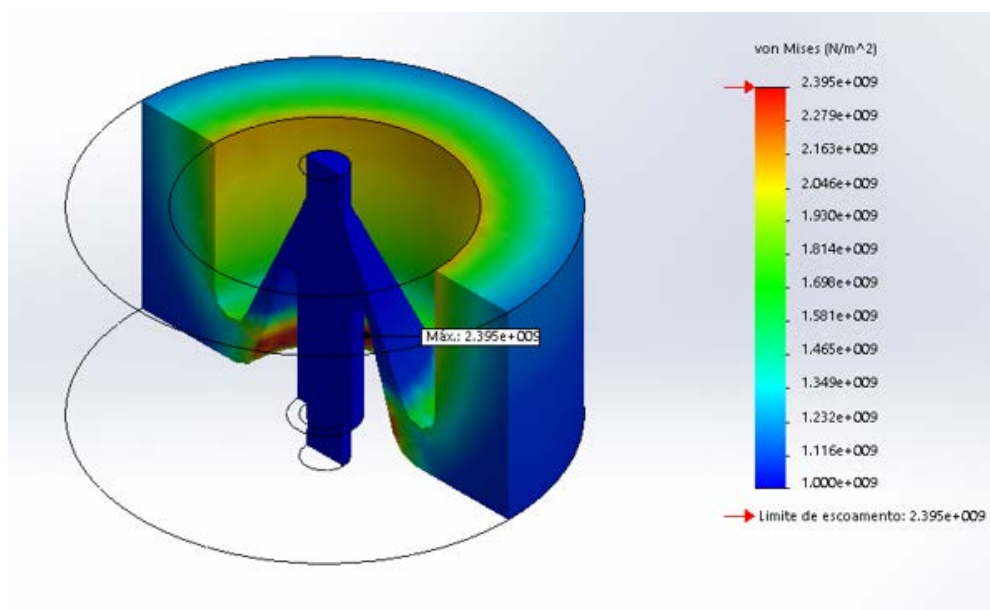


Figura 33 - Resultado da análise do Modelo 08 em aço

6.3. Resultados

Após a realização dos ensaios, os resultados apresentados de rotação máxima e energia rotacional (Gráficos 01 e 02) indicaram que a geometria do modelo 05 possuía a melhor performance e, sendo assim, esta foi a geometria escolhida para as análises posteriores.

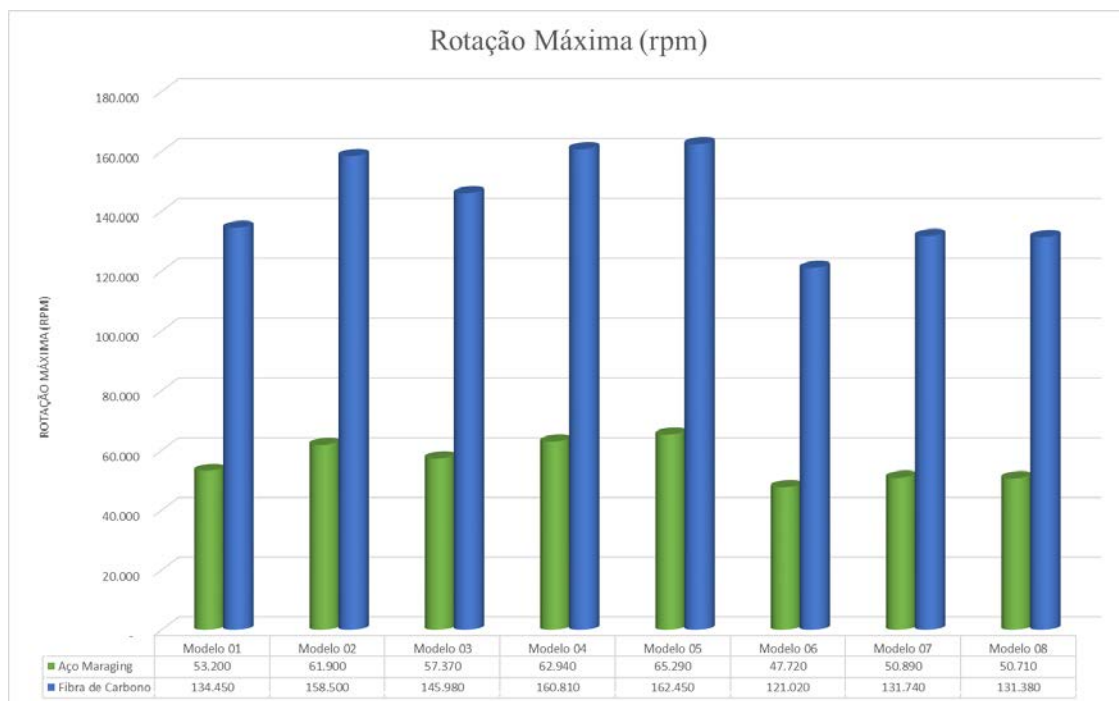


Gráfico 1– Rotação Máxima dos Modelos Analisados

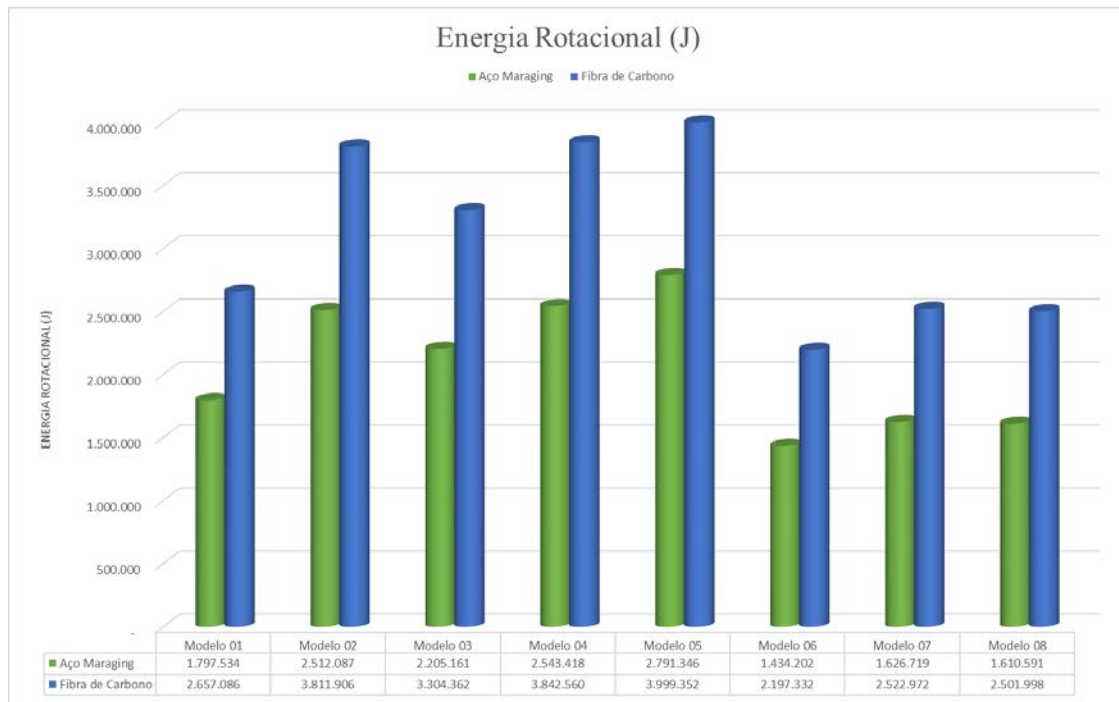


Gráfico 2 – Energia Rotacional dos Modelos Analisados

7. MODELOS CONJUGADOS

Para as análises utilizando materiais conjugados, ou seja, núcleo de aço *maraging* revestido de fibra de carbono, foi utilizado a geometria de modelo 05. O uso dessa geometria se explica pelo desempenho demonstrado anteriormente, visto que foi a melhor geometria analisada neste estudo. O revestimento de fibra de carbono objetiva um ganho de performance do conjunto do rotor, com maior capacidade de acúmulo de energia pelo rotor. As proporções analisadas, exibidas a seguir, tiveram medidas padrão de diâmetro e altura para efeito de cálculos e simulações, variando a relação entre a espessura da fibra de carbono e aço *maraging*.

Foram analisadas diferentes relações entre os materiais constituintes do rotor, visando a otimização da relação massa/integridade, ou seja, um rotor com a maior massa possível, para se obter, de forma diretamente proporcional, o maior momento de inércia. Esta análise priorizou o maior volume de aço com o menor volume possível de fibra de carbono, uma vez que a massa específica do aço *maraging* possui um valor maior que a massa específica da fibra de carbono, conforme evidenciado na tabela 4, o que contribuiria positivamente para o desempenho do equipamento.

A fibra de carbono teve a função específica de manter a integridade estrutural do rotor, porém, apesar da imprescindível função citada, prejudica o desempenho do equipamento em razão da deficiência de acúmulo de energia cinética por conta do valor de sua massa específica. Sendo assim, a conjectura indicava um volume de fibra de carbono reduzido ao mínimo admissível para manter a integridade do conjunto nas altas

solicitações decorrentes das acelerações e velocidades pretendidas, com o consequente maior volume possível, e com sua massa diretamente proporcional, de aço *maraging*.

Antes de realizar as análises com materiais conjugados, após a definição da geometria para o estudo, houve uma análise de proporções entre o raio externo e interno. Após a execução deste estudo, a dimensão escolhida para os estudos foi de raio interno do rotor 65mm, a motivação da escolha fica demonstrada pelos resultados expostos nos gráficos 03 e 04.

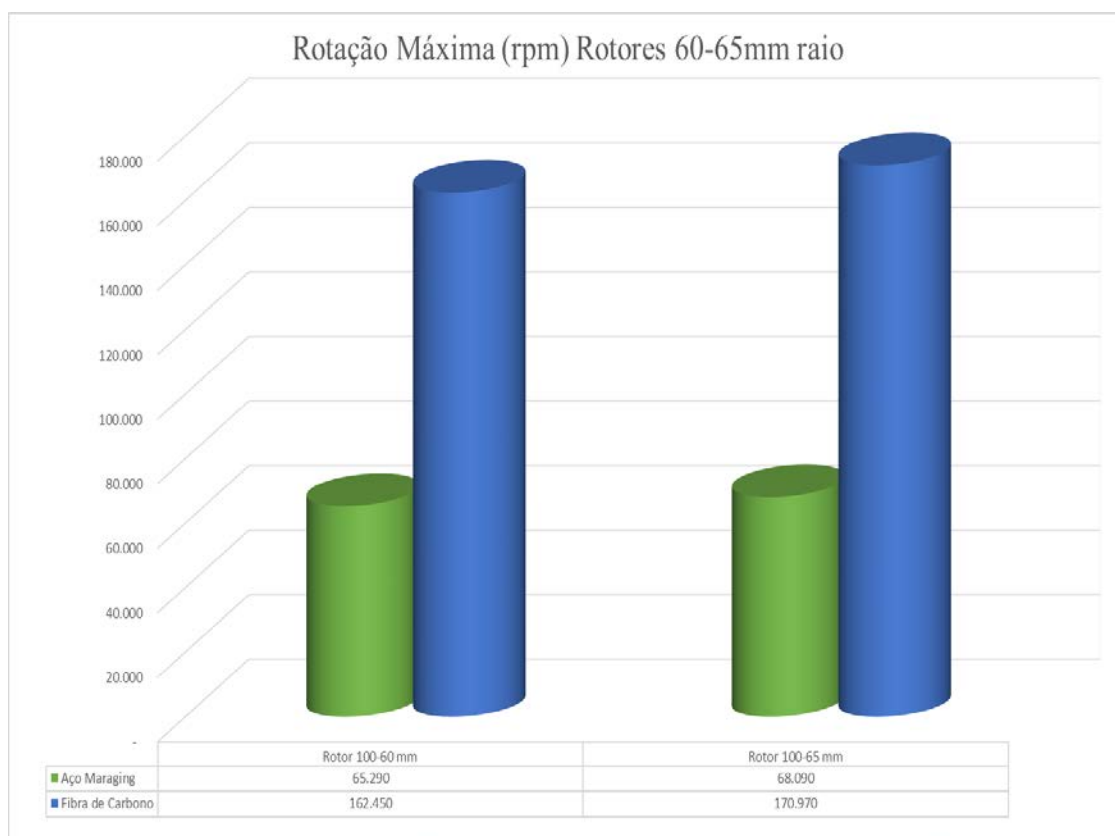


Gráfico 3- Comparação entre rotores com raios internos de 65 e 60 mm - Rotação Máxima

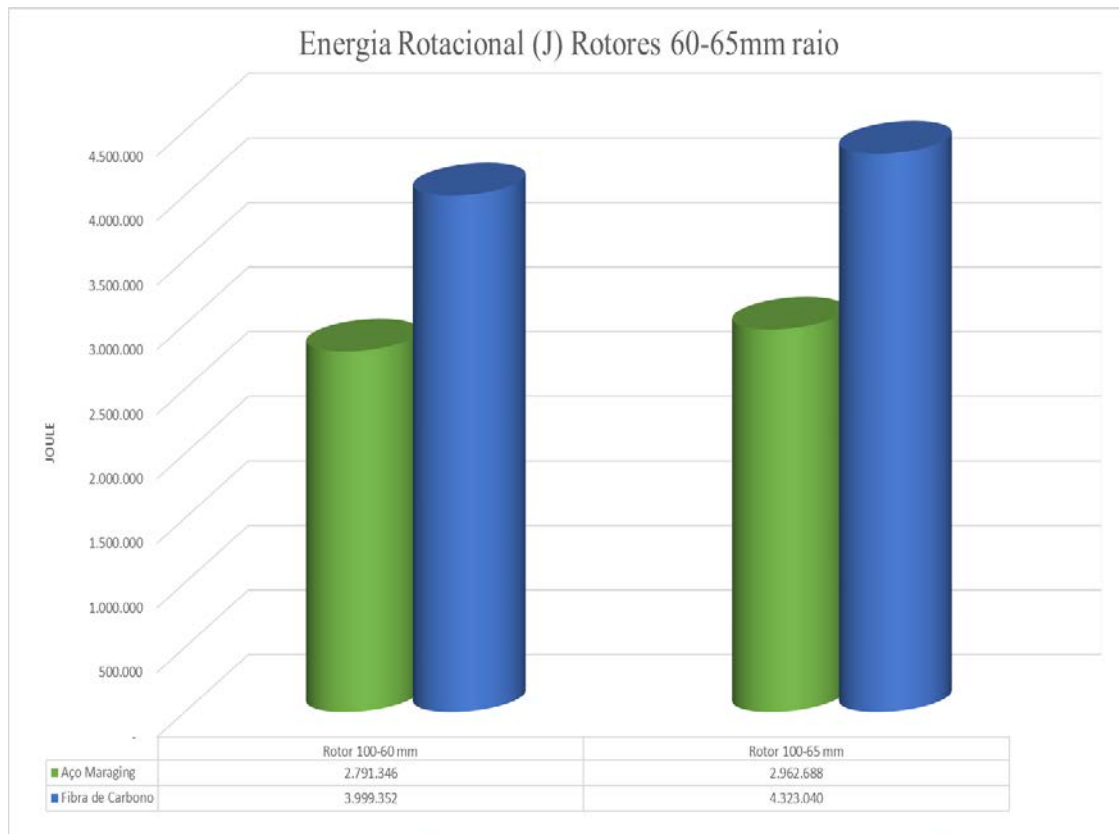


Gráfico 4 - Comparação entre rotores com raios internos de 65 e 60 mm – Energia Rotacional

7.1. Rotor em aço

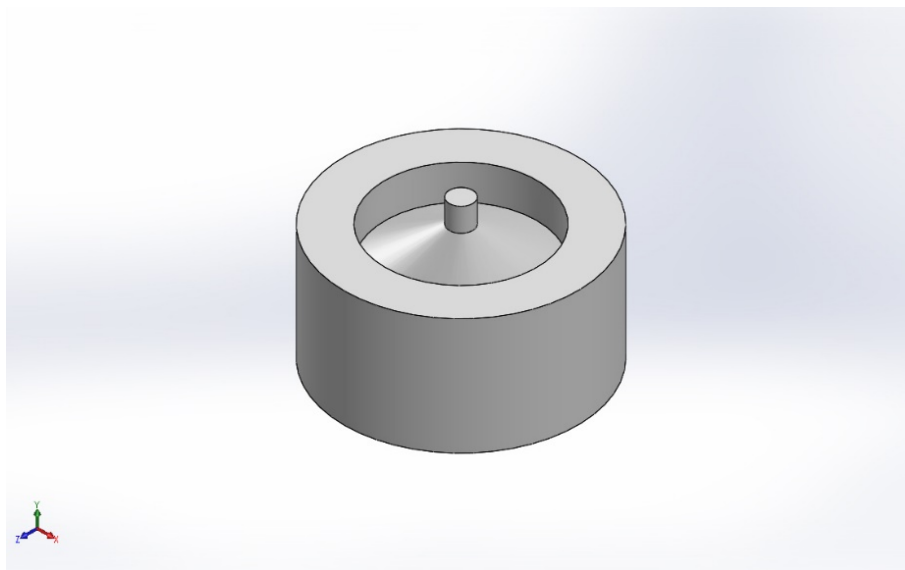


Figura 34- Rotor em Aço *Maraging* sem Recobrimento

O rotor constituído de aço *maraging* possui as características descritas na tabela 14:

Tabela 14 - Características e resultados rotor aço

Diâmetro externo	200 mm
Diâmetro do rotor de aço <i>Maraging</i>	200 mm
Altura do rotor	100 mm
Espessura do revestimento de fibra de carbono	0 mm
Massa do conjunto	21,576 kg
Momento de Inércia (I)	0,11654402 kg.m ²
Rotação máxima admitida	68.090 rpm
Energia de rotação em máximo rpm	2.962.688 J

Fonte: O autor

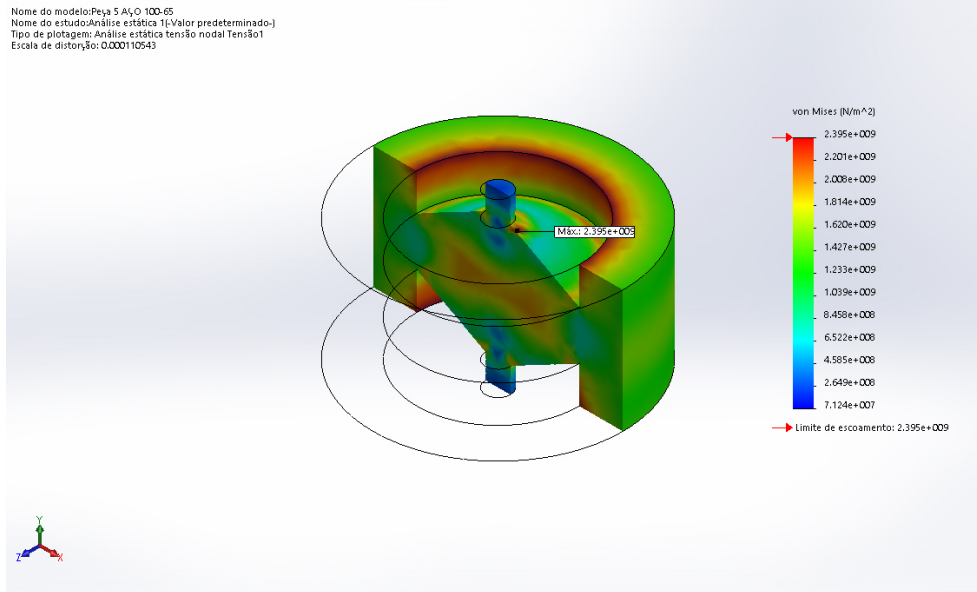


Figura 35 – Resultado da Análise do Rotor em aço *Maraging*

7.2. Rotor com Revestimento em FC de 5mm

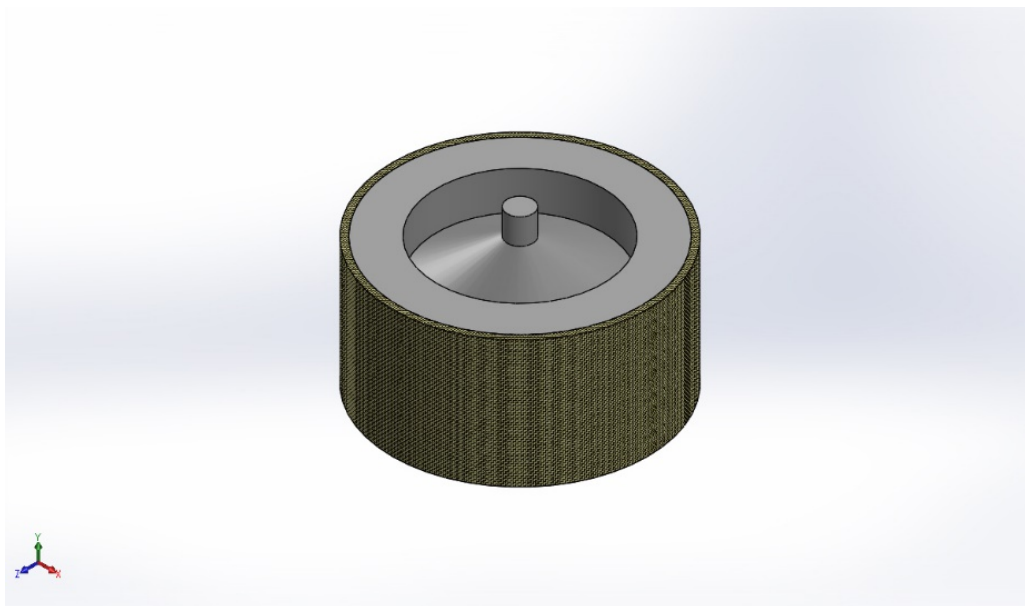


Figura 36- Rotor com FC espessura 5 mm

O rotor com revestimento de 5 mm de fibra de carbono possui as características descritas na tabela 15:

Tabela 15 - Características e resultados rotor com FC 5 mm:

Diâmetro externo	200 mm
Diâmetro do rotor de aço <i>Maraging</i>	190 mm
Altura do rotor	100 mm
Espessura do revestimento de fibra de carbono	5 mm
Massa do conjunto	19,674 kg
Momento de Inércia (I)	0,09844982 kg.m ²
Rotação máxima admitida	72.350 rpm
Energia de rotação a 72.350 rpm	2.825.669 J

Fonte: O autor

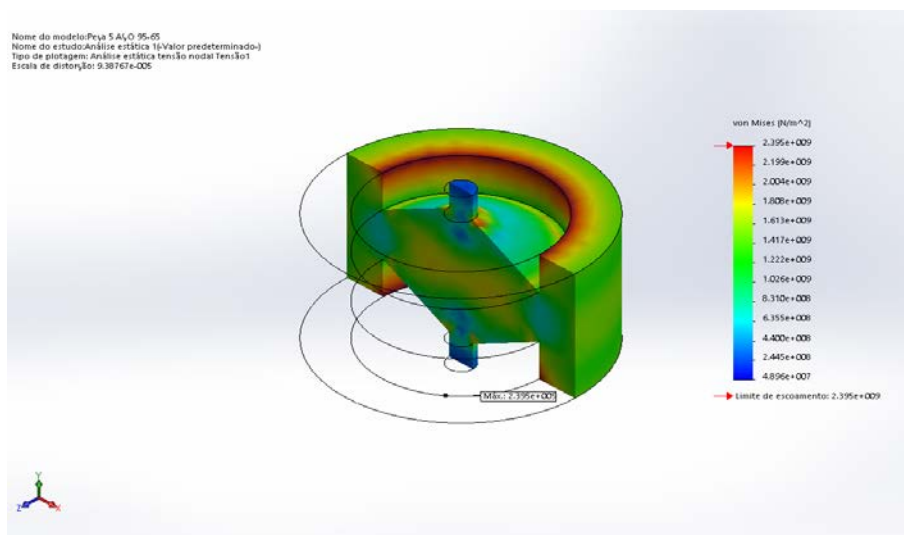


Figura 37 – Resultado da Análise do Rotor de 95 mm sem Revestimento

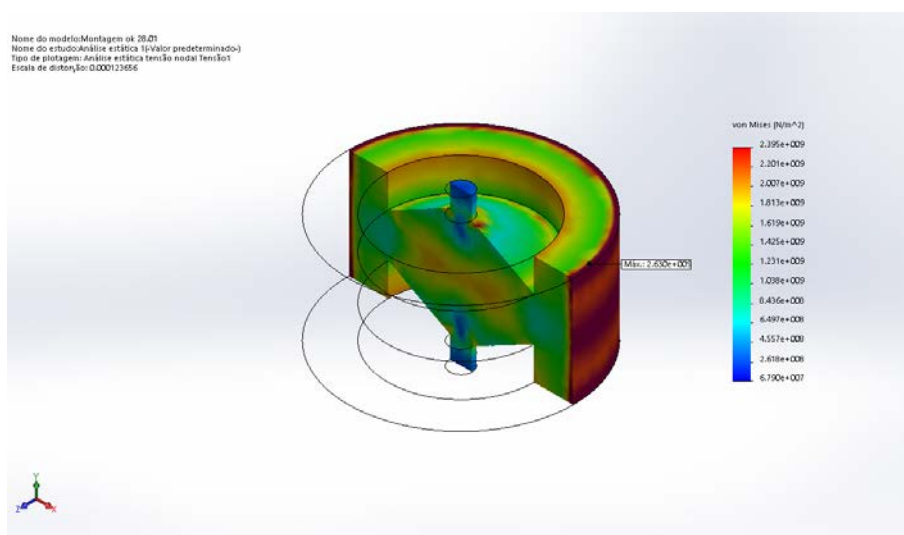


Figura 38- Resultado da Análise do Rotor de 95 mm com Revestimento de 5 mm

A comparação entre as análises realizadas com o rotor sem fibra de carbono e o rotor conjugado de aço *maraging* e fibra de carbono demonstra que houve uma mudança no comportamento do rotor. As tensões que limitavam o estudo e se concentravam nas extremidades internas da coroa se deslocam para a interface entre a fibra de carbono e o aço *maraging*, demonstrando a ação da fibra de carbono no conjunto.

7.3. Rotor com Revestimento em FC de 10 mm

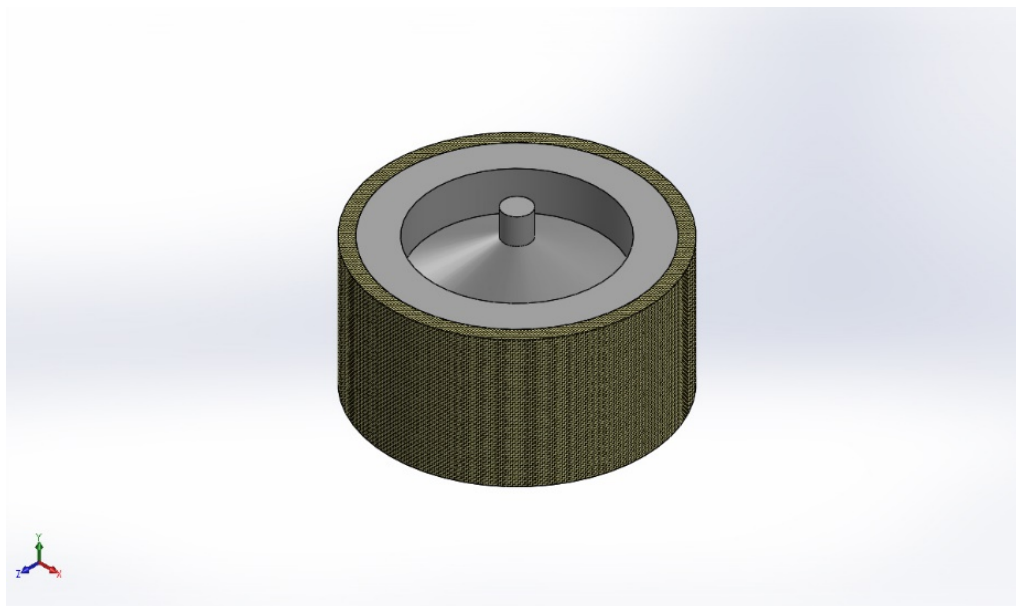


Figura 39- Rotor com FC espessura 10 mm

O rotor com revestimento de 10 mm de fibra de carbono possui as características descritas na tabela 16:

Tabela 16 – Características e resultados rotor com FC 10 mm:

Diâmetro externo	200 mm
Diâmetro do rotor de aço <i>Maraging</i>	180 mm
Altura do rotor	100 mm
Espessura do revestimento de fibra de carbono	10 mm
Massa do conjunto	17,869 kg
Momento de Inércia (I)	0,08299791 kg.m ²
Rotação máxima admitida	76.700 rpm
Energia de rotação a 76.700 rpm	2.677.239 J

Fonte: O autor

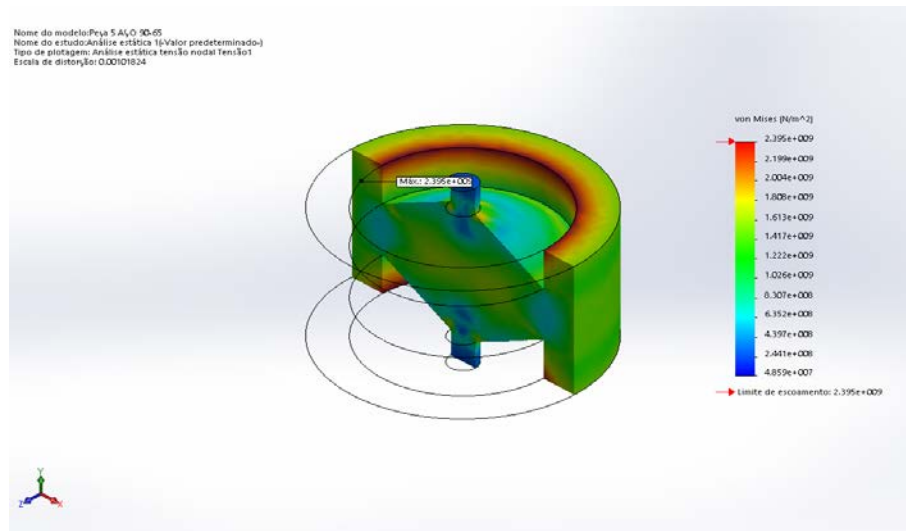


Figura 40 - Resultado da Análise do Rotor de 90 mm sem Revestimento

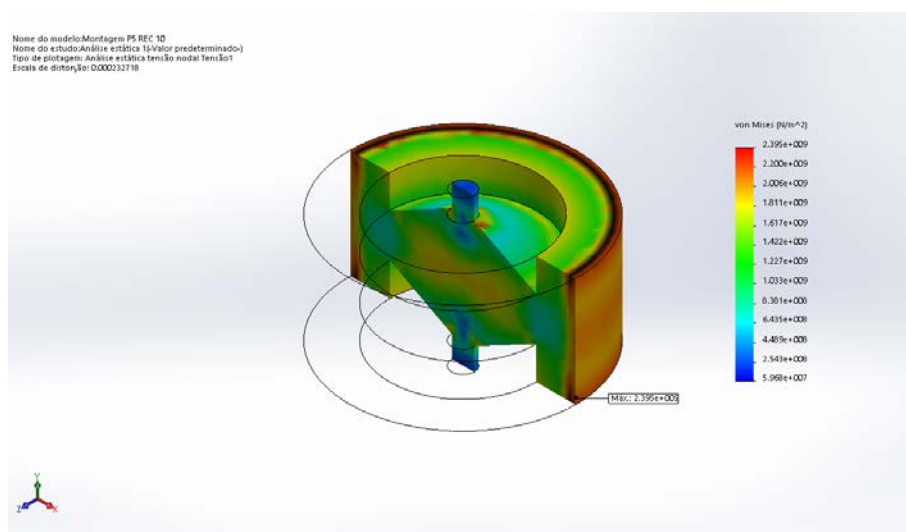


Figura 41 - Resultado da Análise do Rotor de 90 mm com Revestimento de 10 mm

Novamente, a comparação entre as análises realizadas com o rotor sem fibra de carbono e o rotor conjugado de aço *maraging* e fibra de carbono demonstra que houve uma mudança no comportamento do rotor. As tensões que limitavam o estudo e se concentravam nas extremidades internas da coroa se deslocam para a interface entre a fibra de carbono e o aço *maraging*, demonstrando a ação da fibra de carbono no conjunto.

7.4. Rotor com Revestimento em FC de 15 mm

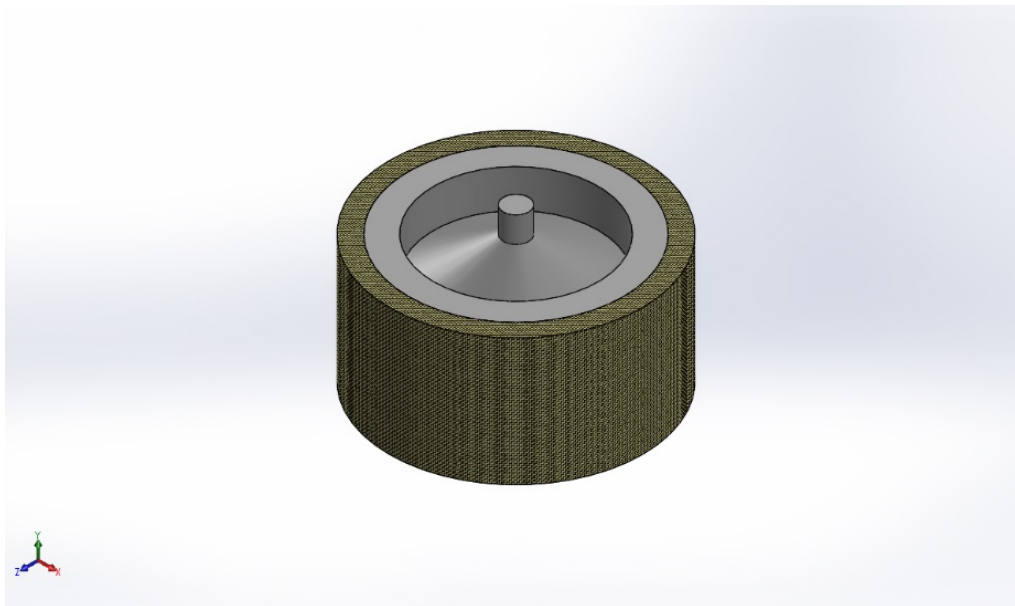


Figura 42- Rotor com FC espessura 15 mm

O rotor com revestimento de 15 mm de fibra de carbono possui as características descritas na tabela 17:

Tabela 17 - Características e resultados rotor com FC 15 mm:

Diâmetro externo	200 mm
Diâmetro do rotor de aço <i>Maraging</i>	170 mm
Altura do rotor	100 mm
Espessura do revestimento de fibra de carbono	15 mm
Massa do conjunto	16,162 kg
Momento de Inércia (I)	0,06991762 kg.m ²
Rotação máxima admitida	82.280 rpm
Energia de rotação a 82.280 rpm	2.595.401 J

Fonte: O autor

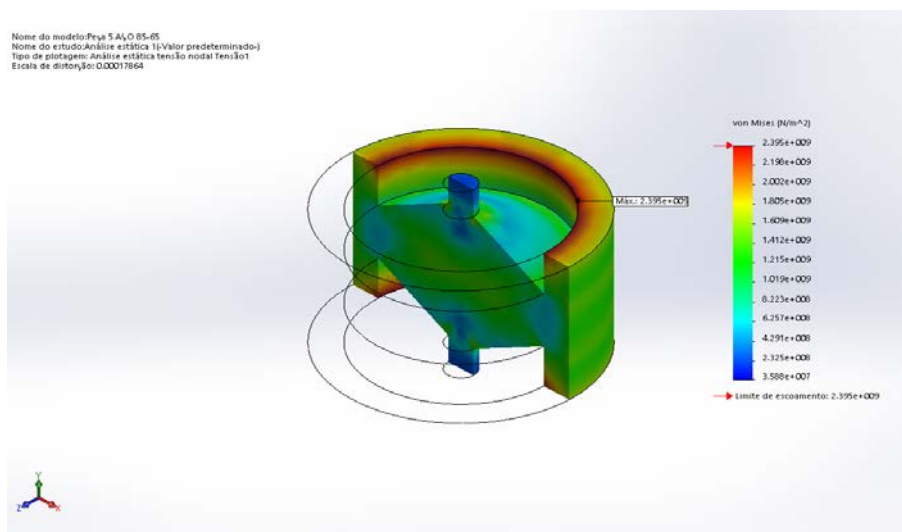


Figura 43 - Resultado da Análise do Rotor de 85 mm sem Revestimento

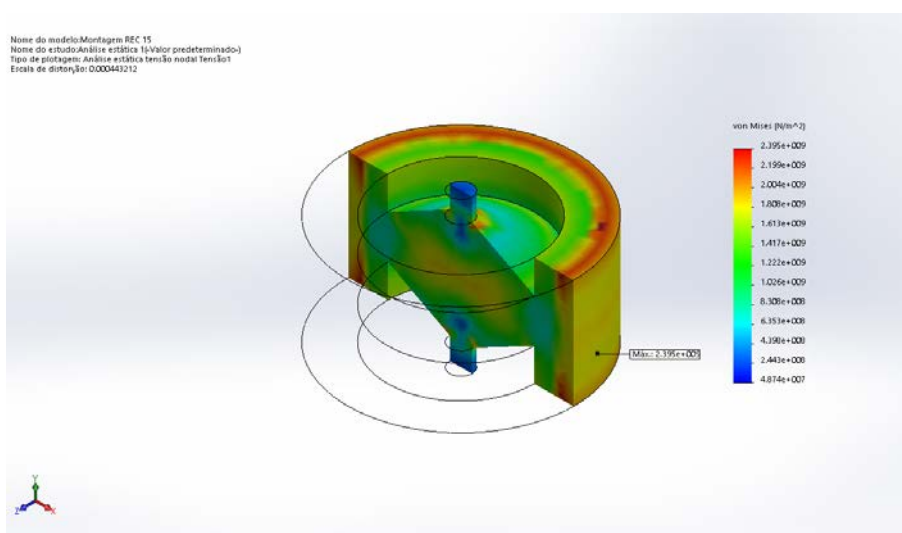


Figura 44 - Resultado da Análise do Rotor de 85 mm com Revestimento de 15 mm

A comparação entre as análises realizadas com o rotor sem fibra de carbono e o rotor conjugado de aço *maraging* e fibra de carbono evidencia um padrão na mudança de comportamento do rotor. As tensões que limitavam o estudo e se concentravam nas extremidades internas da coroa se deslocam para a interface entre a fibra de carbono e o aço *maraging*, demonstrando a ação da fibra de carbono no conjunto.

7.5. Rotor com Revestimento em FC de 20 mm

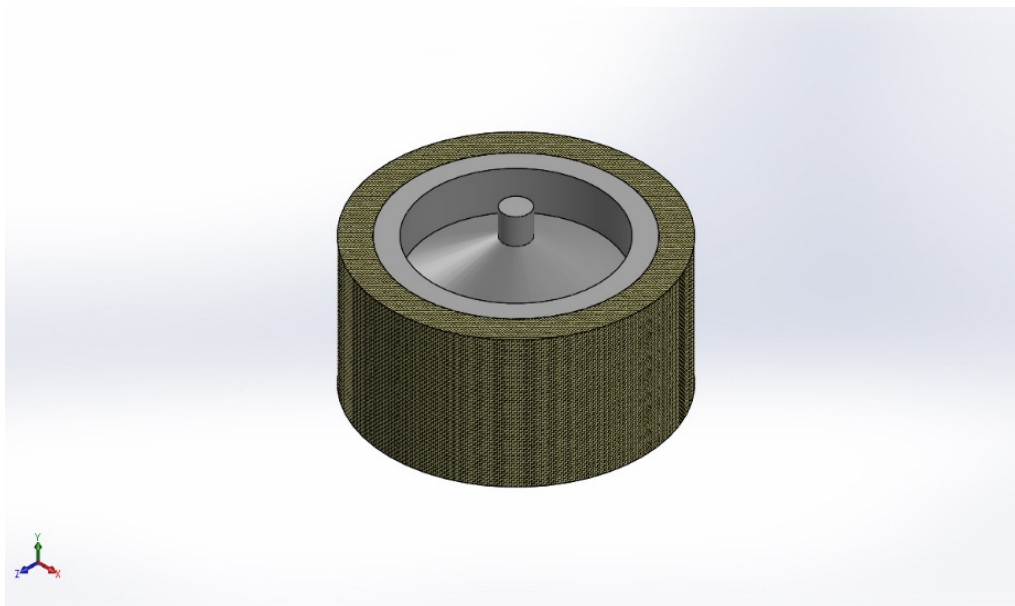


Figura 45- Rotor com FC espessura 20 mm

O rotor com revestimento de 20 mm de fibra de carbono possui as características descritas na tabela 18:

Tabela 18 - Características e resultados rotor com FC 20 mm:

Diâmetro externo	200 mm
Diâmetro do rotor de aço <i>Maraging</i>	160 mm
Altura do rotor	100 mm
Espessura do revestimento de fibra de carbono	20 mm
Massa do conjunto	14,553 kg
Momento de Inércia (I)	0,05895284 kg.m ²
Rotação máxima admitida	88.800 rpm
Energia de rotação a 88.800 rpm	2.548.942 J

Fonte: O autor

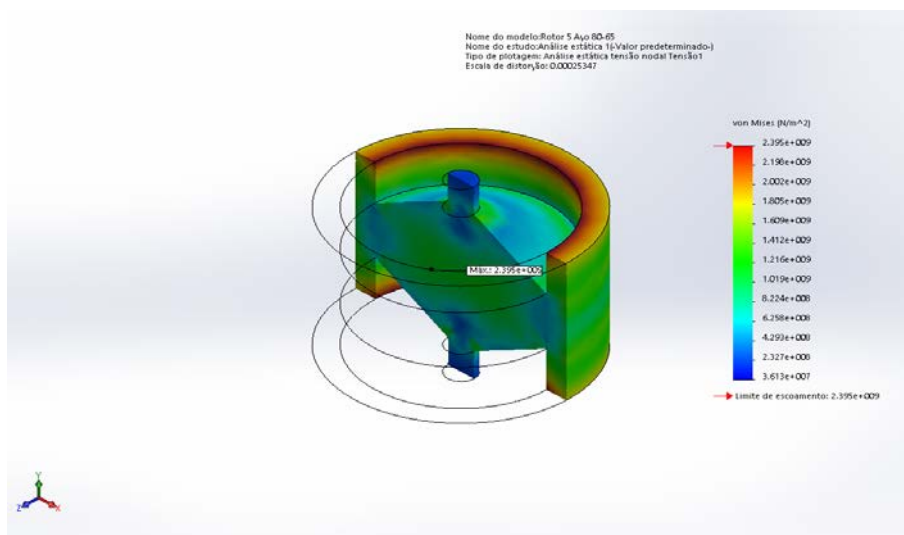


Figura 46 - Resultado da Análise do Rotor de 80 mm sem Revestimento

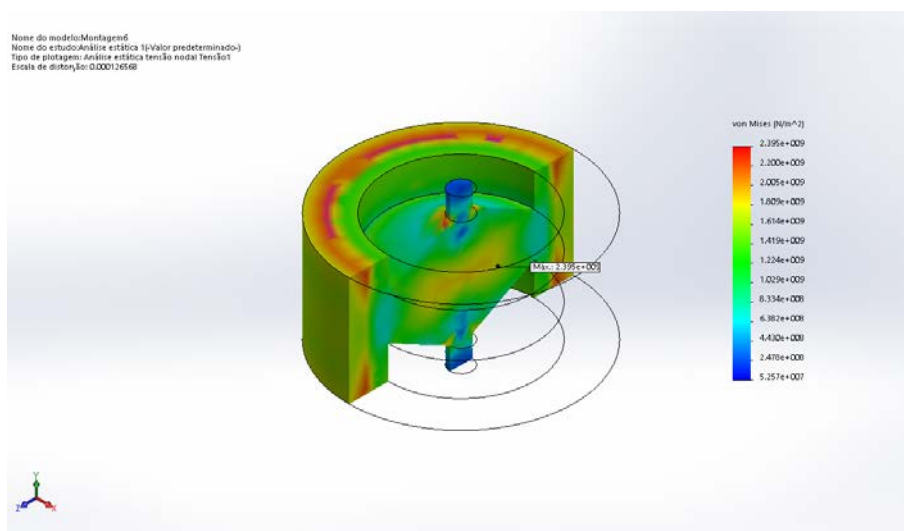


Figura 47- Resultado da Análise do Rotor de 80 mm com Revestimento de 20 mm

Ocorre uma alteração no padrão de comportamento do rotor conjugado. Apesar da tensão na interface entre a fibra de carbono e o aço *maraging* continuar demonstrando a ação da fibra de carbono no conjunto, a tensão que limitou o estudo não está concentrada na coroa, se encontra no centro do rotor.

7.6. Rotor com Revestimento em FC de 25 mm

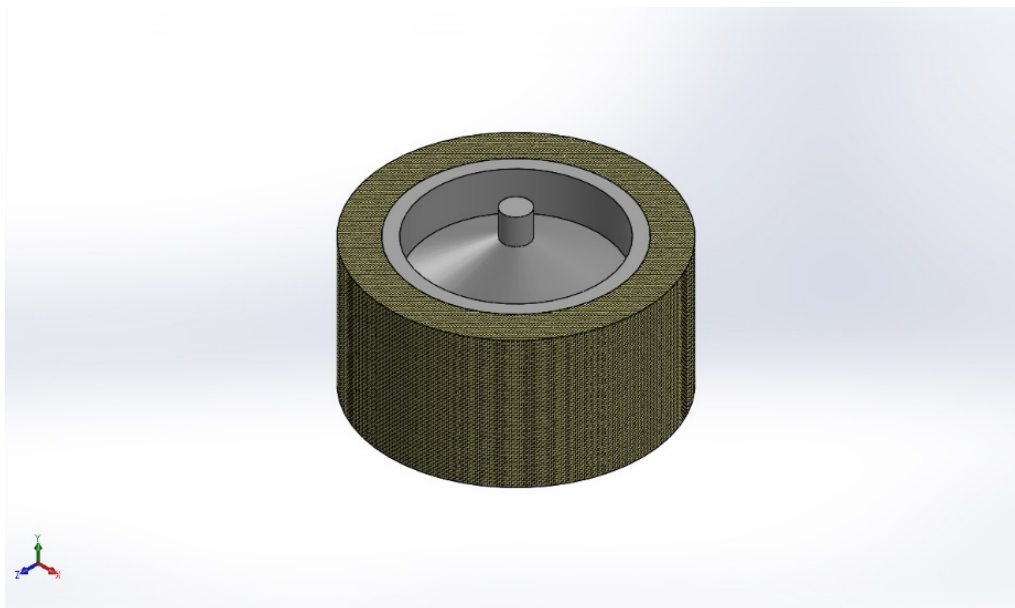


Figura 48- Rotor com FC espessura 25 mm

O rotor com revestimento de 25 mm de fibra de carbono possui as características descritas na tabela 19:

Tabela 19 - Características e resultados rotor com FC 25 mm:

Diâmetro externo	200 mm
Diâmetro do rotor de aço <i>Maraging</i>	150 mm
Altura do rotor	100 mm
Espessura do revestimento de fibra de carbono	25 mm
Massa do conjunto	13,041 kg
Momento de Inércia (I)	0,04986218 kg.m ²
Rotação máxima admitida	96.160 rpm
Energia de rotação a 96.160 rpm	2.528.072 J

Fonte: O autor

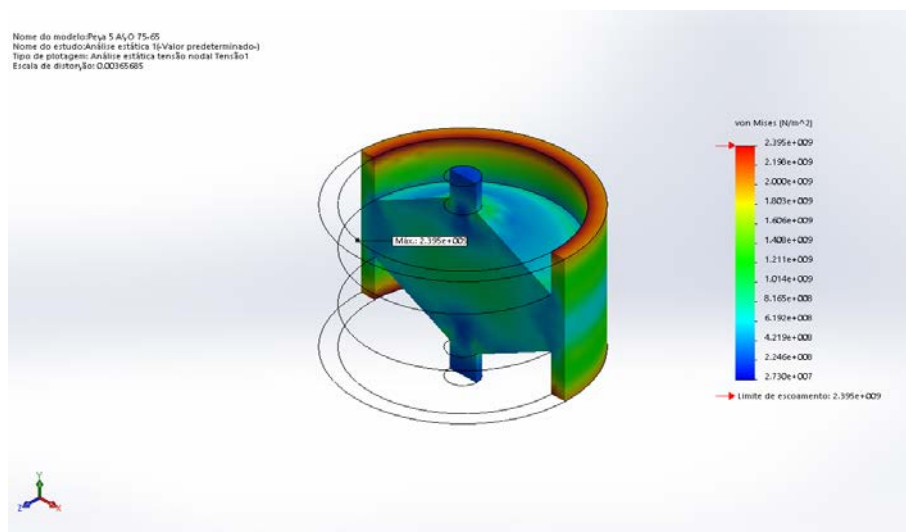


Figura 49 - Resultado da Análise do Rotor de 75 mm sem Revestimento

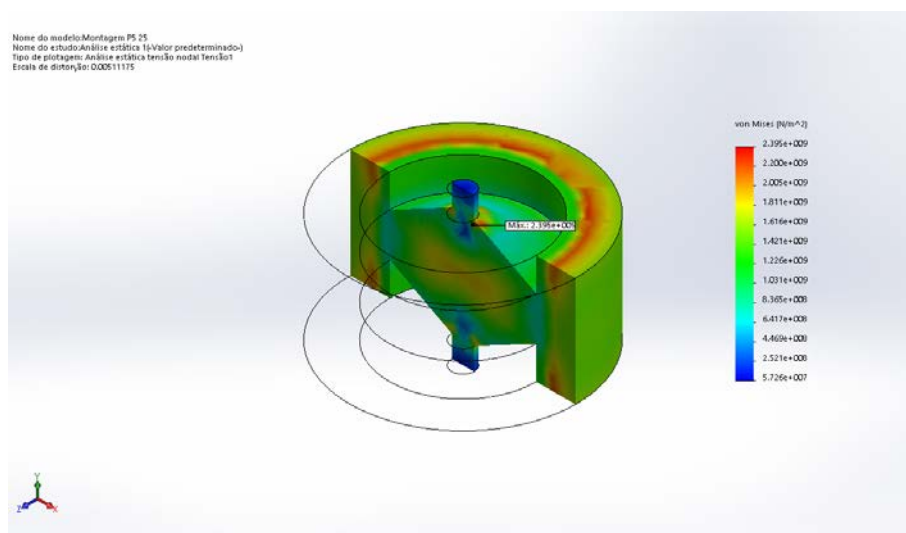


Figura 50 - Resultado da Análise do Rotor de 75 mm com Revestimento de 25 mm

Novamente a alteração no padrão de comportamento do rotor conjugado é evidenciada. Apesar da tensão na interface entre a fibra de carbono e o aço *maraging* continuar demonstrando a ação da fibra de carbono no conjunto, a tensão que limitou o estudo não está concentrada na coroa, se encontra ao redor do eixo do rotor.

7.7. Rotor com Revestimento em FC de 30 mm

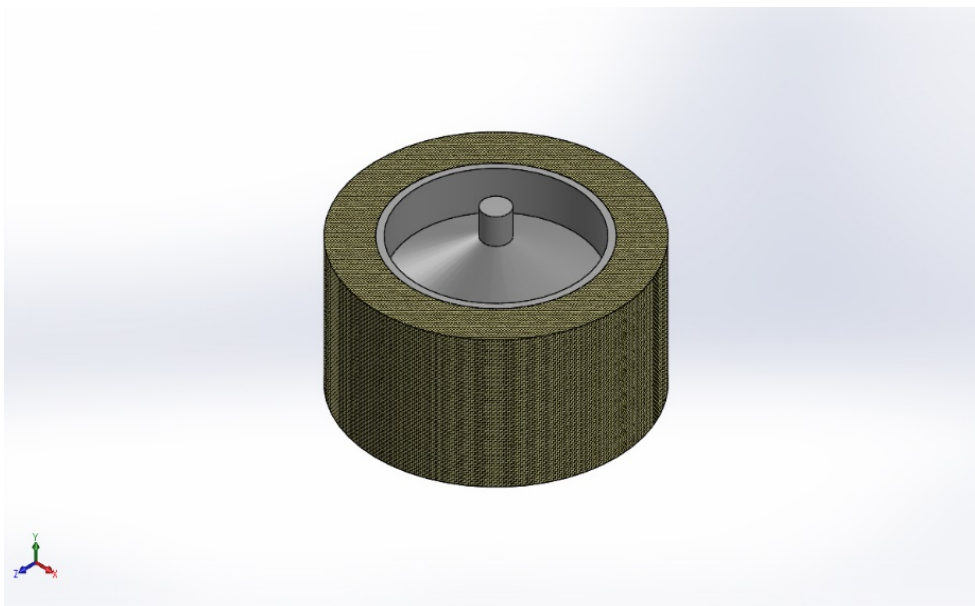


Figura 51- Rotor com FC espessura 30 mm

O rotor com revestimento de 30 mm de fibra de carbono possui as características descritas na tabela 20:

Tabela 20 - Características e resultados rotor com FC 30 mm:

Diâmetro externo	200 mm
Diâmetro do rotor de aço <i>Maraging</i>	140 mm
Altura do rotor	100 mm
Espessura do revestimento de fibra de carbono	30 mm
Massa do conjunto	11,626 kg
Momento de Inércia (I)	0,4241877 kg.m ²
Rotação máxima admitida	103.460 rpm
Energia de rotação a 103.460 rpm	2.489.615 J

Fonte: O autor

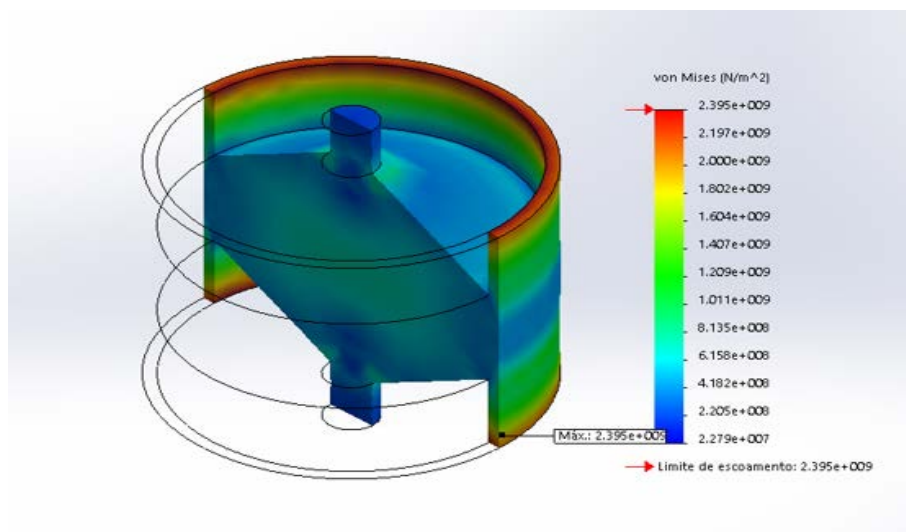


Figura 52 - Resultado da Análise do Rotor de 70 mm sem Revestimento

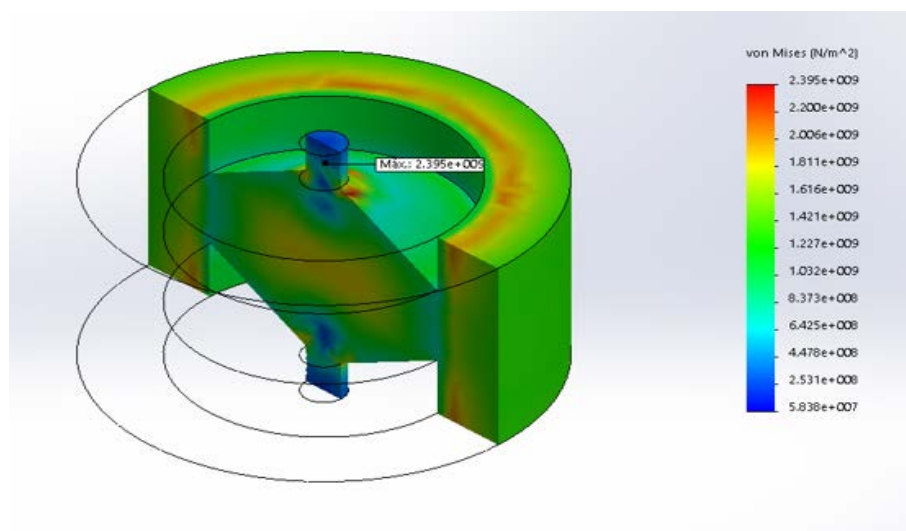


Figura 53 - Resultado da Análise do Rotor de 70 mm com Revestimento de 30 mm

O novo padrão de comportamento do rotor conjugado é caracterizado. A tensão na interface entre a fibra de carbono e o aço *maraging* demonstra nitidamente a ação da fibra de carbono no conjunto, a tensão que limitou o estudo não está concentrada na coroa, se encontra ao redor do eixo do rotor.

7.8. Rotor em Fibra de Carbono

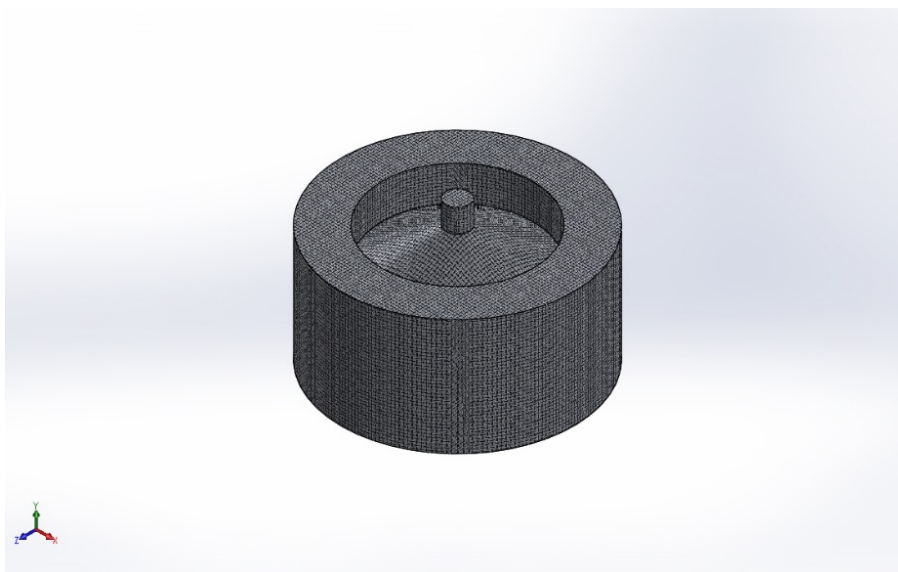


Figura 54- Rotor em Fibra de Carbono

O rotor em fibra de carbono possui as características descritas na tabela 21:

Tabela 21 - Características e resultados do rotor de fibra de carbono:

Diâmetro externo	200 mm
Diâmetro do rotor de aço <i>Maraging</i>	0 mm
Altura do rotor	100 mm
Diâmetro do rotor em fibra de carbono	200 mm
Massa do conjunto	4,993 kg
Momento de Inércia (J)	0,02697244 kg.m ²
Rotação máxima admitida	170.970 rpm
Energia de rotação a 170.970 rpm	4.323.040 J

Fonte: O autor

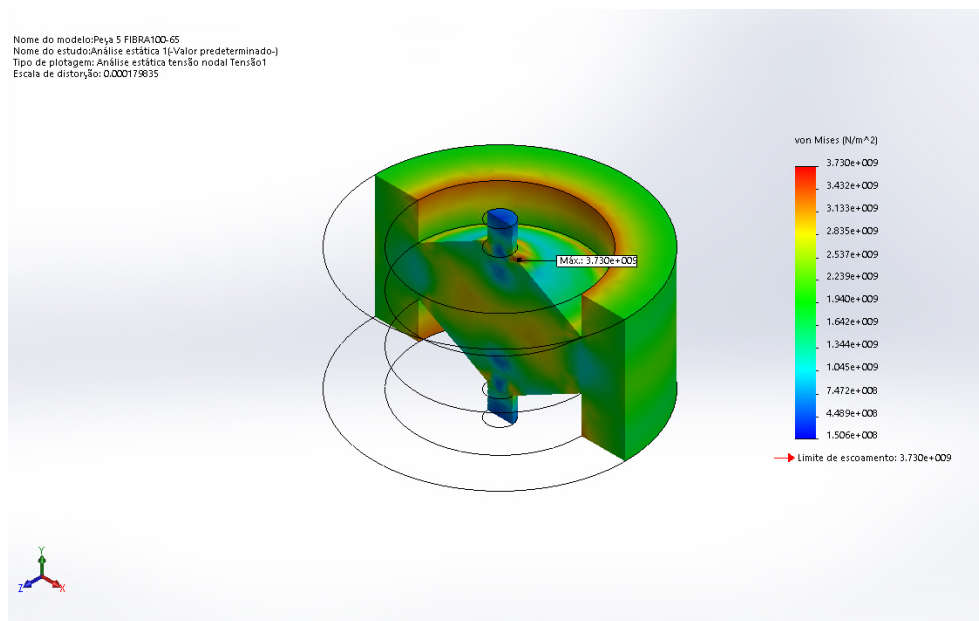


Figura 55 - Resultado da Análise do Rotor em Fibra de Carbono

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os rotores conjugados de aço *maraging* e fibra de carbono simulados tiveram um desempenho superior ao mesmo rotor sem o revestimento de fibra de carbono. Estes resultados ficaram bem evidenciados e estão reproduzidos na tabela 22 a seguir:

Tabela 22 – Valores obtidos de Rotação Máxima e Energia

	Rotação (rpm)	Energia (J)
Rotor com raio 100-65, aço <i>maraging</i>	68.090	2.962.688,00
Rotor com raio 100-65, fibra de carbono	170.970	4.323.039,97
Rotor 95-65 - somente núcleo em aço	69.780	2.483.016,71
Rotor 95-65 – núcleo de aço revestido com 5 mm	72.350	2.825.669,00
Rotor 90-65 - somente núcleo em aço	70.800	2.003.554,65
Rotor 90-65 – núcleo de aço revestido com 10 mm	76.700	2.677.239,00
Rotor 85-65 - somente núcleo em aço	71.020	1.545.342,92
Rotor 85-65 – núcleo de aço revestido com 15 mm	82.280	2.595.401,00
Rotor 80-65 - somente núcleo em aço	70.660	1.139.148,28
Rotor 80-65 – núcleo de aço revestido com 20 mm	88.800	2.548.942,00
Rotor 75-65 - somente núcleo em aço	69.510	789.013,33
Rotor 75-65 – núcleo de aço revestido com 25 mm	96.160	2.528.072,00
Rotor 70-65 - somente núcleo em aço	67.740	505.668,24
Rotor 70-65 – núcleo de aço revestido com 30 mm	103.460	2.489.615,35

Fonte: O autor

Mas quando comparados com o rotor constituído apenas de um dos dois materiais, somente de aço *maraging* ou de fibra de carbono, o seu desempenho ficou aquém do esperado, este desempenho fica evidenciado na comparação demonstrada no gráfico 06.

Era esperado um comportamento diferente do conjunto, a ideia era que, apesar da massa do rotor ser reduzida com o aumento da participação da fibra de carbono na constituição do conjunto, o aumento da rotação proporcionaria um aumento da energia rotacional, o que não foi verificado nos ensaios.

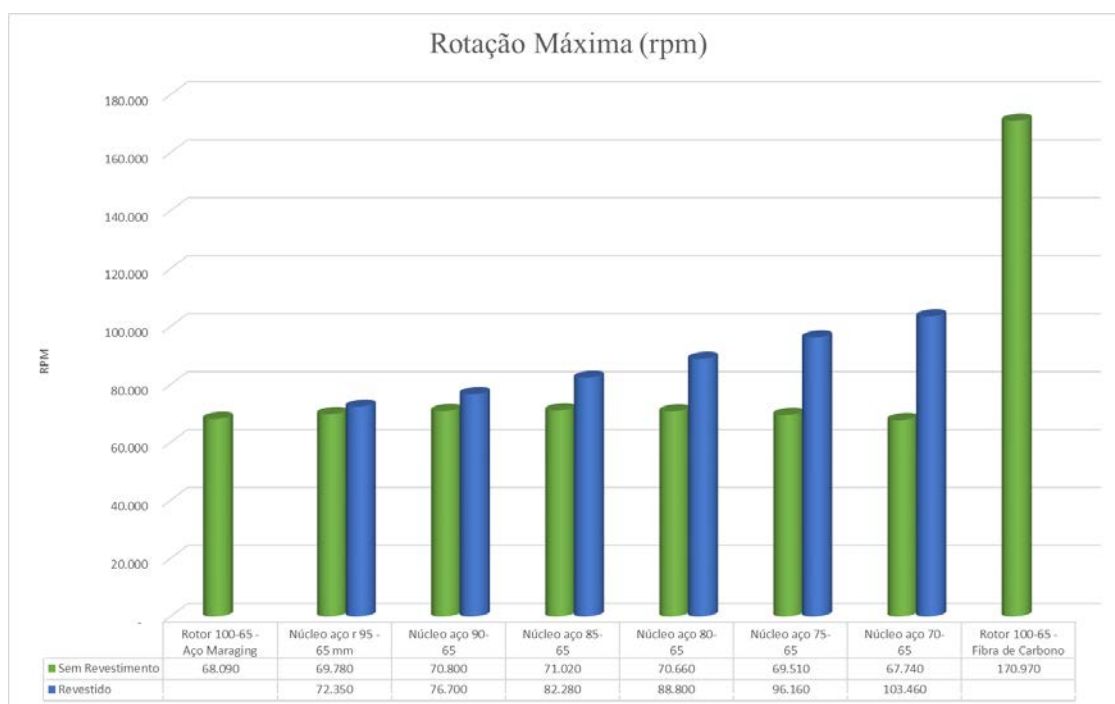


Gráfico 5- Rotação Máxima dos Rotores Revestidos

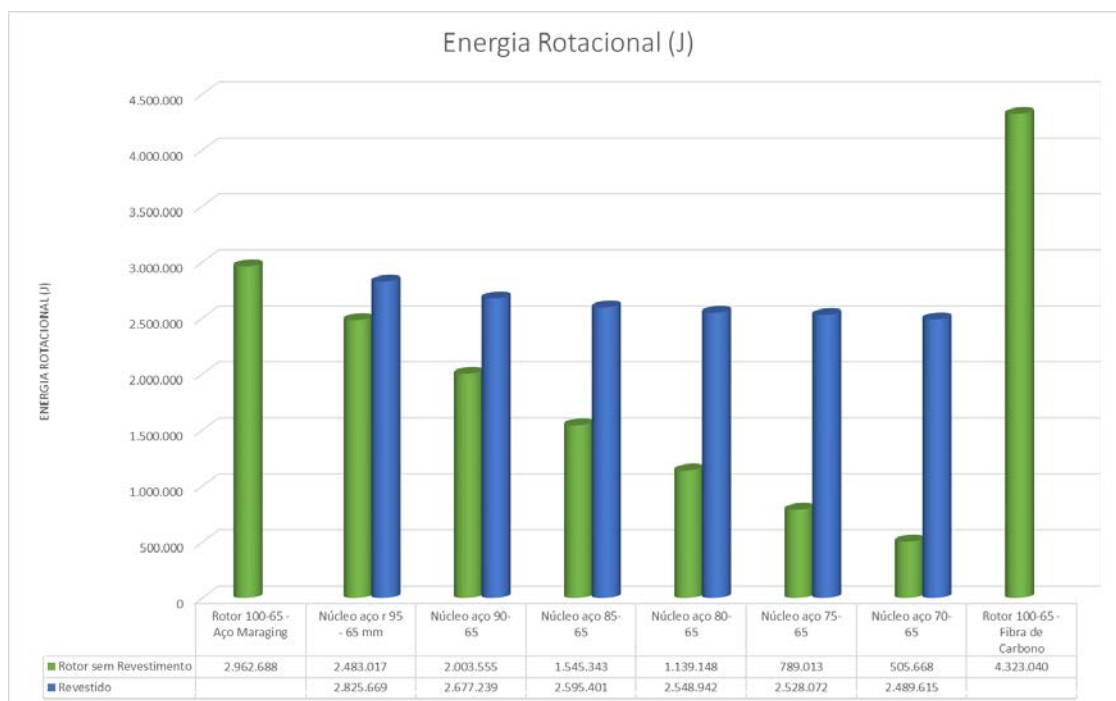


Gráfico 6- Energia Rotacional dos Rotores Revestidos

8.1. Trabalhos Futuros

Esse estudo não é terminal, é a continuação de um estudo já iniciado no IFSP e deve ser considerado como o fulcro para futuras pesquisas que poderão se utilizar desta base sólida construída com rigor científico.

As futuras pesquisas podem analisar novos conceitos de rotores, avaliando a viabilidade de modelos maciços (Figura 56) ou parcialmente preenchidos (Figura 57), que não foram objetos deste estudo.

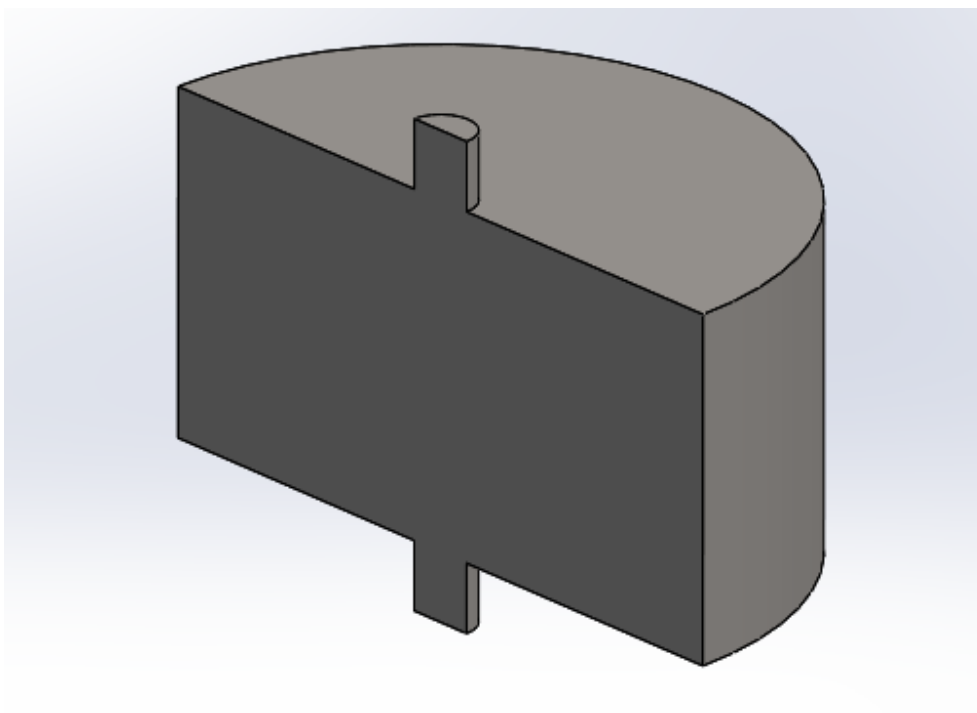


Figura 56- Rotor Maciço
Fonte: O autor

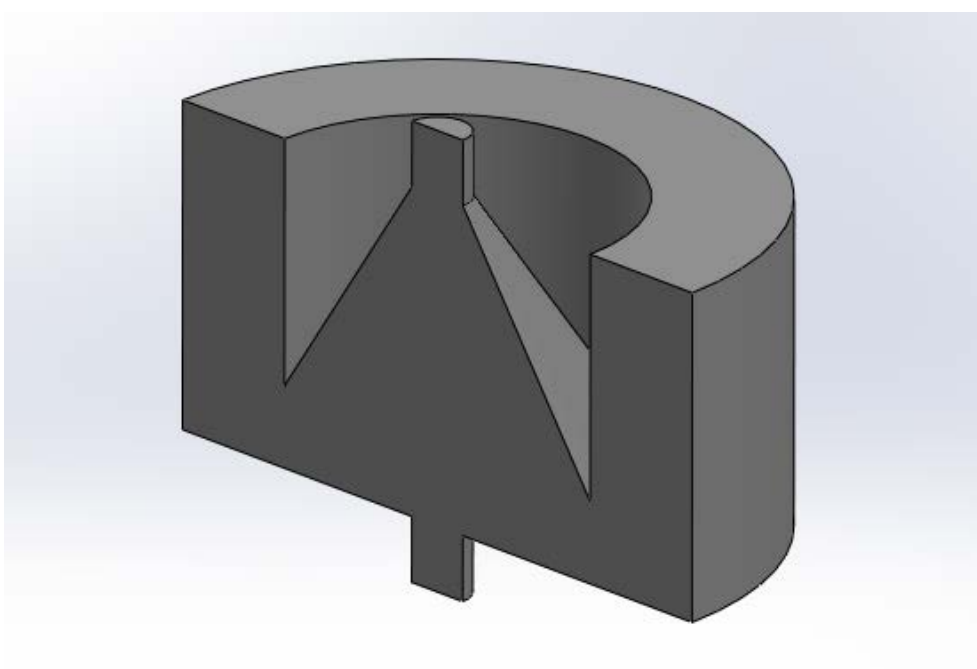


Figura 57- Rotor Parcialmente Preenchido
Fonte: O autor

A pesquisa realizada detalhou e aprofundou as simulações feitas anteriormente no IFSP, com resultados mais precisos, e esta forma de pesquisa deve ser consolidada nos estudos futuros, de forma a estimular sempre a adoção de critérios mais sóbrios, objetivando a excelência de resultados.

A utilização de outros materiais é uma outra possibilidade a ser considerada, como pode ser observado na tabela 23, existem materiais promissores para o futuro da pesquisa.

Tabela 23- Materiais para Pesquisas Futuras

Material	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Massa específica (g / cm³)
Fibra de carbono -Toray T1000G	N / D	6.370 - Fibra sozinha	1.80
Zylon - Polibenzoxazole	2700	5.800	1.56
Silício monocristalino - m-Si	N / D	7.000	2.33
Grafeno	N / D	130.000	1.0
Nanotubo de carbono	N / D	11.000 - 63.000	0,037 - 1,34

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUTODESK – Disponível em <http://www.autodesk.com.br>
Acesso em 01/05/2016

AVIAÇÃO EXPERIMENTAL – Disponível em <http://www.aviacaoexperimental.pro.br/aero/tecnica/virabrequim.html>
Acesso em 16/05/2016

ALPHACHANNEL - Disponível em <http://www.alphachannel.net.br/software/autocad>
Acesso em 15/03/2016.

ALVES FILHO, A., Elementos Finitos - a Base da Tecnologia CAE, Ed. Érica - São Paulo, 2000.

ARKISOFT - Disponível em <http://arkisoft.com.br/conversor/dwg-compare>

BARRA, L. P. da S., Cálculo de Sensibilidades – Uma aplicação do Método dos Elementos de Contorno à Otimização de Forma Tese. Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE, 1990.

BAUMEISTER, J., Stable Solution of Inverse Problem. Fried. Vieweg, Braunschweig, 1981.

CADWORKS – Disponível em <http://cadworks.com.br/treinamentos/treinamento-solidworks-motion/>
Acesso em 08/09/2017

CALLADINE, C. R., Engineering Plasticity. Oxford: Pergamon Press, 1969.

CALLISTER, W. D., Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução. Brasil: Ed. LTC. 2012.

CARDOSO, M. R. S., Controlo Inteligente de Um Sistema de Levitação Magnética 2015. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores – Instituto Superior de Engenharia do Porto.

COURSEHERO – Disponível em <https://www.coursehero.com/file/p1m6ak/arrangement-of-lead-bricks-and-containment-liner-all-within-a-steel-shell-that/>
Acesso em 04/12/2017

EARNSHAW, S., On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether. Trans. Cambridge Philosophical Soc., vol 7, pg 97-112, 1842.

ESSS – Disponível em <http://www.esss.com.br/blog/2016/01/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>
Acesso em 30/11/2017

FERNANDES, P. J., Diretrizes para o Projeto do Calibrador do Detector Mario Schenberg. 2015. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP.

FLYNN, M. M., McMullen, P., Solis, O., Saving Energy using Flywheels, Industry Applications Magazine, IEEE v. 14, issue 6, pp. 69-76, November - December 2008.

GALLAGHER, R. H. Introduction. In: Finite element analysis: fundamentals. 4. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975.

GYROBUS - Disponível em <http://dic.academic.ru/dic.nsf/enwiki/1259114>
Acesso em 15/03/2016.

HEARN, C. S. et al, Low Cost Flywheel Energy Storage for a Fuel Cell Powered Transit Bus. The University of Texas at Austin. 2007.

HULL, J.R. Topical Review – Superconducting Bearings, Supercond. Sci. Technol., vol. 13, pp. R1-R15, 2000.

INTECHOPEN – Disponível em <http://www.intechopen.com/books/dynamic-modelling/dynamic-modelling-and-control-design-of-advanced-energy-storage-for-power-system-applications>
Acesso em 12/04/2016.

IPCC - Disponível em <http://www.greenpeace.org/brasil/pt/Noticias/Relatorio-final-do-IPCC-nao-deixa-duvidas-precisamos-agir-agora>
Acesso em 21/01/2016.

ISTSISTEMAS - Disponível em <http://istsistemas.com.br/solidworks/>
Acesso em 30/03/2016.

JUNLING, C., et al, A Novel Uninterruptible Power Supply using Flywheel Energy Storage Unit, Power Electronics and Motion Control Conference, v. 3, pp. 1180 -1184, Aug. 2004.

KIM, N. H; SANKAR, B. V., Introdução à Análise e ao Projeto em Elementos Finitos. Rio de Janeiro. Ed. LTC, 2011.

KINECT – Disponível em https://en.wikipedia.org/wiki/Kinetic_energy_recovery_system
Acesso em 20/06/2017

LEBRÃO, G. W., Fibra de Carbono. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia – Revista Plástico Sul - 2008

LAGUERRI – Disponível em <http://llaguerri.com/blog/girobus-o-gyrobuss>
Acesso em 24/06/2016

LOPES, J. C. O., Os Aços Maraging. Ciência e Tecnologia dos Materiais, vol 19. 2007.

LOPES, M. A. Estudo de um Mancal Magnético Eletrodinâmico. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

LOTTI, R. S. et al, Aplicabilidade Científica do Método dos Elementos Finitos. Revista Dental Press. Maringa, 2006.

LUBIN, G., Handbook of Composites. Nova York: Ed. Van Nostrand Reinhold.1982.

MATT, L., SolidWorks 2010 Bible. 1. ed. Indianapolis: Publishing by Wiley Publishing de Indiana, 2010.

MURGER, P. R. N., Otimização de Geometria e Material para Baterias Eletromecânicas. 2016. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP.

O'HANLON, J. F., A User's Guide to Vacuum Technology - 2003

PADIAL, A. G. F., Caracterização Microestrutural do Aço Maraging de Grau 400 de Resistência Mecânica Ultraelevada, IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo 2002.

PARDINI, L. C., Preformas para Compósitos Estruturais. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol 10, nº 2, p. 100-109, 2000.

PROAKTIVA- Disponível em http://photo.proaktiva.eu/digest/2008_gyrobus.html
Acesso em 20/05/2016

REIS, A. G. et al., Avaliação das Propriedades de Fluência a 600°C do Aço Maraging 300 Solubilizado. Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. São Paulo, 2014.

RIBEIRO, M. R., Sistema Armazenador de Energia Cinética SAEC - Estratégia de Controle e Simulações. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

RICHARDSON, R. J., (1989) Pesquisa social: métodos e técnicas. 2. ed. São Paulo.

ROBALINHO, E., Otimização da Forma Geométrica de Estruturas Utilizando o Método dos Elementos de Contorno. IPEM - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – SP – 1998.

RUBIN, C. et al. Stress analysis of the human tooth using a three dimensional finite element model. J Dent Res, Washington, v. 62, no. 2, p. 82-86, Feb. 1983.

SADD, M. H. Elasticity: Theory, Applications, and Numerics. Butterworth-Heinemann Publication. EUA, 2005.

SANTOS, L. R. - Disponível em <http://www.infoescola.com/quimica/fibra-de-carbono>.
Acesso em 30/04/2016.

SCHMIT, L. A. Jr. Structural Optimization – Some New Ideas and Insights. Em: New Directions in Optimum Structural Design. Editado por: E.Atrek, R.H. Gallagher, K.M. Ragsdell, e O.C. Zienkiewicz; John Wiley & Sons Ltd, 1984.

SCHWEITZER, G.; MASLEN, E.H. Magnetic Bearings: theory, design, and application to rotating machinery. London – New York: Springer Verlag 2009.

SCPOLIAS - Disponível em <http://www.scpolias.com.br/produto/volantes-de-inercia-19>
Acesso em 27/05/2016 as 18:00 h.

SEVERINO, A. J. Metodologia do trabalho científico. São Paulo: Cortez, 2007.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. Mechanical Engineering Design. 7. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2004.

SILVA, I. F. Introdução ao SolidWorks - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, 2009.

SILVA, J. J. M., Análise de Textura e Propriedades Magnéticas em Aços Maraging 300 e 350 em Várias Condições de Tratamento. Dissertação de Mestrado – DEMM – UFC. Fortaleza. 2005.

SOLIDWORKSBRASIL - Disponível em <http://istsistemas.com.br/solidworks-simulation-professional>
Acesso em 07/10/2015.

STEMPNIAK, R. A., A Ciência e a Tecnologia do Vácuo - Resumo histórico e algumas aplicações. FACAP/CDT – São José dos Campos, SP. 2002

STEPHAN, R. M., Andrade Jr, R., Sotelo, G. G., Third Generation of Flywheels: a Promising Substitute to Batteries, Revista Eletrônica de Potência, v. 13, pp.171-176, 2008.

STEPHAN, R. M., et al. Mancais Magnéticos – Mecatrônica sem Atrito. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2013.

TEST DEVICES INC – Disponível em <http://testedevice.com>
Acesso em 25/10/2017

TRIVIÑOS, A. N. S. Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação. São Paulo: Atlas, 1987.

VANDERPLAATS, G. N., Numerical Methods for Shape Optimization: Assessment of the State of the Art. Em: New Directions in Optimum Structural Design. Editado por: E. Atrek, R.H. Gallagher, K.M. Ragsdell, e O.C. Zienkiewicz; John Wiley & Sons Ltd, 1984.

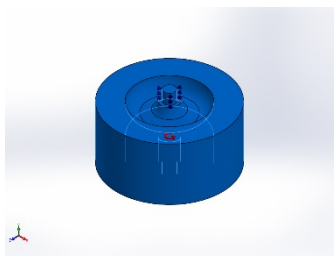
VILLARES. Ligas especiais – Aços Maraging, Disponível em <http://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Ligas-Especiais/Acos-Maraging> - Acesso em 20/11/2015.

WATSON, J. The Control of High-Speed Machines. Computing and Control Engineering Journal, Burgess Hill, Dez. 1999.

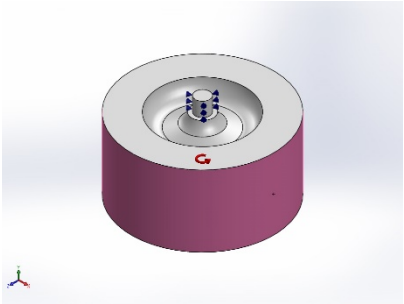
WIEBECK H., Harada J. Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações. São Paulo: Ed Artliber, 2005.

APÊNDICE A – SIMULAÇÃO MODELO 01 EM AÇO MARAGING

Informações do Modelo

Modelo 01	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 19,6641 kg Volume: 0,00243367 m³ Densidade: 8080 kg/m³ Peso: 192,708 N

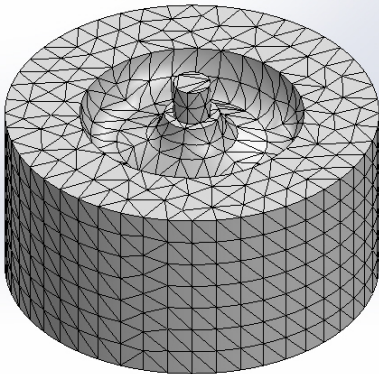
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Carregar imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 53.200 rpm Aceleração angular: 0

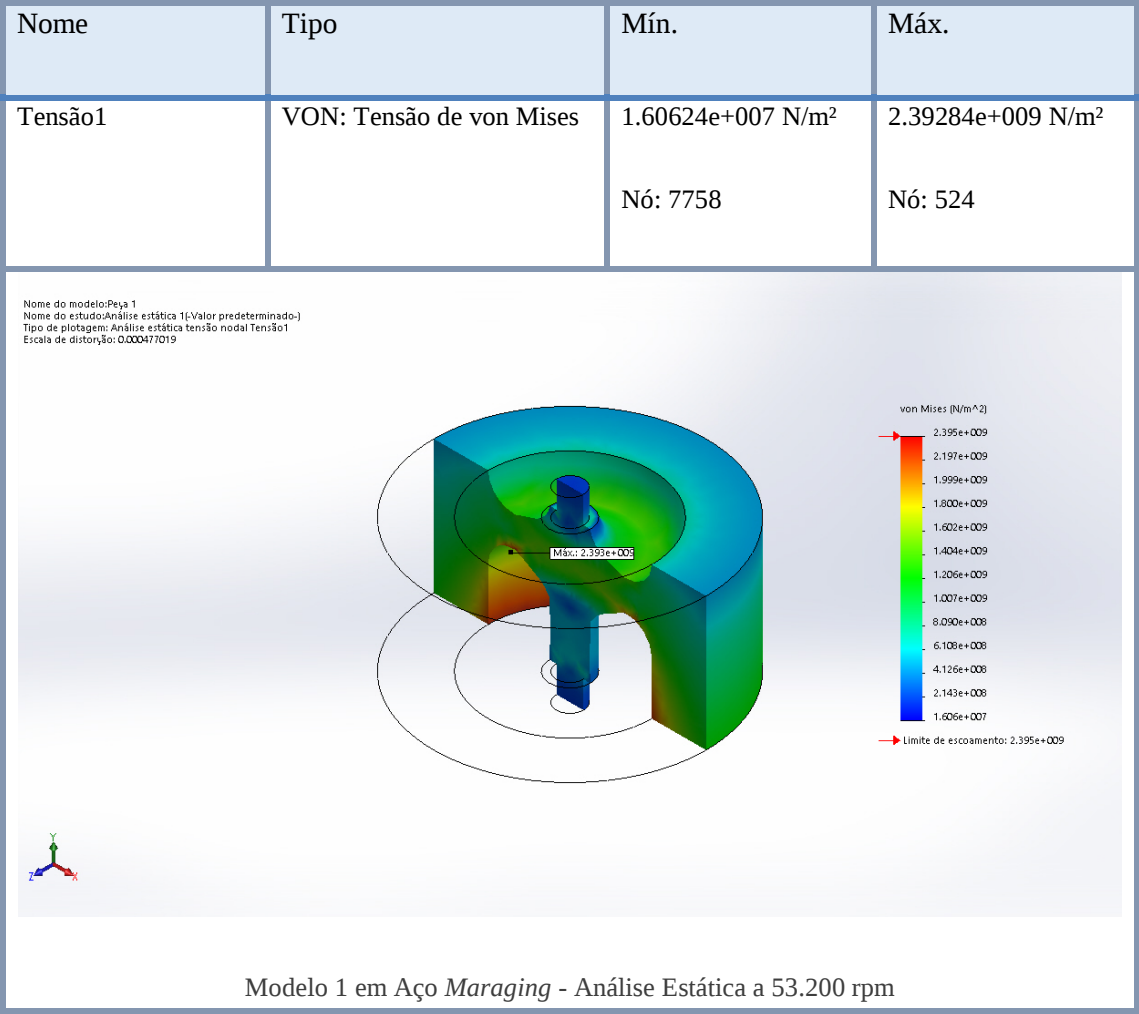
Informações de Malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	11712
Total de elementos	7376
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.4537 mm
Tolerância	0.672684 mm
Qualidade da malha	Alta

Nome do modelo:Peça 1
Nome do estudo:Análise estática 1(-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida

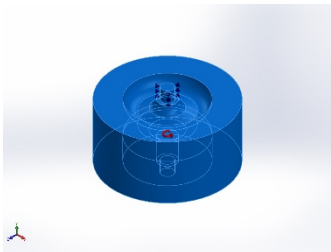


Resultados do Estudo

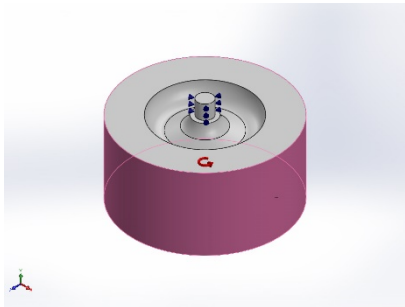


APÊNDICE B – SIMULAÇÃO MODELO 01 EM FIBRA DE CARBONO

Informações do Modelo

Modelo 01	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 4,55097 kg Volume: 0,00243367 m³ Densidade: 1870 kg/m³ Peso: 44,5995 N

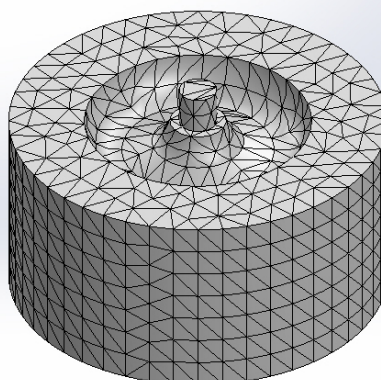
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 134.450 rpm Aceleração angular: 0

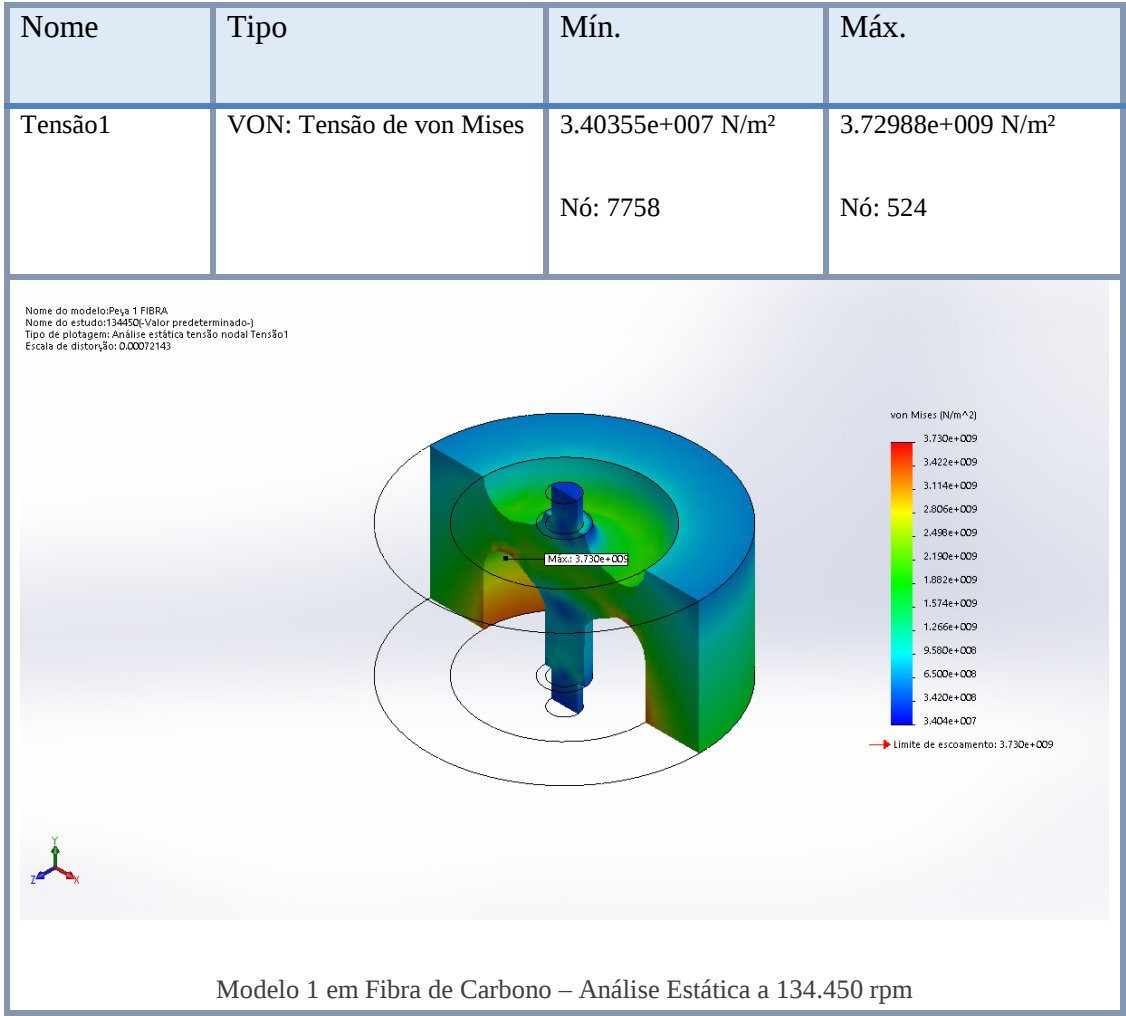
Informações de Malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	11712
Total de elementos	7376
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.4537 mm
Tolerância	0.672684 mm
Qualidade da malha	Alta

Nome do modelo: Peça 1 FIBRA
Nome do estudo: 134450(-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida

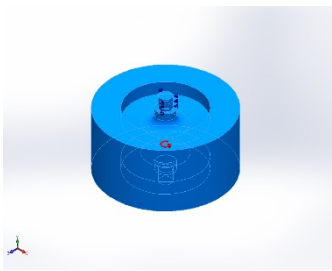


Resultados do Estudo

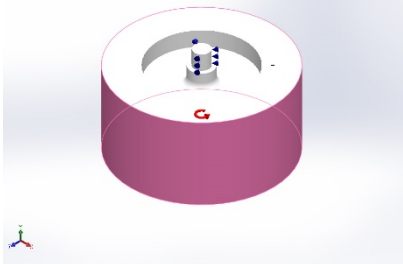


APÊNDICE C – SIMULAÇÃO MODELO 02 EM AÇO MARAGING

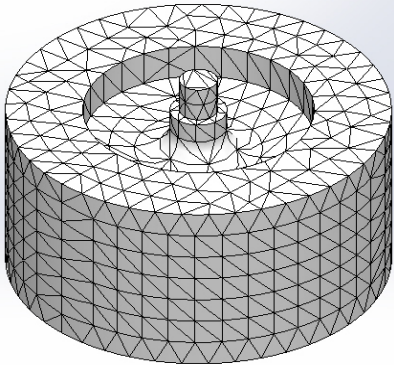
Informações do Modelo

Modelo 02	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 21,5279 kg Volume: 0,00266435 m³ Densidade: 8080 kg/m³ Peso: 210.974 N

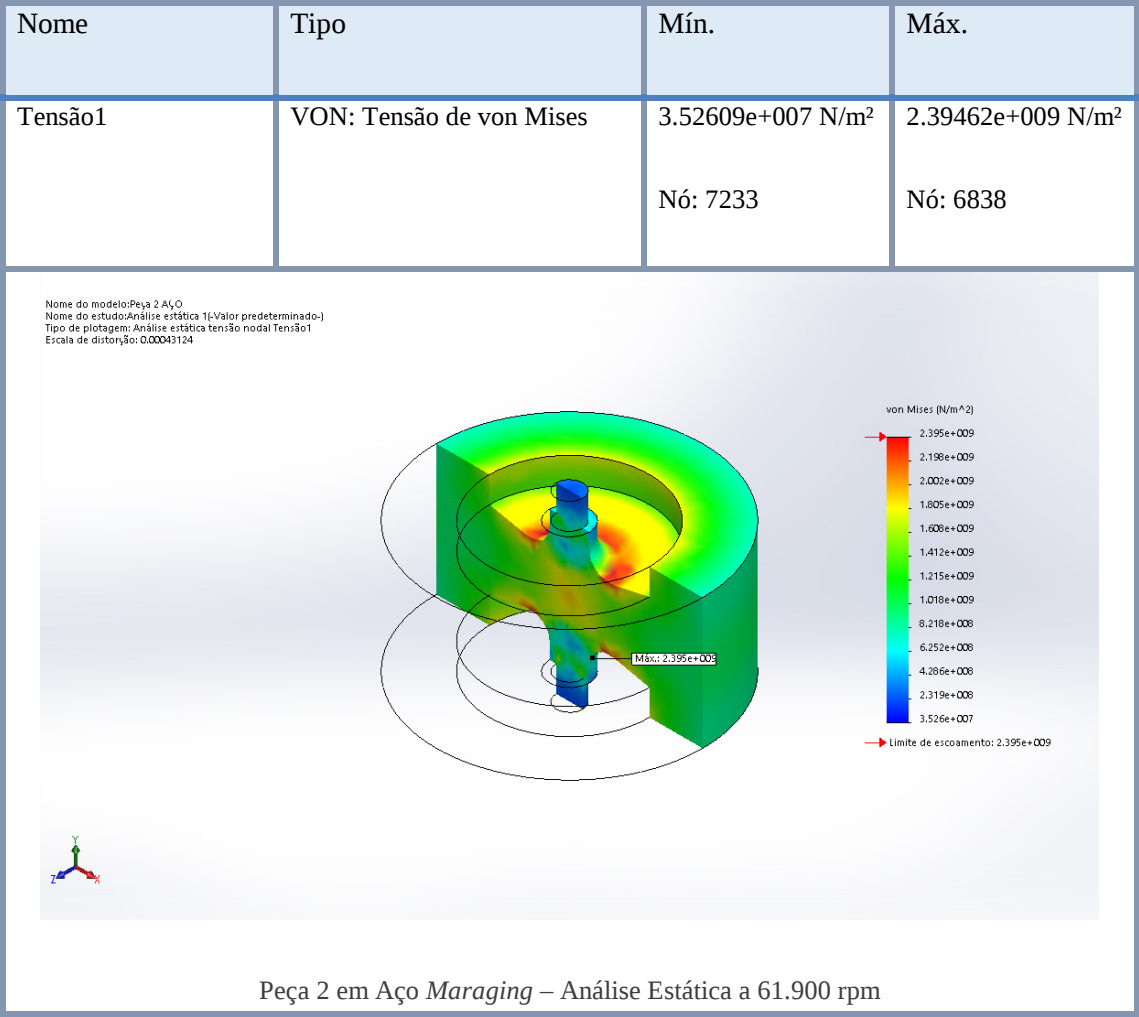
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 61.900 rpm Aceleração angular: 0

Informações de Malha

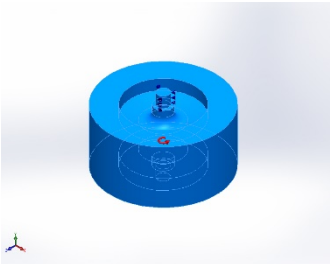
Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	9677
Total de elementos	6083
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	14.0558 mm
Tolerância	0.70279 mm
Qualidade da malha	Alta
Nome do modelo: Peça 2 A₄O Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-) Tipo de malha: Malha sólida  	

Resultados do Estudo

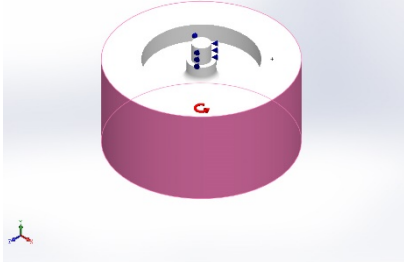


APÊNDICE D – SIMULAÇÃO PEÇA 02 EM FIBRA DE CARBONO

Informações do Modelo

Peça 02	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 4,98233 kg Volume: 0,00266435 m³ Densidade: 1870 kg/m³ Peso: 48,8268 N

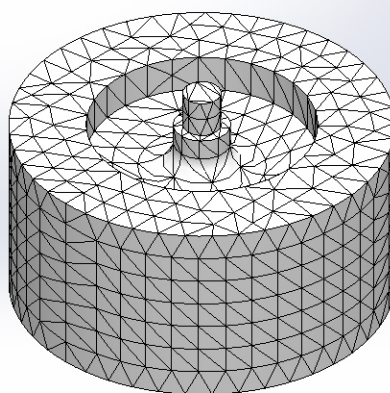
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 158.500 rpm Aceleração angular: 0

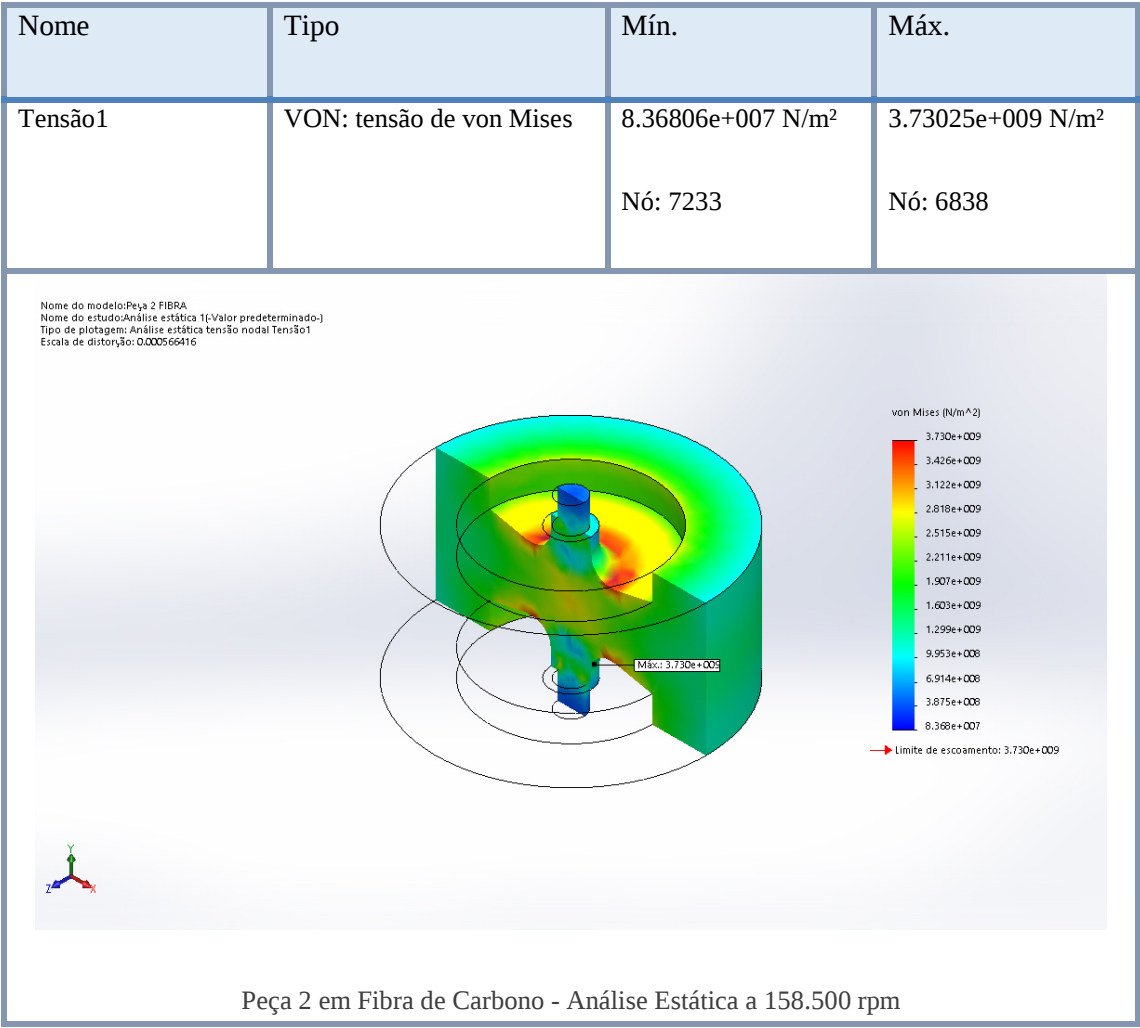
Informações de Malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	9677
Total de elementos	6083
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	14.0558 mm
Tolerância	0.70279 mm
Qualidade da malha	Alta

Nome do modelo: Peça 2 FIBRA
Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida

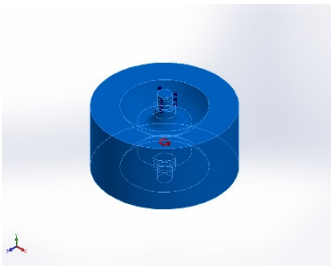


Resultados do Estudo



APÊNDICE E – SIMULAÇÃO MODELO 03 EM AÇO *MARAGING*

Informações do Modelo

Peça 03	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 22,4171 kg Volume: 0,00277439 m³ Densidade: 8080 kg/m³ Peso: 219,687 N

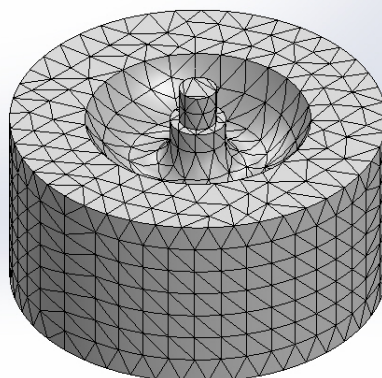
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 57.370 rpm Aceleração angular: 0

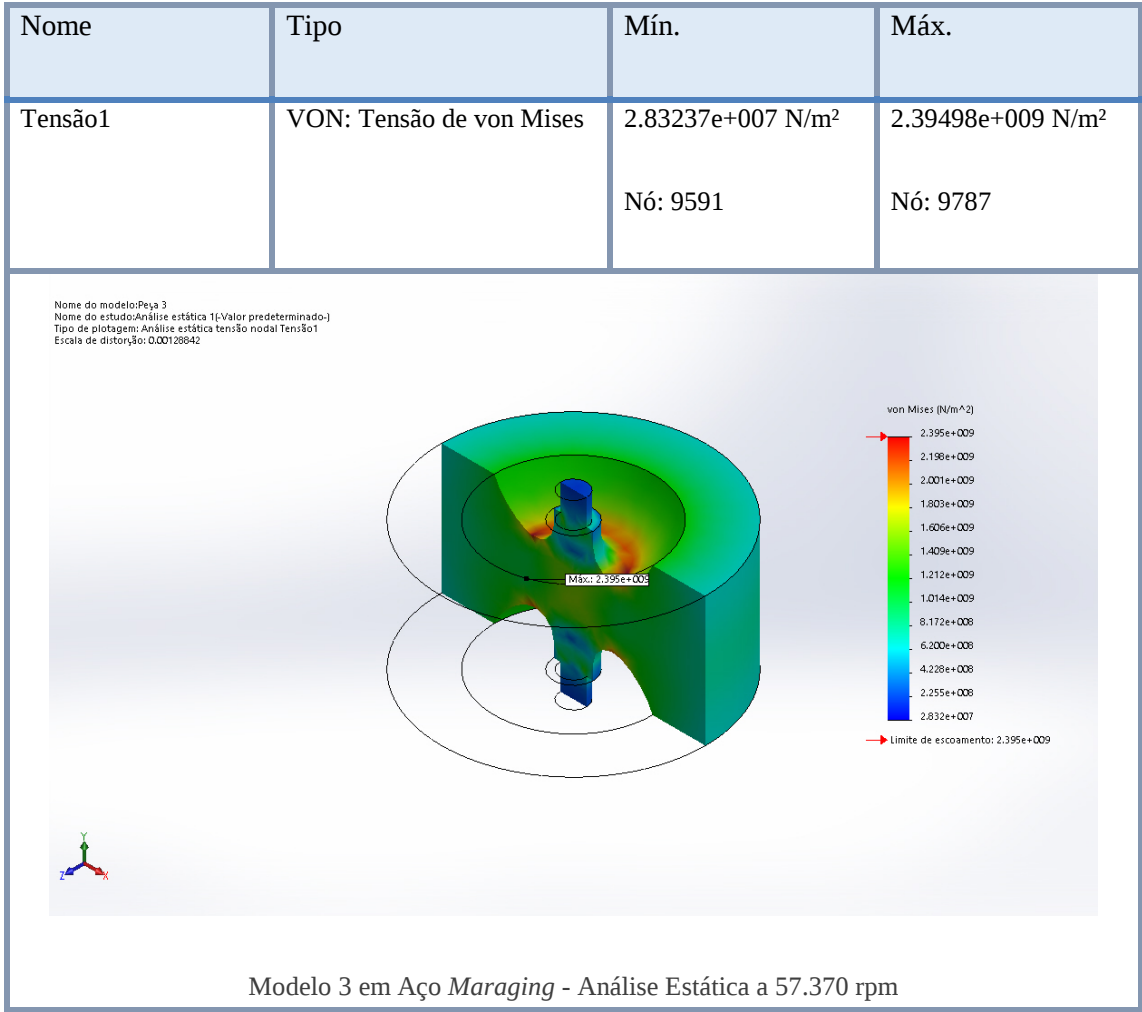
Informações de Malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	10184
Total de elementos	6496
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	14.0543 mm
Tolerância	0.702713 mm
Qualidade da malha	Alta

Nome do modelo:Peça 3
Nome do estudo:Análise estática 1(-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida

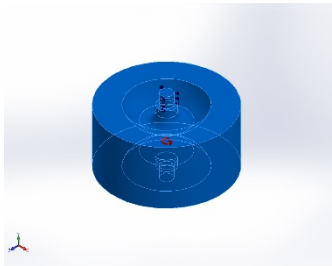


Resultados do Estudo

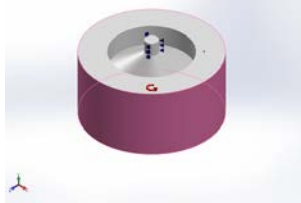


APÊNDICE F – SIMULAÇÃO MODELO 03 EM FIBRA DE CARBONO

Informações do Modelo

Modelo 03	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 5,18811 kg Volume: 0,00277439 m³ Densidade: 1870 kg/m³ Peso: 50,8435 N

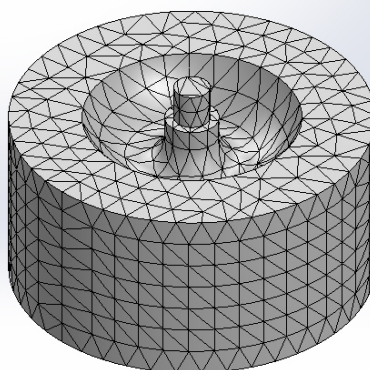
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 145.980 rpm Aceleração angular: 0

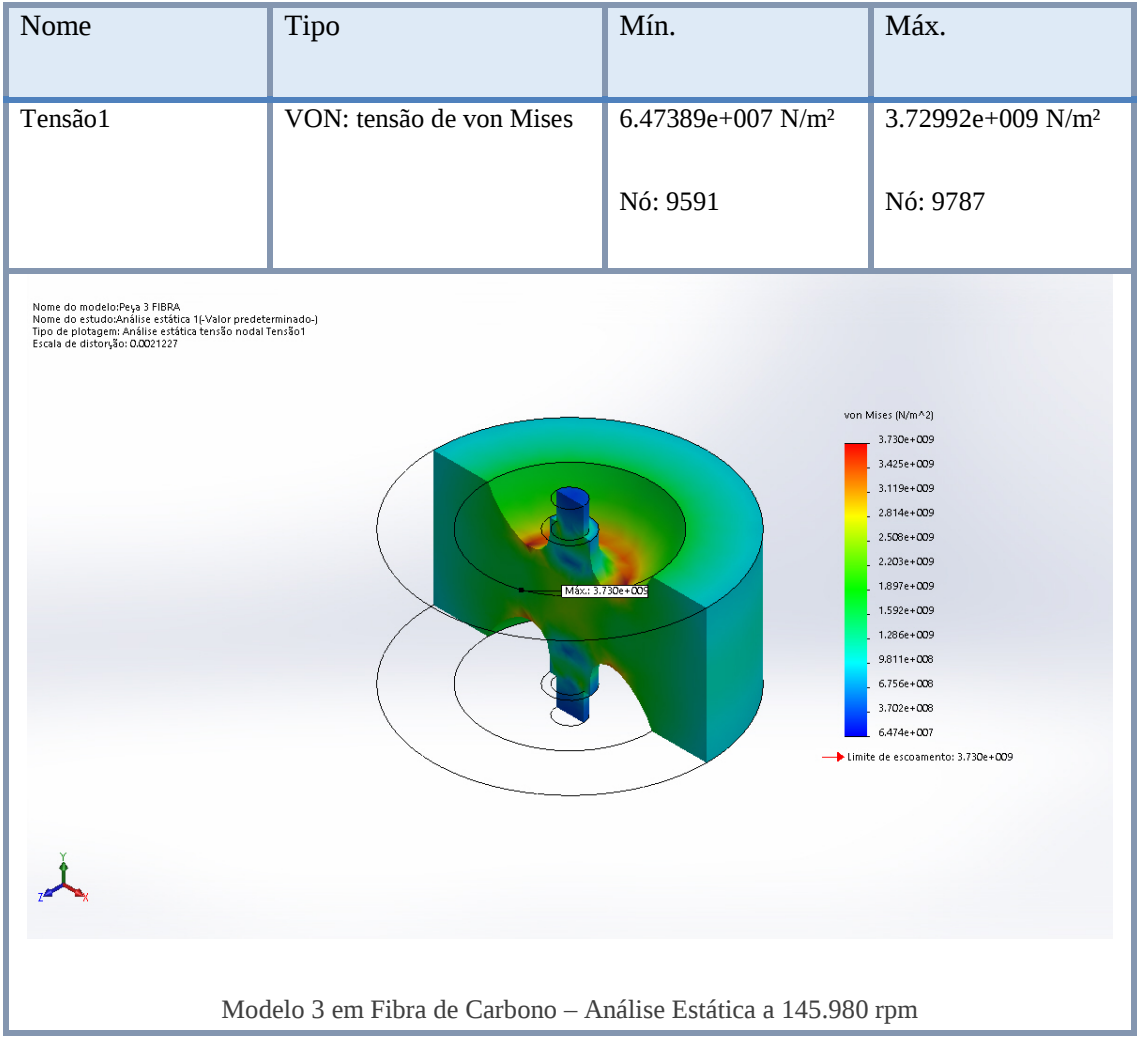
Informações de Malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	10184
Total de elementos	6496
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	14.0543 mm
Tolerância	0.702713 mm
Qualidade da malha	Alta

Nome do modelo: Peça 3 FIBRA
Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida

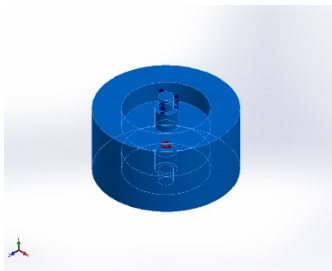


Resultados do Estudo

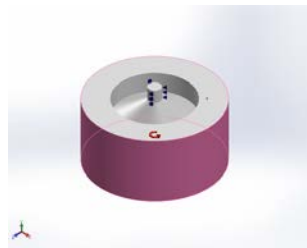


APÊNDICE G – SIMULAÇÃO MODELO 04 EM AÇO MARAGING

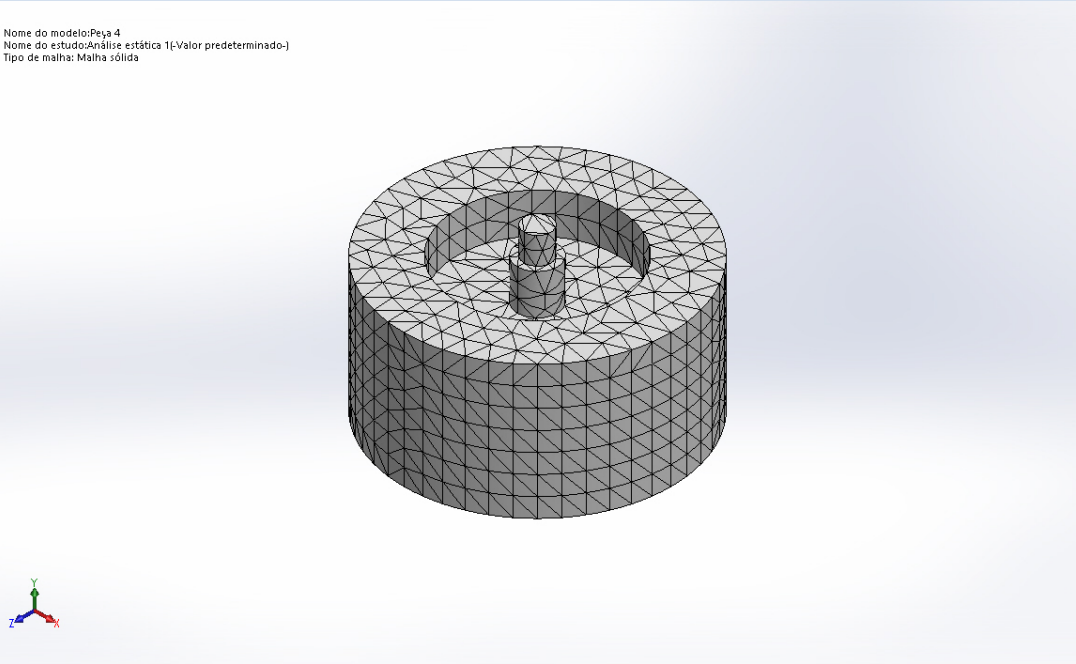
Informações do Modelo

Modelo 04	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 20,3453 kg Volume: 0,00251799 m³ Densidade: 8080 kg/m³ Peso: 199.384 N

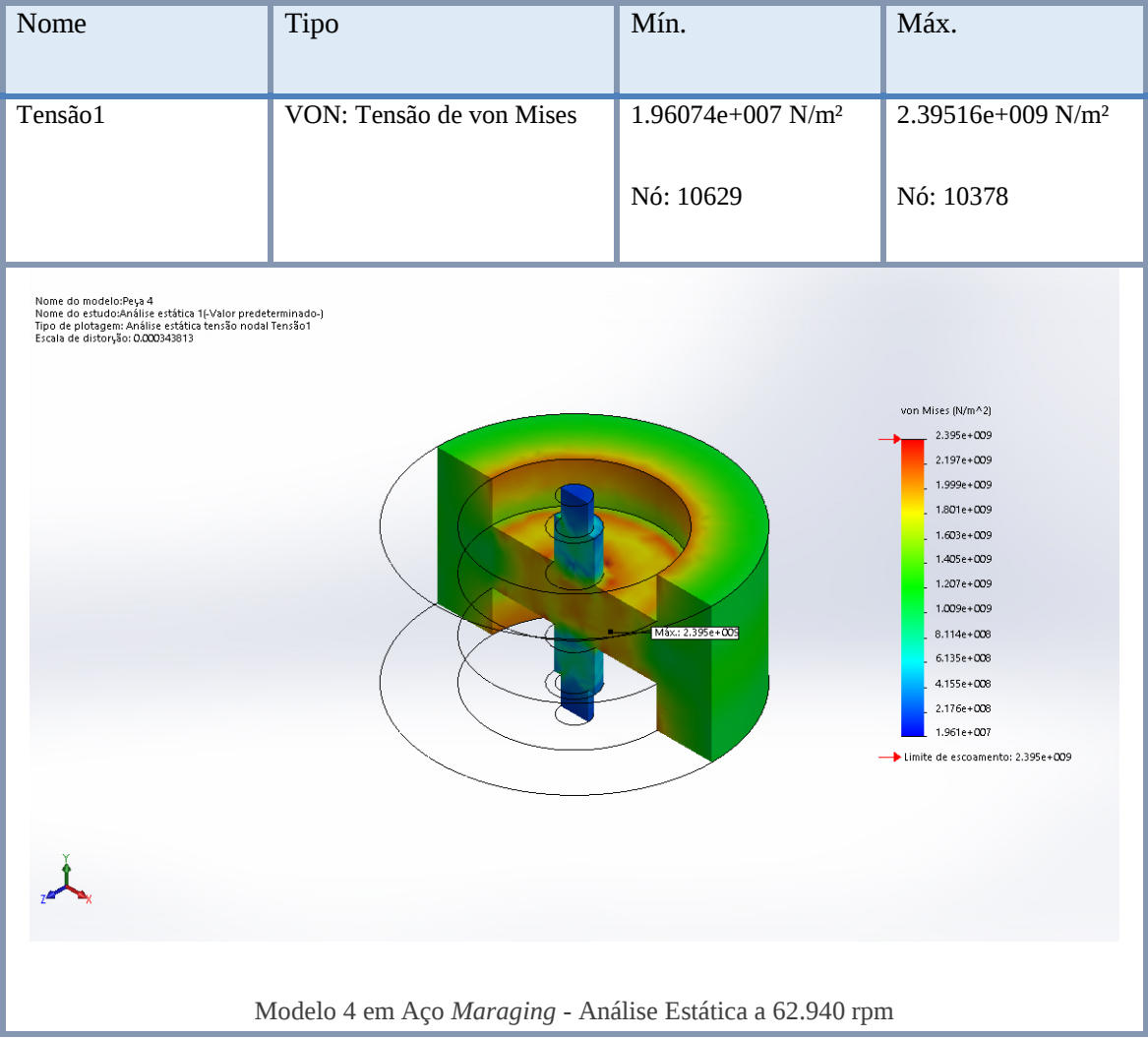
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 62940 rpm Aceleração angular: 0

Informações de Malha

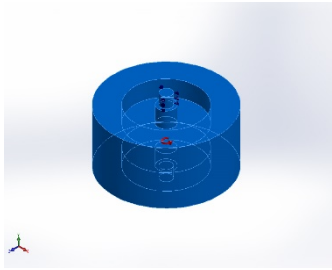
Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	11372
Total de elementos	7150
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.6073 mm
Tolerância	0.680364 mm
Qualidade da malha	Alta
Nome do modelo:Peça 4 Nome do estudo:Análise estática 1(-Valor predeterminado-) Tipo de malha: Malha sólida 	

Resultados do estudo

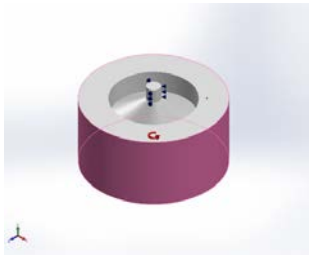


APÊNDICE H – SIMULAÇÃO MODELO 04 EM FIBRA DE CARBONO

Informações do Modelo

Modelo 04	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa:4.70863 kg Volume:0.00251799 m³ Densidade:1870 kg/m³ Peso:46.1446 N

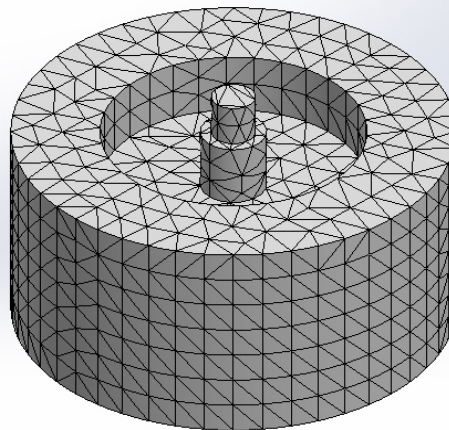
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 160.810 rpm Aceleração angular: 0

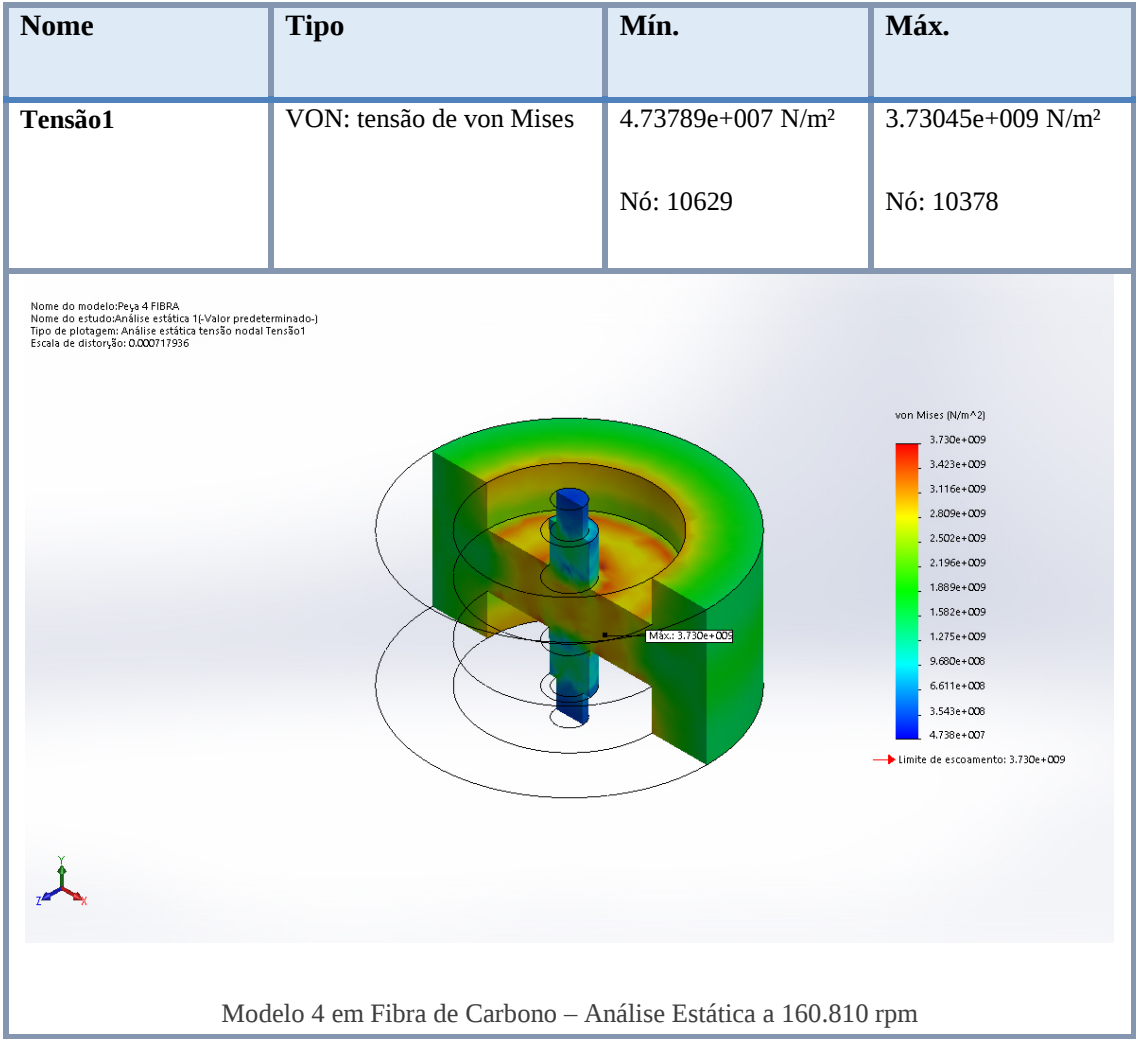
Informações de Malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	11372
Total de elementos	7150
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.6073 mm
Tolerância	0.680364 mm
Qualidade da malha	Alta

Nome do modelo: Peça 4 FIBRA
Nome do estudo: Análise estática 1 (-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida

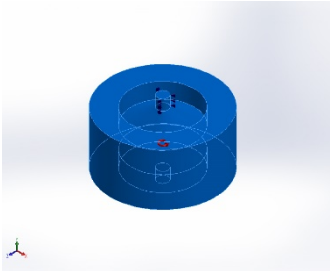


Resultados do Estudo

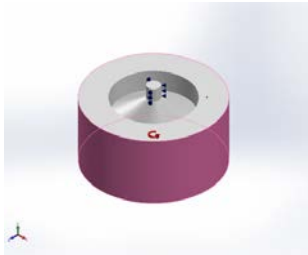


APÊNDICE I – SIMULAÇÃO MODELO 05 EM AÇO *MARAGING*

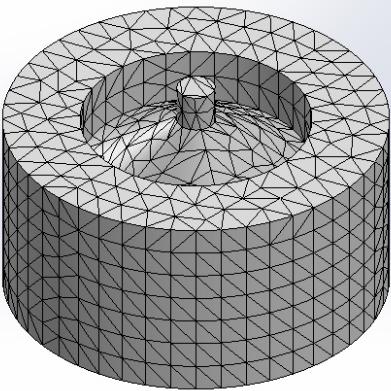
Informações do Modelo

Modelo 05	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 22,1857 kg Volume: 0,00274575 m³ Densidade: 8080 kg/m³ Peso: 217.42 N

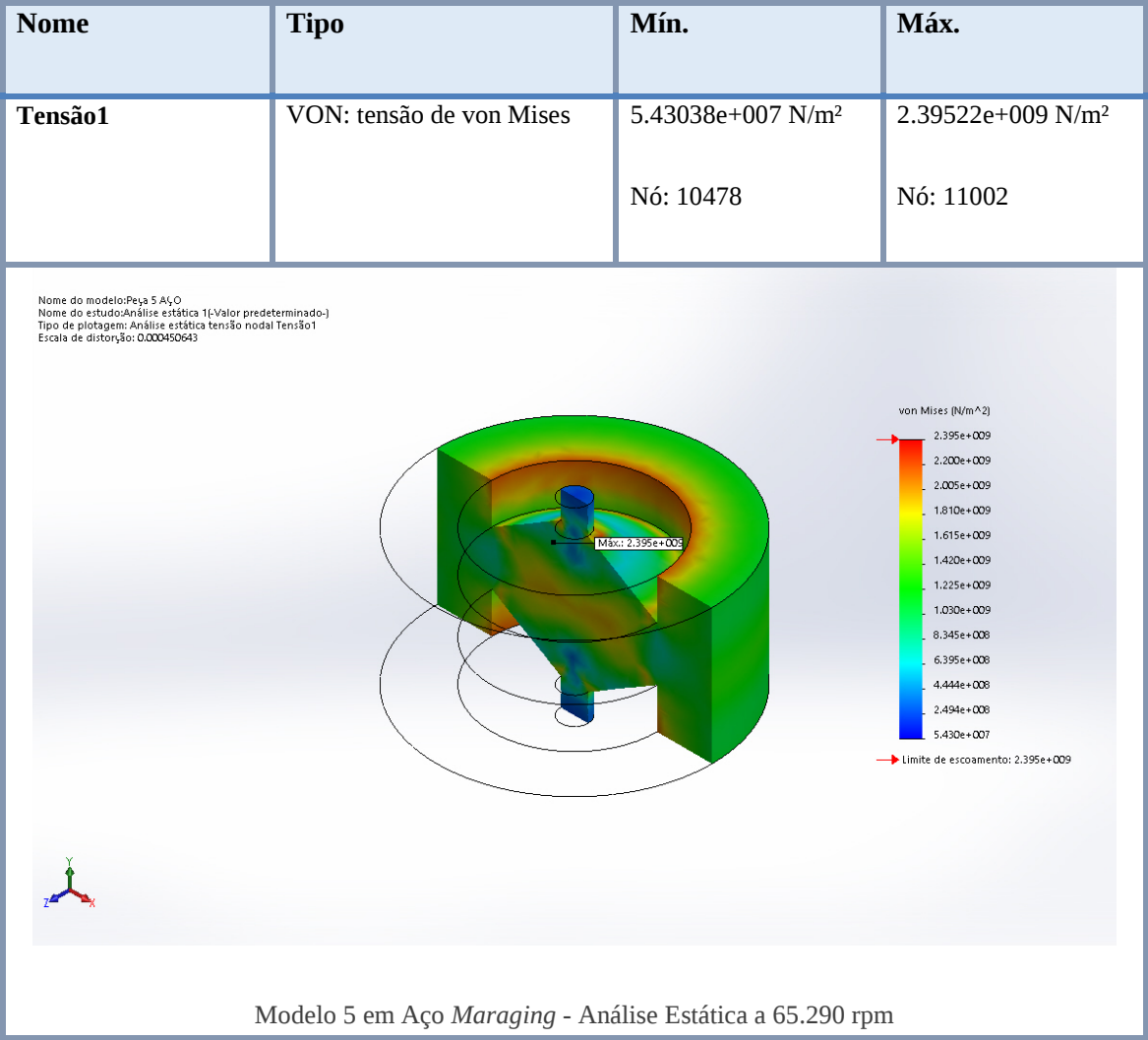
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 65.290 rpm Aceleração angular: 0

Informações de Malha

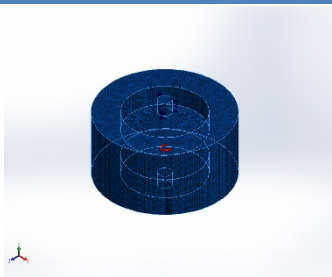
Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	11559
Total de elementos	7347
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.6073 mm
Tolerância	0.680364 mm
Qualidade da malha	Alta
Nome do modelo: Peça 5 Aço Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-) Tipo de malha: Malha sólida 	

Resultados do Estudo

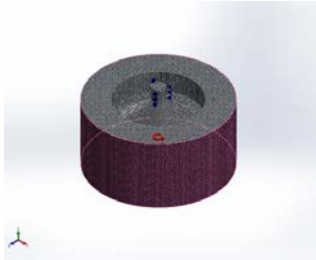


APÊNDICE J – SIMULAÇÃO MODELO 05 EM FIBRA DE CARBONO

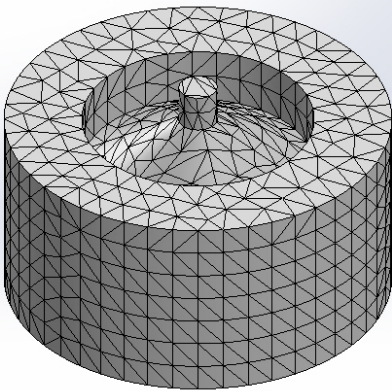
Informações do Modelo

Modelo 05	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 5,13456 kg Volume: 0,00274575 m³ Densidade: 1870 kg/m³ Peso: 50.3187 N

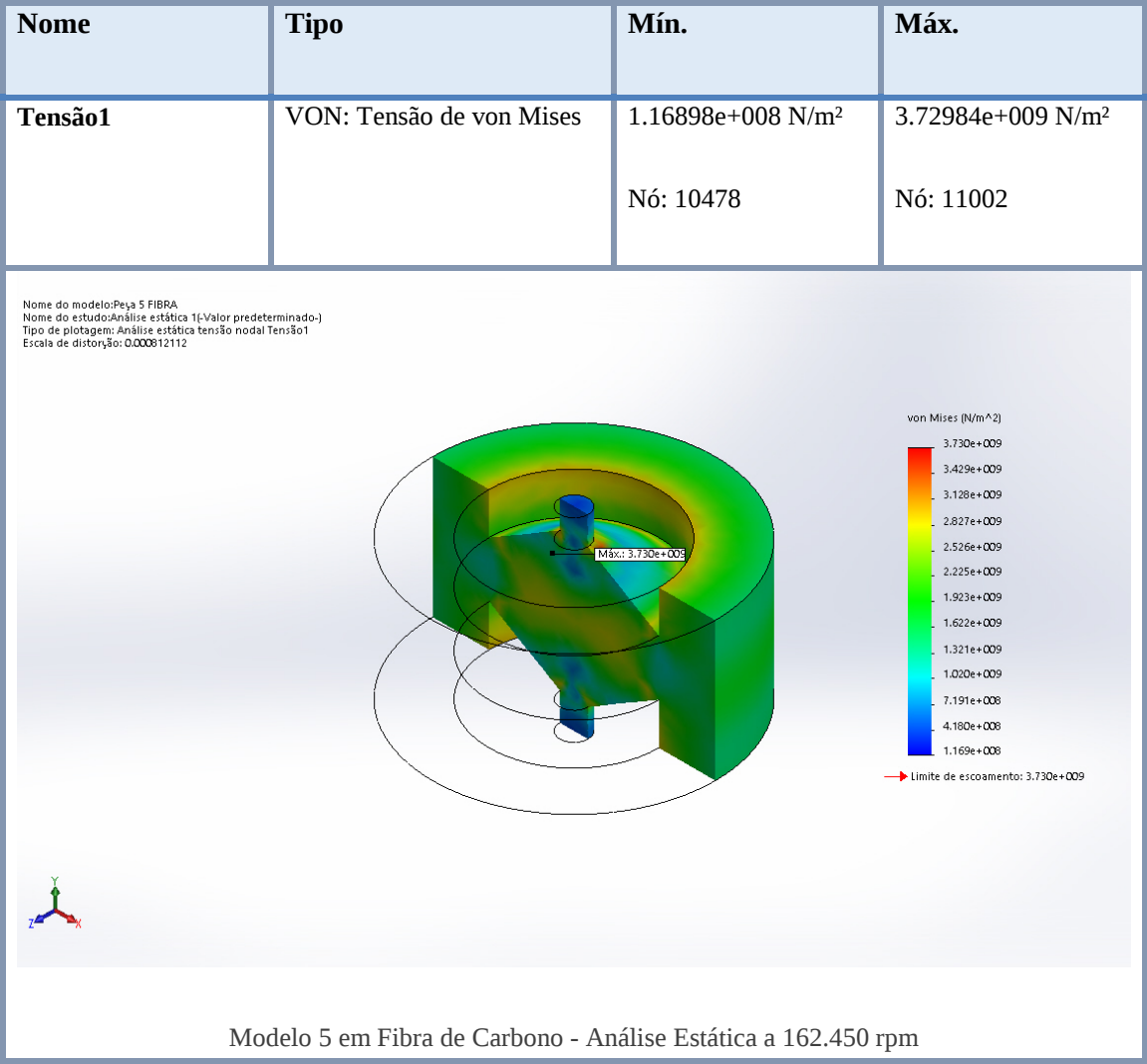
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga -1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 162.450 rpm Aceleração angular: 0

Informações de Malha

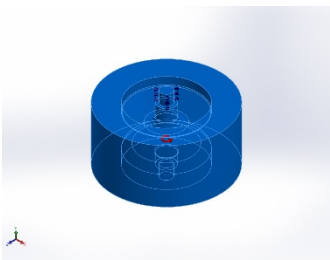
Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	11559
Total de elementos	7347
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.6073 mm
Tolerância	0.680364 mm
Qualidade da malha	Alta
Nome do modelo:Peça 5 FIBRA Nome do estudo:Análise estática 1(Valor predeterminado-) Tipo de malha: Malha sólida 	

Resultados do Estudo



APÊNDICE K – SIMULAÇÃO MODELO 06 EM AÇO MARAGING

Informações do Modelo

Modelo 06	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 20,8222 kg Volume: 0,002577 m³ Densidade: 8080 kg/m³ Peso: 204,058 N

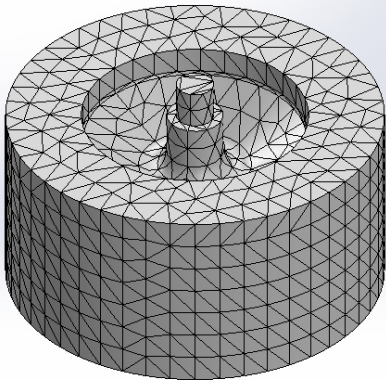
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 47.720 rpm Aceleração angular: 0

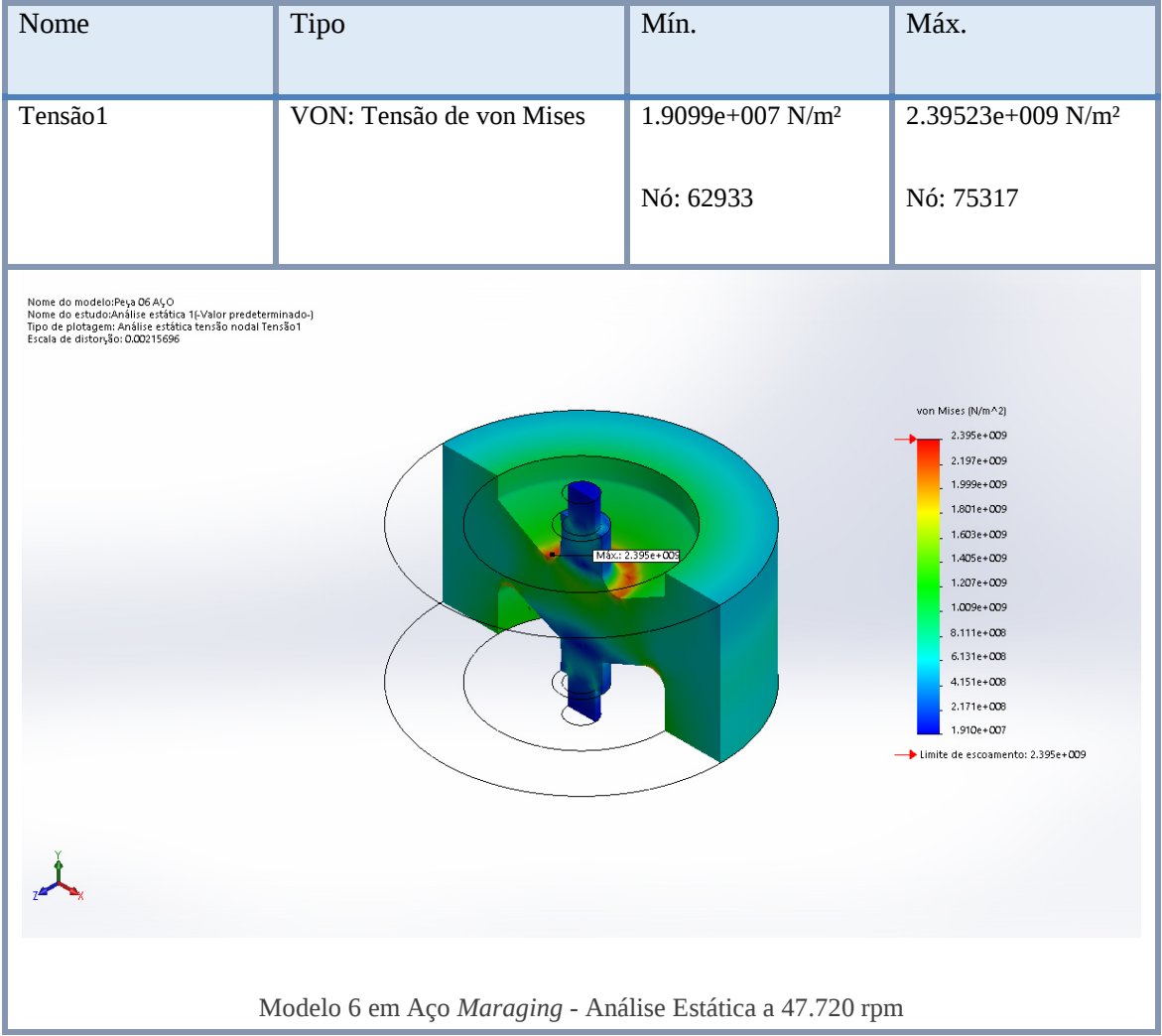
Informações de Malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	14518
Total de elementos	9462
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.7128 mm
Tolerância	0.685638 mm
Qualidade da malha	Alta

Nome do modelo:Peça 06 A₄ O
Nome do estudo:Análise estática 2(-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida

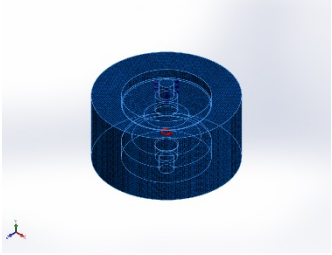


Resultados do Estudo

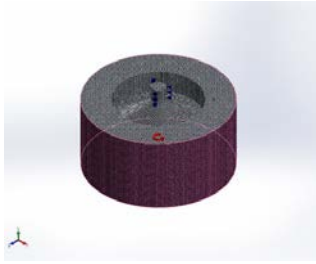


APÊNDICE L – SIMULAÇÃO MODELO 06 EM FIBRA DE CARBONO

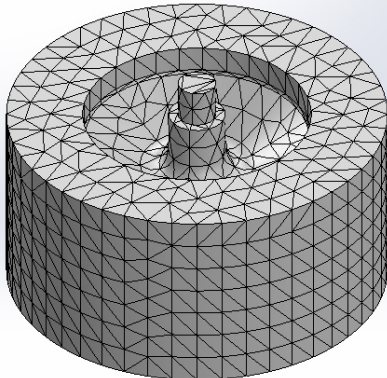
Informações do Modelo

Modelo 06	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa:4.819 kg Volume:0.002577 m³ Densidade:1870 kg/m³ Peso:47.2262 N

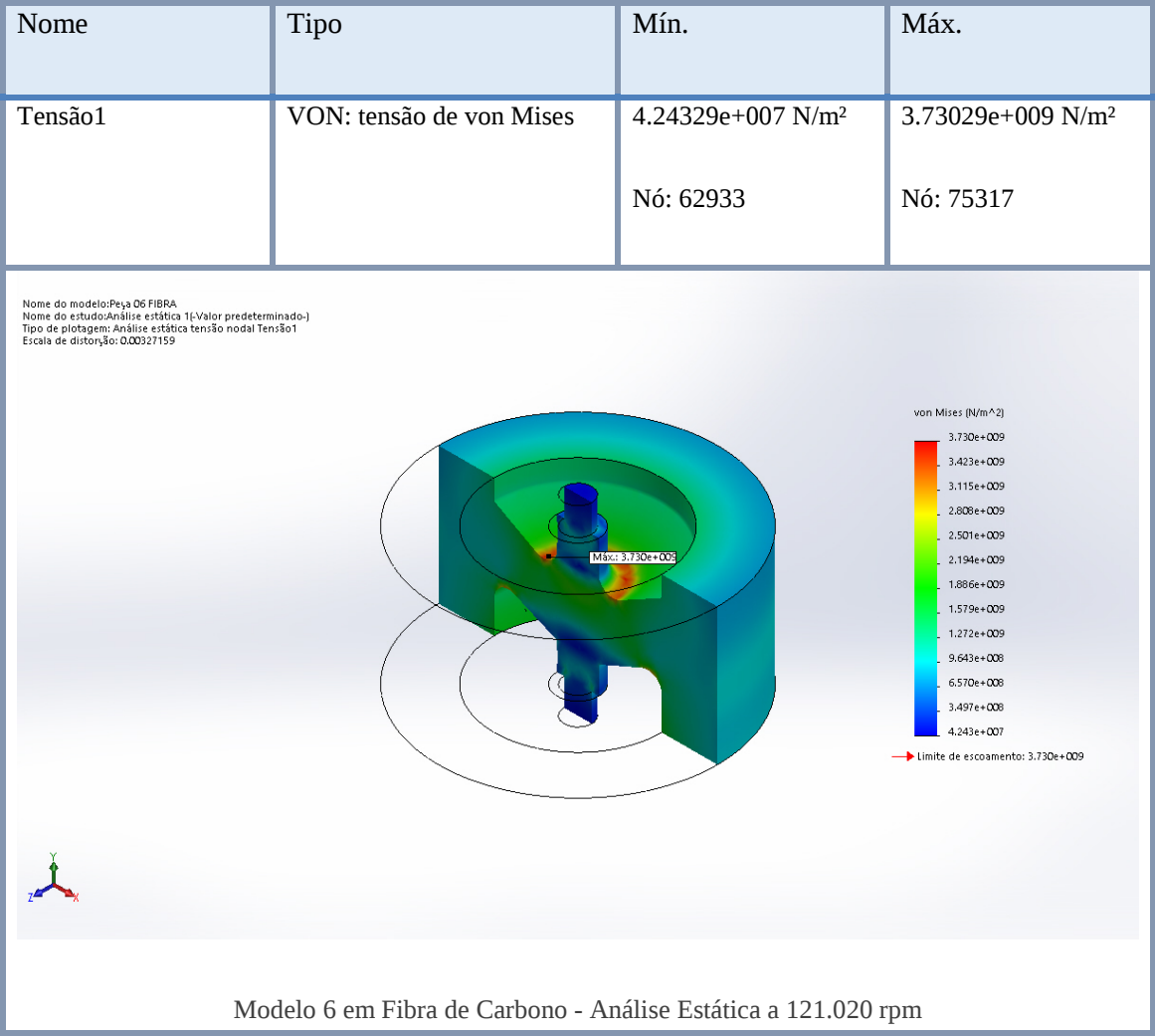
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 121.020 rpm Aceleração angular: 0

Informações de Malha

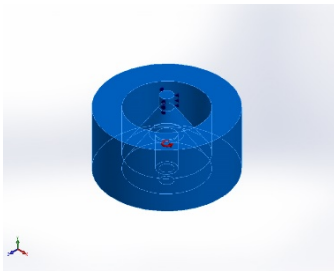
Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	14518
Total de elementos	9462
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.7128 mm
Tolerância	0.685638 mm
Qualidade da malha	Alta
Nome do modelo: Peça 06 A\y\O Nome do estudo: Análise estática 2(-Valor predeterminado-) Tipo de malha: Malha sólida 	

Resultados do Estudo

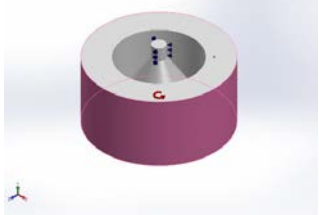


APÊNDICE M – SIMULAÇÃO MODELO 07 EM AÇO MARAGING

Informações do Modelo

Modelo 07	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 19,0078 kg Volume: 0,00235245 m³ Densidade: 8080 kg/m³ Peso: 186,276 N

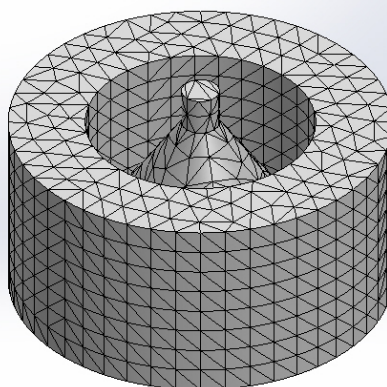
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 50.890 rpm Aceleração angular: 0

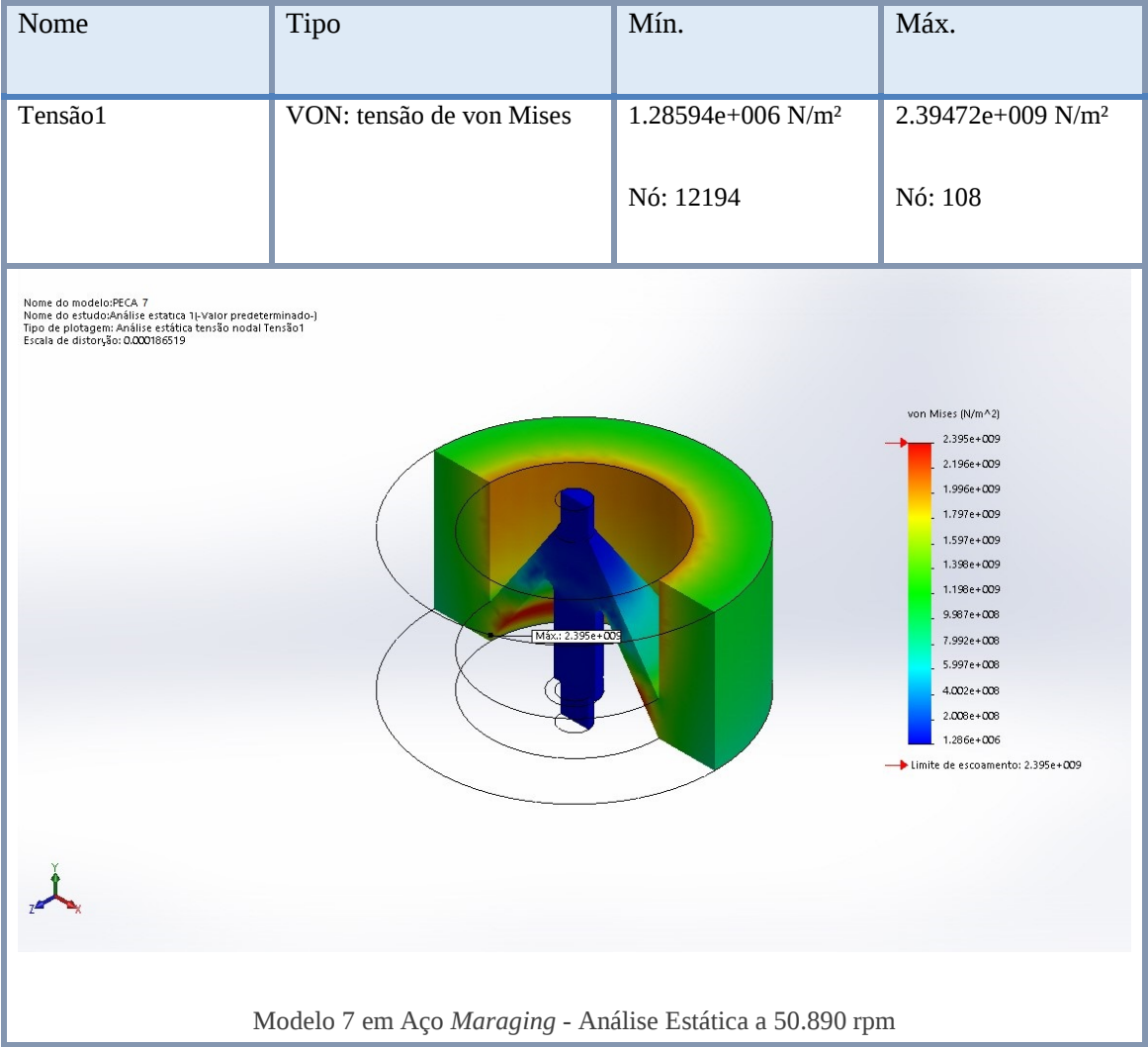
Informações de Malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	12651
Total de elementos	7772
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.3023 mm
Tolerância	0.665116 mm
Qualidade da malha	Alta

Nome do modelo: PEÇA FRAJUCA PERFIL ANTIGO
Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida

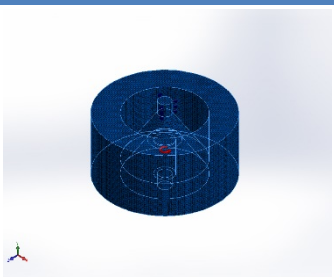


Resultados do Estudo



APÊNDICE N – SIMULAÇÃO MODELO 07 EM FIBRA DE CARBONO

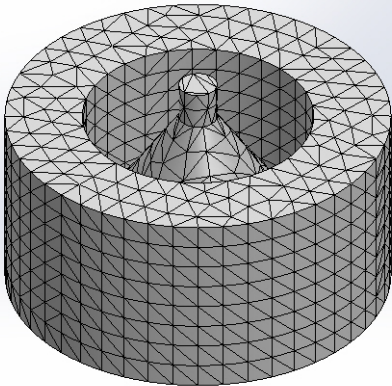
Informações do Modelo

Nome e referência do documento	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 4,39907 kg Volume: 0,00235245 m³ Densidade: 1870 kg/m³ Peso: 43,1109 N

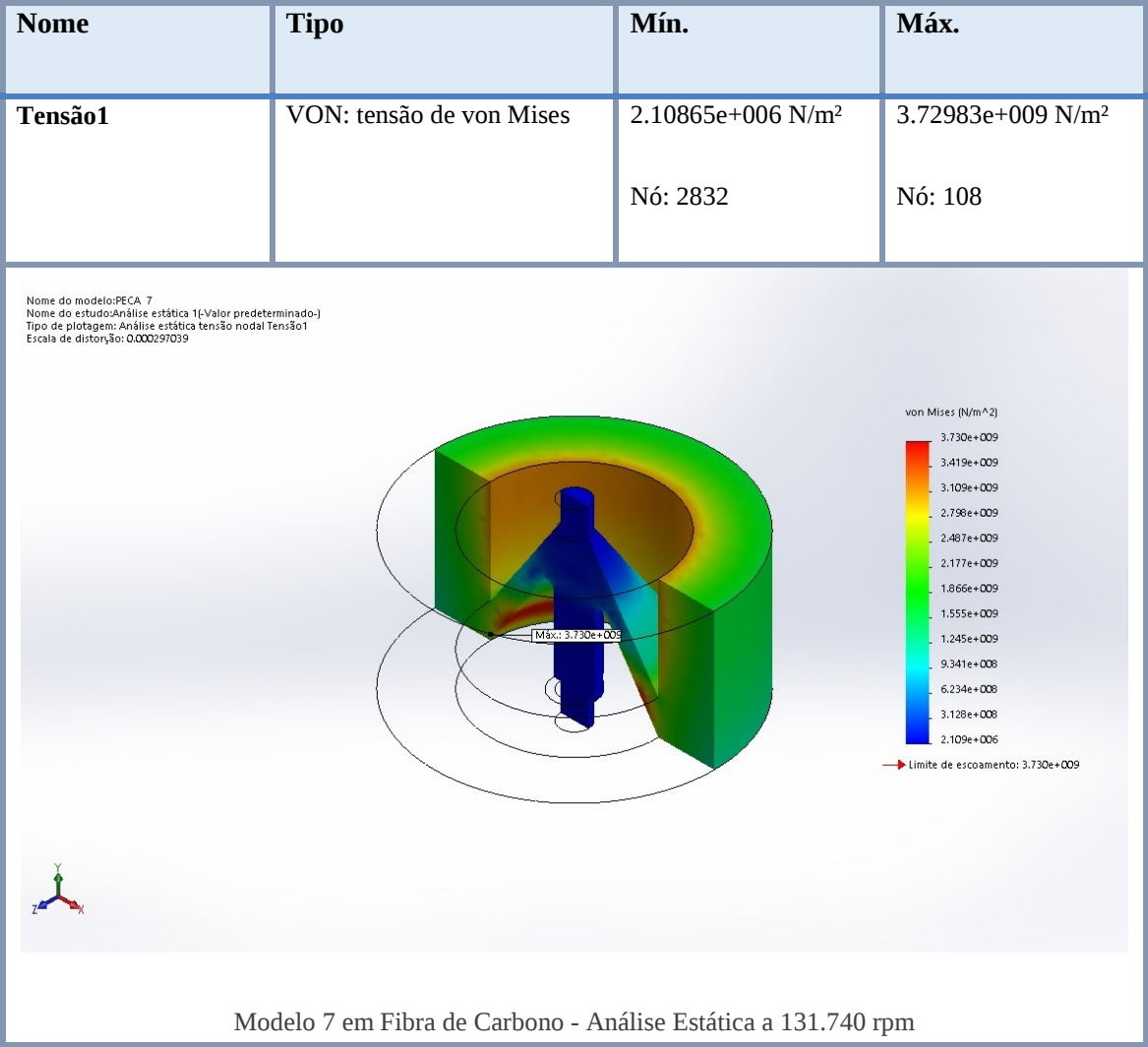
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 131.740 rpm Aceleração angular: 0

Informações de Malha

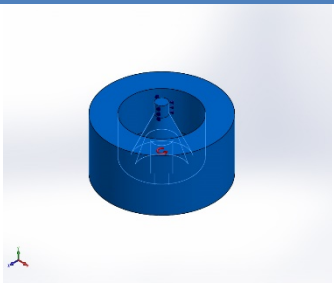
Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	12651
Total de elementos	7772
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.3023 mm
Tolerância	0.665116 mm
Qualidade da malha	Alta
Nome do modelo: PEÇA FRAJUCA PERFIL ANTIGO Nome do estudo: Análise estática 1[-Valor predeterminado-] Tipo de malha: Malha sólida 	

Resultados do Estudo

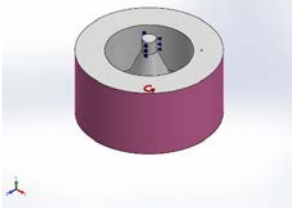


APÊNDICE O – SIMULAÇÃO MODELO 08 EM AÇO MARAGING

Informações do Modelo

Modelo 08	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 18,8291 kg Volume: 0,00233034 m³ Densidade: 8080 kg/m³ Peso: 184,526 N

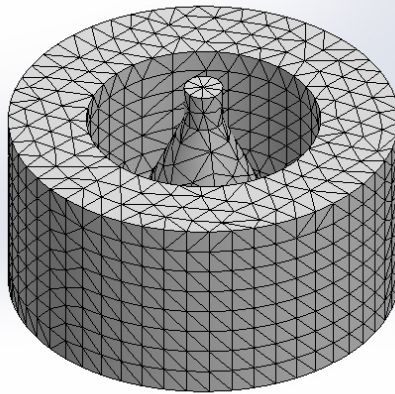
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Carregar imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 50.710 rpm Aceleração angular: 0

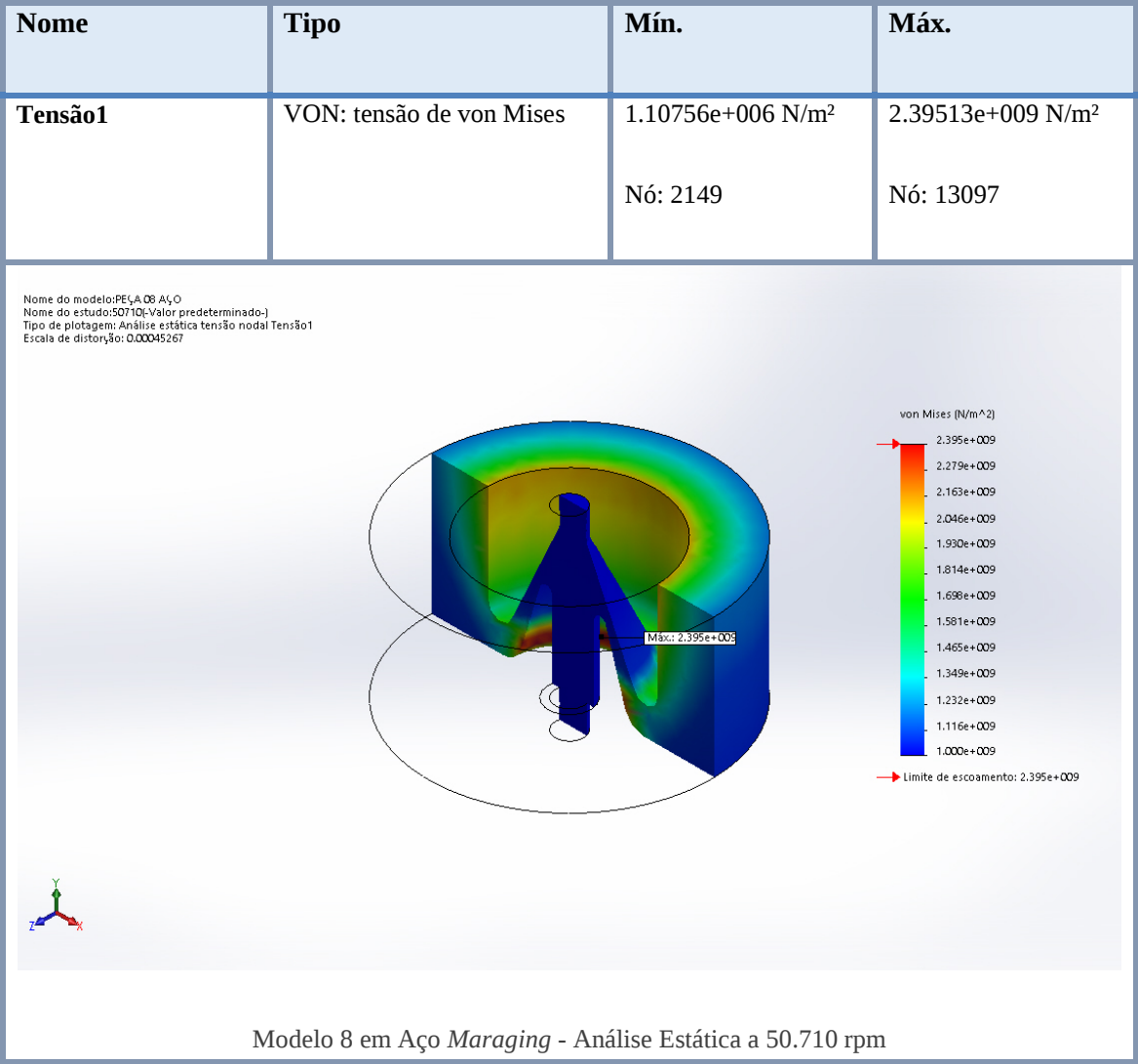
Informações de Malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	15979
Total de elementos	9996
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	12.068 mm
Tolerância	0.603399 mm
Qualidade da malha	Alta

Nome do modelo: PEÇ A08 Aço
Nome do estudo: 50710(-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida

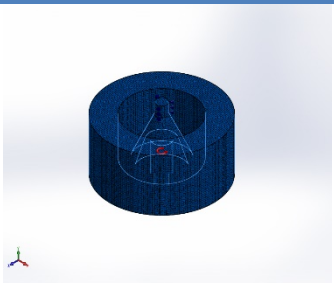


Resultados do Estudo

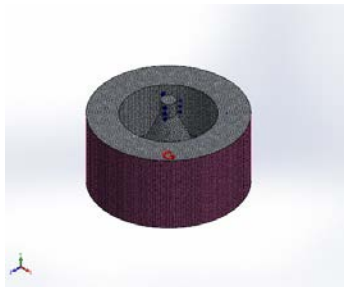


APÊNDICE P – SIMULAÇÃO MODELO 08 EM FIBRA DE CARBONO

Informações do Modelo

Modelo 08	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 4,35774 kg Volume: 0,00233034 m³ Densidade: 1870 kg/m³ Peso: 42,7058 N

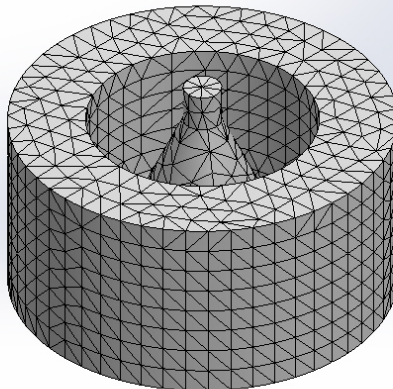
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Carregar imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 131.380 rpm Aceleração angular: 0

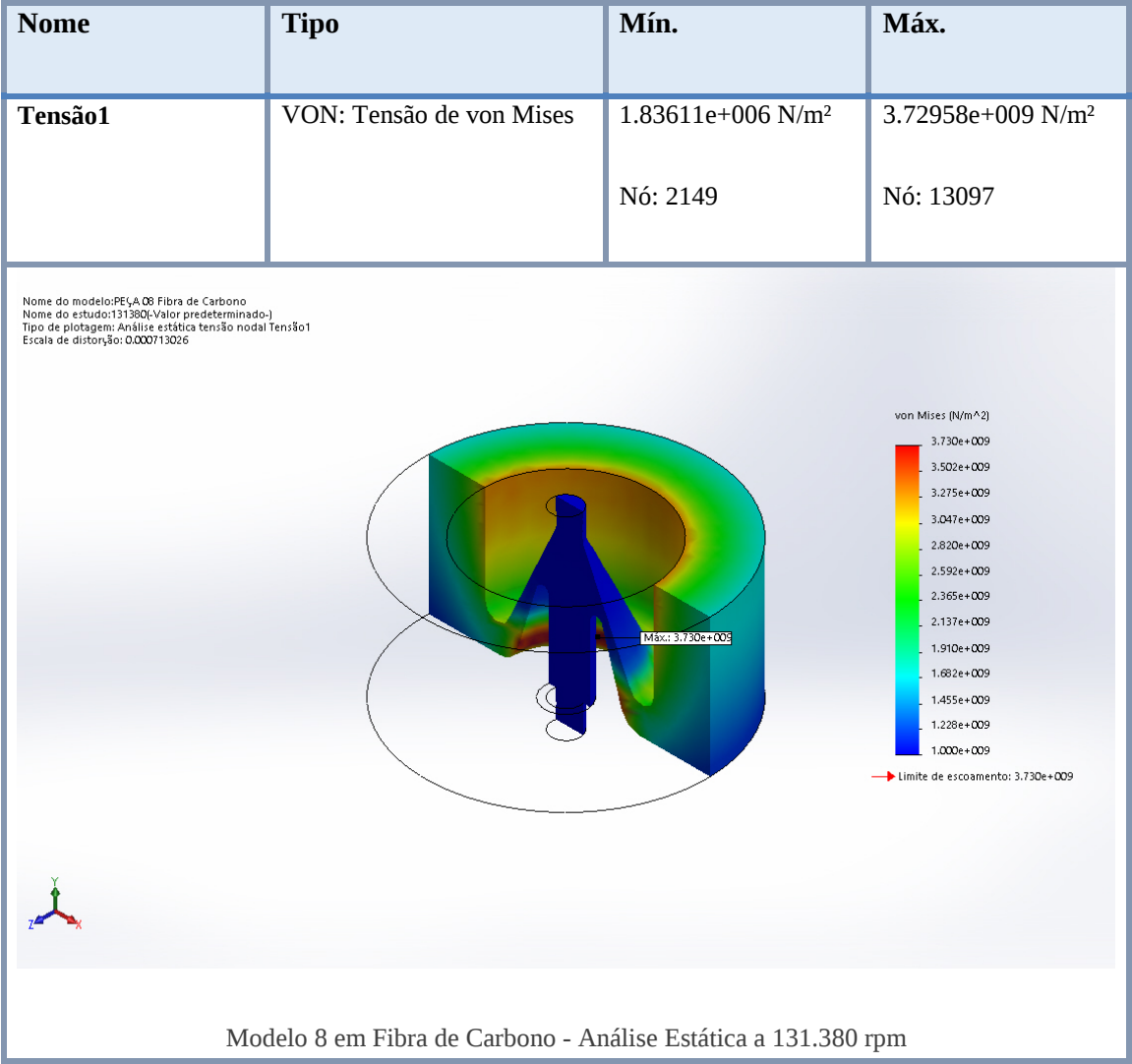
Informações de Malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	15979
Total de elementos	9996
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	12.068 mm
Tolerância	0.603399 mm
Qualidade da malha	Alta

Nome do modelo:PE(A08 Fibras de Carbono
Nome do estudo:131380(-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida

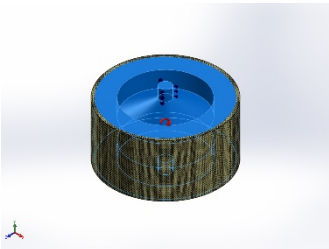
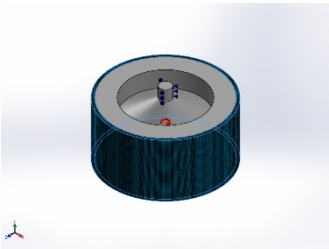


Resultados do Estudo

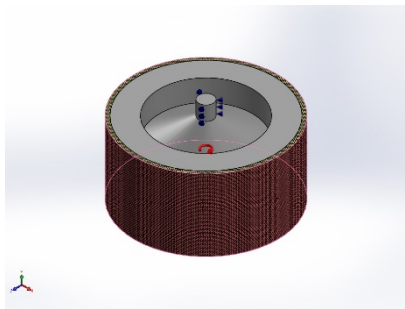


APÊNDICE Q – SIMULAÇÃO ROTOR COM REVESTIMENTO DE 5 MM

Informações do modelo

Rotor com Revestimento 5 mm	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 19,1015 kg Volume: 0,00236405 m³ Densidade: 8080 kg/m³ Peso: 187,195 N
	Corpo sólido	Massa: 0,572791 kg Volume: 0,000306305 m³ Densidade: 1870 kg/m³ Peso: 5,61335 N

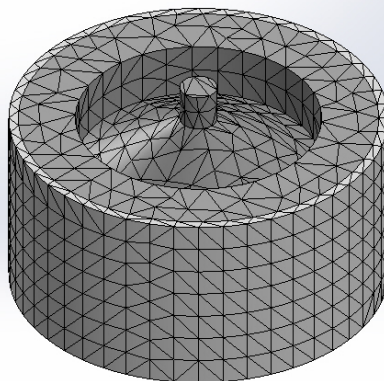
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 72.350 rpm Aceleração angular: 0

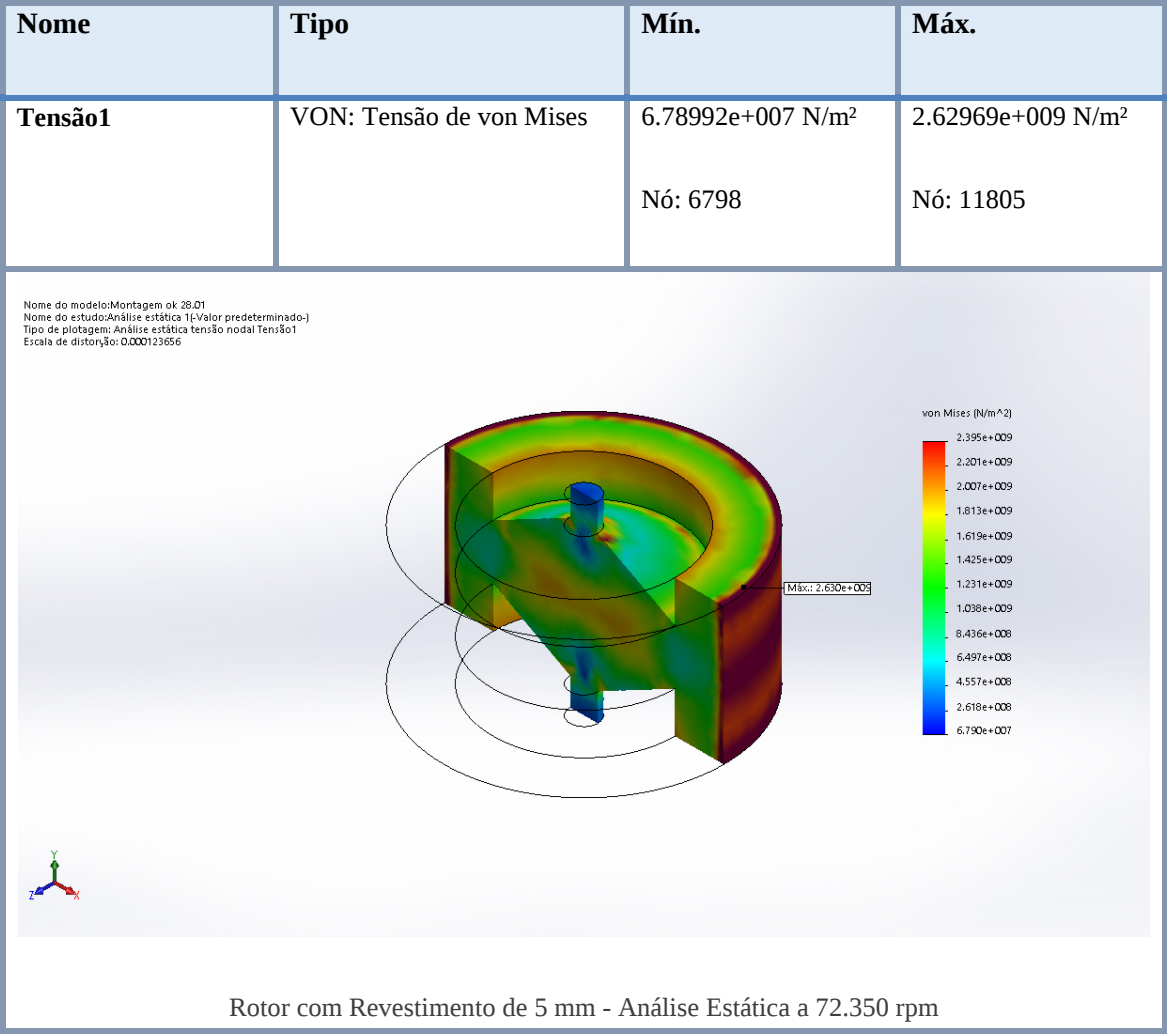
Informações de Malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	12630
Total de elementos	8080
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.8764 mm
Tolerância	0.693818 mm
Qualidade da malha	Alta

Nome do modelo: Montagem ok 28.01
Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida

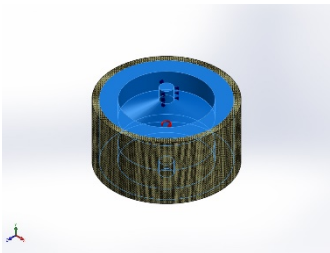
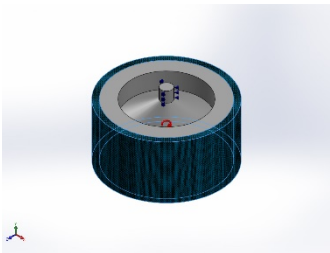


Resultados do Estudo

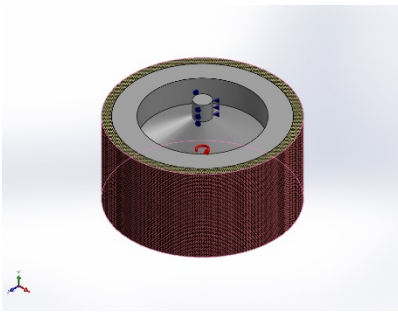


APÊNDICE R – SIMULAÇÃO ROTOR COM REVESTIMENTO DE 10 MM

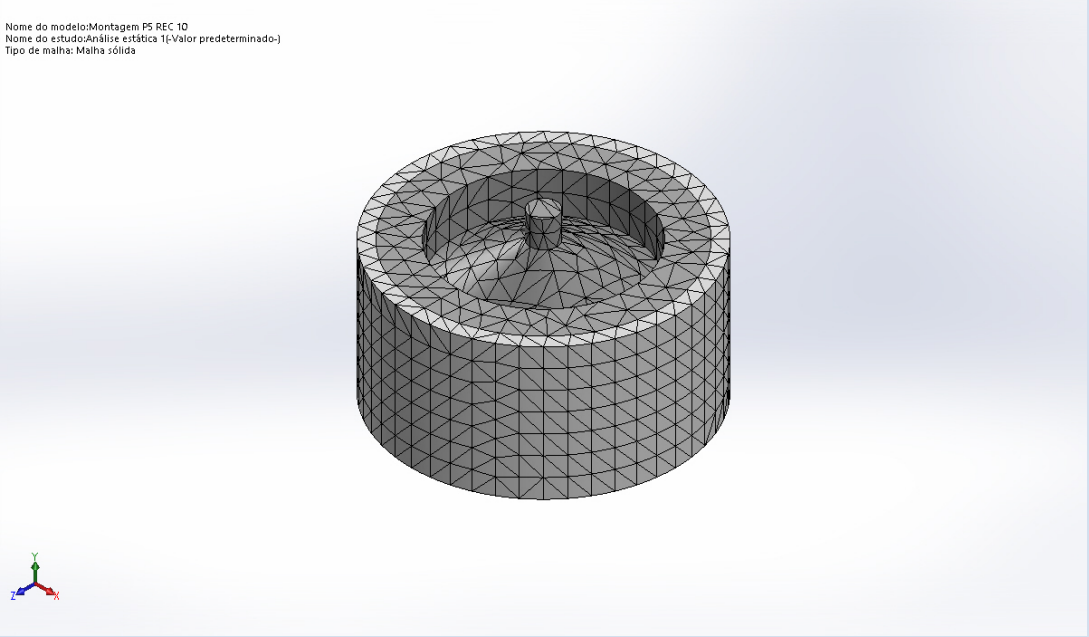
Informações do Modelo

Rotor com Revestimento de 10 mm	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 16,7535 kg Volume: 0,00207345 m³ Densidade: 8080 kg/m³ Peso: 164,184 N
	Corpo sólido	Massa: 1,11621 kg Volume: 0,000596903 m³ Densidade: 1870 kg/m³ Peso: 10,9388 N

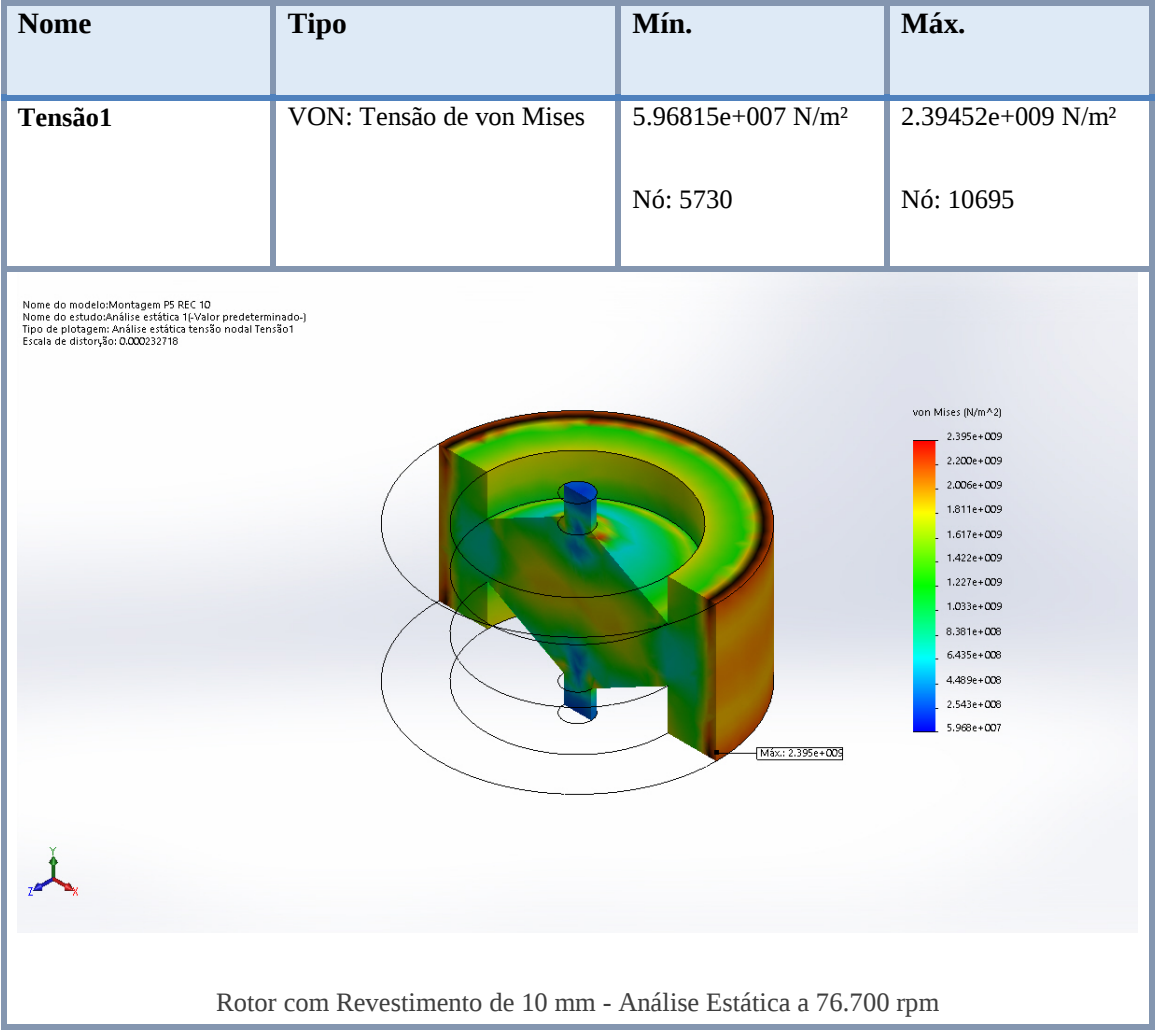
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 76.700 rpm Aceleração angular: 0

Informações de Malha

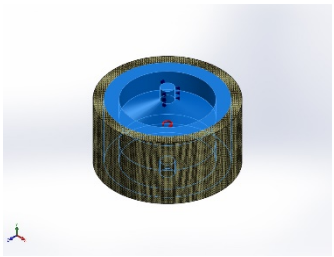
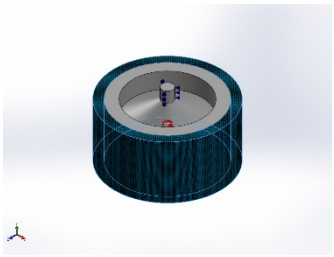
Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	11536
Total de elementos	7260
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.8764 mm
Tolerância	0.693818 mm
Qualidade da malha	Alta
Nome do modelo:Montagem P5 REC 10 Nome do estudo:Análise estática 1(-Valor predeterminado-) Tipo de malha: Malha sólida 	

Resultados do Estudo

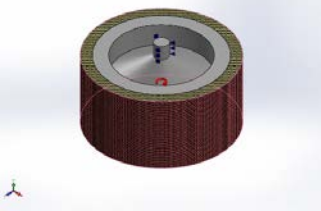


APÊNDICE S – SIMULAÇÃO ROTOR COM REVESTIMENTO DE 15 MM

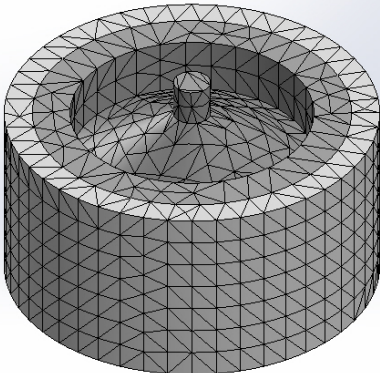
Informações do Modelo

Rotor com Revestimento 10 mm	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 14,5324 kg Volume: 0,00179856 m³ Densidade: 8080 kg/m³ Peso: 142,417 N
	Corpo sólido	Massa: 1,63025 kg Volume: 0,000871792 m³ Densidade: 1870 kg/m³ Peso: 15,9765 N

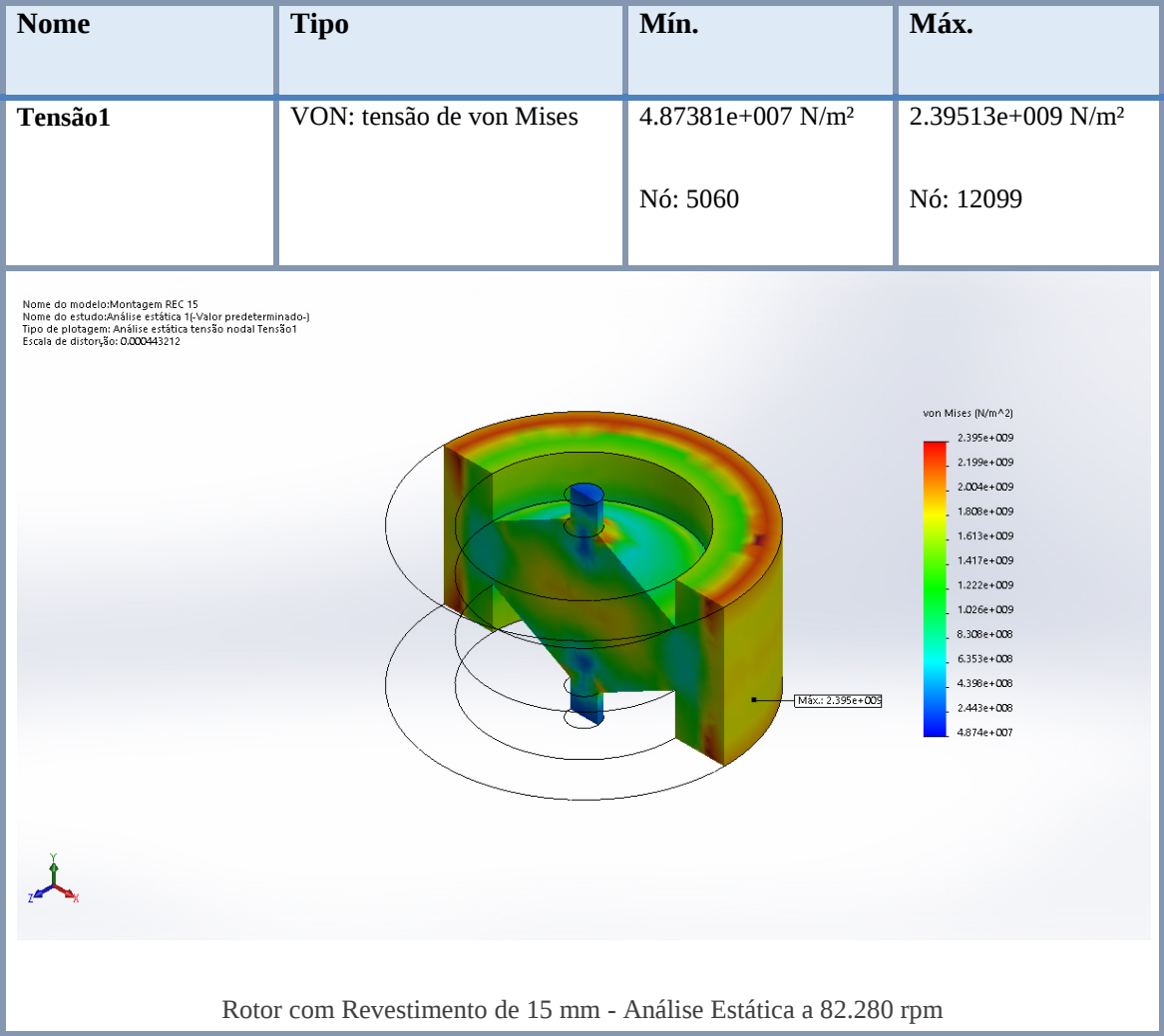
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 82.280 rpm Aceleração angular: 0

Informações de Malha

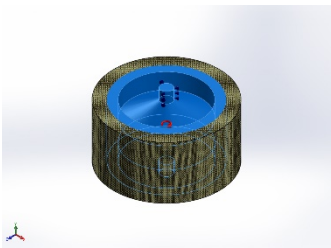
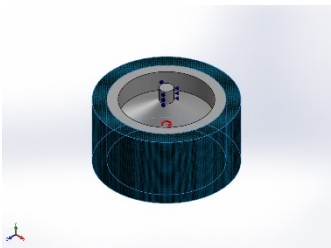
Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	12390
Total de elementos	7986
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.8764 mm
Tolerância	0.693818 mm
Qualidade da malha	Alta
Nome do modelo:Montagem REC 15 Nome do estudo:Análise estática 1(-Valor predeterminado-) Tipo de malha: Malha sólida 	

Resultados do Estudo

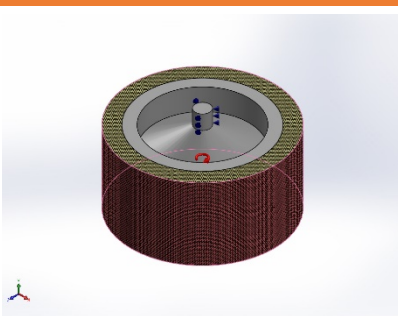


APÊNDICE T – SIMULAÇÃO ROTOR COM REVESTIMENTO DE 20 MM

Informações do Modelo

Rotor com Revestimento 20 mm	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 12,4382 kg Volume: 0,00153938 m³ Densidade: 8080 kg/m³ Peso: 121,894 N
	Corpo sólido	Massa: 2,11492 kg Volume: 0,00113097 m³ Densidade: 1870 kg/m³ Peso: 20,7262 N

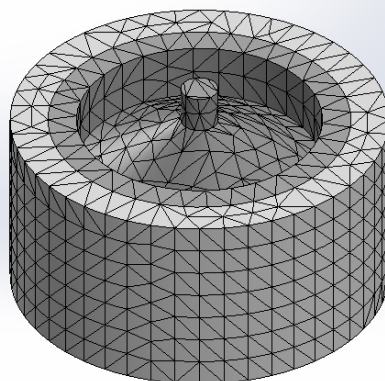
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 88.800 rpm Aceleração angular: 0

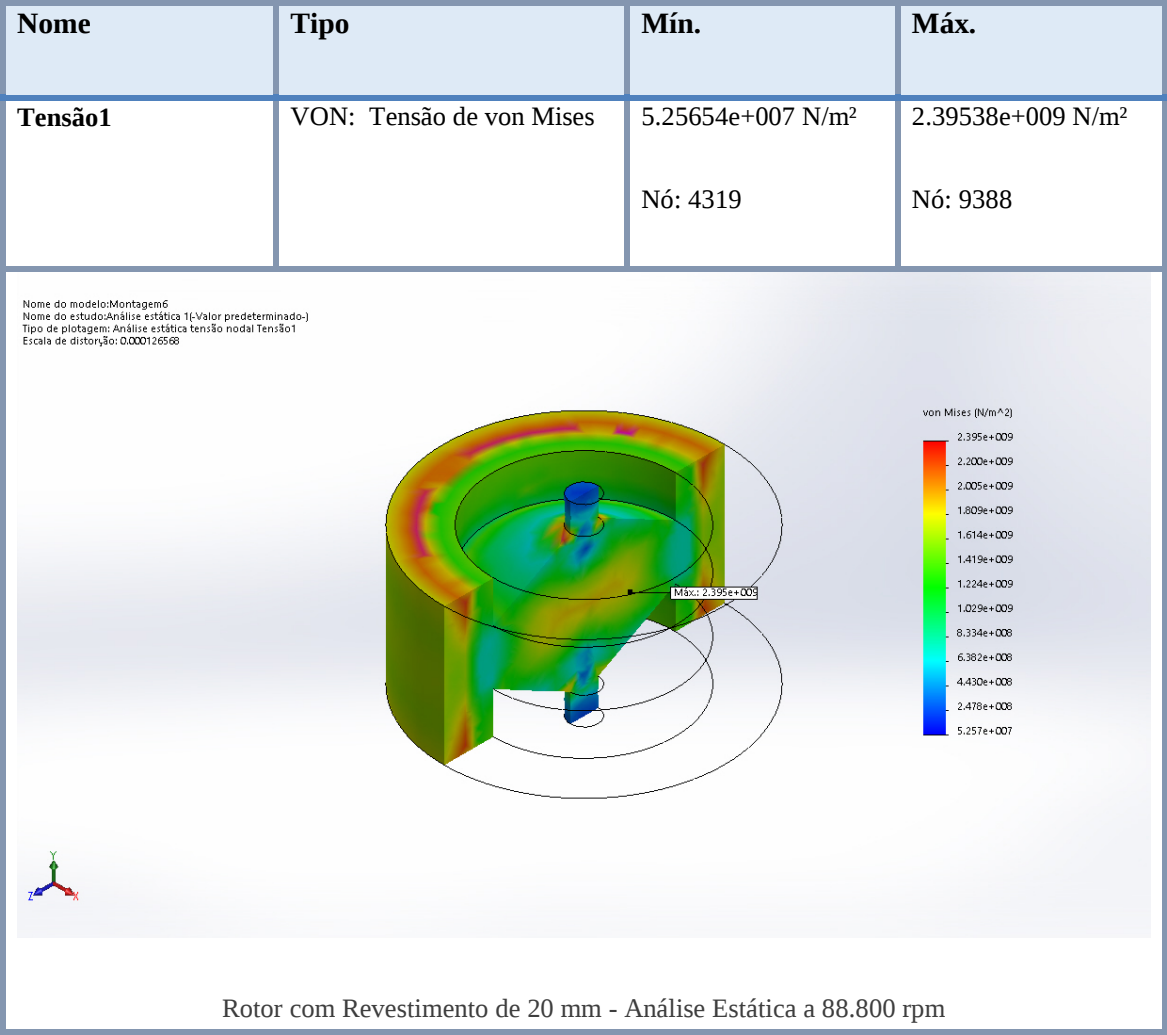
Informações de Malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	12355
Total de elementos	7957
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.8764 mm
Tolerância	0.693818 mm
Qualidade da malha	Alta

Nome do modelo: Montagem6
Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida

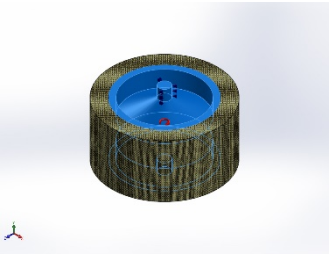
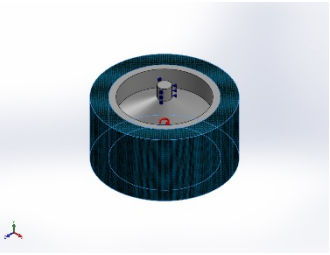


Resultados do Estudo

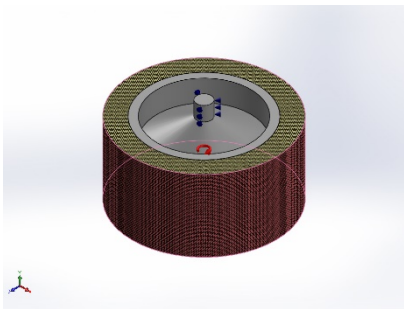


APÊNDICE U – SIMULAÇÃO ROTOR COM REVESTIMENTO DE 25 MM

Informações do Modelo

Rotor com Revestimento 25 mm	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 10,4709 kg Volume: 0,00129591 m³ Densidade: 8080 kg/m³ Peso: 102,615 N
	Corpo sólido	Massa: 2,57022 kg Volume: 0,00137445 m³ Densidade: 1870 kg/m³ Peso: 25,1881 N

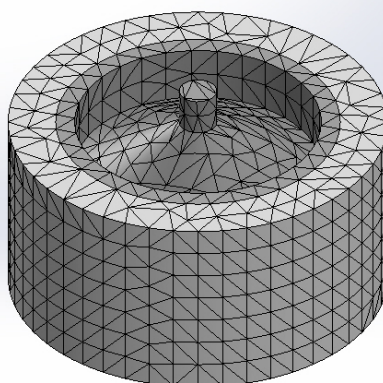
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Carregar imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 96.160 rpm Aceleração angular: 0

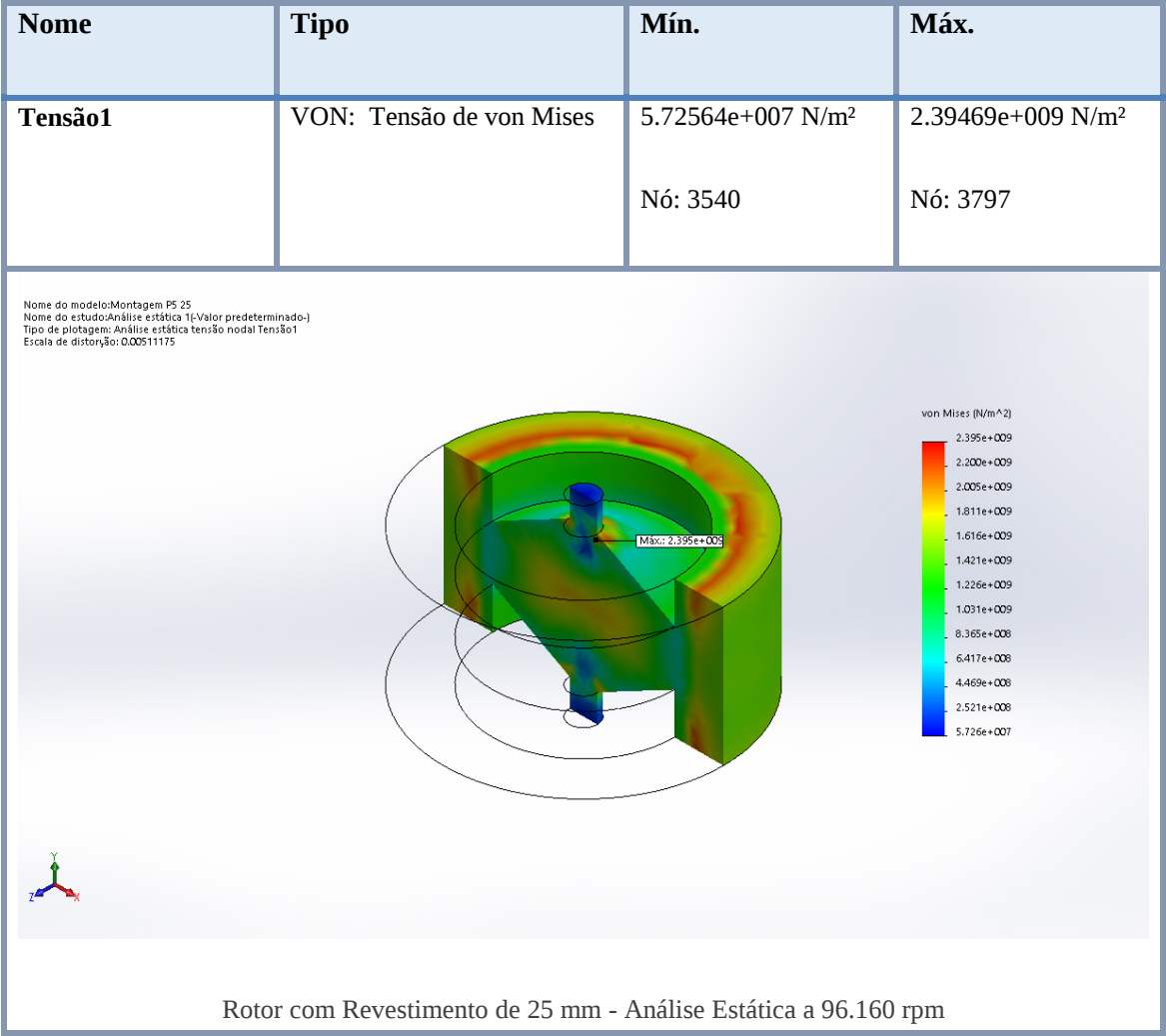
Informações de Malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	11459
Total de elementos	7253
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.8764 mm
Tolerância	0.693818 mm
Qualidade da malha	Alta

Nome do modelo: Montagem P5 25
Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida

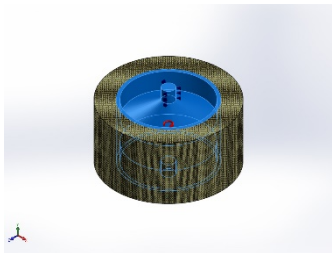
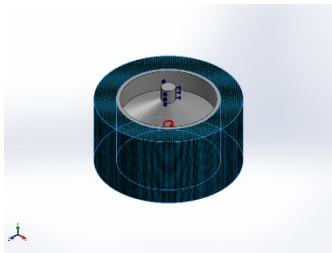


Resultados do Estudo

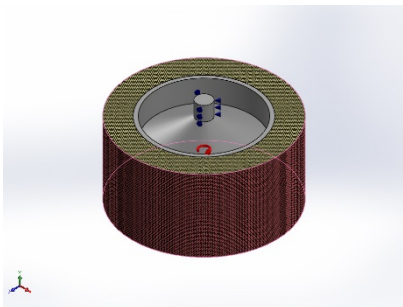


APÊNDICE V – SIMULAÇÃO ROTOR COM REVESTIMENTO DE 30 MM

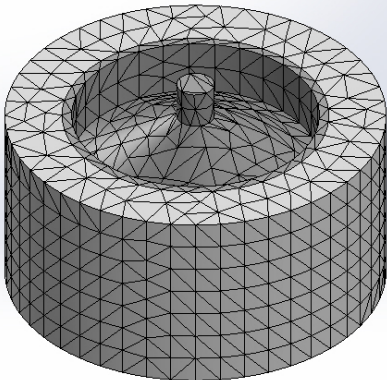
Informações do Modelo

Rotor com Revestimento 30 mm	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 8,63058 kg Volume: 0,00106814 m³ Densidade: 8080 kg/m³ Peso: 84,5797 N
	Corpo sólido	Massa: 2,99614 kg Volume: 0,00160221 m³ Densidade: 1870 kg/m³ Peso: 29,3621 N

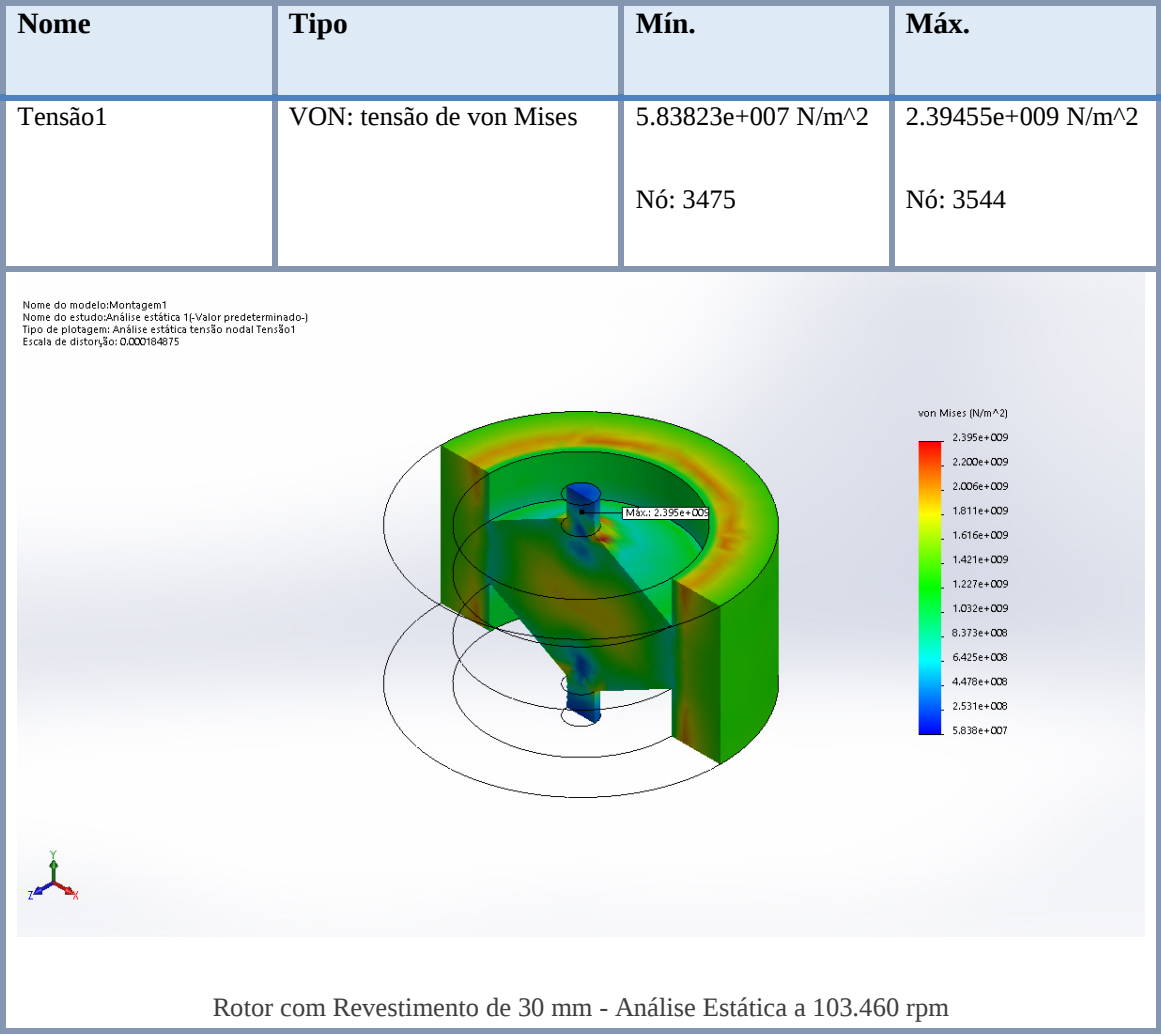
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Carregar imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 103.460 rpm Aceleração angular: 0

Informações de Malha

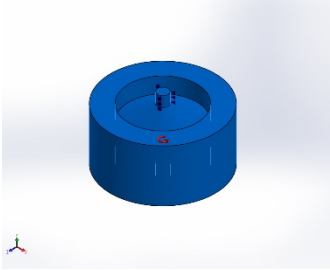
Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	12665
Total de elementos	8147
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.8764 mm
Tolerância	0.693818 mm
Qualidade da malha	Alta
Nome do modelo:Montagem1 Nome do estudo:Análise estática 1(-Valor predeterminado-) Tipo de malha: Malha sólida 	

Resultados do Estudo

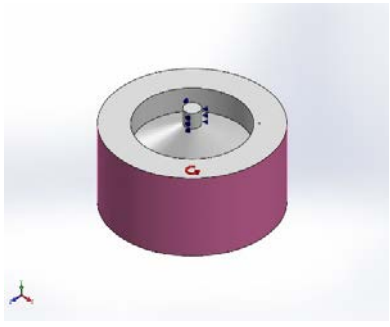


APÊNDICE W – SIMULAÇÃO DO ROTOR COM RAO 65 MM EM AÇO MARAGING

Informações do Modelo

Rotor Raio 65 mm	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 21,5765 kg Volume: 0,00267035 m³ Densidade: 8080 kg/m³ Peso: 211,449 N

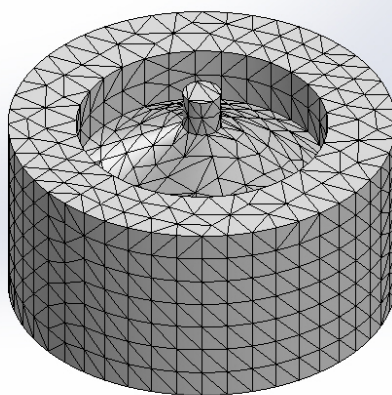
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Carregar imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 68.090 rpm Aceleração angular: 0

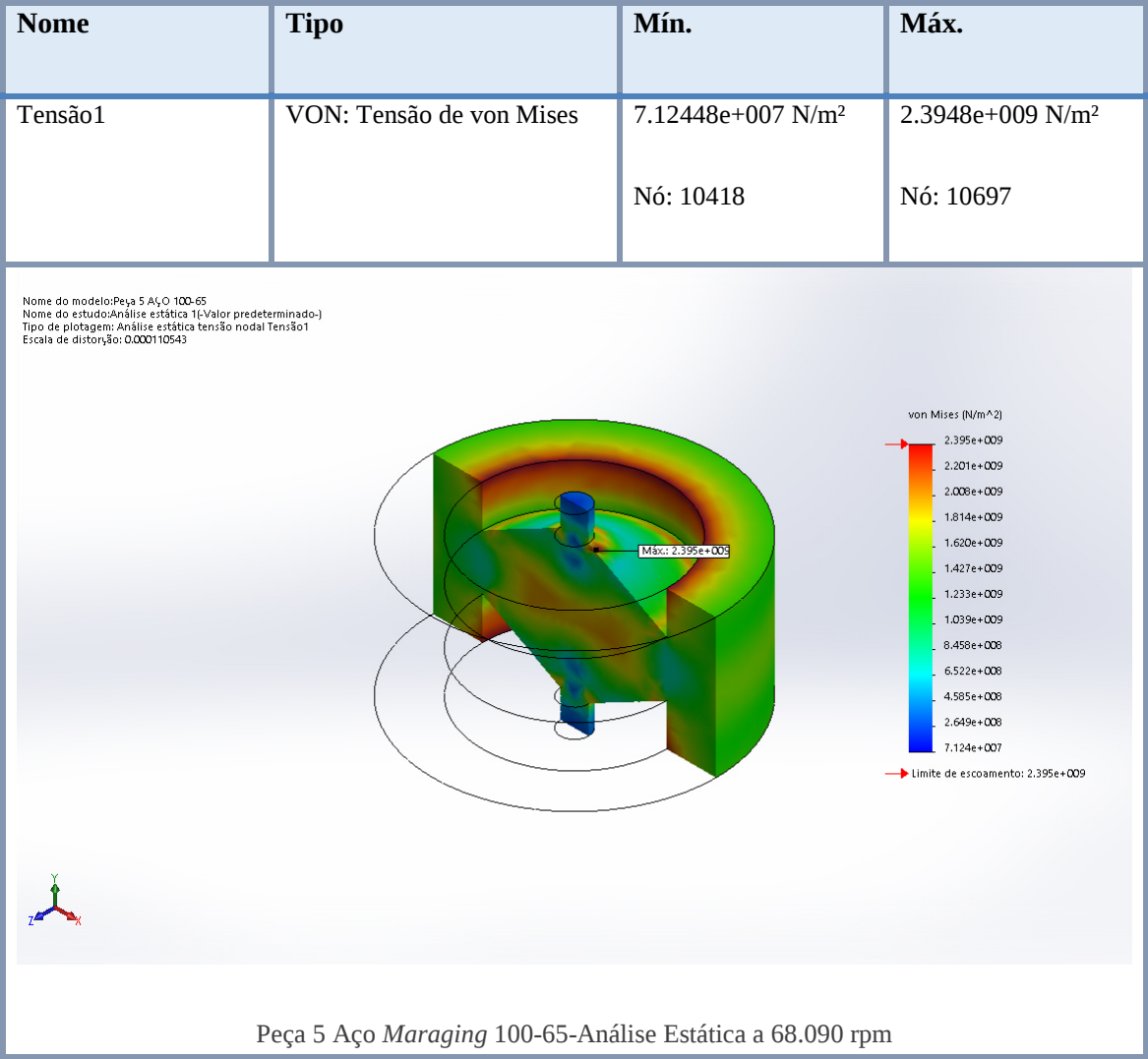
Informações de Malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	11529
Total de elementos	7318
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.6073 mm
Tolerância	0.680364 mm
Qualidade da malha	Alta

Nome do modelo: Peça 5 Aço 100-65
Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida

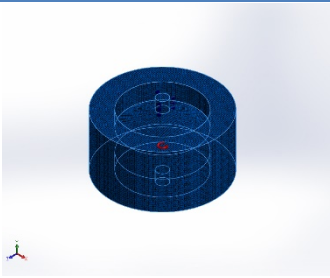


Resultados do Estudo

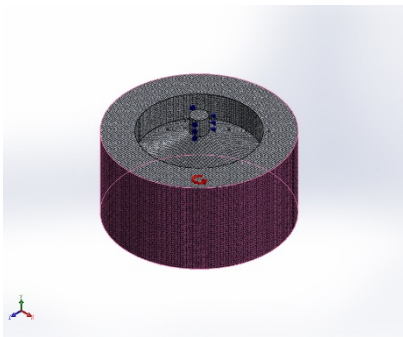


APÊNDICE X – SIMULAÇÃO DO ROTOR COM RAIO DE 65 MM EM FIBRA DE CARBONO

Informações do Modelo

Rotor Raio 65 mm	Tratado como	Propriedades volumétricas
	Corpo sólido	Massa: 4,99356 kg Volume: 0,00267035 m³ Densidade: 1870 kg/m³ Peso: 48,9369 N

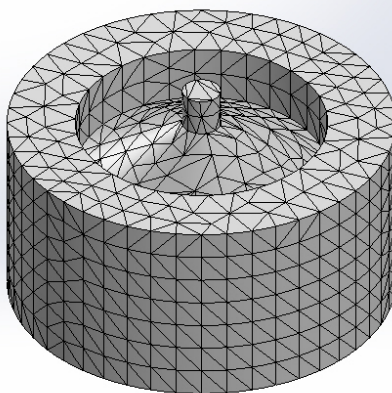
Acessórios de Fixação e Cargas

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga
Centrífuga-1		Centrífuga: Face< 1 > Velocidade angular: 170.970 rpm Aceleração angular: 0

Informações de Malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Total de nós	11529
Total de elementos	7318
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	13.6073 mm
Tolerância	0.680364 mm
Qualidade da malha	Alta

Nome do modelo: Peça 5 FIBRA100-65
Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha sólida



Resultados do Estudo

