

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
POLO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA
REDONDA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RAFAEL NASCIMENTO LOPES

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA
REALIZAÇÃO DE ANÁLISE DE CORROSÃO EM
METAIS INSTALADOS EM UM SISTEMA DE
REFRIGERAÇÃO COM FLUÍDO DE TRABALHO
AMÔNIA ANIDRA EM BAIXA TEMPERATURA E ALTA
PRESSÃO

ORIENTADOR: D.SC GLÁUCIO SOARES DA FONSECA
CO-ORIENTADOR: D.SC ELIVELTON ALVES FERREIRA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
Modelamento e simulação de Processos
e Fenômenos

LINHA DE PESQUISA: Microestrutura e
Propriedades de Materiais

Volta Redonda
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
PÓLO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

RAFAEL NASCIMENTO LOPES

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA REALIZAÇÃO DE ANÁLISE DE
CORROSÃO EM METAIS INSTALADOS EM UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO
COM FLUÍDO DE TRABALHO AMÔNIA ANIDRA EM BAIXA TEMPERATURA E
ALTA PRESSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica.

Área de Concentração:
Modelamento e simulação de Processos e Fenômenos

Linha de Pesquisa:
Microestrutura e Propriedades de Materiais

ORIENTADOR: Prof., Gláucio Soares da Fonseca, D.Sc.

CO-ORIENTADOR: Elivelton Alves Ferreira, D.Sc.

Volta Redonda

2024

RAFAEL NASCIMENTO LOPES

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA REALIZAÇÃO DE
ANÁLISE DE CORROSÃO EM METAIS INSTALADOS EM UM SISTEMA DE
REFRIGERAÇÃO COM FLUÍDO DE TRABALHO AMÔNIA ANIDRA EM BAIXA
TEMPERATURA E ALTA PRESSÃO

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Metalúrgica da
Universidade Federal
Fluminense, como requisito
parcial para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia
Metalúrgica.

Área de Concentração:
Modelamento e simulação de
Processos e Fenômenos

Linha de Pesquisa:
Microestrutura e Propriedades
de Materiais

Aprovado em 02 de Maio de 2024.

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



GLAUCIO SOARES DA FONSECA

Data: 04/06/2024 16:07:06-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Gláucio Soares da Fonseca, D.Sc. - Orientador (UFF/PPGEM)

Documento assinado digitalmente



ELIVELTON ALVES FERREIRA

Data: 03/06/2024 20:48:55-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Elivelton Alves Ferreira, D.Sc. – Coorientador (UFF/PPGEM)

Ingrid M.S. Tomaszewski

Ingrid Meirelles Salvino Tomaszewski, D.Sc. – Docente (FATEC)

**VOLTA REDONDA
2024**

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus por tudo que tem me proporcionado.
“O Senhor é a minha força e o meu escudo; nele o meu coração confia, e dele recebo ajuda. Meu coração exulta de alegria, e com o meu cântico lhe darei graças.” Salmo 28:7

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por tudo que tem feito na minha vida, sei que tudo é seu projeto e seu plano e fico contente por tudo que projetou para mim.

Aos meus pais por sempre me incentivarem a buscar o conhecimento e me desenvolver intelectualmente e humanamente.

A minha esposa por ser minha companheira e compreender os momentos que tive que me dedicar para realizar as atividades e muitas vezes ter que me ausentar para me dedicar aos estudos.

Aos meus orientadores Gláucio Soares da Fonseca e Eivelton Alves Ferreira pela orientação e direcionamento durante esse período.

Aos meus amigos Evandro e Felipe Trindade proprietários da ST Metalúrgica por fabricar e doar o dispositivo do meu mestrado tanto na fabricação, e também meu amigo Eduardo Seixas no suporte nos projetos mecânicos e desenvolvimento das atividades.

A Empresa ROGRANE por liberar a realização das atividades através dos meus amigos Marcelo e Ricardo.

Ao meu amigo Allan da Silva por sempre está me auxiliando no desenvolvimento textual e nas revisões.

Agradeço em especial ao meu sócio Ueliton do Nascimento por sempre está ao meu lado nos momentos que não pude está presente na empresa, e está sempre me ajudando.

A todos que colaboraram de alguma forma para realização desse trabalho, pois sem ajuda de cada um sei que não estaria concluindo esse trabalho.

RESUMO

Devido a necessidade de maior conhecimento científico na conservação de alimentos, no século XIX foram desenvolvidas máquinas de refrigeração artificial na Europa e principalmente na Austrália, devido à dificuldade de obtenção de gelo da natureza. As máquinas primitivas de refrigeração, depois da descoberta de Cullen na Escócia em 1824 utilizando o Éter que possuía pouca eficiência no processo, outros métodos foram desenvolvidos no século XIX buscando melhoria do processo e melhor eficiência. Devido a severidade de acidentes causados por vasos de pressão em sistemas de refrigeração em 1911 foi publicada a primeira versão ASME seção VIII voltada para o tema. No Brasil em decorrência da relevância do tema foi publicada a primeira versão da norma regulamentadora número 13, NR 13 – Caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos, pela portaria MTb nº 3.214, em junho de 1978. Esta Norma Regulamentadora - NR estabelece requisitos mínimos para gestão da integridade estrutural de caldeiras a vapor, vasos de pressão, suas tubulações de interligação e tanques metálicos de armazenamento nos aspectos relacionados à instalação, inspeção, operação e manutenção, visando à segurança e a saúde dos trabalhadores. Propõem-se através desse trabalho o desenvolvimento de um dispositivo que possa ser instalado em um sistema de refrigeração por amônia anidra em baixa temperatura e alta pressão e que possa ser possível alojar amostras de materiais para realizar análise macro estrutural do comportamento de materiais empregados nos vasos de pressão submetidos ao fluido de trabalho amônia, e o acompanhamento da corrosão do material através de análise de perda de massa e medição de espessura por ultrassom. Aponta-se como relevância desse trabalho o desenvolvimento do dispositivo, análise e o comportamento desses materiais altamente empregado na indústria para sistema de refrigeração, submetidos a um ambiente severo através da amônia, buscando auxiliar a indústria de forma geral, e a sistemática de inspeção de segurança dos vasos de pressão.

Palavras-chave: vaso de pressão, aço inoxidável, amônia (NH₃), corrosão.

ABSTRACT

Due to the need for commitment to scientific knowledge in food conservation, in the 19th century artificial refrigeration machines were developed in Europe and mainly in Australia, due to the difficulty of obtaining ice from nature. The primitive refrigeration machines, after Cullen's discovery in Scotland in 1824 using Ether which had little efficiency in the process, other methods were developed in the 19th century seeking to improve the process and better efficiency. Due to the severity of accidents caused by pressure vessels in refrigeration systems, in 1911 the first ASME section VIII version focused on the topic was published. In Brazil, due to the relevance of the topic, the first version of regulatory standard number 13, NR 13 – Boilers, pressure vessels, pipes and metallic tanks, was published by MTb ordinance no. 3,214, in June 1978. This Regulatory Standard - NR establishes minimum requirements for managing the structural integrity of steam boilers, pressure vessels, their interconnection piping and metallic storage tanks in aspects related to installation, inspection, operation and maintenance, aiming at the safety and health of workers. Through this work, we propose the development of a device that can be installed in an anhydrous ammonia refrigeration system at low temperature and high pressure and that can accommodate samples of materials to carry out macro structural analysis of the behavior of materials used in pressure vessels subjected to the working fluid ammonia, and monitoring of material corrosion through mass loss analysis and thickness measurement by ultrasound. The relevance of this work is the development of the device, analysis and behavior of these materials highly used in the industry for refrigeration systems, subjected to a severe environment through ammonia, seeking to assist the industry in general, and the systematic inspection of pressure vessel safety.

Keywords: Pressure vessel, stainless steel, ammonia (NH₃), corrosion.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS.....	4
2.1.	Objetivo Geral	4
2.2.	Objetivos Específicos.....	4
3.	JUSTIFICATIVA	5
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
4.1	Refrigeração industrial	1
4.2	Amônia anidra (NH ₃).....	2
4.2.1	Vasos de pressão	5
4.3	Código ASME SECÇÃO VIII	6
4.3.1	Norma ASME VIII DIVISÃO I.....	7
4.3.2	Norma ASME VIII DIVISÃO II	7
4.4	Método de elementos finitos	7
4.5	Norma Regulamentadora nº 13 (NR 13)	10
4.5.1	Teste hidrostático (TH)	13
4.5.2	Teste de espessura de chapa.....	13
4.6	MATERIAIS UTILIZADOS NO VASO DE PRESSÃO	15
4.6.1	AÇO CARBONO A-516-70.....	16
4.6.2	AÇO INOXIDAVEL AISI 304	16
4.6.3	ZINCO	17
4.7	Nota técnica nº 03/2004: refrigeração industrial por amônia: riscos, segurança e auditoria fiscal. – Brasília: MTE, SIT, DSST, 2005	18
4.7.1	Descrição do Acidente.....	19
5	MATERIAIS E MÉTODOS	23
5.1	Materiais	23
5.2	Métodos	24
5.2.1	Dispositivo	25
5.2.1.1	Modelo computacional	26
5.2.1.2	Fabricação do dispositivo e melhoria	29
5.2.1.3	Validação normativa.....	30
5.2.1.3.1	Teste hidrostático.....	31
5.2.1.3.2	Teste de espessura de chapa.....	33
5.2.1.4	Validação em campo	34
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36

6.1	Análise MEF.....	36
6.2	TESTE HIDROSTÁTICO.....	41
6.3	Teste de espessura de chapa.....	45
6.4	Teste do dispositivo em campo.....	47
6.4.1	Pontos de melhoria do dispositivo.....	52
6.5	Ensaio das amostras: Perda de massa, espessura e largura.....	55
6.	CONCLUSÕES.....	59
7.	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHO.....	60
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
	ANEXO A – LISTA DE COMPONENTES.....	1
	ANEXO B – DESENHO DO CONJUNTO MONTADO.....	2
	ANEXO C – LAUDO DA SIMULAÇÃO POR METODO DE ELEMENTOS FINITOS DO DISPOSITIVO GERADO PELO SOFTWARE INVETOR.....	1

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de sistema de refrigeração por compressão de vapor de amônia.	1
Figura 2 - Organograma da metodologia para análise de MEF	9
Figura 3 - Grupo de Potencial de Risco	11
Figura 4 - Categoria de Risco de Vaso de Pressão.....	11
Figura 5 - Quadro de periodicidade de exames internos e externos.....	12
Figura 6 - Fuga de funcionários devido a amônia no acidente ocorrido no Rio Grande do Norte por vazamento de amônia anidra.	20
Figura 7 - Atendimento médico com trabalhadores contaminados no acidente ocorrido no Rio Grande do Norte por vazamento de amônia anidra.	21
Figura 8 – Cabeçote do compressor de amônia a) Parte do cabeçote do compressor rompido. B) Tampa do compressor rompido.....	21
Figura 9 - Quadro de descrição da amônia anidra.....	24
Figura 10 - Fluxograma representativo das atividades a serem desenvolvidas	25
Figura 11 - Fluxograma representativo das etapas de desenvolvimento do dispositivo	25
Figura 12 – Vista explodida do dispositivo	26
Figura 13 – Condições de contorno de fixação do dispositivo.....	27
Figura 14 – Malha tetraédrico do dispositivo.....	28
Figura 15 – Fabricação da flange na fresa	29
Figura 16 – Produto fabricado a) Vista do corpo com a flange. b) Vista superior do dispositivo. c) Vista do dispositivo e a extremidade de fixação. d) Vista do dispositivo com todos os componentes.	30
Figura 17 – Bomba manual de teste hidrostático.....	31
Figura 18 – Processo de utilização da bomba manual de teste hidrostático.....	31
Figura 19 – Gráfico do grupo de risco de acordo com a normativa IN-2688.	32
Figura 20 – Gráfico de pressão x tempo para grupo 3 de acordo com a normativa IN-2688.	33
Figura 21 – Pontos que será realizada a medição de espessura por ultrassom.....	34
Figura 22 – Balança de precisão.....	35
Figura 23 – Equipamento por ensaio de medição de espessura por ultrassom.	35
Figura 24 – Fluxo do processo dos resultados apresentado.....	36
Figura 25 – Tensão de Von Mises no dispositivo.....	37
Figura 26 – Primeira tensão principal.....	38
Figura 27 – Terceira tensão principal no dispositivo	38
Figura 28 – Deslocamento no dispositivo.....	39
Figura 29 – Fator de segurança do dispositivo	40
Figura 30 – Gráfico de teste hidrostático no dispositivo conforme IN 2688,	45
Figura 31 – Mapa de ultrassom realizado no dispositivo antes do dispositivo ser pressurizado.	46
Figura 32 – Imagem ilustrativa de um separador de líquido.	47
Figura 33 – Diagrama da conexão do equipamento.....	48
Figura 34 – Ponto da linha de refrigeração que foi instalado o dispositivo.....	49
Figura 35 – Foto do dispositivo montado com as melhorias feitas.	50
Figura 36 – Dispositivo instalado na linha de refrigeração por amônia.....	51
Figura 37 – Amostras alojadas no dispositivo. a) Amostra de Zinco, b) Amostra de aço inoxidável, c) Amostra de A-516-70.	52
Figura 38 – Imagem do dispositivo com pontos que serão alterado no equipamento.	53
Figura 39 – Vista explodida do dispositivo com as alterações realizadas.....	54
Figura 40 – Sistema de acoplamento das amostras.	55

Figura 41 – Sistema de acoplamento das amostras57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quadro de propriedades físicas de alguns refrigerantes	3
Tabela 2 - Danos causados pela exposição da amônia	4
Tabela 3 – Materiais aplicados a vasos de pressão de acordo com a ASME VIII div.1	15
Tabela 4 – Propriedade química do A-516-70	16
Tabela 5 – Propriedade química do AISI 304	17
Tabela 6 – Composições químicas dos materiais estudados.	23
Tabela 7 – Parâmetros gerais do material e propriedades mecânicas.	28
Tabela 8 – Parâmetros gerais do matérias e propriedades mecânicas.....	29
Tabela 9 – Resultados gerais obtidos na equação	41
Tabela 10 – Parâmetros para teste hidrostático	41
Tabela 11 - Teste hidrostático no dispositivo antes da instalação na linha de refrigeração por amônia	43
Tabela 12 - Teste hidrostático no dispositivo após a instalação na linha de refrigeração por amônia	44
Tabela 13 – Valores encontrado no teste de espessura de chapa por ultrassom	46
Tabela 14 – Resultados das medições e pesagem da amostra de A-516-70 antes e após serem alocadas no dispositivo.	56
Tabela 15 – Resultados das medições e pesagem da amostra de Aço Inoxidável 304 antes e após está alocada no dispositivo.....	56
Tabela 16 – Resultados das medições e pesagem da amostra de Zinco antes e após está alocada no dispositivo.....	56
Tabela 17 – Resultados comparativos das medições e pesagem das amostras antes e após está alocada no dispositivo.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

AISI - American Iron and Steel Institute

ASTM - American Society for Testing and Materials

C - Elemento químico Carbono

Zn – Elemento químico do Zinco

Ni – Elemento químico do Níquel

Eq. – Equação

Kg - Quilograma

°C - Unidade de medida de temperatura

mm - Milímetro, unidade de medida de comprimento

min - Minuto, unidade de medida de tempo

Bar – Unidade de pressão

MPa - Mega Pascal, unidade de medida de pressão

PPGEM - Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica

UFF - Universidade Federal Fluminense

UNS - Unified Numbering System

VMT Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais

NR – Norma Regulamentadora

ASME – The American Society of Mechanical Engineers

VP – Vaso de pressão

TH – Teste hidrostático

PMTA – Pressão Máxima de Tensão Admissível

PTH – Pressão de Teste Hidrostático

SPIE - Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos

MEF – Método de Elementos Finitos

OIT – Organização Internacional do Trabalho

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers

ANSI - American National Standards Institute

DRT – Delegacia Regional do Trabalho

IIAR - International Institute of Ammonia Refrigeration

API - American Petroleum Institute

1. INTRODUÇÃO

A conservação de alimentos em longo prazo tem sido uma preocupação universal ao longo da história da humanidade. Embora a refrigeração seja um processo antigo, suas primeiras aplicações remontam aos chineses, que, de maneira empírica e artesanal, já a utilizavam muitos anos antes de Cristo com o intuito de preservar bebidas e alimentos por períodos mais prolongados (COSTA, 2011). Entretanto, somente no final do século XVIII, foram feitas as primeiras descobertas científicas relacionadas à inibição do processo de deterioração dos alimentos por meio da redução da temperatura. (HEROLD, 2011)

Um dos desafios no período pós-colonização das Américas e da Austrália pelos europeus, que abrange os séculos XVI e XIX, era o transporte de alimentos, especialmente carne, da Austrália para a Europa. Devido à escassez de gelo natural, houve a necessidade de desenvolver conhecimentos científicos para superar essa dificuldade. Assim, no século XIX, foram criados equipamentos de refrigeração artificial na Europa e principalmente na Austrália. (WOOLRICH, 1968)

Após a descoberta de Cullen na Escócia em 1824, que utilizou éter com eficiência limitada, outros métodos foram desenvolvidos durante o século XIX com o objetivo de aprimorar o processo e sua eficácia. Graças a pesquisas contínuas, no início do século XX, foi revelada a propriedade criogênica dos gases, ou seja, sua capacidade de retirar calor de um sistema ao serem expandidos. A partir dessa descoberta, a produção de gelo artificial em larga escala teve início, utilizando fluidos refrigerantes como amônia, dióxido de enxofre e cloreto de metila. (FRINHANI, 2022)

A amônia é amplamente utilizada na refrigeração industrial principalmente em equipamentos e processos de fabricação. Como se sabe a amônia tem algumas ressalvas em termos de segurança, além da elevada toxicidade também possui efeito explosivo em concentração alta. Portanto, para a utilização desse produto na indústria é necessário que a empresa tenha um bom plano de manutenção na operação, controle, instalação de detectores de gases, ventilação adequada e sistema de alarmes. Tudo para evitar acidentes do tipo químico que venham acontecer por vazamentos de amônia para o ambiente, pois esse tipo

de acidente quando ocorrem na indústria atinge grande número de trabalhadores devido o produto ser volátil e muitas das vezes gerar fatalidades (WINCK,2021).

Devido ao perigo envolvido nesse fluido de trabalho, começou a ser desenvolvido leis e regulamentação para buscar melhorias nos processos, método de controle e segurança no trabalho. Grande parte desses esforços foram voltados a realização de padronização dos métodos de fabricação dos vasos de pressão, pois no final do século XIX ocorreram aproximadamente 2.000 explosões nos Estados Unidos e no início do século XX mais de 1.600 explosões causando a morte de cerca de 1.200 pessoas, tendo uma das principais repercussões em 1905, no acidente na empresa norte americana R. B. Grover onde ocorreu uma explosão que destruiu quatro andares da empresa e o fogo se alastrou pela vizinhança gerando uma catástrofe impedindo o socorro aos funcionários presos nos escombros, ocasionando um dos maiores desastres da indústria norte americana resultando em 58 mortes e 150 feridos (MATHIAS, 2016).

Em decorrência dos inúmeros acidentes, em 1911 foi criada a ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), uma serie de regulamentações que fornece as diretrizes para fabricação de componentes de caldeiras e vasos de pressão. A primeira edição foi lançada no ano de 1915 (Edição 1914) com apenas 114 páginas, mas sendo um marco para a época devido a busca de proteção e segurança para funcionários e a população em geral. Desde então, a norma vem sofrendo alterações e melhoria continua e atualmente são 28 livros dedicados ao assunto. A versão de 2011, alcançou a marca de 16.000 páginas de diretrizes se tornando assim a maior norma ASME já disponibilizada de acordo com a ESSS (2016). Dentro da ASME BPVC, a seção VIII div.1 se destaca por ser especifica para o cálculo estrutural dos vasos de pressão. Com regras especificas para fabricação, verificação e segurança dos equipamentos buscando premissas conservativas. (ASME VIII BPVC.DIV.1, 2023)

No Brasil devido a relevância do tema foi publicada a primeira versão da norma regulamentadora, NR 13 — Caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos, pela portaria MTb nº 3.214, em junho de 1978. Esta Norma Regulamentadora - NR estabelece requisitos mínimos para gestão da integridade estrutural de caldeiras a vapor, vasos de pressão, suas tubulações

de interligação e tanques metálicos de armazenamento nos aspectos relacionados à instalação, inspeção, operação e manutenção, visando à segurança e à saúde dos trabalhadores. (NR13, 2019).

Nesta respectiva norma regulamentadora o item 13.4.1 estabelece método de inspeções e a periodicidade das inspeções: inicial, periódica e extraordinária. As inspeções periódicas são definidas em exames externo e exames internos, sendo geralmente dois tipos mais aplicados: teste hidrostático e teste de medição de espessura de chapa por ultrassom. O teste hidrostático possui intervalos de realização maiores (em relação ao outro método), contudo em vasos que possui como fluido de trabalho a amônia, há dificuldade na realização do teste devido ao fluido de trabalho, portanto o teste de rotina que as empresas de inspeção geralmente adotam é o teste de espessura de chapa. O teste de espessura de chapa realiza a verificação da dimensão da chapa de acordo com o mapa de medições disponibilizado pelo fabricante do vaso de pressão ou de acordo com a determinação do engenheiro que irá realizar o teste. Nessa avaliação é realizado o acompanhamento da dimensão da chapa e verificado se está dentro dos parâmetros aceitáveis estabelecidos pelo prontuário. Esse método muito usual não analisa os efeitos da corrosão no material e se o mesmo se manteve com os aspectos construtivos iniciais, somente a taxa de perda de massa. (PEREIRA FILHO, 2004)

Portanto, propõem-se através desse trabalho o desenvolvimento de um dispositivo que seja capaz de alocar amostras para realizar a análise macro estrutural do comportamento de materiais empregados nos vasos de pressão submetidos ao fluido de trabalho amônia (NH₃), e o acompanhamento da corrosão do material através de análise da taxa de perda de massa e espessura de chapa do material.

Aponta-se como a relevância desse trabalho o desenvolvimento de um dispositivo para realizar a análise e o comportamento desses materiais altamente empregado na indústria para sistema de refrigeração, submetidos a um ambiente severo através da amônia, buscando auxiliar a indústria de forma geral, e a sistemática de inspeção de segurança dos vasos de pressão.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é criar um dispositivo em conformidade com as normas vigentes, destinado a ser instalado em um sistema de refrigeração por amônia de alta pressão e baixa temperatura. Esse dispositivo tem o propósito de submeter amostras de materiais amplamente utilizados na produção de vasos de pressão, especialmente neste regime específico.

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são listados de forma mais detalhada abaixo:

- Desenvolver dispositivo para realização de pesquisa in-loco em sistema de refrigeração com fluido de trabalho a amônia (NH₃) no estado líquido em vasos de pressão.
- Validar o dispositivo de acordo com normas vigentes.
- Realizar ensaios antes e depois das amostras serem submetidas ao sistema de refrigeração;
- Analisar a taxa de perda de massa e espessura das amostras.

3. JUSTIFICATIVA

Vasos de pressão com fluído de trabalho sendo amônia possui vasta aplicação em sistemas de refrigeração industrial. A amônia (NH₃) é volátil e os vasos de pressão devido a pressão e volume deve atender a critérios de segurança de acordo com a legislação vigente, onde a mesma detalha o que o fabricante e o comprador do vaso de pressão deve possuir para operação dos mesmos. A NR 13, norma regulamentadora para vasos de pressão, descreve como deve ser realizada as inspeções dos vasos de pressão e a periodicidade de acordo com a categoria do vaso. No entanto a normativa indica dois principais testes que devem ser realizados periodicamente que são o teste hidrostático e teste de espessura de chapa.

Para realização do teste hidrostático é necessário que o fluído de trabalho seja recolhido do vaso de pressão e o mesmo seja isolado tendo somente um ponto de entrada para pressurização do vaso de pressão com fluído (geralmente água). O vaso de pressão é pressurizado com a pressão de teste hidrostático (PTH) indicada no projeto, pressão essa que é acima da pressão máxima de trabalho admissível (PMTA) do vaso, portanto o vaso fica pressurizado com água em uma pressão acima do máximo de pressão de operação durante o período de 20 minutos à 60 minutos em média de acordo com a determinação do fabricante com base em diretrizes normativas. Durante esse período é verificado se ocorre variação da pressão no manômetro e se o vaso possui alguma fissura e/ou vazamento em suas conexões flanges e etc. Esse processo possui a periodicidade de 3 a 10 anos de acordo com a categoria do vaso, no entanto devido à alta complexidade de isolação do vaso quando o fluído de operação é amônia esses testes são realizados pelo fabricante e/ou proprietário em situações críticas.

O outro teste que é amplamente utilizado é o de medição de espessura de chapa por ultrassom, este é mais usual devido a facilidade da aplicação, essa atividade se baseia na utilização de um equipamento de ultrassom que verifica a espessura da chapa de acordo com o mapa de medições do fabricante que contém os pontos que deve ser realizada a inspeção e/ou determinado profissional habilitado (no caso engenheiro responsável pela atividade), entretanto esse teste verifica se houve perda da espessura da chapa sem a

realização da análise das propriedades dos metais empregado no vaso, além de realizar uma amostragem e não realizar a análise global do vaso.

Pode-se notar que os testes mais usuais realizados nos vasos de pressão verificam somente aspectos macroestruturais pontuais desses vasos. Esse trabalho busca validar um dispositivo que possa alocar amostras para que seja possível a análise macro estrutural das propriedades de metais que são utilizados na fabricação do vaso de pressão e verificar o comportamento corrosivo, pois esses aspectos podem está relacionado diretamente na segurança e eficácia do produto.

Esse estudo utiliza como fluído a amônia anidra no estado líquido em vasos de pressão de aço carbono, devido a realização de uma pesquisa bibliográfica onde foram detectado artigos que indicaram que esse fluído em contato com o ferro, pode gerar uma reação química que ocasiona no desprendimento de moléculas de hidrogenio da amonia e a pressão do sistema ocasionar a permeação de hidrogênio no ferro, assim gerando fragilização do metal e alteração de suas propriedades mecânicas por consequencia diminuindo a segurança do vaso de pressão (Queiroz, V.F.M, 2016).

Outro ponto para a escolha desse fluído (amônia anidra) é devido o mesmo ser altamente corrosivo em materiais metálicos (D.A. JONES, 1977) e é de extrema importância entender o comportamento corrosivo nos vasos de pressão, uma vez que os testes indicados pela NR 13 e aplicado com maior periodicidade realiza somente análise pontual, portanto não é realizada a análise geral do vaso de pressão, seus aspectos macroestrutural e microestrutural, corrosão e as propriedades dos materiais empregados.

Vale ressaltar que em nenhum parágrafo da NR 13 é levado em consideração a caracterização dos materiais e a corrosão para vaso de pressão que utilizam a norma ASME VIII div.1, portanto é tratado como um tema secundário apoiado em diretivas internacionais. Contudo pode-se apontar que este trabalho possui relevância em termos de pesquisa científica e aplicabilidade nos processos industriais, uma vez que foi possível desenvolver um dispositivo capaz de realizar ensaios em sistemas de refrigeração por amônia.

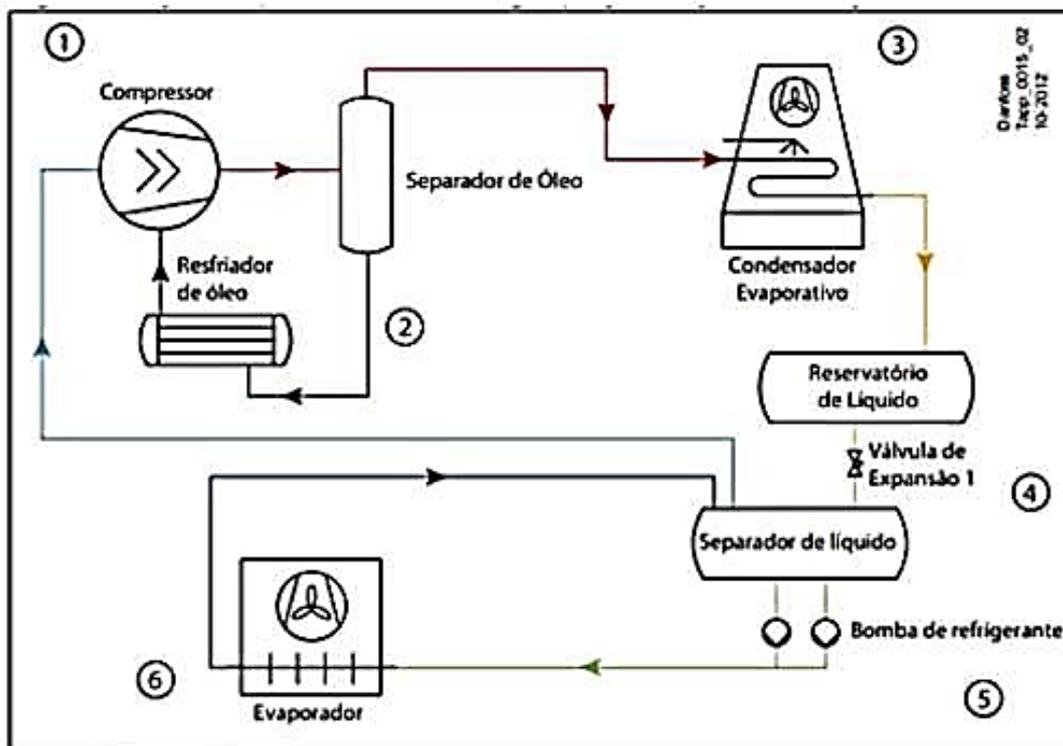
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Refrigeração industrial

Os sistemas de resfriamento de amônia, desempenham um papel importante na indústria. Geralmente, esses são sistemas de resfriamento por absorção em que a amônia é o refrigerante e a água é o absorvente. Esses sistemas são baseados no fato de que os vapores de amônia podem ser facilmente absorvidos por outros líquidos quando frios, criando uma carga de resfriamento significativa. Observa-se apenas o funcionamento desses sistemas, o ponto crítico é o alto consumo de energia em relação, aos sistemas de pressão mecânica. (FERREIRA, 2008)

Como em outros sistemas de refrigeração, no sistema de absorção o líquido passa pelo evaporador a baixa pressão com o vapor de amônia (Figura 1). Os vapores resultantes são absorvidos no absorvedor, resultando em uma solução rica em água e amônia. Essa solução passa por um gerador onde retira calor do meio resfriado sob baixa pressão (COSTA, 2017).

Figura 1 - Representação de sistema de refrigeração por compressão de vapor de amônia.



Fonte: DANFOSS, 2020

A grande aplicação também pode ser encontrada em sistemas de refrigeração por compressão de vapor de amônia, onde a amônia é o único líquido que circula pelo tubo. A quantidade de amônia em todo o sistema pode variar de 2.000 kg a 100.000 kg. O calor é removido do meio resfriado devido à mudança de fase do evaporador de líquido para vapor. O vapor de amônia passa pela rede através do compressor, em sequência pelo condensador e pela válvula de expansão para reduzir a entropia e retorna ao estado líquido (CARVALHO, 2010).

A Figura 4 mostra dois elementos auxiliares na apresentação do sistema de resfriamento por compressão de vapor de amônia: separador de líquido e óleo. O separador de óleo evita que o óleo seja carregado no tubo de resfriamento, e a função do separador de líquido é separar o vapor de amônia e a amônia líquida. Um separador de líquido pode ser colocado entre o condensador e a válvula de expansão para evitar a entrada de vapor na válvula; ou também após o evaporador para que a amônia líquida não entre no compressor. Esses elementos são frequentemente encontrados em sistemas de absorção e compressão de vapor (DANFOSS, 2020).

4.2 Amônia anidra (NH₃)

Com o avanço do estudo do Protocolo de Montreal, em 1995, foi definida uma redução de 50% no uso de clorofluorcarbonos (CFCs) e hidrofluorcarbonos (HFCs). Para gases de refrigeração são 17 gases com alto potencial de destruição da camada de ozônio. No Brasil, o uso de compostos HFC como refrigerantes foi proibido em 2010. (MILANÉS, 1997).

A amônia (R-717) foi definida por Zukowski Júnior (1995) como o principal gás para refrigeração devido às suas propriedades térmicas para diversos processos relacionados à refrigeração. A Tabela 1 compara propriedades importantes em sistemas de refrigeração da amônia e outros refrigerantes, como o: R-22, R-134a e R-123, esses amplamente utilizados na indústria.

Tabela 1 - Quadro de propriedades físicas de alguns refrigerantes

Composição	R-717 NH₃	R-22 CHClF₂	R-134a CH₂FCF₃	R-123 CHCl₂CF₃
Massa Molecular	17,03	86,48	102,03	152,93
Temperatura Crítica, °C	132,4	96,2	101,15	183,71
Pressão Crítica, MPa	11,35	5,00	4,06	3,67
Temperatura de Ebulição à 0,101 MPa, °C	-33,4	-40,8	-26,5	27,9
Entalpia de Vaporização à 0,101 MPa, KJ/Kg	1372,8	233,6	231,2	230,3
Volume Específico do Vapor à 0,101 MPa, m ³ /kg	1,125	0,213	0,189	0,154
Relação entre Pressões na faixa -30/35 °C	9,81	8,29	9,10	
Relação entre Pressões na faixa 0/35 °C	2,72	2,72	2,63	3,98
Potencial de Destruição da Camada de Ozônio, ODP	0	0,05	0	0,02
Efeito Estufa, GWP	0	0,04	0,31	0,02

Fonte: Adaptada pelo autor (MILANÉS, 1997)

Analisando a Tabela 1, verifica-se que a massa molecular da amônia é inferior ao de outros refrigerantes analisados. O peso molecular tem uma relação inversa entre o calor específico de uma substância e o calor latente de vaporização, que por sua vez é quanto maior o calor de vaporização, menor o volume do refrigerante. A pressão crítica do amoníaco é significativamente superior à dos outros refrigerantes, o que favorece a sua utilização em bombas de calor. Ao projetar sistemas de refrigeração, o ponto de ebulição deve ser superior ao ponto de ebulição de 1 atm (0,101 MPa), devido ao funcionamento do fluxo de operação do sistema de refrigeração. Operar o sistema em temperatura mais baixa permite que a pressão nos compressores e nos tubos do evaporador seja menor que a pressão atmosférica, o que favorece a entrada de ar no sistema. (JUNIOR, 1995).

Os pontos negativos da amônia anidra perante sua aplicação que tornam seu uso ainda questionável. Geralmente é adequado para aço, ferro e alumínio, mas não é recomendado para uso com cobre, zinco e suas ligas, borracha e plástico devido a esses materiais não serem resistente a corrosão por essa substância química. Além dos materiais limitados usados em equipamentos de amônia, este requer um processo de soldagem mais complexo. O R-717 torna-se explosivo e muito tóxico na concentração de 15-30%. (BRASIL, 2009).

Os maiores problemas com o uso de amônia são os grandes vazamentos, onde se, ocorrerem principalmente nas áreas de baixa pressão do sistema, é possível que seja porque a atenção está mais voltada para as áreas de alta pressão. Os vazamentos geralmente são causados por falha, junta ou material de embalagem instalado incorretamente, problemas de soldagem e danos físicos externos. Os derramamentos produzem vapor de amônia, que rapidamente se mistura com o ar e se desloca para as camadas superiores. MILANÉS (1997). Como resultado dos vazamentos, pessoas podem estar expostas à amônia em áreas próximas. A exposição aos vapores do R-717 pode causar os danos descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Danos causados pela exposição da amônia

Concentração de amônia no ar (ppm)	Efeitos sobre seres humanos desprotegidos	Tempo de exposição permitido sem dano
5	Em baixas temperaturas abaixo de 0°C, pessoas sensíveis poderiam sentir	Ilimitado
20	O cheiro é percebido pela maioria das pessoas	Ilimitado
50	O cheiro é característico e as pessoas não habituadas reagem	O permitido por norma na maioria dos países são 8 horas por dia
100	Não causa efeitos perigosos em pessoas saudáveis, mas pode causar ansiedade em pessoas inexperientes.	Não permanecer mais que o necessário.
300	Pessoas habituadas não suportam e pessoas não habituadas podem entrar em pânico.	Em circunstâncias normais de saúde não causa sérios problemas no período de uma hora.
400-700	Irritação imediata nos olhos, nariz e órgãos respiratórios. Pessoas acostumadas não podem permanecer.	Em circunstâncias normais de saúde não causa sérios problemas no período de um hora.
1700	Tosse, câibras e serias irritações no nariz, olhos e órgãos respiratórios.	Exposição de 30 min pode causar lesões sérias.
2000-5000	Tosse, câibras e sérias irritações no nariz, olhos e órgãos respiratórios.	Pode provocar a morte em 30 min ou menos.
7000	Paralisia e asfixia.	Letal em poucos minutos.

Fonte: Adaptado do MILANÉS (1997).

Em caso de derramamento, recomenda-se diluir completamente a amônia com água e depois escoar para a rede de esgoto. Em alguns projetos, os canais

de drenagem nas casas de máquinas são fechados para que não haja risco de exposição direta à amônia antes da diluição. STOECKER; JABARDO (2018).

4.2.1 Vasos de pressão

Os vasos de pressão devem ser projetados para as mais severas condições de pressão e temperatura que o equipamento irá operar durante sua vida útil. Essa condição sujeita as solicitações e condições operacionais únicas, como: Instalação; Operação normal; Desvios operacionais (previsíveis e inesperados); Descomissionamento. (Freitas, A.S.N,2017)

Para evitar fraudes decorrentes de tais situações e padronizar a construção desses dispositivos, foram estabelecidos padrões e documentados em normas e códigos. Sua função é principalmente garantir condições mínimas de segurança para operação. Conforme evidenciado por anos de acompanhamento, pode-se dizer que o projeto de vasos de pressão baseado em padrões reduz muito a possibilidade de avarias e acidentes.

Um padrão de projeto expressa um conjunto de suposições consistentes características desse padrão relacionadas a critérios de cálculo, fatores de segurança, padronização e especificações de materiais, detalhes de fabricação e teste, DONATO (2003). A ASME VIII (2010) exige que os vasos de pressão sejam projetados para suportar as seguintes cargas, quando aplicável:

- Pressão interna e/ou externa;
- Peso do recipiente e acessórios durante a operação ou teste de pressão hidrostática (incluindo pressão estática do líquido).
- Reação estática devido ao peso do equipamento acoplado ao vaso de pressão, como motores, maquinário e outras embarcações, tubulações, revestimentos e equipamentos de proteção.
- A parte interna do vaso e a parte externa, como os olhos, anéis e saia.
- Resposta cíclica e dinâmica a mudanças de pressão ou temperatura, equipamentos conectados ao vaso e cargas mecânicas.
- Vento, neve e respostas sísmicas.
- Reações de choque, como as causadas por choque líquido;
- Diferentes coeficientes de dilatação térmica dos materiais;
- Pressão anormal devido à deflagração.

O desenvolvimento de vasos de pressão requer um projeto baseado na análise de resistência estática e fadiga. A análise de resistência estrutural tem sua origem na resistência mecânica, definida como a capacidade de um material suportar uma carga especificada sem tensões excessivas. (BEER & JOHNSTON, 2012).

Com isso, entende-se que o projeto do vaso de pressão é uma análise de resistência estática e, adicionando padrões, tensões permitidas, equações e limites, podemos determinar a tensão que atua no vaso e compará-la com a tensão permitida sob condições de projeto.

4.3 Código ASME SECÇÃO VIII

A Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME) foi fundada em 1880. É uma organização profissional sem fins lucrativos que facilita a colaboração, o compartilhamento de conhecimento e o desenvolvimento de habilidades em todas as áreas da engenharia. Os códigos, padrões, publicações e conferências da ASME promovem educação continuada e programas de desenvolvimento profissional e fornecem uma base para o avanço do conhecimento técnico e um mundo mais seguro.

O Código ASME foi estabelecido em 1911, ainda como ASME Boiler Committee, quando a primeira edição do código foi publicada em 1914 -1915, exclusivamente para caldeiras estacionárias (Seção I). Em 1924, foi publicada a Seção VIII, que se refere aos vasos de pressão que não são suscetíveis à chama.

Até a década de 1960, apenas a espessura do equipamento era necessária para suportar a carga máxima, e o material era dúctil o suficiente para absorver tensões ocorridas em áreas com picos de tensão e descontinuidades geométricas, não havia risco iminente. Esta parte corresponde à Divisão I.

A primeira edição da Divisão II foi em 1968 e a última versão foi em 2013, segue a diferença entre os tipos de projetos:

Projeto por normativa:

Usa soluções analíticas estabelecidas para medir vasos com detalhes padrão da geometria do componente. Já ocorria em edições anteriores.

Projeto por análise:

Vaso de pressão e também inclui componentes com formas e gradientes não tradicionais. As dimensões dependem da análise e classificação das tensões atuantes e da comparação com as tolerâncias.

4.3.1 Norma ASME VIII DIVISÃO I

A Divisão I da ASME estabelece regras para determinar os principais componentes de vasos de pressão, cascos, tampas, redutores, flanges, bocais e reforços que estão sujeitos a pressão externa ou interna. Também fornece informações sobre outras cargas e armaduras que devem ser consideradas, mas não especifica a metodologia para fazê-lo, este passo é limitado a uma pressão interna máxima de 20,685 MPa, mínima de 0,103 MPa e pressão externa de 0,103 MPa.

A tensão primária da membrana normal à parede do vaso causada pela carga do vaso não deve exceder o valor especificado para a tensão admissível. Para tensões devido ao vento ou cargas sísmicas, a tensão admissível pode ser aumentada em 20%.

Essa divisão se resume às dimensões de pressão dos principais componentes. Nenhum método de análise computacional é apresentado para avaliar esses componentes, tensões resultantes e tensões locais. Para essas análises, baseasse em outras literaturas.

4.3.2 Norma ASME VIII DIVISÃO II

A Divisão II da ASME é uma alternativa à Divisão I porque aplica padrões e detalhes de projeto, fabricação, inspeção e testes mais rigorosos, tensões admissíveis mais altas e não limita as pressões de projeto. (ASME VIII div. 2, 2013).

Os critérios de projeto para vasos de pressão incluem classificações de tensão para as combinações de carga mais comuns, análise de fadiga para condições operacionais cíclicas e gradientes de temperatura e análise de tensão para descontinuidades geométricas.

4.4 Método de elementos finitos

O método dos elementos finitos usado como ferramenta de análise numérica é um meio eficaz de redução de custo e tempo, pois evita a

prototipagem e reduz o tempo gasto na análise experimental. Tem sido usado na análise estrutural porque é uma aproximação muito satisfatória do comportamento de uma estrutura ou contínuo. (Silva B.A, 2015)

Na engenharia, acredita-se que a aproximação dos modelos à realidade seja por elementos discretos e partes finitas de domínios contínuos ou elementos finitos. O termo foi mencionado pela primeira vez por Clough em 1960.

O método dos elementos finitos é um método auxiliado por computador que pode ser usado para analisar estrutura e continuidade. tem aplicações comuns na análise do comportamento estático, dinâmico e térmico de sistemas físicos e seus componentes. (Spirakos, 1996).

Na análise de elementos finitos, existem várias etapas nas quais o analista deve tomar decisões e são implementadas no método desenvolvido onde se encontra 7 passos:

- Modelo discretizado ou estrutural:
- Definição do elemento;
- Compile a matriz de rigidez do elemento.
- Aplicação de carga
- Definir condições de contorno
- Resolver sistemas lineares de equações algébricas.
- Resolução das tensões

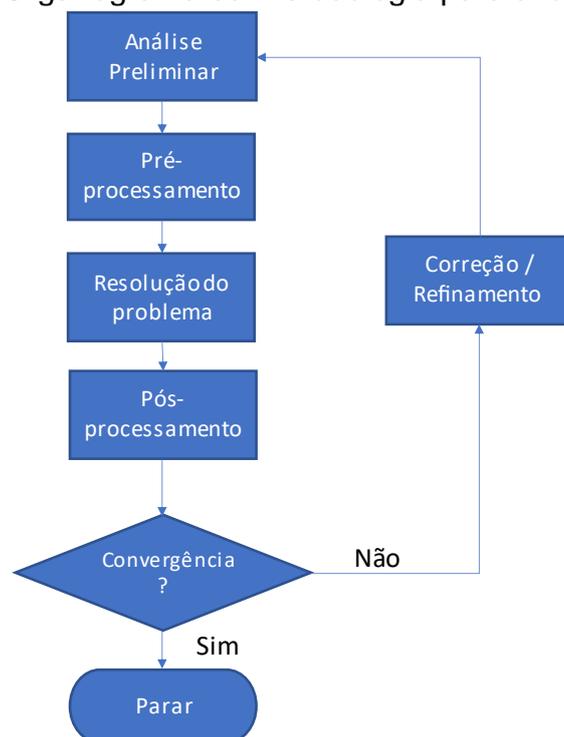
Usando uma metodologia diferente na mesma base, Kim e Sankar (2009) definiram o organograma ou árvore de eventos mostrado na Figura 5 como um procedimento na análise de elementos finitos, da seguinte forma: Análise preliminar, pré-processamento, resolução de problemas, pós- processamento, convergência, modificação/refinamento e conclusão. Durante cada uma das fases mencionadas, existem várias etapas e análises que os analistas devem realizar.

Além desses dois métodos, a ASME apresenta um capítulo sobre análise numérica incluindo método de elementos finitos (FEM) na Seção VIII, Seção II do Código (ASME VIII div.2, 2013)), que é recomendado para componentes com geometrias complexas. Abaixo está um breve resumo das etapas envolvidas na análise:

- **Análise preliminar:** Ele fornece uma visão geral e uma diretriz do problema na questão e fornece previsões do comportamento do modelo.
- **Pré-processamento:** Nesta hora prepara-se o modelo para análise. Isso inclui discretizar a estrutura em elementos, especificar as condições de contorno no deslocamento e as cargas aplicadas.
- **Resolução do problema:** Nesta etapa, uma matriz de elementos isolados e um vetor de forças nodais são montados para encontrar os valores dos graus de liberdade desconhecidos.
- **Pós-processamento:** Revisar os resultados da análise e usar ferramentas de pós-processamento para avaliar o desempenho estrutural.

Como você pode ver no fluxograma (Figura 2), este sistema é autossuficiente, então se após o término da análise os resultados não forem os esperados, ou seja, sem convergência, você pode voltar ao início, reavaliar os passos e fazer de novo.

Figura 2 - Organograma da metodologia para análise de MEF



Fonte: ADAPTADO DE NAN-HO KUM & BAHAVANI V.SANKAR(2009)

Os métodos apresentados por Spirakos (1996) e Kim (2011) correspondem ao que deve ser feito para a análise do método de elementos finitos e a regra ASME Divisão II para a análise de vasos projetados. Quanto às tensões, uma combinação delas é necessária para analisar os vasos de pressão.

As análises desenvolvidas nesse trabalho através de simulação computacional por elementos finitos foram efetuadas tendo em conta a hipótese de isotropia e homogeneidade do material no dispositivo desenvolvido. Isotrópico é um material que possui propriedades mecânicas constantes em todas as direções. No caso de um material homogêneo, deve-se entender que o material não apresenta descontinuidades ou defeitos internos.

Nesse trabalho será utilizado uma ferramenta de desenho CAD e em seguida a utilização de simulações CAE, para avaliar a estrutura do dispositivo, assim sendo possível analisar as tensões principais, tensão de Von Mises, deslocamento e fator de segurança.

4.5 Norma Regulamentadora nº 13 (NR 13)

A Norma regulamentadora nº 13 é uma norma regulamentadora nacional que visa normatizar o método de inspeção e análise de projetos de vasos de pressão em âmbito nacional. Utiliza como base para sua normatização as normas ASME VIII e a API (American Petroleum Institute).

Nesta norma é realizada a padronização do processo das categorias dos vasos de pressão, onde é levado em consideração dois parâmetros, esses são: fluido de trabalho e Potencial de risco.

Os fluidos de trabalho são classificados em 5 tipos, conforme descritos a seguir (trecho adaptado da norma):

- Classe A: - fluidos inflamáveis; - fluidos combustíveis com temperatura superior ou igual a 200 °C (duzentos graus Celsius); - fluidos tóxicos com limite de tolerância igual ou inferior a 20 ppm (vinte partes por milhão); - hidrogênio; - acetileno.
- Classe B: - fluidos combustíveis com temperatura inferior a 200 °C (duzentos graus Celsius); - fluidos tóxicos com limite de tolerância superior a 20 ppm (vinte partes por milhão).
- Classe C: - vapor de água, gases asfixiantes simples ou ar comprimido.
- Classe D: - outro fluido não enquadrado acima.

OBS.: Durante o manuseio da mistura, a classificação deve levar em consideração o líquido que apresenta maior risco aos trabalhadores e instalações, devido à sua toxicidade, inflamabilidade e concentração.

Já os vasos de pressão são classificados em grupos potencial de riscos, de acordo com o valor resultante da equação Pressão (MPa) x Volume (m³), ou seja, P.V. O Quociente desse valor é classificado em Grupo de Potencial de Risco de 1 à 5 (Figura 3).

- Figura 3 - Grupo de Potencial de Risco
- Grupo 1 - P.V ≥ 100
 - Grupo 2 - P.V < 100 e P.V ≥ 30
 - Grupo 3 - P.V < 30 e P.V ≥ 2,5
 - Grupo 4 - P.V < 2,5 e P.V ≥ 1
 - Grupo 5 - P.V < 1

Fonte: NR13 (2019).

Na Figura 4, os vasos de pressão são classificados de acordo com possíveis grupos de perigo e classes de líquidos contidos.

Figura 4 - Categoria de Risco de Vaso de Pressão
CATEGORIAS DE VASOS DE PRESSÃO

Classe de Fluido	Grupo de Potencial de Risco				
	1 P.V ≥ 100	2 P.V < 100 P.V ≥ 30	3 P.V < 30 P.V ≥ 2,5	4 P.V < 2,5 P.V ≥ 1	5 P.V < 1
Categorias					
A - Fluidos inflamáveis, e fluidos combustíveis com temperatura igual ou superior a 200 °C - Tóxico com limite de tolerância ≤ 20 ppm - Hidrogênio - Acetileno	I	I	II	III	III
B - Fluidos combustíveis com temperatura menor que 200 °C - Fluidos tóxicos com limite de tolerância > 20 ppm	I	II	III	IV	IV
C - Vapor de água - Gases asfixiantes simples - Ar comprimido	I	II	III	IV	V
D - Outro fluido	II	III	IV	V	V

Fonte: NR13 (2019).

Pode-se notar que a amônia é classificada como fluido classe A, portanto a menor categoria para vasos de pressão com esse fluido é III, pois para o grupo

5 de risco (o menor risco, P.V. abaixo de 1) a menor classificação de risco de acordo com NR 13. Conforme pode-se notar na Figura 7 (destacado).

A categoria do fluído determina o rigor e a periodicidade das inspeções que irão ser realizadas no vaso de pressão e como a empresa deve se portar mediante a tal risco.

As inspeções de segurança periódicas são determinadas de acordo com a categoria do vaso de pressão. Empresas geralmente não possuem SPIE (Serviços Próprio de Inspeção de Equipamentos), conforme determinado no ANEXO 2 desta norma, conforme mostrado na Figura 5 estão os prazos de inspeção.

Figura 5 - Quadro de periodicidade de exames internos e externos

Categoria do Vaso	Exame Externo	Exame Interno
I	1 ano	3 anos
II	2 anos	4 anos
III	3 anos	6 anos
IV	4 anos	8 anos
V	5 anos	10 anos

Fonte: NR 13 (2019).

Exame externo é a inspeção da superfície e componentes externos do dispositivo que podem ser feitos em uso para avaliar sua integridade estrutural. O exame externo mais comum aplicado é a medição de espessura de chapa com ultrassom, esse item é discutido na revisão bibliográfica deste documento.

Já o exame interno é inspeção visual da superfície interna e interior do dispositivo usando testes e ensaios apropriados para avaliar sua integridade estrutural. O exame interno mais comum aplicado é o teste hidrostático e avaliação visual do vaso, esse item também é discutido na revisão bibliográfica deste documento.

Além da inspeção inicial que é realizada quando o vaso de pressão é instalado, e as inspeções periódicas há as inspeções extraordinárias, que é um controle aplicável a vasos de pressão produzidos em sem seguir código de projeto atualizado (produtos que foram fabricados há mais de dez anos), que são casos muito específicos e isolados que não está dentro do escopo desse trabalho.

4.5.1 Teste hidrostático (TH)

Os Testes hidrostáticos definidos pela ASME são caracterizados como um teste de carga que exige que os vasos de pressão sejam submetidos a tensões maiores do que as condições de projeto, conduzidas usando pressão hidrostática, geralmente usando água como fluido de pressões operacionais ou de projeto, em geral, superiores a 1,5 vezes a pressão máxima de trabalho admissível (PMTA) (PEREIRA FILHO, 2004). Neste teste espera-se que os dispositivos mantenham sua integridade estrutural a essa alta pressão e que sejam capazes de realizar suas operações com segurança e em condições menos severas.

Os testes hidrostáticos são obrigatórios após a construção de vasos de pressão e também em equipamentos já em uso conforme exigido pela legislação de muitos países. Dessa forma, simula-se uma situação mais rigorosa, com o objetivo de assegurar que, em funcionamento normal, não haverá falhas ou vazamentos. O objetivo é identificar possíveis vazamentos, defeitos em soldas, roscas, partes mandriladas e outras ligações do vaso, bem como defeitos nas soldas. (PEREIRA FILHO, 2004).

Conforme detalhado por Pereira Filho (2004), para validação estrutural de um vaso de pressão é necessário a realização do teste hidrostático. Portanto neste trabalho será realizado o teste hidrostático no dispositivo que foi desenvolvido para assegurar critérios normativos da NR 13 e da ASME para constituição de um projeto. Uma vez que o dispositivo desenvolvido se enquadra como vaso de pressão e está sendo utilizado em um ambiente fabril.

Para realização do procedimento, será utilizada a norma N-2688 teste de pressão em vaso de pressão e caldeira. Essa norma defini o procedimento para realização adequada do teste hidrostático com a pressão em função do tempo de execução. (N-2688 Teste de Pressão em Serviço de Vasos de Pressão em Caldeira, 2014)

4.5.2 Teste de espessura de chapa

O ensaio por ultrassom é caracterizado por não causar danos ao material a ser ensaiado, ou seja, é uma técnica não destrutiva que utiliza um feixe sônico

de alta frequência no material, permitindo a detecção de falhas internas e superficiais. (SANTIN, 2003).

A grande utilização desta técnica em vasos de pressão se deve ao fato de dispensar o acesso à parede oposta do equipamento para sua execução. Aperfeiçoa a capacidade de execução do equipamento em operação, reduzindo a perda de produção decorrente das atividades de inspeção. Outros fatores relevantes são a simplicidade de execução, o treinamento de pessoal e a rapidez de execução. (SANTIN, 2003). Portanto esse método se torna amplamente utilizado para ensaio não destrutivos em vasos de pressão e um dos métodos mais utilizados para inspeção em vasos de pressão com amônia como fluido de trabalho.

O conceito de ultrassom, que faz parte da ideia de som, cujos princípios e conceitos básicos podem ser explicados pelo efeito piezoelétrico, sendo que o som é uma forma de energia que ocorre como resultado do aumento e diminuição periódica da densidade do ar, compressão, e uma raridade. (SANTIN, 2003).

Em 1880, Pierre Curie chegou à conclusão de que os cristais anisotrópicos são capazes de gerar cargas elétricas quando submetidos a deformação mecânica. Quando aplicada uma carga mecânica a duas superfícies opostas de uma placa de cristal de quartzo, cargas elétricas opostas se desenvolvem nessas superfícies. Quando uma voltagem é aplicada, o cristal se contrai ou expande, e quando uma voltagem alternada é aplicada, a superfície do cristal vibra para cima e para baixo em um ritmo constante, criando uma onda de ultrassom. (Ensaio por ultrassom, 2018)

Os ultrassons são ondas mecânicas imperceptíveis ao ser humano, pois possuem frequência superior a 16 kHz e se propagam por qualquer meio material em ciclos sucessivos de compressão e rarefação. (Biscegli, 2003)

O sinal ultrassônico não fica preso em obstáculos sólidos ou líquidos, permanece sob a influência das condições do processo e pode ser monitorado em tempo real e no ponto de uso. No entanto, o ultrassom deve ser calibrado para correlacionar o nível de atenuação acústica com as concentrações da fase dispersa. (Biscegli, 2003)

Um transdutor ultrassônico contém um ou mais elementos piezoelétricos que, sob a influência de um pulso de tensão elétrica, oscilam em suas

frequências ressonantes e emitem ultrassom. O elemento ativo do dispositivo sensor ultrassônico consiste em um disco cerâmico piezoelétrico, em cujas superfícies paralelas são colocados eletrodos metálicos, e quando o funciona como transmissor, transforma a excitação elétrica em um campo acústico, e quando funciona como receptor. ele converte a pressão ultrassônica em um sinal elétrico. (Biscegli, 2003)

Esse ensaio deve ser aplicado no dispositivo que será alocado as amostras antes de submeter a rede de refrigeração e após submetido a amônia afim de acompanhar a integridade física e verificar a taxa de perda de espessura como critério de segurança uma vez que é um equipamento que deve cumprir parâmetros normativos da NR 13 e da ASME, já que o mesmo se enquadra como vaso de pressão.

4.6 MATERIAIS UTILIZADOS NO VASO DE PRESSÃO

Os materiais utilizados no estudo proposto, foram retirados da ASME SEÇÃO VIII div. 1, onde determina a aplicabilidade do material de acordo com cada temperatura trabalho e o tipo de liga. (ASME VIII BPVC.DIV.1,2023)

Tabela 3 – Materiais aplicados a vasos de pressão de acordo com a ASME VIII div.1

Classe de material	Forma de apresentação	Especificação ASTM	Tensões admissíveis (Mpa) / Temperatura (°C)														
			-30 à 93	150	205	260	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	
Aço-carbono	Chapas	A-285-C	108,0	108,0	108,0	108,0	106,0	104,0	101,0	97,2	88,9	74,4	62,2	45,6			
	Tubos cond.	A-53-A	80,6	80,6	80,6	106,0	80,6	80,6	78,8	71,6	62,3	54,4	47,5	40,0			
	Tubos cond.	A-53-B	101,0	101,0	101,0	101,0	101,0	101,0	98,4	89,5	75,9	63,4	52,9	38,7			
	Tubos t.c.	A-179	92,3	92,3	92,3	92,3	91,8	90,4	87,5	83,8	73,3	63,4	55,8	47,3			
Aço-carbono Si	Forjados	A-181-60	92,3	92,3	92,3	92,3	91,8	90,4	87,5	83,8	73,3	63,4	55,8	47,3	33,7	22,0	
	Chapas	A-516-60	117,8	117,8	117,8	117,8	114,3	111,5	108,0	103,2	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0	
	Chapas	A-515-65	128,1	128,1	128,1	128,1	124,6	121,9	118,2	112,3	95,0	78,5	62,2	45,6	32,3	22,0	
	Chapas	A-515-70	137,7	137,7	137,7	137,7	134,8	132,2	128,3	121,5	101,2	82,6	67,0	50,8	34,2	22,0	
Para altas temperaturas	Tubos cond.	A-106-A	94,4	94,4	94,4	94,4	94,4	94,4	92,4	84,4	73,3	64,0	56,0	47,3	36,0	23,6	
	Tubos cond.	A-106-B	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	115,3	104,9	88,9	74,4	62,2	47,3	36,0	23,6	
	Forjados	A-210-AI	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	115,3	104,9	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0	
	Fundidos	A105	137,7	137,7	137,7	137,7	129,0	125,3	121,6	116,1	101,2	82,6	67,0	50,8	34,2	22,0	
Aço-carbono Si para baixas temperaturas	Chapas	A-216-WCI	137,7	137,7	137,7	137,7	129,0	125,3	121,6	116,1	101,2	82,6	67,0	50,8	34,2	22,0	
	Chapas	A-516-60	117,8	117,8	117,8	117,8	114,5	111,5	108,0	103,2	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0	
	Chapas	A-516-65	128,1	128,1	128,1	128,1	124,6	121,9	118,2	112,3	95,0	78,5	62,2	45,6	32,3	22,0	
	Chapas	A-516-70	137,7	137,7	137,7	137,7	134,8	132,2	128,3	121,5	101,2	82,6	67,0	50,8	34,2	22,0	
Para altas temperaturas	Tubos cond.	A-333-6	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	115,3	104,9	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0	
	Tubos t.c.	A-334-6	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	115,3	104,9	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0
	Forjados	A-350-LF1	117,8	117,8	117,8	117,3	107,3	104,2	101,1	97,2	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0	
	Forjados	A-350-LF2	137,7	137,7	135,5	135,0	129,0	125,3	121,6	116,1	101,2	82,6	67,0	50,8	34,2	22,0	
Aço-liga ½ Mo	Forjados	A-352-LCB	128,1	128,1	128,1	128,1	124,6	121,9									
	Chapas	A-204-A	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,0	126,7	123,8	101,9	70,1	43,8	
	Chapas	A-204-B	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	133,6	104,4	70,1	43,8	
	Tubos cond.	A-335-PI	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	107,8	105,9	102,6	100,3	95,8	70,1	43,8	
Para altas temperaturas	Tubos t.c.	A-209-Ti	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	107,8	105,9	102,6	100,3	95,8	70,1	43,8	
	Forjados	A-182-FI	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,1	133,6	104,4	70,1	43,8	
	Forjados	A-217-WCI	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,8	126,2	123,1	119,8	116,9	100,1	70,1	43,8	

Fonte: Adaptado pelo autor ASME VIII (2010)

O outro aspecto levado em consideração foi os principais fabricantes nacionais de vasos de pressão e verificado os materiais mais utilizados. Para vasos de pressão de amônia o aço carbono A-516-70 e o Aço Inoxidável AISI 304 são os mais utilizados.

Para realização de revestimento para maior durabilidade do material o metal amplamente utilizado na indústria e que possui boa compatibilidade com

o aço carbono é o zinco. Esse metal é muito utilizado na indústria de refrigeração. Para melhor avaliação do material de forma isolada, a amostra utilizada será de zinco puro.

Portanto com as considerações destacadas nos itens anteriores foram determinados os três materiais utilizados. Que serão detalhados nos tópicos a seguir.

4.6.1 AÇO CARBONO A-516-70

O aço A516 Gr. 70 deve ser classificado e atender aos requisitos de tamanho de grão fino austenítico. As propriedades mecânicas, como resistência à tração, resistência ao escoamento e alongamento, são determinadas usando o teste de tração do aço ASTM A516. (Araújo, 2012). Na tabela 4 está o detalhamento da composição química do material.

Tabela 4 – Propriedade química do A-516-70

Elementos	Percentual (%)
Cr	-
Ni	-
Mo	-
Mn	0,33
Si	-
Fe	Balance
Zn	-

Fonte: Adaptado de Tenax (2018).

O aço ASTM-A-516 Grau 70 apresenta qualidades excelentes em termos de resistência à tração e tenacidade, sendo aconselhável para uso em temperaturas elevadas e baixas. O aço ASTM-A-516 Grau 70 é adequado para a fabricação de diversos tipos de equipamentos, incluindo os vasos de pressão, que são amplamente empregados em diversas áreas da indústria. (Araújo, 2012)

Portanto devido esse material ser amplamente utilizado na indústria para vasos de pressão com baixa temperatura e alta pressão, ele será objeto de estudo das amostras deste trabalho.

4.6.2 AÇO INOXIDAVEL AISI 304

O aço AISI 304 é o aço inoxidável mais utilizado no mundo. O material tem composição de 0,1% Cu, 0,14% Co, 0,44% Si, 1,18% Mn, 8,37% Ni, 18,57% Cr e o restante sendo Fe, conforme detalhado na Tabela 5. (WEN-JU CHOU, 2003).

Tabela 5 – Propriedade química do AISI 304

Elementos	Percentual
Cr	18,57
Ni	8,37
Mo	0,03
Mn	1,18
Si	0,44
Cu	0,1
Co	0,14
Fe	Balance

Fonte: Adaptado de WEN-JU CHOU, 2003

Essa combinação de elementos essenciais em aços inoxidáveis é classificada como o sistema austenítico mais amplamente aplicável no mundo. O Brasil consome mais de 350 mil toneladas de aço inoxidável anualmente, mas o consumo per capita é de apenas 1,72 kg/ano/habitante (ABINOX, 2018). Em comparação com a Europa, esse consumo é 8 a 10 vezes menor. Cerca de 60% deste é feito de aço AISI 304, que é utilizado em diversas aplicações. As principais características do aço AISI 304 são:

- Alta resistência à corrosão em meios muito agressivos
- Boa resistência a temperaturas altas e criogênicas
- Superfície altamente polida
- Vida útil muito longa e baixos custos de manutenção
- Ideal para ambientes onde é necessária higiene e limpeza
- Boa relação custo-eficácia a longo prazo

Esse material é amplamente utilizado em sistema de refrigeração por amônia principalmente em indústrias alimentícias devido a sua resistência a corrosão e normas técnicas da vigilância sanitária que solicita a aplicação de material inoxidável em indústrias alimentícias, farmacêuticas e etc. (Cunjian Miao, 2012)

4.6.3 ZINCO

O aço carbono A-516-70 ele é um aço carbono com propriedades mecânicas específicas altamente utilizado para fabricação de vasos de pressão, conforme descrito no item 4.7.1. Quando é realizado o banho com outra liga no material, a finalidade é para realizar a melhoria das propriedades do material, portanto nesse trabalho foi utilizado o zinco pois ele está entre os materiais mais

utilizados na indústria de refrigeração para revestimento. A seguir será detalhado os benefícios do banho de zinco. (Cavalcante, 2010)

Os banhos de galvanização consistem no processo tradicional de proteção de peças de aço por imersão a quente. Também comumente conhecido como galvanização por imersão a quente. No geral é um processo químico no qual as peças e superfícies de aço são cobertas com zinco para evitar o contato entre o metal base e o ambiente corrosivo. (Hamid, 2016)

O banho de zinco é um processo altamente versátil no mercado industrial e pode oferecer muitas vantagens técnicas e econômicas. Em comparação com outros processos de revestimento de superfície, a galvanização é uma opção econômica tanto a curto quanto a longo prazo. (Cavalcante, 2010)

Os banhos de zinco são considerados o método de galvanização mais adequado para peças de aço carbono devido às suas propriedades técnicas. O zinco é mais anódico que o ferro, por isso corrói, criando uma proteção catódica que pode proteger as peças por décadas em ambientes extremos. (HAMID, 2016)

De acordo com a ASME VIII div.1 (2023) no item UG-26 direcionado à revestimento determina que os revestimentos fixados ou não à parede de um vaso de pressão, não devem ser considerados como contribuindo para a resistência da parede. Portanto, devido a tal afirmação nesse trabalho foi utilizado uma amostra de zinco puro, afim de analisar o seu comportamento a corrosão uma vez que o revestimento não é utilizado para contribuir com resistência da parede do vaso.

4.7 Nota técnica nº 03/2004: refrigeração industrial por amônia: riscos, segurança e auditoria fiscal. – Brasília: MTE, SIT, DSST, 2005

Em 2005 foi publicada a nota técnica nº 03/2004 pelo ministério do trabalho. Esta NT foi elaborada pelo ministério do trabalho em conjunto com os Auditores Fiscais do Trabalho do Grupo de Estudos Tripartite da Convenção nº 174 da OIT – Prevenção de Grandes Acidentes Industriais – e da Delegacia Regional do Trabalho do Rio Grande do Norte, que refere sobre os Sistemas de Refrigeração Industrial por Amônia, enfatizando sobre os aspectos relacionados à segurança e à saúde no trabalho e à auditoria fiscal. (Nota técnica 03/2006: refrigeração por amônia, 2004)

Conforme relata nesta nota técnica, o Brasil carece de normas legais e técnicas específicas para refrigeração por amônia, assim destacando as Normas Regulamentadoras, especialmente a NR 13. Com isso as principais referências normativas de apoio são normas internacionais, destacando as normas do Instituto Nacional de Normas Técnicas dos EUA (ANSI), sobressaindo a ANSI/ASHRAE 15-1978 (ANSI/ASHRAE, 1978) e a ANSI/IIAR 2-1984 (ANSI/IIAR, 1984). Salientando assim a relevância dessa nota técnica para orientação profissional do ministério do trabalho para trabalhos com refrigeração industrial por amônia.

Esta iniciativa de realizar o estudo, foi gerada após um acidente grave ocorrido em Natal, no Rio Grande do Norte, quando houve um vazamento de NH₃ em uma empresa de beneficiamento de camarão, afetando diretamente 127 trabalhadores, dos quais dois faleceram. Essa situação destacou a alta probabilidade de ocorrerem outros acidentes graves semelhantes, devido à vasta aplicação dos sistemas de refrigeração por amônia, principalmente na indústria alimentícia, em decorrência das condições precárias de instalação e manutenção desses sistemas em muitas empresas e a falta de preparo para trabalhar com esse tipo de fluido. (Nota técnica 03/2006: refrigeração por amônia, 2004)

4.7.1 Descrição do Acidente

O sistema de refrigeração estava em pleno funcionamento quando a tampa de um dos compressores rompeu inesperadamente, resultando na liberação sob pressão da amônia liquefeita. Depois que cerca de 40 Kg de amônia refrigerante vazaram, o operador do sistema interveio, fechando a válvula principal e contendo o agente no tanque de armazenamento principal.

A amônia foi liberada na forma de aerosol, agindo como um gás pesado, e se espalhou da casa de máquinas para o piso inferior através de uma grande abertura de ventilação. Isso resultou na formação de uma nuvem que se espalhou pelo pátio dos caminhões, entre as saídas do salão de beneficiamento e o portão principal.

Todos os cantos do estabelecimento foram preenchidos pelo gás, com destaque para o salão de produção, onde alcançou os trabalhadores ocupados em suas tarefas habituais.

Os trabalhadores buscaram opções de fuga em meio ao pânico (Figura 6), no entanto encontraram vários obstáculos, como porta obstruídas, equipamentos no corredor de passagem e etc. Assim dificultando a fuga e aumentando o tempo de exposição.

Figura 6 - Fuga de funcionários devido a amônia no acidente ocorrido no Rio Grande do Norte por vazamento de amônia anidra.



Fonte: Nota técnica 03/2006: refrigeração por amônia (2006)

Devido à exposição prolongada à amônia, ocorreram dois óbitos e 127 pessoas ficaram feridas. Dentre as vítimas, 18 foram afastadas por mais de 15 dias, 67 ficaram afastadas por 15 dias ou menos e 42 não se afastaram do trabalho (Figura 7). A fragilidade e o despreparo técnico dos serviços de saúde para lidar com esse tipo de acidente foram evidenciados, apesar do extremo esforço dos profissionais no atendimento às vítimas.

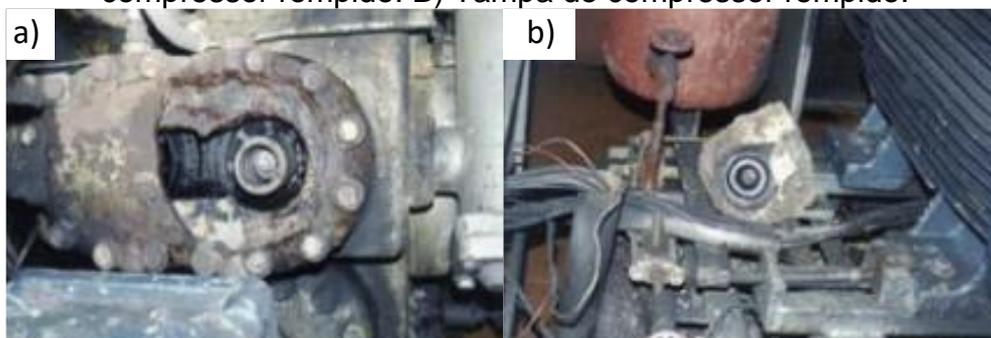
Figura 7 - Atendimento médico com trabalhadores contaminados no acidente ocorrido no Rio Grande do Norte por vazamento de amônia anidra.



Fonte: Nota técnica 03/2006: refrigeração por amônia (2006)

O rompimento da tampa do cabeçote do compressor, mostrava um alto grau de corrosão interna, portanto sendo a causa direta do acidente. (Figura 8)

Figura 8 – Cabeçote do compressor de amônia a) Parte do cabeçote do compressor rompido. B) Tampa do compressor rompido.



Fonte: Nota técnica 03/2006: refrigeração por amônia 2006

Como consequência do ocorrido e após inspeção do ministério do trabalho, o estabelecimento foi imediatamente interditado, assim sofrendo uma

sanção, em decorrência que a empresa exporta 100 % da sua produção, e durante a interdição foi impedida de realizar suas atividades produtivas. Uma semana após o incidente, a liberação do local foi condicionada à avaliação técnica do sistema de refrigeração por um profissional legalmente habilitado, de acordo com a norma da NR-13, para garantir a integridade dos compressores e sua capacidade de funcionamento adequada.

Em seguida foi lavrado autos de infração nos pontos constatados de maior gravidade segundo as normas regulamentadoras, como: Manter a porta fechada durante expediente normal, por não contemplar no PPRA os riscos inerentes a amônia e etc.

Outros itens também foram objeto de notificação, como: treinamento de funcionário, instalação de exaustores em casa de máquina; implantação de programa de manutenção preventiva e etc.

Em virtude da gravidade dos fatos a Delegacia Regional do Trabalho do Estado do Rio Grande do Norte – DRT/RN realizou uma convocação para uma reunião com as empresas da região que possuem sistema de refrigeração por amônia, para dissertar sobre o acidente ocorrido, e ao final da qual foram coletivamente e formalmente notificadas em relação ao cumprimento das normas regulamentadoras e foi entregue uma lista específica de itens para ser cumpridos enfatizando alguns pontos normativos que devem ser cumpridos com maior criticidade.

Vale ressaltar que várias medidas técnicas foram realizadas e solicitadas a adequação na empresa que ocorreu o acidente. Porém nota-se que apesar de algumas serem direcionadas a manutenção do compressor, melhorias do sistema de segurança de refrigeração e inspeção, não foi possível identificar nenhuma medida diretamente relacionado a causa raiz do acidente de acordo com o que foi constatado que foi: a corrosão no sistema de refrigeração. Isto está diretamente relacionado a falta de normas técnicas no Brasil sobre o assunto e falta de informação nacional sobre o tema.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais

As preparações de amostras foram realizadas nos laboratórios da Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda da Universidade Federal Fluminense e em seguida foi realizado a pesquisa em campo em uma indústria alimentícia na cidade de Paraíba do Sul.

Os metais que foram empregados para análise da amostra são: aço carbono A-516-70, aço inoxidável AISI 304 e o zinco.

O aço inoxidável AISI 304 também foi utilizado para construção do dispositivo para análise de corrosão.

O aço carbono A-516-70 é diferenciado dos aços SAE 1020 e outros por possuir propriedades mecânicas bem delimitadas. Isso permite que este aço seja utilizado em projetos de responsabilidade. Ele possui 0,26% de carbono e um limite de escoamento de 200 MPa.

O aço inoxidável AISI 304 é o tipo mais versátil de aço inoxidável e, portanto, é amplamente utilizado. Sua composição geralmente contém cerca de 18% de cromo e 8% de níquel

A última amostra é o zinco que é utilizado para aumentar a resistência à corrosão do material e esse processo é amplamente utilizado nos aços em tubulações de vaso de pressão.

A tabela 6 descreve a composição química geral dos materiais estudados.

Tabela 6 – Composições químicas dos materiais estudados.

Material	Elemento (% wt)					
	Cr	Ni	Mn	Cu	Fe	Zn
A-516-70	-	-	0,33	-	Balanço	-
AISI 304	18,7	8,0	1,4	0,09	Balanço	-
Zinco				<0,01	0,03	Balanço

Fonte: Adaptado pelo autor de Araújo (2012) e D.A. Jones (1977).

Os respectivos materiais foram submergidos na amônia anidra (NH₃) com temperatura de -33 °C e uma pressão de trabalho de 14 bar. A figura 9, detalha a composição química da amônia anidra do sistema de refrigeração.

Figura 9 - Quadro de descrição da amônia anidra

Ponto de Ebulição: 33,35°C	Peso Molecular: 17 g/mol
Ponto de Fusão: 77,7°C	Densidade 20°C: 0,682 g/cm ³
Aparência e Odor: Gás comprimido liquefeito, incolor, com odor característico	
Ponto de fulgor: Gás na temperatura ambiente	Temperatura Auto-Ignicão: 651°C
LIE: 16% (Limite Inferior de Explosividade)	LSE: 25% (Limite Superior de Explosividade)
Limite de Tolerância (NR-15, Anexo 11): 20 ppm ou 14 mg/m ³	IPVS: 300 ppm (Atmosfera imediatamente perigosa à vida e à saúde)
OSHA: 15min STEL: 35 ppm, 24 mg/m ³	ACGIH/TWA: 25 ppm, 17 mg/m ³
NIOSHI: 5 mg: 50 ppm, 35 mg/m ³	
Solubilidade em água: Alta – 1 vol. de água dissolve 1.300 volumes do gás	
Absorção de calor: Alta - 1,1007 cal/g°C (H ₂ O: 1cal/g°C)	

Fonte: Nota técnica 03/2006: refrigeração por amônia 2006

5.2 Métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho foi construído um dispositivo que foi acoplado em uma linha de alta pressão com amônia anidra. Esse dispositivo não possui no mercado e foi utilizado materiais comerciais para o desenvolvimento e projeto do produto. Foi utilizado o software Autodesk inventor 2018 para realização dos desenhos e simulações CAE.

Após a fase de desenvolvimento e projeto o dispositivo foi submetido a testes de validação e em seguida o equipamento foi instalado em uma empresa alimentícia de refrigerante e as amostras dos materiais ficaram alojada na parte interna desse dispositivo sendo submetida a alta pressão (14 Bar) sob amônia (NH₃) no estado líquido, na temperatura de -33 °C.

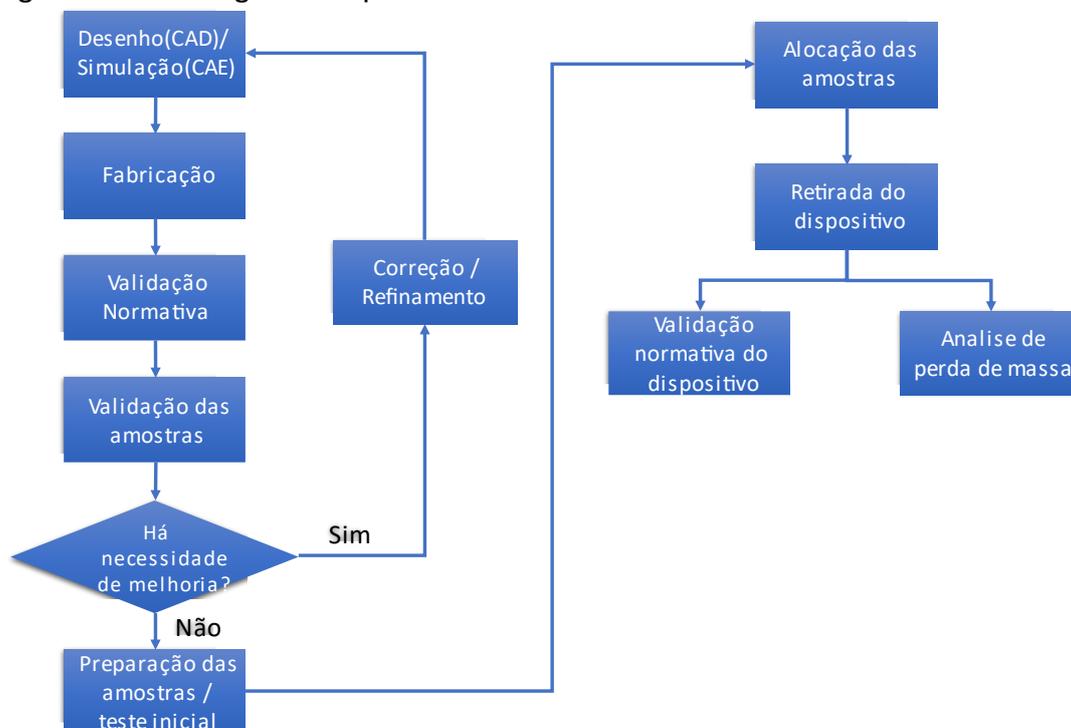
Após o teste do equipamento inicial foi necessário fazer algumas alterações no dispositivo inicial e novamente sendo necessário a realização das validações das alterações realizadas.

Com o equipamento validado e com as modificações necessárias realizadas, as amostras foram alocadas durante um período de um mês sendo submetidas antes e após o período a teste de espessura de chapa por ultrassom, medição das dimensões e pesagem.

Com os dados compilados foi realizado a análise do comportamento dos materiais e a comparação da corrosão desses materiais.

O fluxo de trabalho para realização do dispositivo foi: Desenvolvimento, Validação normativa, Validação em campo e Amostras. Sendo as três primeiras etapas diretamente relacionada ao desenvolvimento e projeto do dispositivo. (Figura 10)

Figura 10 - Fluxograma representativo das atividades a serem desenvolvidas

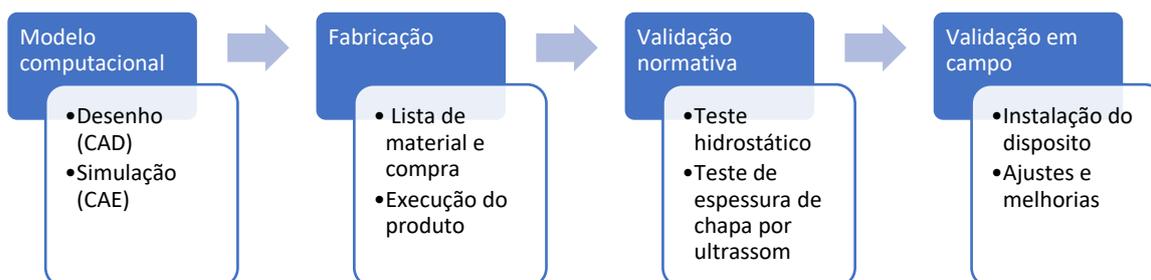


Fonte: Autor (2024).

5.2.1 Dispositivo

Para realização do trabalho, foi desenvolvido um dispositivo que seja capaz de suportar altas pressões e baixas temperaturas e que fosse capaz de alocar amostras no seu interior. As etapas para o desenvolvimento desse equipamento consistiam de modelagem computacional, fabricação, validação normativa e validação em campo, conforme detalhado na Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma representativo das etapas de desenvolvimento do dispositivo



Fonte: Autor (2024)

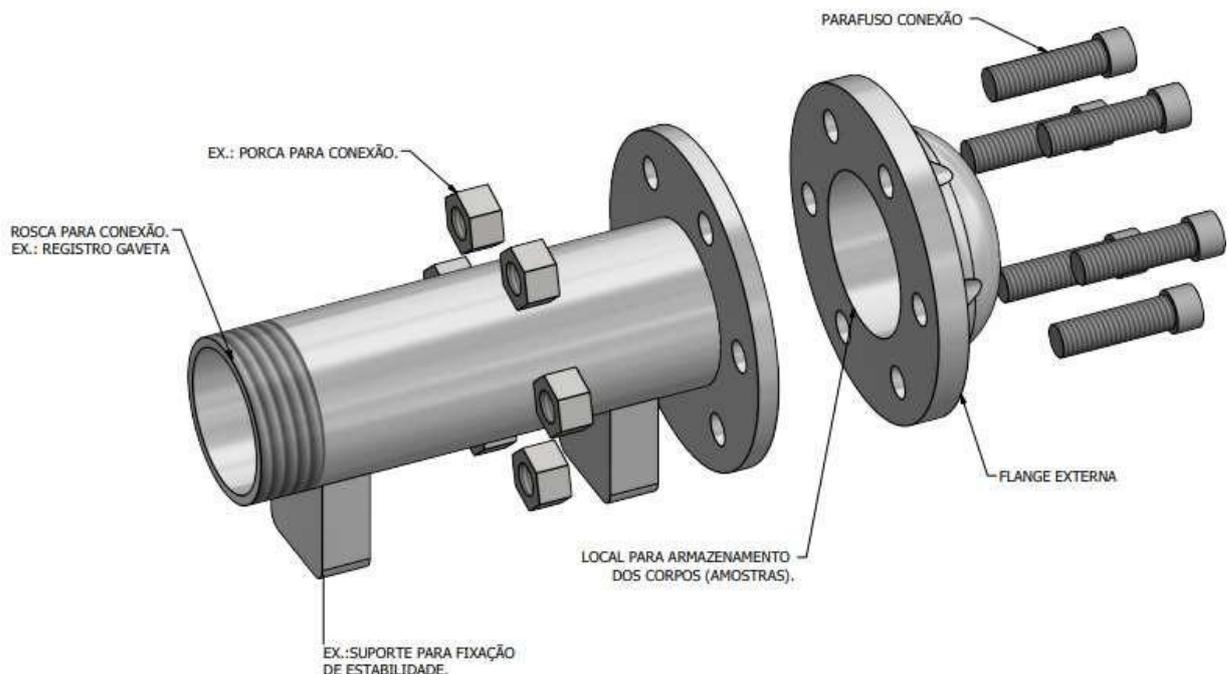
5.2.1.1 Modelo computacional

Para realização desse trabalho foi projetado um dispositivo para ser acoplado em uma rede de refrigeração por amônia anidra, com alta pressão e baixa temperatura. Portanto, esse dispositivo seguiu as diretrizes de projeto determinada pela ASME VIII divisão I e II.

Esse dispositivo não possui no mercado e foi utilizado componentes comerciais para o projeto do produto e o material para fabricação foi selecionado o aço inox AISI 304 devido a sua resistência a corrosão por amônia anidra. O software utilizado foi o inventor 2018 para realização dos desenhos em CAD e simulações CAE.

Portanto o dispositivo é constituído por um conjunto mecânico. O corpo do dispositivo é feito de um tubo AISI 304L em uma extremidade o tubo possui uma rosca para ser conectada em uma válvula registro (conforme será detalhado mais a frente nesse subitem), do outro lado possui uma flange vazada que está soldada no tubo. A flange vazada é um subconjunto onde é conectado uma flange externa. A flange cega possui a finalidade alojar três amostras de: A-516-70, AISI 304 e Zinco puro (Tabela 6). Essas amostras foram parafusadas na flange cega para não permitir deslocamentos abruptos em nenhuma sentido e sofrer pressão axial sobre a face da amostra. Conforme detalhado na Figura 12.

Figura 12 – Vista explodida do dispositivo

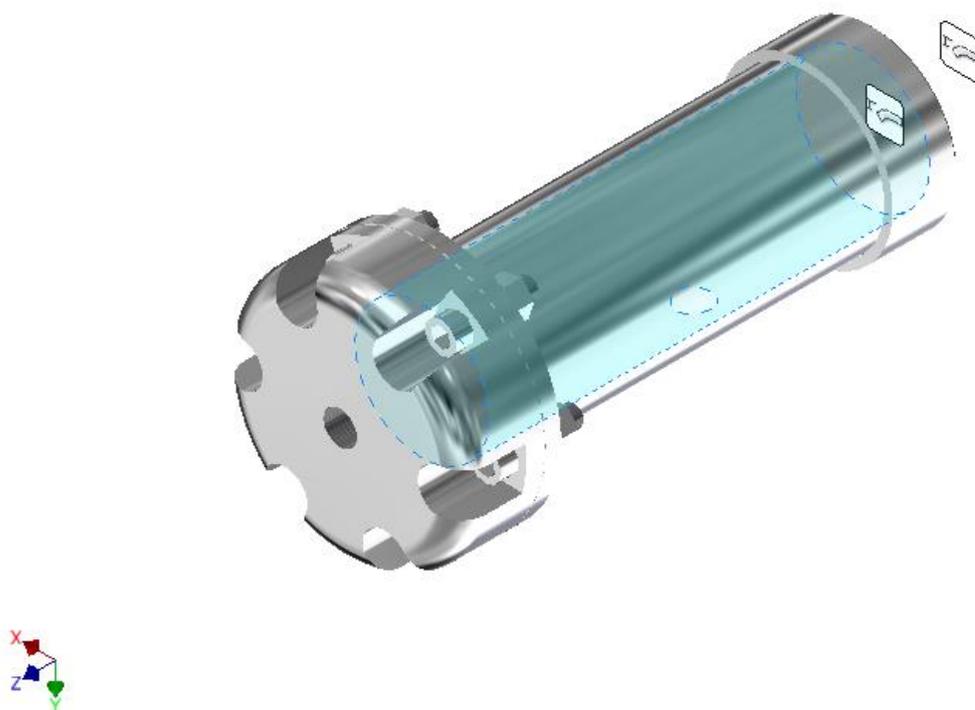


Fonte: Autor (2024)

A simulação foram realizada a aplicação das condições de contorno, na flange da tubulação onde o dispositivo será conectado, pois é o ponto de fixação do dispositivo. As cargas foram aplicadas internamente de acordo com os parâmetros do sistema que estava sendo acoplado, portanto a pressão PMTA de 1,4 MPa (14 Bar) e com a PTH 2,1 MPa (21 Bar), conforme determinado em cálculo de projeto. Os dados apresentados no trabalho foram das tensões para 2,1 MPa devido ser a pressão mais severa nesse processo. O material utilizado no dispositivo é o aço inoxidável AISI 304L.

Para realização das simulações foram removidos os componentes do dispositivo, como: registro esférico, conexões e etc. Assim simplificando o dispositivo afim de analisar a integridade estrutural do corpo e das paredes onde receberão maior carga. Conforme detalhado na Figura 13.

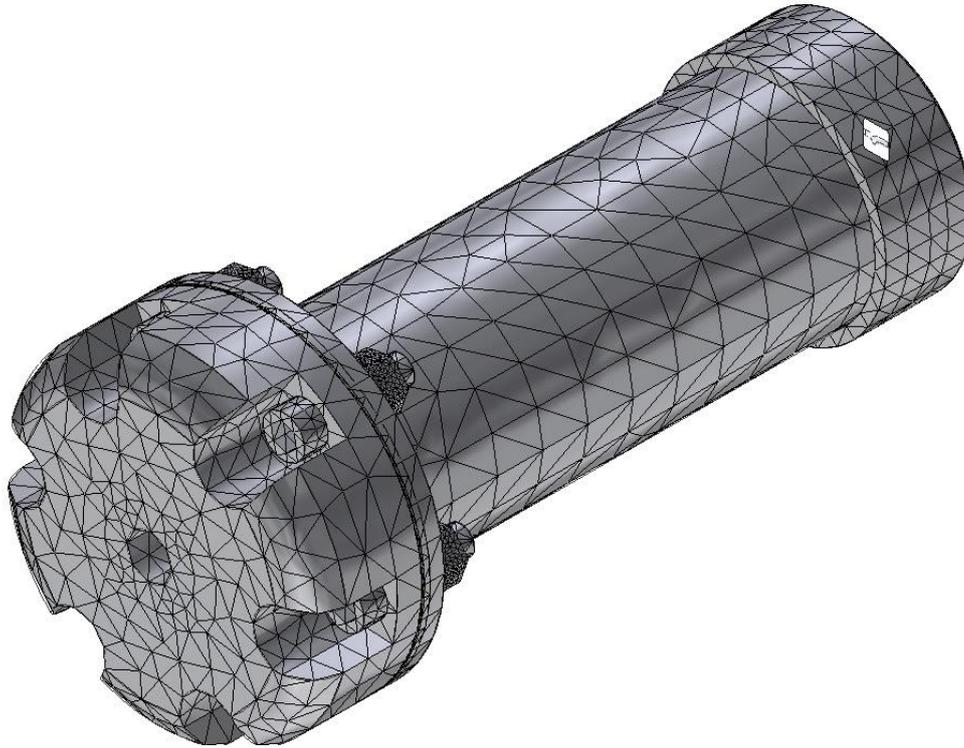
Figura 13 – Condições de contorno de fixação do dispositivo



Fonte: Autor (2024)

A malha utilizada foi tetraédrica (Figura 14), com tamanho médio dos elementos de 0,1 e tamanho mínimo de 0,2, com fator de nivelamento de 1,5. O número de nós do dispositivo é de 246016 unidades e 141765 elementos.

Figura 14 – Malha tetraédrico do dispositivo



Fonte: Autor (2024)

Os parâmetros gerais utilizados para realização das simulações no dispositivo estão detalhados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros gerais do material e propriedades mecânicas.

Descrição	Valor/Referência
Resistência à escoamento	215 MPa
Resistência máxima à tração	505 MPa
Módulo de Young	195 GPa
Coefficiente de Poisson	0,29
Módulo cortante	75,58 GPa
Pressão aplicada	2,1 MPa
Nós	246016
Elementos	141765
Tipo de malha	Tetragonal
Fixação	Extremidade de fixação

Fonte: Autor (2024)

As tensões de referência utilizado, são de acordo com o determinado na norma, portanto o valor de referência é de 2/7 do limite de ruptura do material de acordo com a ASME VIII div.I e 1/3 do limite de ruptura do material de acordo

com a ASME VIII div.II. Portanto os valores de referência para análise estão detalhados na Tabela 8. Pode-se notar que os critérios adotados pela ASME VIII div. 1 são mais rígidos que os levados em consideração pela ASME VIII div.2. Vale ressaltar que as normas se diferem em aplicação de acordo com: componentes, material, aplicação e etc. (TELLES, 1991).

Tabela 8 – Parâmetros gerais do matérias e propriedades mecânicas.

Tensão ruptura	Tensão ASME VIII div.1	Tensão ASME VIII div.2
505 MPa	144,29 MPa	168,33 MPa

Fonte: Autor (2024)

5.2.1.2 Fabricação do dispositivo e melhoria

Com as simulações computacionais por método de elementos finitos realizadas e validadas dentro dos parâmetros normativos da ASME VII div.1, foi dado início a fabricação e validação do dispositivo.

O processo de fabricação foi realizado por máquinas de usinagem de alta precisão, sendo a flange realizado por fresa, o corpo (tubulação) e a tampa cega por CNC. A tampa foi composta por tampa cega e uma flange sendo as mesmas soldadas pelo processo de soldagem TIG.

Figura 15 – Fabricação da flange na fresa



Fonte: Autor (2024)

Após todo o processo de fabricação finalizado o equipamento ficou conforme Figura 16.

Figura 16 – Produto fabricado a) Vista do corpo com a flange. b) Vista superior do dispositivo. c) Vista do dispositivo e a extremidade de fixação. d) Vista do dispositivo com todos os componentes.



Fonte: Autor (2024)

Durante o processo de desenvolvimento do produto foi realizado a fabricação do produto inicial e após o mesmo ser acoplado e testado foi necessário realizar a ajuste no equipamento.

Vale ressaltar que após a fabricação e a melhoria o equipamento passou pela validação normativa.

5.2.1.3 Validação normativa

Para validação do dispositivo foi realizado o teste hidrostático do equipamento e teste de espessura de chapa conforme determinado pela norma ASME VIII divisão 1 e 2, NR 13 e N-2668. Portanto esses testes foram realizados três vezes, sendo: Após a conclusão do projeto inicial; Após as melhorias que o equipamento sofreu; E após a retirada do equipamento em um mês de exposição

na amônia. No entanto nesse trabalho será detalhado os resultados das etapas antes e após do equipamento submetido a amônia no período de um mês.

5.2.1.3.1 Teste hidrostático

Para validação estrutural do dispositivo foi realizado o teste hidrostático, pelo equipamento SUPER-EGO TP25, com o manômetro de teste calibrado conforme certificado.

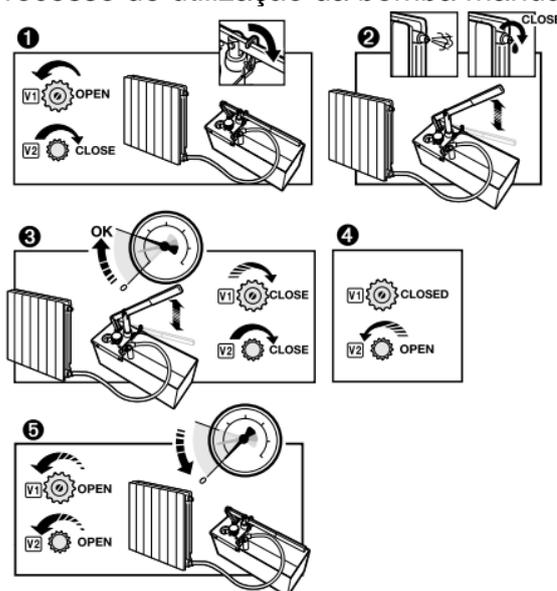
Figura 17 – Bomba manual de teste hidrostático



Fonte: Super-Ego TP 25

Para realização do processo hidrostático é necessário que o sistema seja conectado a entrada principal e um ponto de saída permaneça aberto. Em seguida é realizado o fechamento da válvula V2 e abertura da válvula V1 . Após a válvula V1 está aberta é necessário fazer a pressurização manual do sistema, quando começar a sair o fluido pela saída do sistema que está sendo pressurizado é necessário realizar o fechamento do mesmo. (Figura 18)

Figura 18 – Processo de utilização da bomba manual de teste hidrostático



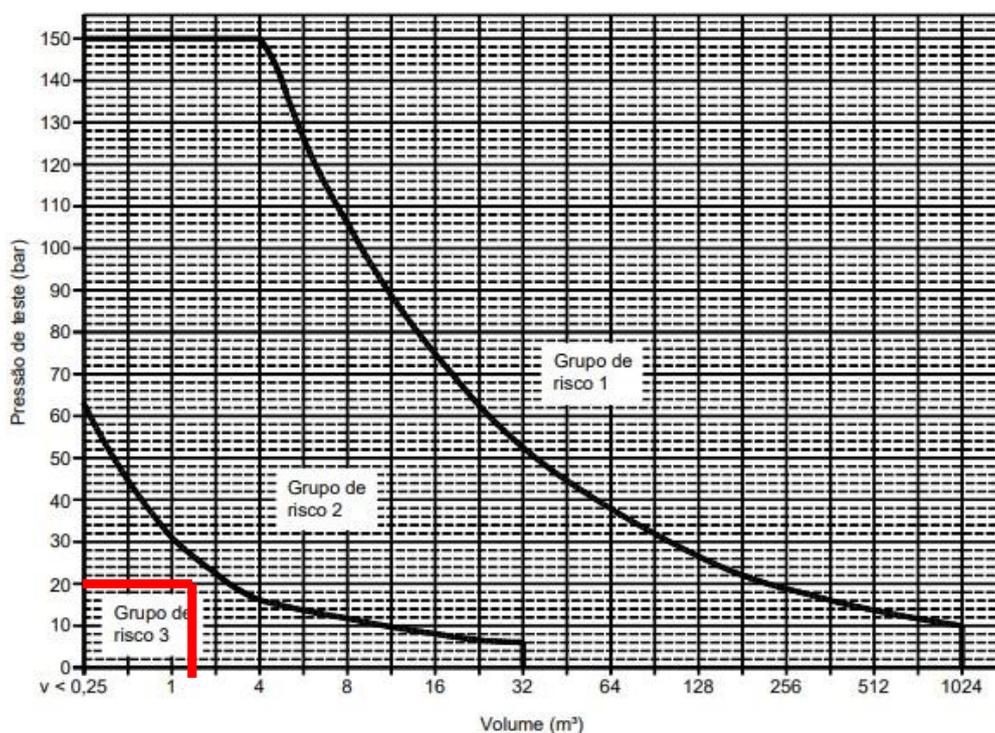
Fonte: Super-Ego TP 25

De acordo com a N-2688 os parâmetros de entrada para classificação do grupo de risco do dispositivo é pressão do teste hidrostático (PTH em BAR) e o volume (m^3), portanto esses dois dados foram definidos no projeto de acordo com os parâmetros de entrada definido após o desenho conceitual e o valor definido no projeto, sendo:

- Pressão de Teste hidrostático (PTH): 21 bar
- Volume interno do dispositivo: 1,195 m^3 .

Portanto o grupo de risco com os respectivos parâmetros foi definido como grupo 3, conforme destacado nas linhas vermelhas no gráfico a seguir, sendo sinalizado no e Volume (eixo x) e pressão em Bar (eixo y) (Figura 19)

Figura 19 – Gráfico do grupo de risco de acordo com a normativa IN-2688.



Fonte: Adaptado de IN-2688, teste de pressão em vaso de pressão e caldeira (Petrobras).

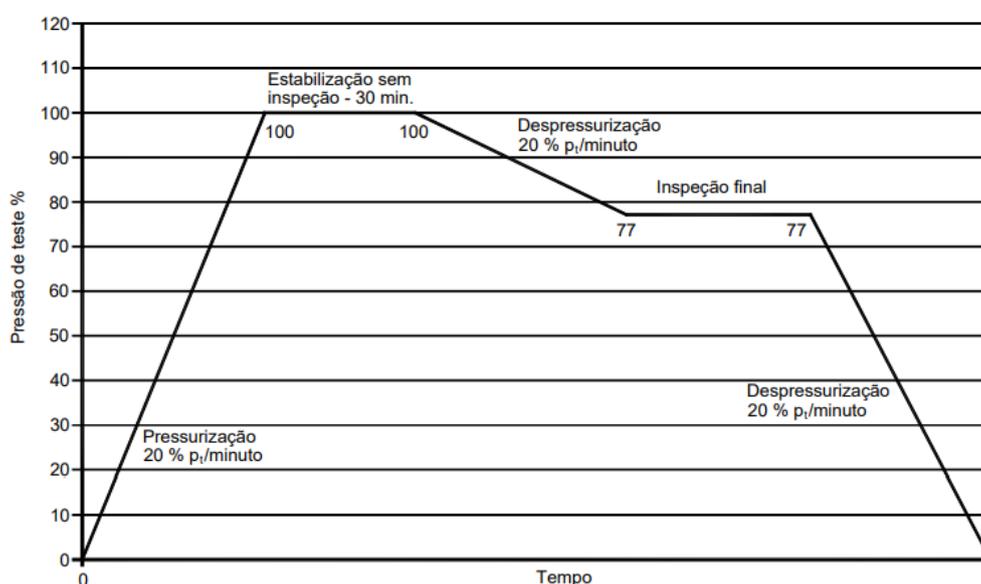
Com o grupo de risco definido, a norma N-2688 determina quais são os parâmetros de pressurização e o tempo determinado para realização dos projetos. Sendo, a pressurização dos equipamentos deste grupo de risco é obtida através do aumento da pressão do teste hidrostático em 20% de pressão por minuto.

Quando a pressão do teste hidrostático é atingida, a pressão se estabiliza por 30 minutos, mantendo o vaso sob pressão controlada. A redução

da pressão do dispositivo é realizada em duas etapas, mas a uma taxa constante de 20% da flutuação da pressão por minuto. Houve a despressurização de 33% da pressão, e a estabilização nesse valor para que seja realizado uma inspeção na estrutura do vaso, logo após essa inspeção é realizada a despressurização total.

A despressurização ocorreu em 33% e estabilizou neste valor, para que pudesse ser realizada uma inspeção estrutural do vaso, logo após esta inspeção foi realizada uma despressurização total. (Figura 20)

Figura 20 – Gráfico de pressão x tempo para grupo 3 de acordo com a normativa IN-2688.



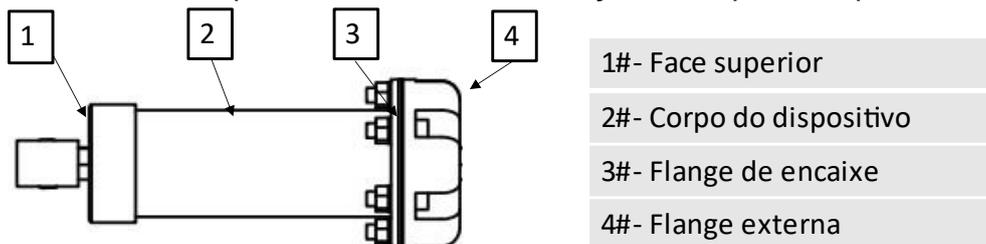
Fonte: IN-2688, teste de pressão em vaso de pressão e caldeira (Petrobras).

5.2.1.3.2 Teste de espessura de chapa

As medições nesse processo seguiram a norma de inspeção de ensaios não destrutiva conforme API 510 (2006). Foi utilizado como referência o monitoramento realizado por Agyenim-Boateng (2014) assim determinando os pontos para realização das medições.

Esse processo é determinado pela ASME VIII div.1 (2023) para inspeção não destrutiva, e pela NR 13 para acompanhamento durante toda a vida do útil do produto. Na Figura 21, estão os pontos onde será realizado as medições no equipamento. O equipamento utilizado foi o BENETECH GM 100 (Figura 23),

Figura 21 – Pontos que será realizada a medição de espessura por ultrassom.



Fonte: Autor (2014)

5.2.1.4 Validação em campo

Nesta etapa foi realizado os testes em campo do dispositivo, sendo o equipamento testado primeiramente na etapa de validação e posteriormente instalado no vaso de pressão e posteriormente no sistema de refrigeração.

Foram realizados dois testes, sendo possível realizar o levantamento das melhorias necessárias a serem feitas no equipamento. Após o segundo teste, foi realizado os apontamentos de melhorias, essas para atualização do produto.

5.2.2. Análise das amostras

As análises das amostras foram realizadas em duas etapas. Sendo a primeira antes da amostra ser introduzida no dispositivo e a segunda após um mês que a amostra está introduzida no dispositivo e em contato com a amônia no estado líquido.

Antes das medições em campo foi realizado a limpeza das amostras para maior precisão dos dados. Os dados foram anotados na mesma folha de preenchimento.

5.2.2.1. Análise de medição

Para as duas amostragens foram realizadas a limpeza da amostra em seguida a medida da peça por um paquímetro. Para realização das medições foi utilizado um paquímetro digital Mitutoyo ABSOLUTE 150mm com duas casas decimais.

As amostras foram pesadas antes e após serem submetidas a exposição pela amônia anidra no prazo de um mês.

5.2.2.2. Análise de perda de massa

Para realização das pesagens foi utilizado uma balança de precisão da Toledo AS 82/200 com 5 casas decimais de precisão. (Figura 22).

As amostras foram pesadas antes e após serem submetidas a exposição pela amônia anidra no prazo de um mês.

Figura 22 – Balança de precisão.



Fonte: Toledo (2021).

5.2.2.3. Análise de medição de espessura por ultrassom.

O equipamento BENETECH GM 100 (Figura 23), este instrumento possui uma casa decimal de precisão. Seguindo os parâmetros de utilização do equipamento seguiu a N 1594 ensaio não destrutivo por ultrassom. (N-1594,2004). Para realização do teste de espessura de chapa o equipamento fez a medida somente na face frontal do material assim, tendo maior precisão na sua leitura.

Figura 23 – Equipamento por ensaio de medição de espessura por ultrassom.



Fonte: BENETECH (2024)

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão discutidos as análises e resultados obtidos do dispositivo e as análises realizadas nas amostras alocadas no dispositivo na rede de refrigeração e os dados obtidos em campo.

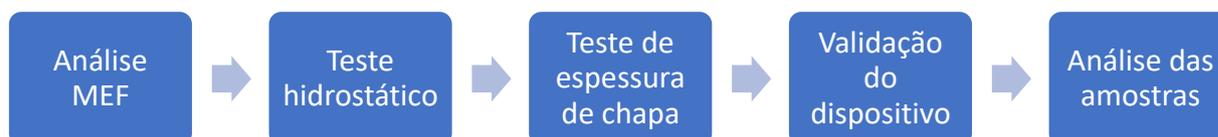
A sequência da apresentação dos resultados do dispositivo, foi definido da seguinte forma: Análise MEF, Análise do teste hidrostático (antes e depois do processo), análise de teste por espessura de chapa (antes e após o processo) e validação do dispositivo (este realizado em duas etapas).

A sequência apresentada das análises realizadas para as amostras foi definida da seguinte forma: A-516-70, Aço Inox e Zinco.

Os ensaios seguiram um sequenciamento lógico sendo realizado primeiramente a pesagem, medição com paquímetro e por ultrassom da amostra para os ensaios em campo. Essa rotina ocorreu nos estágios a coleta de dados sendo: Coleta inicial realizada período pré instalação (antes das amostras serem instaladas no dispositivo); Segunda medição sendo realizada um mês após a instalação.

Portanto os resultados obtidos no trabalho foram apresentados conforme fluxo detalhado na Figura 24.

Figura 24 – Fluxo do processo dos resultados apresentado



Fonte: Autor (2024)

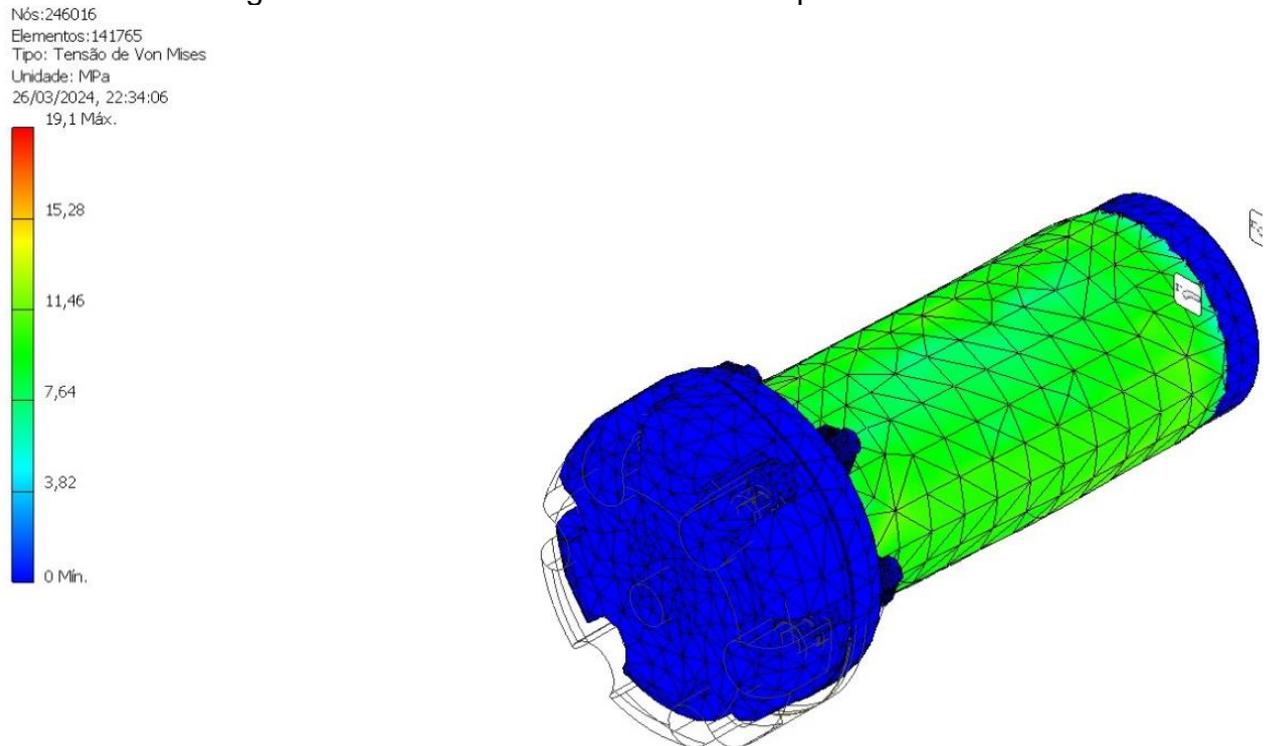
6.1 Análise MEF

Foi realizada a simulação de cálculo estrutural e analisado de acordo com as diretrizes ASME VIII divisão 1 e 2, sendo realizado simulações computacionais por método de elementos finitos (MEF) para análises dos esforços e tensões. Com as simulações realizadas, foram gerados dados de: Tensão de Von Mises, primeira tensão máxima principal, terceira tensão máxima principal, deslocamento e fator de segurança.

A Tensão de Von Mises no dispositivo foi de 22,391 MPa, muito inferior ao limite de escoamento do material de 215 MPa (Tabela 7). Também não foi

verificado nenhum ponto de concentração de tensão (Figura 25), em relação as tensões limites de acordo com as normas utilizadas como referência o valor está aproximadamente 6,4 vezes menor.

Figura 25 – Tensão de Von Mises no dispositivo.

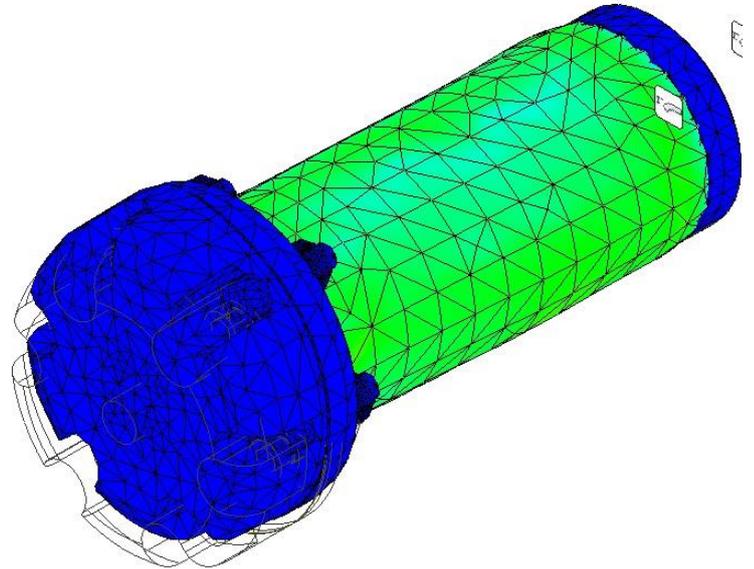
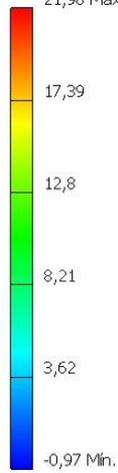


Fonte: Autor (2024)

A primeira tensão principal apresentou o valor de 21,06 MPa. Não sinalizando nenhum ponto de reforço do material, uma vez que a tensão de escoamento do material é de 215 MPa, portanto valor muito acima das tensões apresentada no material. (Figura 26). Em relação aos valores de referência da ASME VIII div 1 e 2, está muito abaixo.

Figura 26 – Primeira tensão principal

Nós:246016
Elementos:141765
Tipo: Primeira tensão principal
Unidade: MPa
26/03/2024, 22:34:34
21,98 Máx.

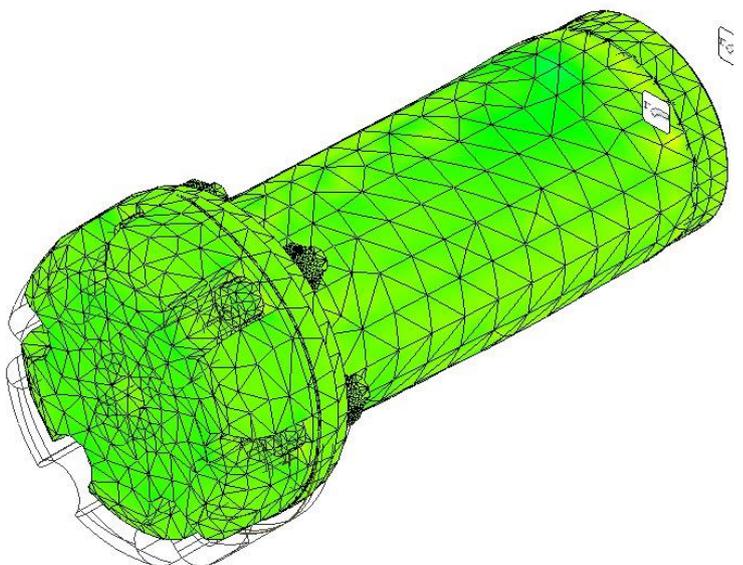
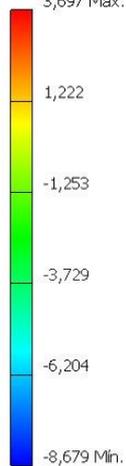


Fonte: Autor (2024)

A terceira tensão principal apresentou o valor de 3,697 MPa. Essa muito menor que o valor apresentado na primeira tensão principal. Portanto não gerando risco de ruptura no equipamento. (Figura 27)

Figura 27 – Terceira tensão principal no dispositivo

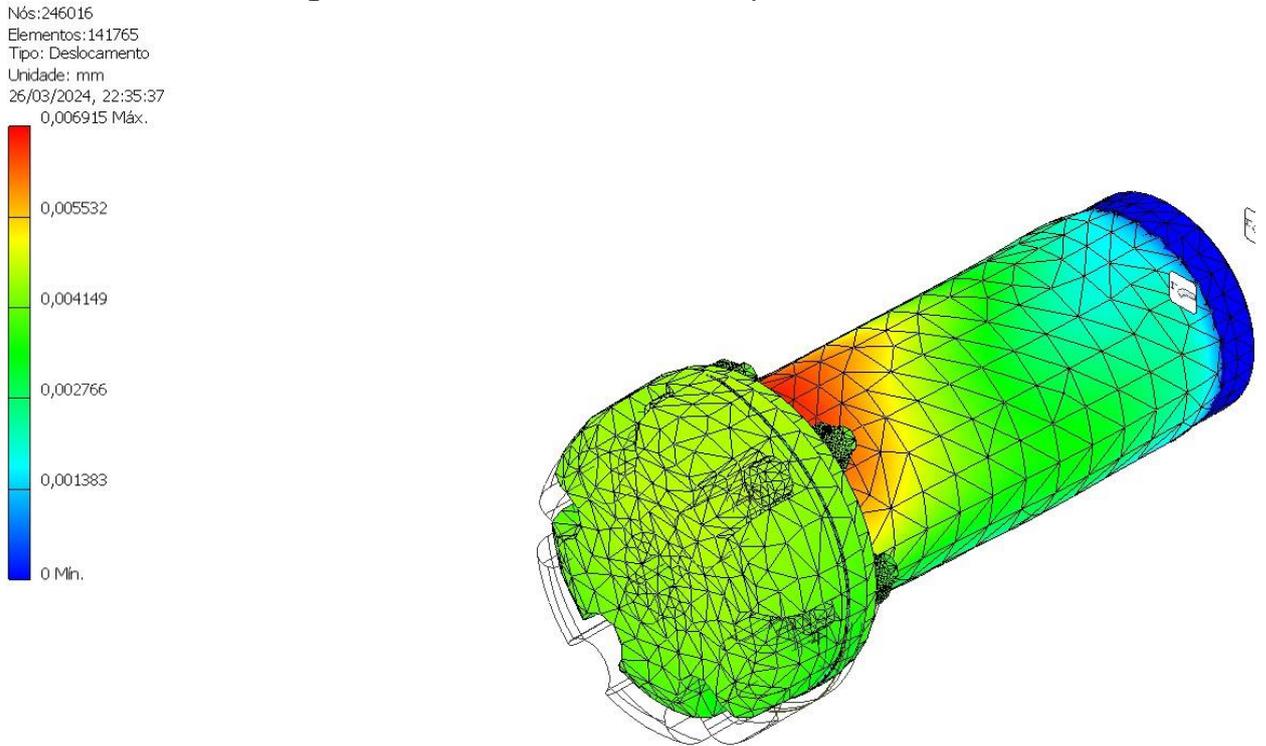
Nós:246016
Elementos:141765
Tipo: Terceira tensão principal
Unidade: MPa
26/03/2024, 22:35:15
3,697 Máx.



Fonte: Autor (2024)

O deslocamento máximo apresentado no dispositivo foi de $6,915 \times 10^{-3}$ mm, portanto não sendo um deslocamento considerável que possa gerar deslocamento nos componentes de fixação sendo assim não sendo necessário a alteração da forma de fixação, ou a necessidade de um suporte para travamento externo. (Figura 28)

Figura 28 – Deslocamento no dispositivo



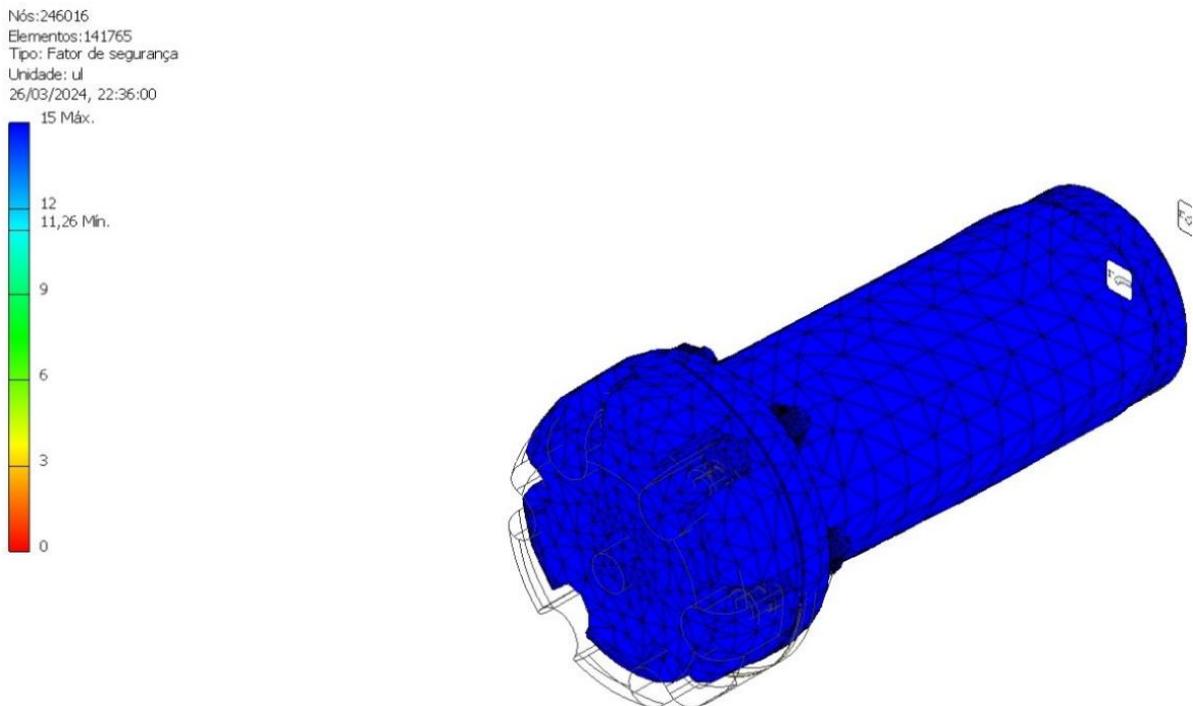
Fonte: Autor (2024)

Após a aplicação das cargas internas no equipamento o fator de segurança na flange e na tampa externa está de aproximadamente 9,6 (Figura 29). Sendo assim o equipamento está dentro das especificações determinada pela ASME VIII div.1 onde determina que o fator de segurança de um vaso de pressão não deve ultrapassar a $2/3$ do valor do limite de escoamento do material, ou seja, aproximadamente 143 MPa (Fator de segurança equivalente a 1,5). Na Figura 29, está detalhando os resultados da simulação realizada, onde é possível verificar que o fator de segurança mínima no equipamento é de 9,6 e na extremidade flange externa onde constantemente será necessário realizar o manuseio possui um fator de segurança superior a 15,0.

Segundo ASME VIII div.1 (2023) especifica que para chapa circular na extremidade de um vaso de pressão o fator de segurança deve ser no mínimo igual 4,0 para assegurar uma resistência adequada contra ruptura. Portanto,

pode-se afirmar que o equipamento está dentro das especificações determinada pela norma e está seguro.

Figura 29 – Fator de segurança do dispositivo



Fonte: Autor (2024)

Na tabela 9, estão todos os principais resultados obtidos nas simulações, inclusive as tensões combinadas. Vale ressaltar que para todas as tensões resultantes da simulação ficou aproximadamente seis vezes menor que as tensões de referência aceitável de projeto de acordo com a ASME VIII div.1 e div.2, que são respectivamente 144,29 MPa e 168,33 e a maior tensão apresenta na simulação foi de 22,39 MPa.

Tabela 9 – Resultados gerais obtidos na equação

Nome	Mínima	Máxima
Tensão de Von Misses	$404,522 \times 10^{-13}$ MPa	22,3913 MPa
Primeira tensão principal	-0,979223 MPa	27,7021 MPa
Terceira tensão principal	-8,67901 MPa	4,26929 MPa
Deslocamento	0 mm	$6,92 \times 10^{-3}$ mm
Fator de segurança	9,60	15,00
Tensão XX	-2,91043 MPa	19,2115 MPa
Tensão XY	-12,3876 MPa	11,9709 MPa
Tensão XZ	-3,35128 MPa	3,90143 MPa
Tensão YY	-4,6907 MPa	14,6644 MPa
Tensão YZ	-3,28903 MPa	2,78296 MPa
Tensão ZZ	-6,56506 MPa	8,56393 MPa

Fonte: Autor (2024)

6.2 TESTE HIDROSTÁTICO

De acordo com a norma N-2668, o dispositivo está no grupo 3, e foi pressurizado em 20% pt/minuto, e após chegar 100% da pressão de teste hidrostático o equipamento foi mantido durante 30 minutos e em seguida foi despressurizado gradativamente. Conforme detalhado na tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros para teste hidrostático

Tempo (minutos)	Pressão (%pt)	Pressão (Bar)
0	0	0
1	20%	4,2
2	40%	8,4
3	60%	12,6
4	80%	16,8
5 – 30	100%	21
35	90%	18,9
40	85	17,85
45-55	77%	16,17
55-60	0	0

Fonte: Autor (2024)

Foi realizado a inspeção do dispositivo antes e depois do equipamento ser instalado no sistema de refrigeração por amônia, vale ressaltar que o teste é uma inspeção estrutural, foi realizado a análise das imagens do dispositivo no primeiro teste, ou seja, antes do equipamento ser instalado na rede de refrigeração e no segundo teste, após o equipamento estar instalado na rede de refrigeração.

A tabela 11, detalha as etapas realizadas do teste hidrostático antes do equipamento ser submetido ao sistema de refrigeração. Foi possível notar que o equipamento não apresentou nenhum vazamento na flange, solda e etc. Portanto está apto para utilização do equipamento no sistema de refrigeração em campo.

Tabela 11 - Teste hidrostático no dispositivo antes da instalação na linha de refrigeração por amônia

ETAPA	DESCRIÇÃO	IMAGEM
Início do teste	Equipamento com todos os componentes montado pronto para iniciar o processo.	
Aumento de pressão para 20% - 40%	Não foi verificado nenhuma anomalia durante a operação e variações de pressão	
Equipamento pressurizado durante 30 minutos a 100% da pressão.	O dispositivo não apresentou nenhuma anomalia ou variação da pressão manométrica.	
Despressurização em 77% durante 10 minutos.	O dispositivo não apresentou nenhuma variação de pressão	

Fonte: Autor (2024)

A tabela 12 detalha através das imagens o teste hidrostático no dispositivo após ter sido retirado do sistema de refrigeração por amônia. É possível notar algumas impurezas no dispositivo, mas isso é devido ao contato com a amônia anidra, no entanto em questão estrutural o equipamento não sofreu nenhuma degradação notável pelo teste e não ocorreu vazamentos.

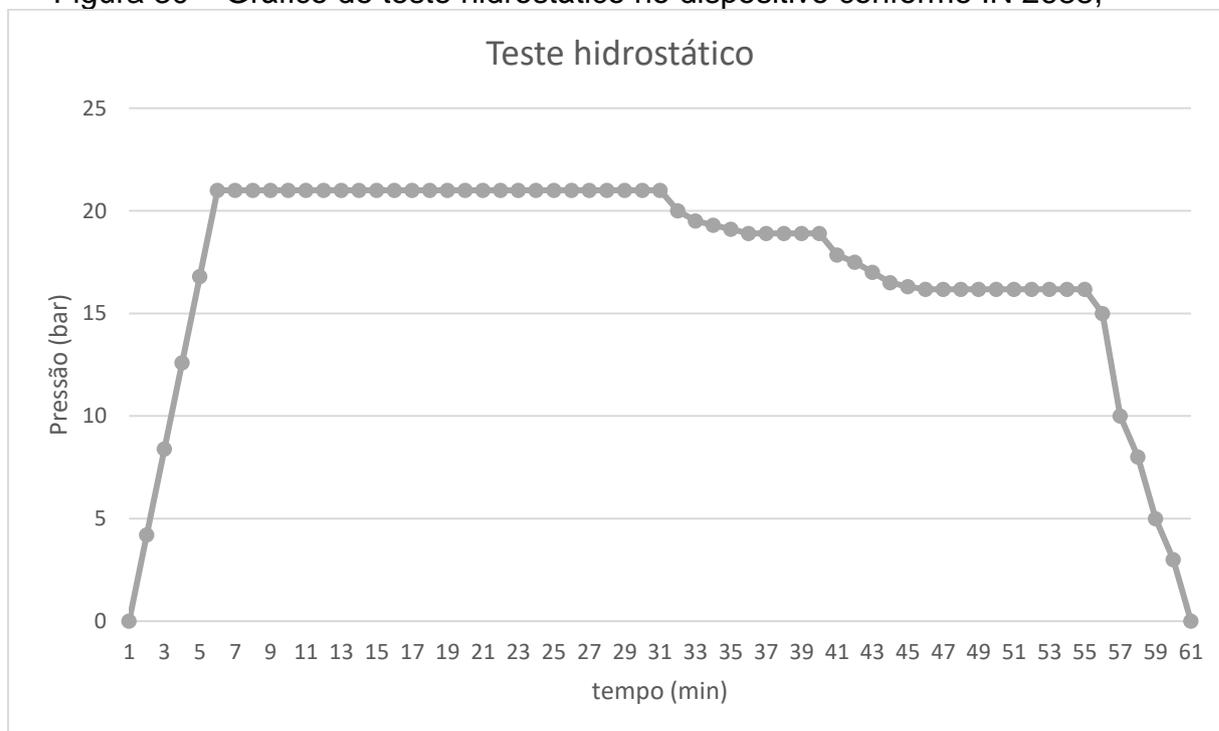
Tabela 12 - Teste hidrostático no dispositivo após a instalação na linha de refrigeração por amônia

ETAPA	DESCRIÇÃO	IMAGEM
Máquina acoplada no dispositivo.	Máquina acoplada no dispositivo.	
Aumento de pressão para 20% - 40%	Não foi verificado nenhuma anomalia durante a operação e variações de pressão	
Equipamento pressurizado durante 30 minutos a 100% da pressão.	O dispositivo não apresentou nenhuma anomalia ou variação da pressão manométrica.	
Despressurização em 77% durante 10 minutos.	O dispositivo não apresentou nenhuma variação de pressão	

Fonte: Autor (2024)

Após a realização dos testes o dispositivo não sofreu nenhum dano estrutural ou rompimento de; junta, solda, flange e etc. Também foi possível notar que não houve variação nos resultados de pressão em função do tempo. Conforme detalhado na Figura 30.

Figura 30 – Gráfico de teste hidrostático no dispositivo conforme IN 2688,



Fonte: Autor (2024)

Não foram realizados o gráfico de cada um dos testes hidrostático, pois os resultados foram muito semelhantes, assim não havendo necessidade de replicar a informação. O dispositivo está dentro dos parâmetros determinado na N-2688 para grupo 3 e está apto para utilização de acordo com as normativas de referência.

6.3 Teste de espessura de chapa

O mapeamento da espessura de chapa foi feita em duas etapas. A primeira antes do equipamento ser instalado na tubulação do sistema de refrigeração e a outra após a instalação do equipamento na tubulação do sistema de refrigeração. Na Figura 31, estão identificados os locais que foram realizado o mapeamento da espessura de chapa no dispositivo.

Vale ressaltar que para cada ponto identificado no componente foram feitas quatro medições em pontos distintos afim de verificar se ocorreu variação das medições realizadas.

Figura 31 – Mapa de ultrassom realizado no dispositivo antes do dispositivo ser pressurizado.



Identificação	Descrição	Espessura
#1	Face superior	18,0 mm
#2	Corpo do dispositivo	4,5 mm
#3	Flange de encaixe	8,0 mm
#4	Flange externa	19,0 mm

Fonte: Autor (2024)

Durante o ensaio foram feitas em cada ponto do mapa de espessura de chapa quatro medidas e a média dessas espessuras foram colocadas na tabela 13 em seguida sendo verificado a variação em relação a espessura nominal de projeto.

Tabela 13 – Valores encontrado no teste de espessura de chapa por ultrassom

Ponto	Esp. Nominal	Esp. Teste 1	% Var. 1	Esp. Teste 2	%var.2
1	18,0	17,9	-0,1	17,8	-0,1
2	4,5	4,6	+0,1	4,5	0,0
3	8,0	8,1	+0,1	8,0	0,0
4	19,0	19,0	0	19,1	+0,1

Fonte: Autor (2024)

Foi possível notar que no dispositivo não houve variações relevantes nas medidas. As pequenas variações podem ser consideradas como variação do próprio aparelho. Portanto, o dispositivo está dentro da integridade estrutural esperada.

6.4 Teste do dispositivo em campo

Na fase de instalação do dispositivo ocorreu alguns ajustes que precisaram ser realizados, sendo necessário fazer a alteração do desenho mecânico do produto e realizar novamente todas as etapas de validação normativa, como: Teste hidrostático e teste de espessura de chapa (conforme detalhado na metodologia)

Com a etapa de fabricação e teste do dispositivo executado, o mesmo foi conectado na parte inferior do vaso de pressão (separador de líquido), próximo à área de purgação. Essa área foi escolhida pois fica concentrada a amônia no estado líquido, e é um ponto onde não ocorre muitas variações de pressão e menor transiente de temperatura, ou seja, os fluídos se mantem pressurizado com pressão de aproximadamente 14 bar e com poucas variações de temperatura e alteração de estado. O local onde o dispositivo foi instalado está destacado na Figura 32.

Figura 32 – Imagem ilustrativa de um separador de líquido.



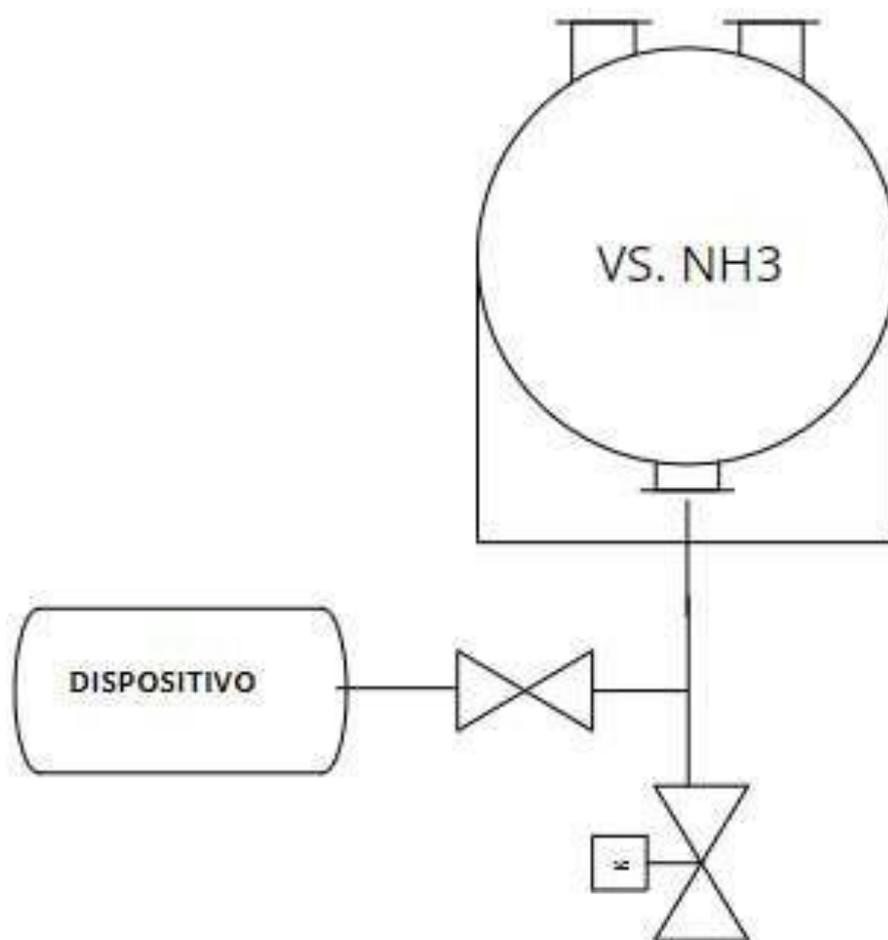
Fonte: Autor (2024)

A Montagem do dispositivo foi feita no ponto de saída de purgação do vaso de pressão. Foi utilizado um tubo de ferro de $\frac{3}{4}$ " de 500 mm e em seguida a conexão de um T ferro de $\frac{3}{4}$ ". Em cada saída do T foi conectada uma válvula

registro, uma para realização da purgação e a outra para conexão do dispositivo. Na válvula registro para conexão do dispositivo, foi acoplado um niple de $\frac{3}{4}$ ".

Foi realizado a implementação do dispositivo no vaso de pressão na parte debaixo do separador de líquido e foi realizada a pressurização com sucesso conforme diagrama Figura 33. No entanto quando foi retirar o equipamento ocorreu dificuldade de remoção, devido não ter um ponto de purgação de amônia diretamente no dispositivo sendo necessária a despressurização de todo o sistema do separador de líquido. Quando o dispositivo foi removido para verificação estrutural o mesmo estava com muitas impurezas como óleo, resíduos de metal e etc. Provenientes do compressor de amônia que fica no sistema antes do separador de líquido.

Figura 33 – Diagrama da conexão do equipamento

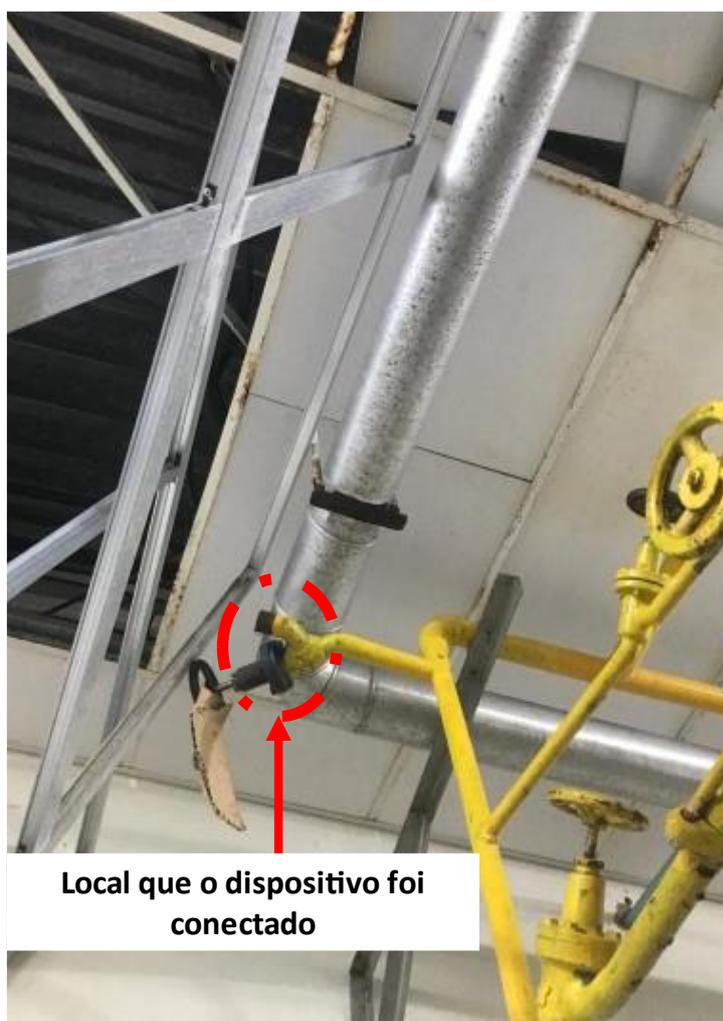


Fonte: Autor (2024)

Portanto após a primeira implementação do dispositivo no local de teste foi necessário fazer alterações no dispositivo para melhoria do sistema de purgação e alteração do ponto de teste para que não ocorresse contaminação nas amostras que seria introduzida no dispositivo.

Com o estudo da rede de refrigeração e a escolha de um ponto onde fosse possível a realização da análise dentro dos seguintes parâmetros: ponto que permita que amônia esteja no estado líquido com baixa temperatura e alta pressão. Foi possível selecionar esse ponto em um local onde foi removido o primeiro vaso de pressão da rede (logo após o separador de líquido), sendo assim se mantendo dentro das propriedades de entrada, essas: -33°C de temperatura e 14 Bar de pressão (Figura 34).

Figura 34 – Ponto da linha de refrigeração que foi instalado o dispositivo.



Fonte: Autor (2024)

Com a dificuldade de purgação da amônia do dispositivo, foi realizada uma melhoria no dispositivo, sendo instalada uma válvula gaveta e desenvolvido

um sistema de purgador com pista de segurança. Como havia uma redução muito acentuada da bitolado do vaso de pressão para a tubulação que seria derivada para teste do equipamento, por motivos de segurança foi realizada a soldagem do suporte de derivação do equipamento no dispositivo. Como o segundo teste seria feito em um prazo de exposição de experimentos realizados num período de um mês. Foi optado a utilização de uma junta de carbono grafitada para diminuir a chance de pequenos vazamentos, uma vez que no primeiro teste foi possível verificar que a junta de papelão em uma pequena exposição sofreu muito desgastes (Vale ressaltar que não ocorreu vazamentos, mas foi possível ver sinais de desgastes visual). O dispositivo com as alterações de projeto está detalhado na Figura 35.

Figura 35 – Foto do dispositivo montado com as melhorias feitas.



Fonte: Autor (2024)

Com as modificações realizadas no dispositivo foi realizado os testes de validação. Em seguida foi instalado na linha e pressurizado com 14 Bar de pressão e -33 °C na rede de refrigeração (Figura 36).

Figura 36 – Dispositivo instalado na linha de refrigeração por amônia

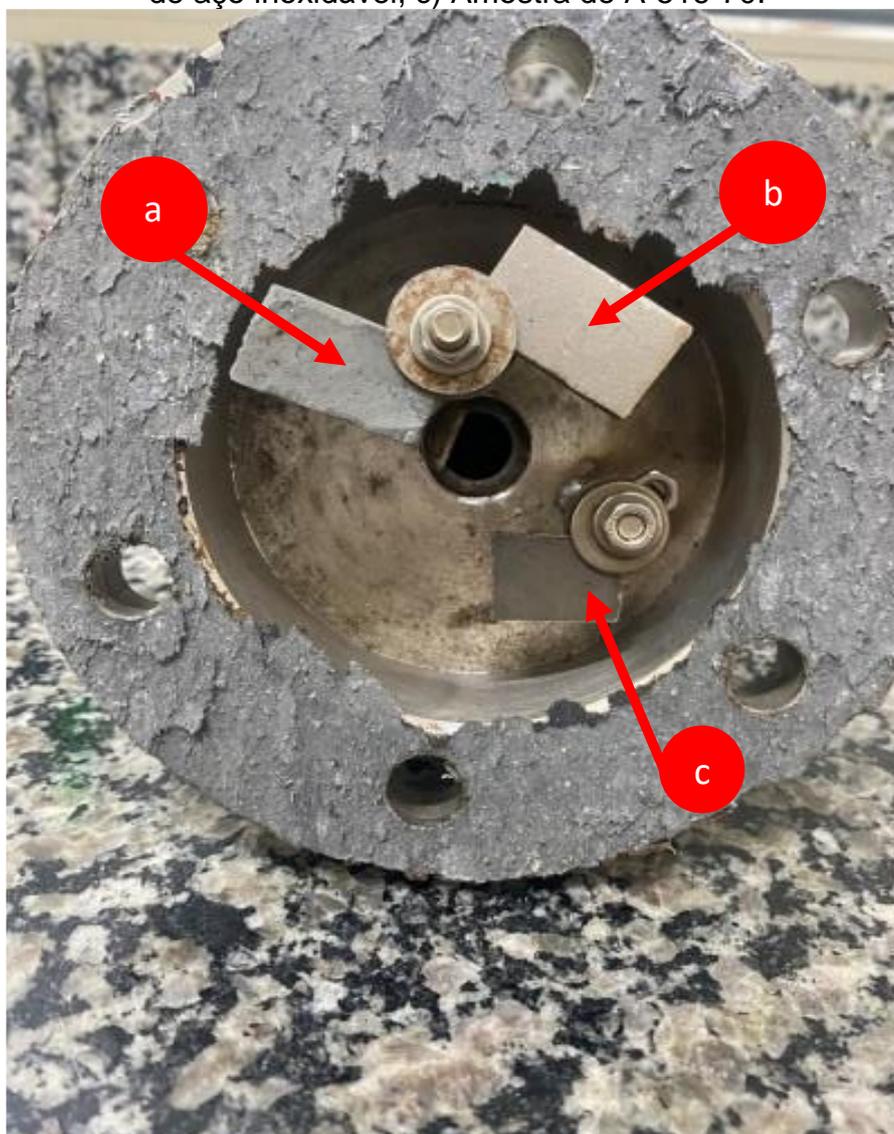


Fonte: Autor (2024)

Durante o período de um mês, foi realizado a inspeção do dispositivo e teste de verificação de vazamento com detector portátil de verificação de vazamento de amônia e não foi apresentado nenhum vazamentos nem falhas estruturais do equipamento. Com o cumprimento do prazo estipulado, foi realizada a purgação do sistema, sendo fechado primeiramente a válvula gaveta da própria rede de sistema de refrigeração e posteriormente utilizado o sistema de purgação introduzido no equipamento.

As amostras foram introduzidas no interior da flange em uma da extremidade e do suporte. Este suporte permite que todos os lados da amostra fique exposto na amônia no estado líquido. Conforme detalhado na Figura 37.

Figura 37 – Amostras alojadas no dispositivo. a) Amostra de Zinco, b) Amostra de aço inoxidável, c) Amostra de A-516-70.



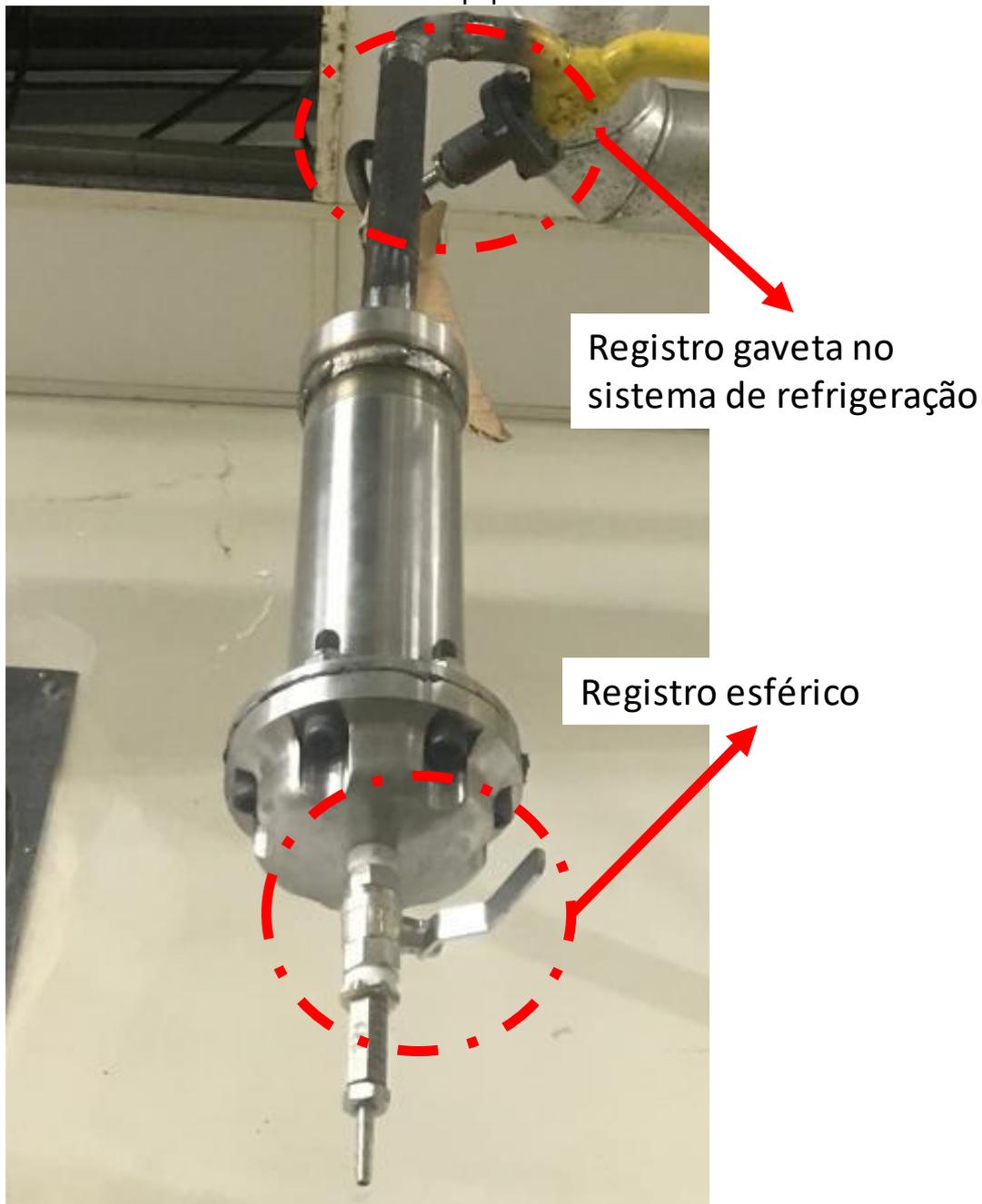
Fonte: Autor (2024)

6.4.1 Pontos de melhoria do dispositivo

Após a remoção do dispositivo com as amostras em um mês de exposição foi possível verificar alguns pontos de melhorias para ser realizado no dispositivo afim de facilitar a ergonomia do equipamento e aumentar a segurança durante o processo.

No dispositivo foi colocado um registro esfera antes da válvula purgadora de amônia e um registro gaveta diretamente na linha de amônia (Figura 38).

Figura 38 – Imagem do dispositivo com pontos que serão alterado no equipamento.



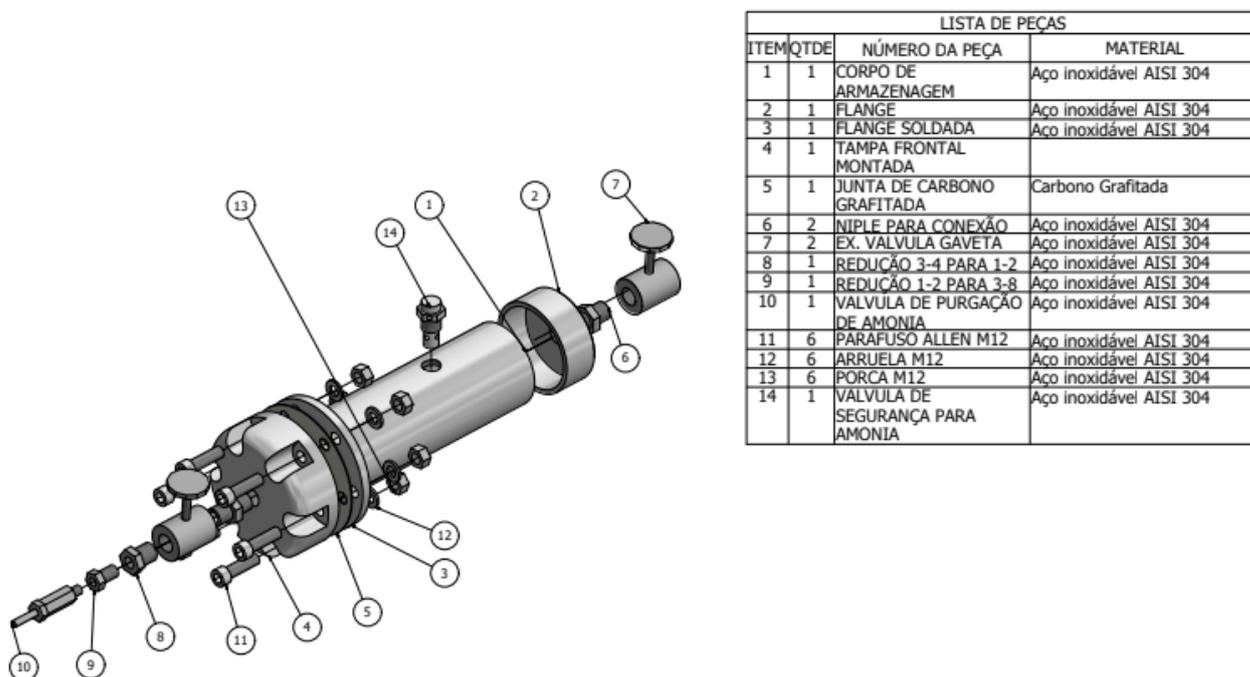
Fonte: Autor (2024)

O registro esfera não é recomendado para utilização em grande tempo de exposição por amônia, portanto o mesmo será substituído por um registro gaveta. Já o registro gaveta que está diretamente ligado a linha de amônia não faz parte do conjunto do dispositivo, portanto será colocado uma válvula gaveta no flange superior afim de facilitar o manuseio, além de possibilitar a instalação

do dispositivo em outros locais aonde não possui uma válvula gaveta próxima ao sistema.

Devido o equipamento ter sido instalado diretamente em um sistema de amônia com válvulas de segurança, não se viu a necessidade de instalar uma válvula de segurança no dispositivo, no entanto durante o processo de purgação da amônia do dispositivo é necessário fazer o fechamento da válvula gaveta assim a amônia fica aprisionada no sistema durante a purgação, sendo que a amônia está no seu estado líquido a -33°C e por ela não está circulando na rede de refrigeração ela troca calor com a parede do dispositivo e por sua vez com o ambiente, portanto como a amônia possui boas propriedades térmicas, em pouco tempo pode receber calor e mudar de estado físico passando do estado líquido para gasoso por sua vez aumentando a pressão interna do dispositivo. Com isso foi realizada a atualização do projeto com a colocação de uma válvula de segurança diretamente conectada ao corpo do dispositivo (Figura 39).

Figura 39 – Vista explodida do dispositivo com as alterações realizadas.

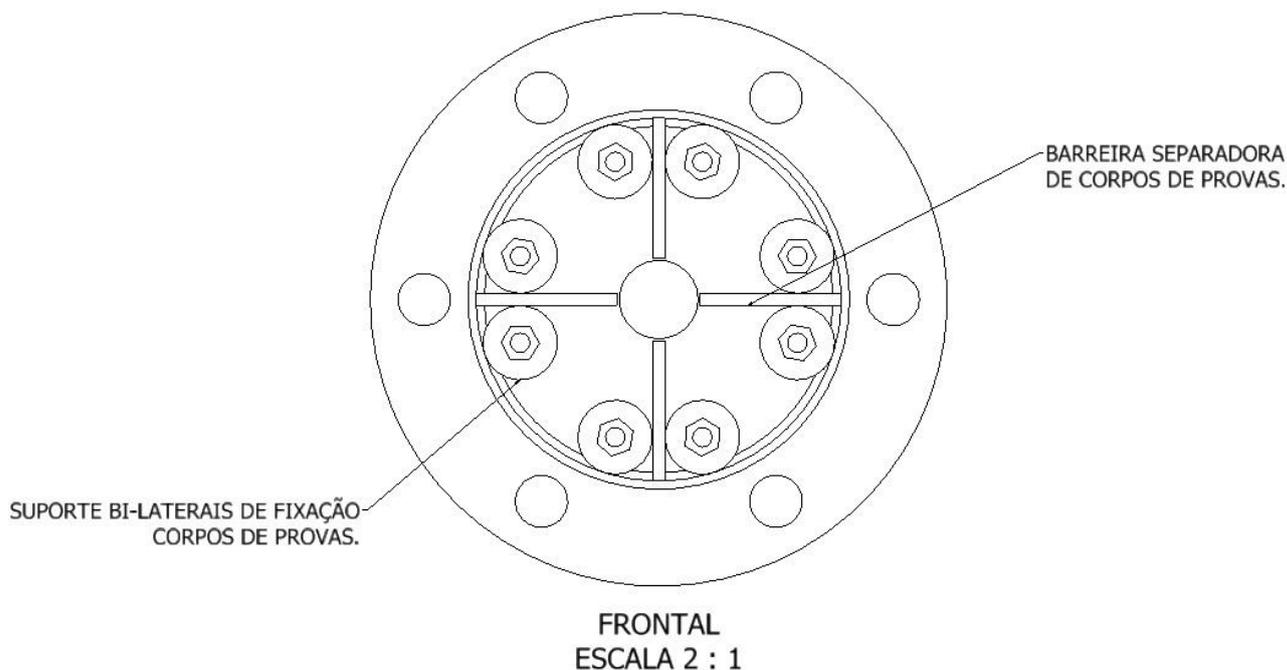


Fonte: Autor (2024)

No sistema de acoplamento das amostras no dispositivo (Figura 37) foi possível notar que as amostras poderiam se desprender caso houvesse um tempo de exposição maior, pois a forma de fixação não proporcionava fixar os lados da amostra podendo desprender durante a utilização. Para melhoria desse

sistema foi feito um alojamento individual para amostra sendo possível colocar no máximo quatro amostras de material, também foi realizada a colocação de uma barreira física entre as amostras, conforme Figura 40.

Figura 40 – Sistema de acoplamento das amostras.



Fonte: Autor (2024)

6.5 Ensaios das amostras: Perda de massa, espessura e largura

Com os procedimentos realizados do ensaio de campo, sendo medido a massa, tamanho (comprimento, largura e espessura) e ultrassom foi possível obter a taxa de variação assim sendo apresentado os resultados obtidos no experimento.

O material aço carbono A-516-70 comportou-se com pouca variação do peso com um pequeno acréscimo da sua massa, e obteve uma variação maior na largura em comparação as outras dimensões. Conforme detalhado na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados das medições e pesagem da amostra de A-516-70 antes e após serem alocadas no dispositivo.

Amostragem	Massa (g)	Paquímetro (mm)			Ultrassom (mm)
		Comprimento	Largura	Espessura	Espessura
Coleta 1 - Antes da exposição	12,02	21,76	15,62	4,81	4,8
Coleta 2 - Após exposição de 30 dias	12,03	21,70	15,24	4,77	4,7
Taxa de variação	0,08%	-0,28%	-2,43%	-0,83%	-2,08%

Fonte: Autor (2024)

Já o aço inoxidável (Tabela 15) por sua vez, obteve nenhuma variação expressiva em suas dimensões e peso. Sendo possível notar somente uma pequena variação na largura.

Tabela 15 – Resultados das medições e pesagem da amostra de Aço Inoxidável 304 antes e após está alocada no dispositivo.

Amostragem	Massa (g)	Paquímetro (mm)			Ultrassom (mm)
		Comprimento	Largura	Espessura	Espessura
Coleta 1 - Antes da exposição	18,62	27,30	15,94	5,60	5,7
Coleta 2 - Após exposição de 30 dias	18,62	27,30	15,62	5,60	5,6
Taxa de variação	0,00%	0,00%	-2,05%	0,00%	-1,75%

Fonte: Autor (2024)

O Zinco (Tabela 16) por sua vez foi o material que apresentou maior variação nas suas dimensões variando mais de 1mm no seu comprimento. No entanto quase não ocorreu variação de seu peso.

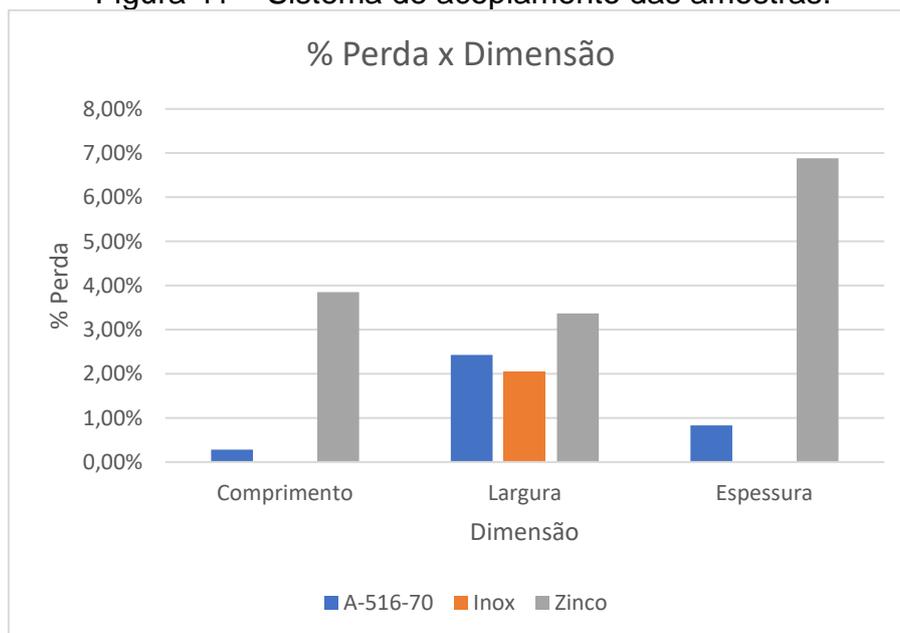
Tabela 16 – Resultados das medições e pesagem da amostra de Zinco antes e após está alocada no dispositivo.

Amostragem	Massa (g)	Paquímetro (mm)			Ultrassom (mm)
		Comprimento	Largura	Espessura	Espessura
Coleta 1 - Antes da exposição	16,10	26,77	15,15	6,69	6,7
Coleta 2 - Após exposição de 30 dias	16,09	25,74	14,64	6,23	6,2
Taxa de variação	-0,06%	-3,85%	-3,37%	-6,88%	-7,46%

Fonte: Autor (2024)

Comparando a taxa de perda de dimensão e massa, foi possível notar uma variação maior na largura, apesar do material está totalmente submerso em todas as suas faces, portanto a largura foi a dimensão que mais apresentou perda de dimensão em todas amostras de materiais ensaiadas. (Figura 41)

Figura 41 – Sistema de acoplamento das amostras.



Fonte: Autor (2024)

Em relação a massa (Tabela 17), ocorreu uma pequena perda de massa no zinco como foi diretamente relacionado ao desgaste e a perda de dimensões, o aço inoxidável não ocorreu variação, e no ferro apesar de ter perdido dimensões teve um pequeno aumento de massa, isso pode ter ocorrido devido a permeação de hidrogênio no material, conforme já relatado em outros artigos como no trabalho de Queiroz, V.F.M (2016).

Também foi possível notar que em todos os materiais ocorreram variações nas suas espessuras no teste por ultrassom (Tabela 17), vale ressaltar que possa ser uma variação do equipamento pois possui somente uma casa decimal de precisão, ou seja o índice de erro é alto para pequenas variações, porém os resultados obtidos ficaram próximo dos valores apresentados nas medições realizadas por paquímetro.

Tabela 17 – Resultados comparativos das medições e pesagem das amostras antes e após está alocada no dispositivo.

Material	Massa (g)	Paquímetro (mm)			Ultrassom
		Comprimento	Largura	Espessura	Espessura (mm)
A-516-70	0,08%	-0,28%	-2,43%	-0,83%	-2,08%
Inox	0,00%	0,00%	-2,05%	0,00%	-1,75%
Zinco	-0,06%	-3,85%	-3,37%	-6,88%	-7,46%

Fonte: Autor (2024)

Os resultados obtidos nos materiais neste experimento (Tabela 17) foram similares ao encontrado no artigo publicado por D.A. JONES, 1977. Portanto em viés de comparação o aço inox 304 L não ocorreu corrosão, devido sua resistência a corrosão, no entanto o ferro-carbono (A-516-70) houve pequena variação de sua massa semelhante ao ocorrido nesse experimento. Por sua vez o Zinco foi o material que apresentou maior taxa de perda de massa e espessura devido a corrosão.

6. CONCLUSÕES

Foi possível desenhar, simular e projetar um dispositivo para armazenamento de amostras utilizando as normas de referência ASME VIII div 1 (2023) e ASME VIII div. 2 (2015). Com a fabricação, validação e instalação do dispositivo na linha de amônia foi alocada as amostrar de metais no equipamento e após um mês a realização da retirada da amostra para ensaios e coleta de dados com sucesso. O equipamento depois dos ajustes realizados não apresentou vazamento e/ou anomalias físicas sendo possível a realização do procedimento novamente sem contrariedade.

Com a perda de massa e espessura das amostras observou que durante o período de um mês é possível realizar análises de corrosão nas amostras e obter resultado significativo em vista dos resultados apresentados principalmente na amostra de zinco.

Apesar do curto período de análise foi possível realizar comparações dos metais dos corpos de prova, sendo verificado a discrepância do comportamento de cada material, com o zinco apresentando alta perda de massa e espessura. O ferro carbono apresentou um pequeno aumento de massa, isso pode estar interligado diretamente a permeação de hidrogênio nos interstícios dos grãos do ferro carbono. O aço inoxidável apresentou baixa variação nesse tempo de exposição assim demonstrando sua alta resistência a corrosão em ambientes severos.

Contudo pode-se concluir que foi possível analisar os materiais metálicos com o dispositivo desenvolvido por meio do acompanhamento dos processos de corrosão, perda de massa e espessura.

7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHO

Realizar acompanhamento dos testes in loco por um prazo superior a 8 meses, assim sendo possível realizar comparativo de resultado por D.A. JONES, 1977.

Realizar análise de permeação por hidrogênio nos metais estudados.

Analisar degradação do material a curto, médio e longo prazo.

Realizar ensaio de dureza nas amostras e acompanhar a mudança de propriedades mecânicas nos materiais.

Analisar a fragilização dos materiais e os impactos das alterações das propriedades mecânicas dos materiais a médio e longo prazo de exposição.

Solicitar patente do dispositivo desenvolvido neste trabalho.

Realizar melhorias no dispositivo para uso comercial.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMONEX Disponível em <<http://www.amonex.com.br/quimica/amoniasolucao.htm>>, acessada em Janeiro 2002.

ANSI/ASHRAE 15-1978, **Safety code for mechanical refrigeration** :
ANSI/ASHRAE 15-1978

ANSYS 7.0 DOCUMENTATION, ANSYS INC. 2023

API BRD581, **BASE RESOURCE DOCUMENT ON RISK-BASED INSPECTION, SECOND EDITION, OUT/2000, AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE PUBLISHING SERVICES, WASHINGTON D C, USA. 2000**

API RP571, **DAMAGE MECHANISMS AFFECTING FIXED EQUIPMENT IN THE REFINERY INDUSTRY, RECOMMENDED PRACTICE, FIRST EDITION, DEZ/2003, AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE PUBLISHING SERVICES, WASHINGTON D C, USA. 2003**

API RP579 - **FITNESS FOR SERVICE, RECOMMENDED PRACTICE, FIRST EDITION, JAN/2000, AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE PUBLISHING SERVICES, WASHINGTON D C, USA. 2000**

ARAÚJO, G. P. S.; XAVIER, C. R. **Caracterização microestrutural e mecânica do aço ASTM-A-516 Grau 70**. Cadernos UniFOA, Volta Redonda, v. 7, n. 1 Esp, p. 296, 2012.

ARTUR SIQUEIRA NÓBREGA DE FREITAS, **Análise estrutural e de estabilidade do vaso de pressão de um auv**, 2017

ASM METALS HANDBOOK, **VOLUME 11, NINTH EDITION, AMERICAN SOCIETY FOR METALS, CAPÍTULOS**

ASM METALS HANDBOOK, **VOLUME 13, NINTH EDITION, SEVENTH PRINTING, AMERICAN SOCIETY FOR METALS, CAPÍTULOS**

ASME BPVC Section VIII Division. 1. 2023

ASME VIII Div.2 - **Design by analysis de componentes pressurizados**, 2010

BARSOM, J. M., ROLFE, S. T., **FRACTURE AND FATIGUE CONTROL IN STRUCTURES**,

Carlos Eustáquio dos Santos Neves, **Otimização Multiobjetivo de Vaso de Pressão Tipo IV para Armazenamento de Hidrogênio usando Método dos Elementos Finitos e Metodologia de Superfície de Resposta**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Programa de Pós Graduação em engenharia mecânica, 2023.

Clovis Isberto Biscegli, **Conceito físico do ultrassom**, ISSN1518-7179_2003. 2003

Cunjian Miao, Jianyang Zheng, Li Ma, Duyi Ye, **Investigation on Fatigue Properties of Cold Stretched Austenitic Stainless Steel**, ASME, PVP2011-57347, pp. 1019-1025; 7 pages, 2012.

D.A. JONES; B.E. WILDE. Journal Corrosion, **Corrosion Performance of Some Metals and Alloys in Liquid Ammonia**. 1977.

DANFOSS, **Aplicações da Amônia e do CO2 na Refrigeração Industrial**. 2020

DANFOSS. Válvulas de expansão termostáticas T2/TE3, orifício intercambiável. Osasco, 2020. Disponível em: <<https://www.danfoss.com/pt-br/products/valves/dcs/thermostatic-expansion-valves/t2-te2/#tab-overview>>. Acesso em: 29 maio 2020.

ESSS, **ASME VIII – Utilização de metodos computacionais na verificação de normas tecnicas**, Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/asme-viii-utilizacao-de-metodos-computacionais-na-verificacao-de-normas-tecnicas>> 2016. Acessado em: Março de 2024.

Felix, E.P e Cardoso, A.A. **AMÔNIA (NH3) ATMOSFÉRICA: FONTES, TRANSFORMAÇÃO, SORVEDOUROS E MÉTODOS DE ANÁLISE**, Quim. Nova, Vol. 27, No. 1, 123-130, 2004.

Ferreira, Dário Alexandre Martins. **Cálculo de eficiência de absorção de uma unidade de refrigeração**. 2008

Filho J.S.P , **ANÁLISE DE EFEITOS DE TESTE HIDROSTÁTICO EM VASO DE PRESSÃO**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

Frinhani, Renan de Jesus, **Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.8, n.6, p. 44002-44025**, jun., 2022

FUKAI, Y., **The metal-hydrogen system**. Berlin, Springer-Verlag. 1993

GODINI, Charles. Funcionamento e aplicações dos chillers por absorção. São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.engenhariae arquitetura.com.br/2018/04/funcionamento-e-aplicacoes-dos-chillers-por-absorcao>>. Acesso em: 25 maio 2020.

JORGE DOS SANTOS PEREIRA FILHO, Dissertação de mestrado. **ANÁLISE DE EFEITOS DE TESTE HIDROSTÁTICO EM VASO DE PRESSÃO**, 2004

Kateryne hamberger ferreira, **Influência da austenitização, têmpera e revenimento na dureza e resistência à corrosão no aço inoxidável martensítico en 1.4116**, 2022

KIM, NAM-HO; SANKAR, BHAVANI V.. **Introdução à Análise e ao Projeto em Elementos Finitos**, Rio de Janeiro, Editora LTC, 2011.

Licurgo B. Winck, Aldo N. Cardoso, & Wanderley V. Oliveira. (2022). **Atendimento de Ocorrências Envolvendo Gás Refrigerado Amônia no Estado de Goiás: uma Padronização para a Sequência dos atendimentos**. Revista Processos Químicos, 15(30), 9-23. 2021

MATHIAS, A. C. **Válvulas: Industriais, Segurança e Controle. 2. ed.** São Paulo: Artliber, 2014. 2016

Mellor, J. W.; **Química Inorgânica Moderna, 2nd ed.**, Globo: Porto Alegre, 1952.

Miguel, D.C, **REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL: Análise comparativa entre sistemas de refrigeração por amônia e chiller de água gelada nos processos de uma indústria alimentícia**, Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG, Varginha – MG, 2020.

MILANÉS, Rafael Lincoln Pratts. Melhoramento de um Sistema de Refrigeração por Absorção Água-Amônia para a Fabricação de Gelo. 1997. 123f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/265428/1/PrattsMilanes_RafaelLincoln_M.pdf>. Acesso em: 20 maio 2020.

MORRIS JR, J. W., KINNEY, C. C., PYTLEWSKI, K. R., KHACHATURYAN, A. G., 2014, **The microstructure of lath martensite in quenched 9Ni steel**, Acta Materialia 69, pp 372-385.

NR 13, **NORMA REGULAMENTADORA 13 DO MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 26 DE ABRIL DE 1995, GOVERNO FEDERAL.** 2019

Queiroz, V.F.M, **ESTUDO DOS EFEITOS DA PERMEAÇÃO DO HIDROGÊNIO EM AÇOS 9Ni**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro,

Engenharia Metalúrgica e materiais, Comissão do COPPE. Rio de Janeiro – RJ, 2016;

Ricardo Audreucci; **Ensaio por ultrassom**, Ed. Junho/ 2018

Silva B.A, **Projeto de vaso de pressão segundo norma asme e análise pelo método dos elementos finitos**. Dissertação apresentada ao Curso Pós-graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Projetos, ênfase em Projeto Mecânico. 2015.

SPIRAKOS, CONSTANTINE C.. **Finite Element Modeling in engineering Practice**. **Published** 1996 by Algor Inc, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A.

Tâmara Samara Lima Cavalcante. **Avaliação da Resistência à Corrosão de Aços Revestidos ou não com Zinco Fosfatizados e Pintados**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais curso de pós-graduação em engenharia química, 2010.

Telles, P. C. das. **Vasos de Pressão**. p. 302, 1991.

Wen-Jun Chou, Ge-Ping Yu, Jia-Hong Huang, **Corrosion resistance of ZrN films on AISI 304 stainless steel substrate**, **Surface and Coatings Technology** 167 (2003) 59–67 .

Z. Abdel Hamid^{1,*}, S. S. Abd El Rehim², A. Abou Shama³, M. Ebrahim³, **Improvement the Corrosion Resistance for the Galvanized Steel by Adding Sn**, **Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology**, 2016, 6, 58-71. Published Online April 2016 in SciRes. <http://dx.doi.org/10.4236/jsemat.2016.62006>.

ZUKOWSKI JÚNIOR, Joel Carlos. Construção, teste e análise termodinâmica de um sistema de refrigeração de amônia utilizando-se um compressor para R-12 adaptado. 1995. 84f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995. Disponível em: <http://taurus.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/257342/1/ZukowskiJunior_JoelCarlos_M.pdf>. Acesso em: 15 maio 2020.

ANEXO A – LISTA DE COMPONENTES

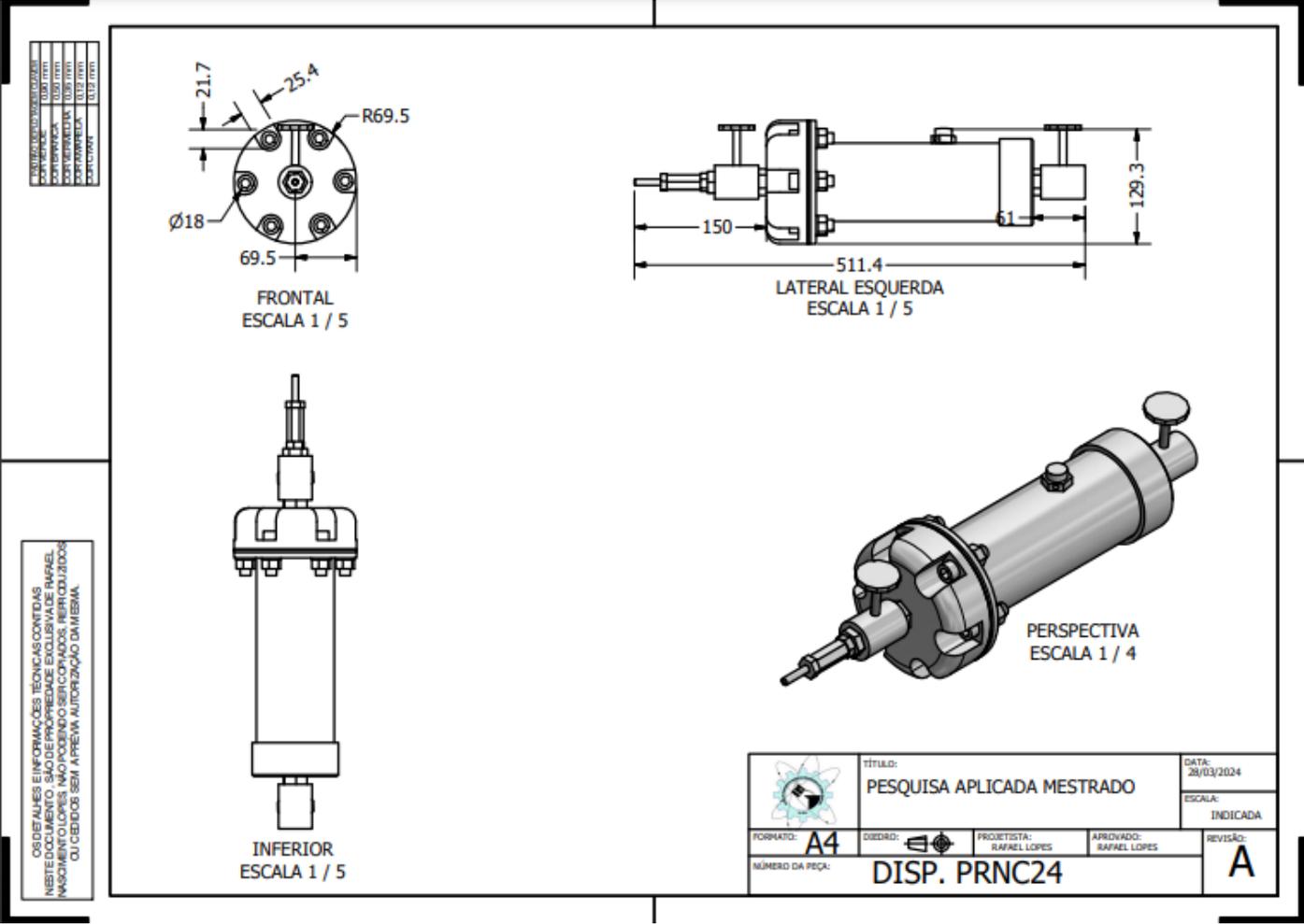
TAMANHO DE TEXTO: 10/12/14/16/18/20/22/24/28/32/36/40/44/48/52/56/60/64/72/78/84/96/108/120/144/168/180/200/220/240/260/280/300/320/360/400/420/440/480/500/520/540/560/580/600/620/640/660/680/700/720/740/760/780/800/820/840/860/880/900/920/940/960/980/1000

LISTA DE PEÇAS		
ITEM	QTDE	DESCRIÇÃO
1	1	CORPO DE ARMAZENAGEM
2	1	FLANGE FINAL SOLDADA
3	1	FLANGE INICIAL SOLDADA
4	1	TAMPA FRONTAL PARAFUSADA
5	1	JUNTA GRAFITADA
6	2	NIPLE PARA CONEXÃO 3/4"
7	2	EX. VALVULA GAVETA 3/4"
8	1	REDUÇÃO 3/4" PARA 1/2"
9	1	REDUÇÃO 1/2" PARA 3/8"
10	1	VALVULA DE PURGAÇÃO DE AMÔNIA
11	6	PARAFUSO ALLEN M12
12	6	ARRUELA M12
13	6	PORCA M12
14	1	VALVULA DE SEGURANÇA PARA AMONIA

OS DETALHES E INFORMAÇÕES TÉCNICAS CONTIDAS NESTE DOCUMENTO, SÃO DE PROPRIEDADE EXCLUSIVA DE RAFAEL NASCIMENTO LOPES. NÃO PODENDO SER COPIADOS, REPRODUZIDOS OU CÉDIDOS SEM A PRÉVIA AUTORIZAÇÃO DA MESMA.

	TÍTULO: LISTA DE COMPONENTES	DATA: 28/03/2024
		ESCALA: INDICADA
FORMATO: A4	DESENHO:	PROJETA: RAFAEL LOPES
NÚMERO DA PEÇA: LIST.CMP	APROVADO: RAFAEL LOPES	REVISÃO: A

ANEXO B – DESENHO DO CONJUNTO MONTADO



ANEXO C – LAUDO DA SIMULAÇÃO POR METODO DE ELEMENTOS FINITOS DO DISPOSITIVO GERADO PELO SOFTWARE INVENTOR

Relatório de análise de tensão



Arquivo analisado:	Montagem3 PROTOTIPO.iam
Versão do Autodesk Inventor:	2018 (Build 220112000, 112)
Data de criação:	26/03/2024, 22:37
Autor do estudo:	usuario
Resumo:	

Informações de projeto (iProperties)

Resumo

Autor	usuario
-------	---------

Projeto

Nº da peça	Montagem3 PROTOTIPO
Projetista	usuario
Custo	R\$ 0,00
Data de criação	26/03/2024

Status

Status do desenho	TrabalhoEmCurso
-------------------	-----------------

Física

Massa	9,50612 kg
Área	378151 mm ²
Volume	1194490 mm ³
Centro de gravidade	x=2,85734 mm y=-3,75319 mm z=63,5883 mm

Nota: os valores físicos podem ser diferentes dos valores físicos utilizados por FEA indicados a seguir.

Análise estática:1

Objetivo geral e configurações:

Objetivo do projeto	Ponto único
Tipo de estudo	Análise estática
Data da última modificação	26/03/2024, 22:33
Detectar e eliminar modos de corpo rígido	Não
Separar tensões em superfícies de contato	Não
Análise de cargas de movimento	Não

Configurações de malha:

Tamanho médio dos elementos (fração do diâmetro do modelo)	0,1
Tamanho mínimo dos elementos (fração do tamanho médio)	0,2
Fator de nivelamento	1,5
Ângulo máximo de giro	60 grau
Criar elementos de malha curva	Não
Usar medida baseada em peça para a malha da montagem	Sim

Materiais

Nome	Aço inoxidável AISI 304	
Geral	Densidade de massa	8 g/cm ³
	Resistência à escoamento	215 MPa
	Resistência máxima à tração	505 MPa
Tensão	Módulo de Young	195 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,29 s_m
	Módulo cortante	75,5814 GPa

Nome(s) de peça	CORPO DE ARMAZENAGEM FLANGE TAMPA FLANGE SOLDADA TAMPA FRONTAL SUPORTE PARA O CORPO DE PROVA SUPORTE PARA O CORPO DE PROVA 2 PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS CORPO DE PROVA 1 CORPO DE PROVA 1 CORPO DE PROVA 2 CORPO DE PROVA 2 CORPO DE PROVA 3 CORPO DE PROVA 3 PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS SUPORTE PARA O CORPO DE PROVA SUPORTE PARA O CORPO DE PROVA PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS CORPO DE PROVA 2 CORPO DE PROVA 2 NIPLE PARA CONEXÃO NIPLE PARA CONEXÃO EX. VALVULA GAVETA EX. VALVULA GAVETA REDUÇÃO 3-4 PARA 1-2 REDUÇÃO 1-2 PARA 3-8 ESPIGÃO PRODUZIDO SOB MEDIDA PARAFUSO ALLEN M12 PARAFUSO ALLEN M12 PARAFUSO ALLEN M12 PARAFUSO ALLEN M12 PARAFUSO ALLEN M12 PARAFUSO ALLEN M12 ARRUELA M12 ARRUELA M12 ARRUELA M12 ARRUELA M12 ARRUELA M12 ARRUELA M12 PORCA M12 PORCA M12
-----------------	---

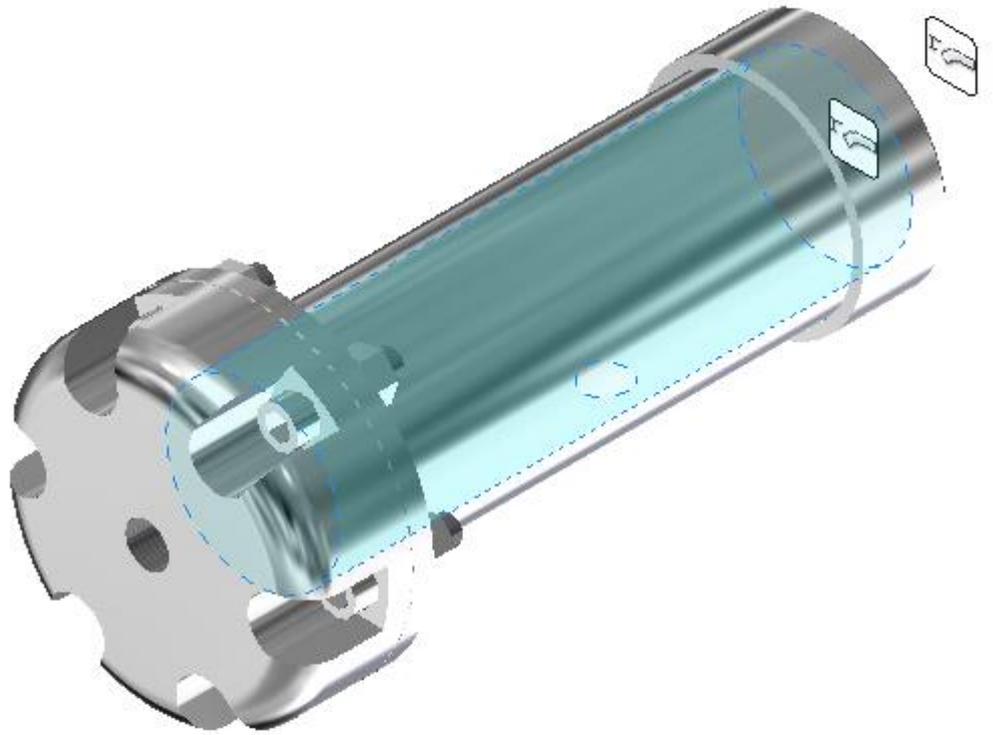
	PORCA M12 PORCA M12 PORCA M12 PORCA M12 VALVULA DE SEGURANÇA PARA AMONIA	
Nome	Politetrafluoroetileno, PTFE	
Geral	Densidade de massa	2,02 g/cm ³
	Resistência à escoamento	20,7 MPa
	Resistência máxima à tração	22,4 MPa
Tensão	Módulo de Young	0,583 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,45 s _m
	Módulo cortante	0,201034 GPa
Nome(s) de peça	VEDAÇÃO	

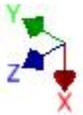
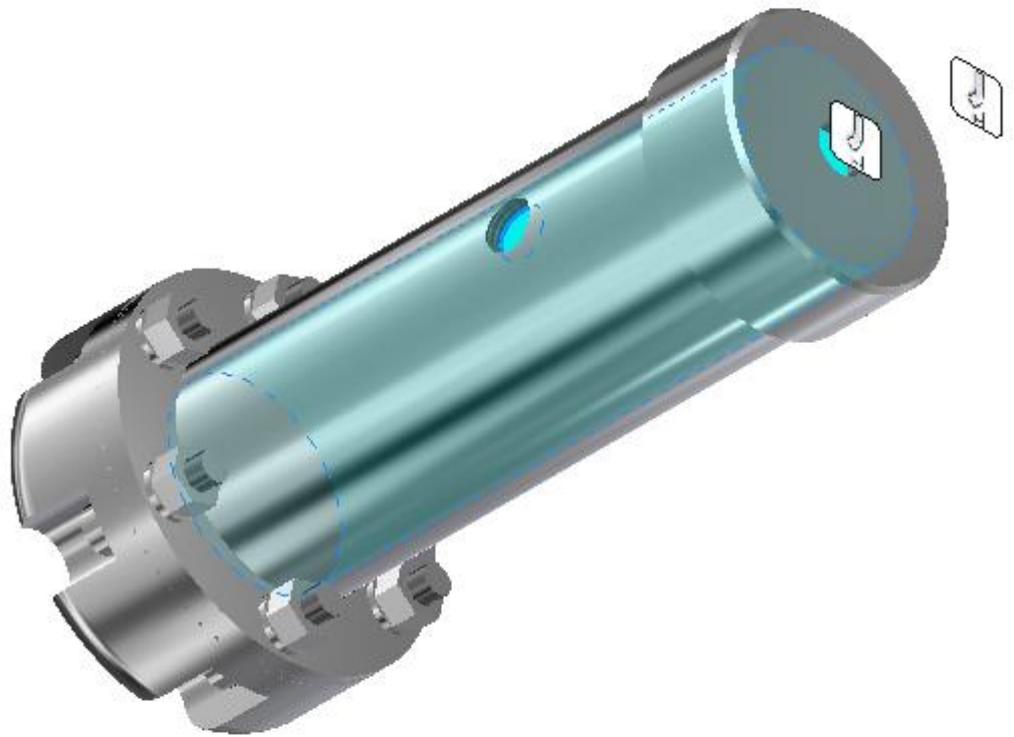
Condições de funcionamento

Pressão:1

Tipo de carga	Pressão
Magnitude	2,100 MPa

Faces seleccionadas

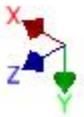
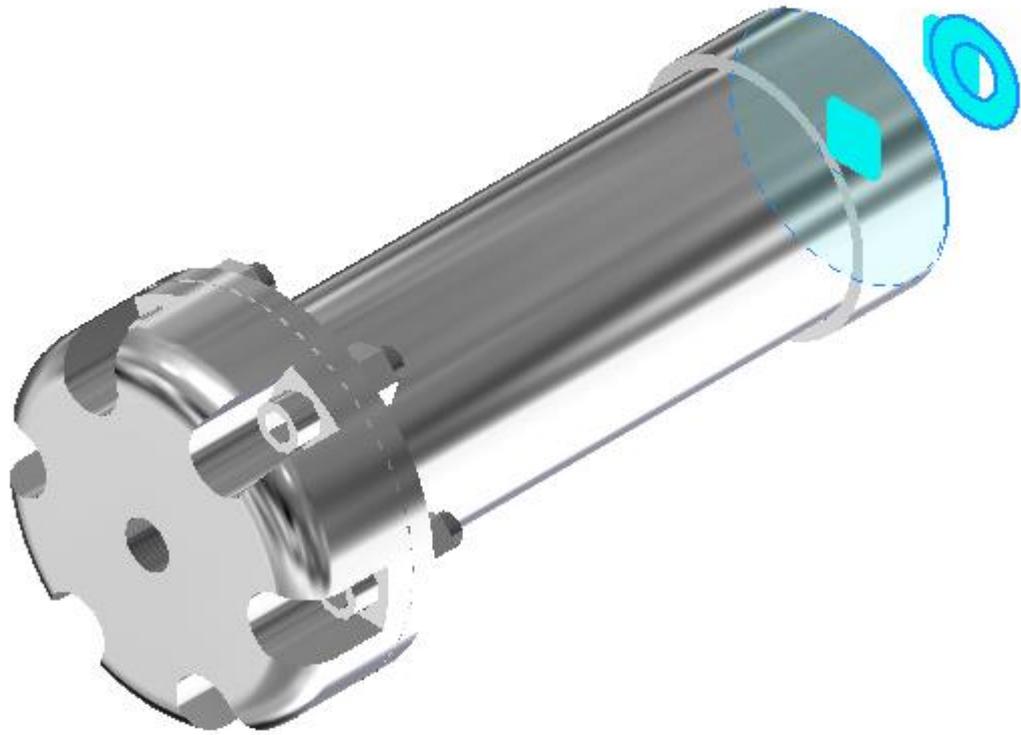




Restrição fixa:1

Tipo de restrição	Restrição fixa
-------------------	----------------

Faces seleccionadas





Contatos (Fixado)

Nome	Nome(s) de peça
Fixado:1	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:7
Fixado:2	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:10
Fixado:3	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:1
Fixado:4	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:2

Fixado:5	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/SUORTE PARA O CORPO DE PROVA:2
Fixado:6	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/SUORTE PARA O CORPO DE PROVA:1
Fixado:7	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/SUORTE PARA O CORPO DE PROVA 2:1
Fixado:8	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/SUORTE PARA O CORPO DE PROVA:3
Fixado:9	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1 NIPLE PARA CONEXÃO:1
Fixado:10	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1 PARAFUSO ALLEN M12:3
Fixado:11	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1 PARAFUSO ALLEN M12:4
Fixado:12	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1 PARAFUSO ALLEN M12:1
Fixado:13	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1 PARAFUSO ALLEN M12:2
Fixado:14	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1 PARAFUSO ALLEN M12:6
Fixado:15	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1 PARAFUSO ALLEN M12:5
Fixado:16	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1 NIPLE PARA CONEXÃO:1
Fixado:17	PARAFUSO ALLEN M12:2 PORCA M12:3
Fixado:18	PARAFUSO ALLEN M12:5 PORCA M12:5
Fixado:19	PARAFUSO ALLEN M12:4 PORCA M12:1
Fixado:20	PARAFUSO ALLEN M12:3 PORCA M12:6
Fixado:21	PARAFUSO ALLEN M12:1 PORCA M12:2
Fixado:22	PARAFUSO ALLEN M12:6 PORCA M12:4

Fixado:23	PARAFUSO ALLEN M12:2 ARRUELA M12:4
Fixado:24	PARAFUSO ALLEN M12:6 ARRUELA M12:6
Fixado:25	PARAFUSO ALLEN M12:1 ARRUELA M12:5
Fixado:26	PARAFUSO ALLEN M12:3 ARRUELA M12:3
Fixado:27	PARAFUSO ALLEN M12:4 ARRUELA M12:2
Fixado:28	PARAFUSO ALLEN M12:5 ARRUELA M12:1
Fixado:29	NIPLE PARA CONEXÃO:1 EX. VALVULA GAVETA:1
Fixado:30	NIPLE PARA CONEXÃO:2 EX. VALVULA GAVETA:2
Fixado:31	NIPLE PARA CONEXÃO:1 EX. VALVULA GAVETA:1
Fixado:32	REDUÇÃO 3-4 PARA 1-2:1 REDUÇÃO 1-2 PARA 3-8:1
Fixado:33	REDUÇÃO 3-4 PARA 1-2:1 REDUÇÃO 1-2 PARA 3-8:1
Fixado:34	ESPIGÃO PRODUZIDO SOB MEDIDA:1 ESPIGÃO PRODUZIDO SOB MEDIDA:1
Fixado:35	CORPO DE ARMAZENAGEM:1 VALVULA DE SEGURANÇA PARA AMONIA:1
Fixado:36	FLANGE TAMPA:1 NIPLE PARA CONEXÃO:2
Fixado:37	REDUÇÃO 1-2 PARA 3-8:1 ESPIGÃO PRODUZIDO SOB MEDIDA:1
Fixado:38	FLANGE TAMPA:1 NIPLE PARA CONEXÃO:2
Fixado:39	FLANGE SOLDADA:1 VEDAÇÃO:1
Fixado:40	EX. VALVULA GAVETA:2 EX. VALVULA GAVETA:2

Fixado:41	EX. VALVULA GAVETA:1 EX. VALVULA GAVETA:1
Fixado:42	FLANGE SOLDADA:1 VEDAÇÃO:1
Fixado:43	NIPLE PARA CONEXÃO:2 EX. VALVULA GAVETA:2
Fixado:44	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:12 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 2:8
Fixado:45	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:11 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 2:7
Fixado:46	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:9 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 2:5
Fixado:47	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:8 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 2:3
Fixado:48	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:3 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 2:1
Fixado:49	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:4 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 1:1
Fixado:50	REDUÇÃO 1-2 PARA 3-8:1 ESPIGÃO PRODUZIDO SOB MEDIDA:1
Fixado:51	EX. VALVULA GAVETA:1 REDUÇÃO 3-4 PARA 1-2:1
Fixado:52	CORPO DE ARMAZENAGEM:1 FLANGE TAMPA:1
Fixado:53	CORPO DE ARMAZENAGEM:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/TAMPA FRONTAL:1
Fixado:54	CORPO DE ARMAZENAGEM:1 VEDAÇÃO:1
Fixado:55	EX. VALVULA GAVETA:1 REDUÇÃO 3-4 PARA 1-2:1
Fixado:56	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 2:2 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:6
Fixado:57	ARRUELA M12:2 PORCA M12:1
Fixado:58	ARRUELA M12:1 PORCA M12:5

Fixado:59	ARRUELA M12:5 PORCA M12:2
Fixado:60	ARRUELA M12:4 PORCA M12:3
Fixado:61	ARRUELA M12:3 PORCA M12:6
Fixado:62	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 2:6 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 2:8
Fixado:63	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 2:4 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 2:5
Fixado:64	ARRUELA M12:6 PORCA M12:4
Fixado:65	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 2:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 3:2
Fixado:66	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 2:2 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 3:1
Fixado:67	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 2:3 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 2:4
Fixado:68	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 2:6 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 2:7
Fixado:69	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 1:2 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:5
Fixado:70	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 1:2 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 3:1
Fixado:71	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 1:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/CORPO DE PROVA 3:2
Fixado:72	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/SUORTE PARA O CORPO DE PROVA:2 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:7
Fixado:73	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/SUORTE PARA O CORPO DE PROVA:2 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:8
Fixado:74	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/SUORTE PARA O CORPO DE PROVA:2 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:9
Fixado:75	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/SUORTE PARA O CORPO DE PROVA 2:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:2
Fixado:76	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/SUORTE PARA O CORPO DE PROVA:3 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:10

Fixado:77	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/SUORTE PARA O CORPO DE PROVA:3 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:11
Fixado:78	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/SUORTE PARA O CORPO DE PROVA:3 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:12
Fixado:79	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/SUORTE PARA O CORPO DE PROVA:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:1
Fixado:80	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/SUORTE PARA O CORPO DE PROVA:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:3
Fixado:81	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/SUORTE PARA O CORPO DE PROVA:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:4
Fixado:82	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/SUORTE PARA O CORPO DE PROVA 2:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:5
Fixado:83	TAMPA FRONTAL MONTADA:1/SUORTE PARA O CORPO DE PROVA 2:1 TAMPA FRONTAL MONTADA:1/PORCA PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS:6
Fixado:84	FLANGE SOLDADA:1 ARRUELA M12:6
Fixado:85	FLANGE SOLDADA:1 ARRUELA M12:1
Fixado:86	FLANGE SOLDADA:1 ARRUELA M12:5
Fixado:87	FLANGE SOLDADA:1 ARRUELA M12:4
Fixado:88	FLANGE SOLDADA:1 ARRUELA M12:2
Fixado:89	FLANGE SOLDADA:1 ARRUELA M12:3

Resultados

Força e momento de reação em restrições

Nome da restrição	Força de reação		Momento de reação	
	Magnitude	"Componente (X,Y,Z)"	Magnitude	"Componente (X,Y,Z)"
Restrição fixa:1	570,208 N	0 N	58,2655 N m	-58,2655 N m
		538,883 N		0 N m
		-186,394 N		0 N m

Resumo de resultados

Nome	Mínima	Máxima
Volume	1194550 mm ³	
Massa	9,50653 kg	
Tensão de Von Mises	0,000000000404522 MPa	22,3913 MPa
Primeira tensão principal	-0,979223 MPa	27,7021 MPa
Terceira tensão principal	-8,67901 MPa	4,26929 MPa
Deslocamento	0 mm	0,00691501 mm
Fator de segurança	9,60194 s_m	15 s_m
Tensão XX	-2,91043 MPa	19,2115 MPa
Tensão XY	-12,3876 MPa	11,9709 MPa
Tensão XZ	-3,35128 MPa	3,90143 MPa
Tensão YY	-4,6907 MPa	14,6644 MPa
Tensão YZ	-3,28903 MPa	2,78296 MPa
Tensão ZZ	-6,56506 MPa	8,56393 MPa
Deslocamento X	-0,00388705 mm	0,00355651 mm
Deslocamento Y	-0,00561305 mm	0,00210848 mm
Deslocamento Z	-0,00471331 mm	0,000485244 mm
Deformação equivalente	0,0000000000000205145 s_m	0,000103728 s_m
Primeira deformação principal	-0,0000000277228 s_m	0,000122861 s_m
Terceira deformação principal	-0,0000971012 s_m	0,000000733881 s_m
Deformação XX	-0,0000860019 s_m	0,0000911548 s_m
Deformação XY	-0,0000819485 s_m	0,0000791921 s_m
Deformação XZ	-0,0000246805 s_m	0,0000258095 s_m
Deformação YY	-0,000074283 s_m	0,0000799797 s_m
Deformação YZ	-0,0000217582 s_m	0,0000260802 s_m
Deformação ZZ	-0,0000407568 s_m	0,0000484059 s_m

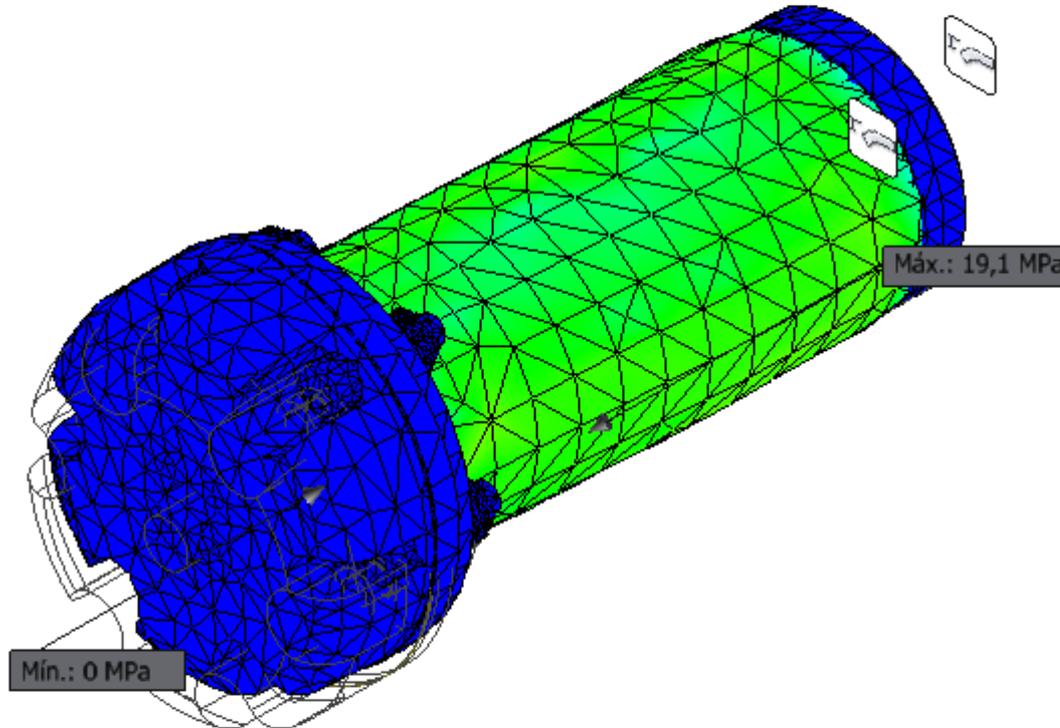
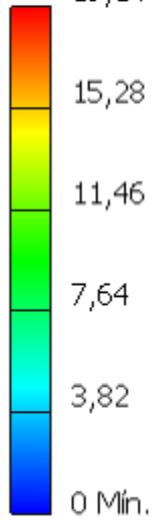
Pressão de contato	0 MPa	27,9989 MPa
Pressão de contato X	-27,7937 MPa	27,8582 MPa
Pressão de contato Y	-7,33005 MPa	7,0094 MPa
Pressão de contato Z	-15,0488 MPa	14,4842 MPa

Figuras

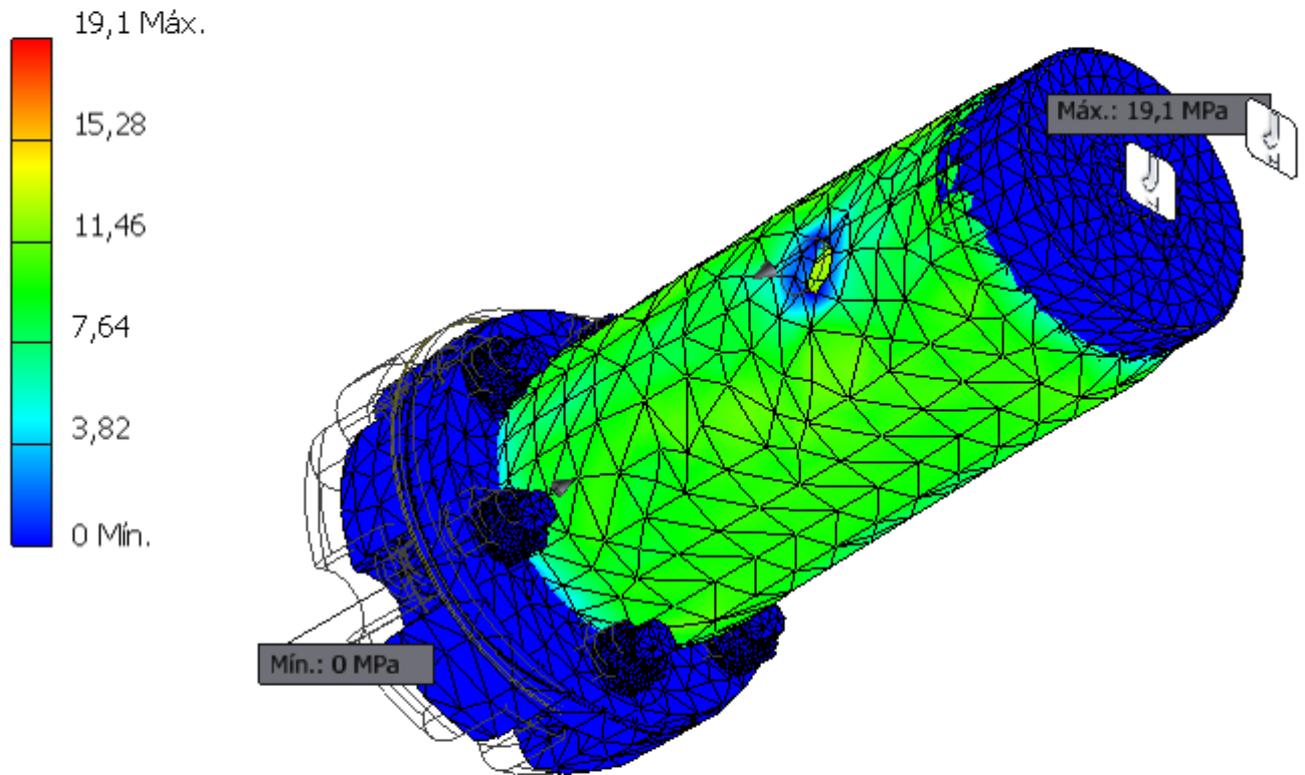
Tensão de Von Mises

Nós: 246016
 Elementos: 141765
 Tipo: Tensão de Von Mises
 Unidade: MPa
 26/03/2024, 22:37:11

19,1 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Tensão de Von Mises
Unidade: MPa
26/03/2024, 22:37:11



Primeira tensão principal

Nós: 246016

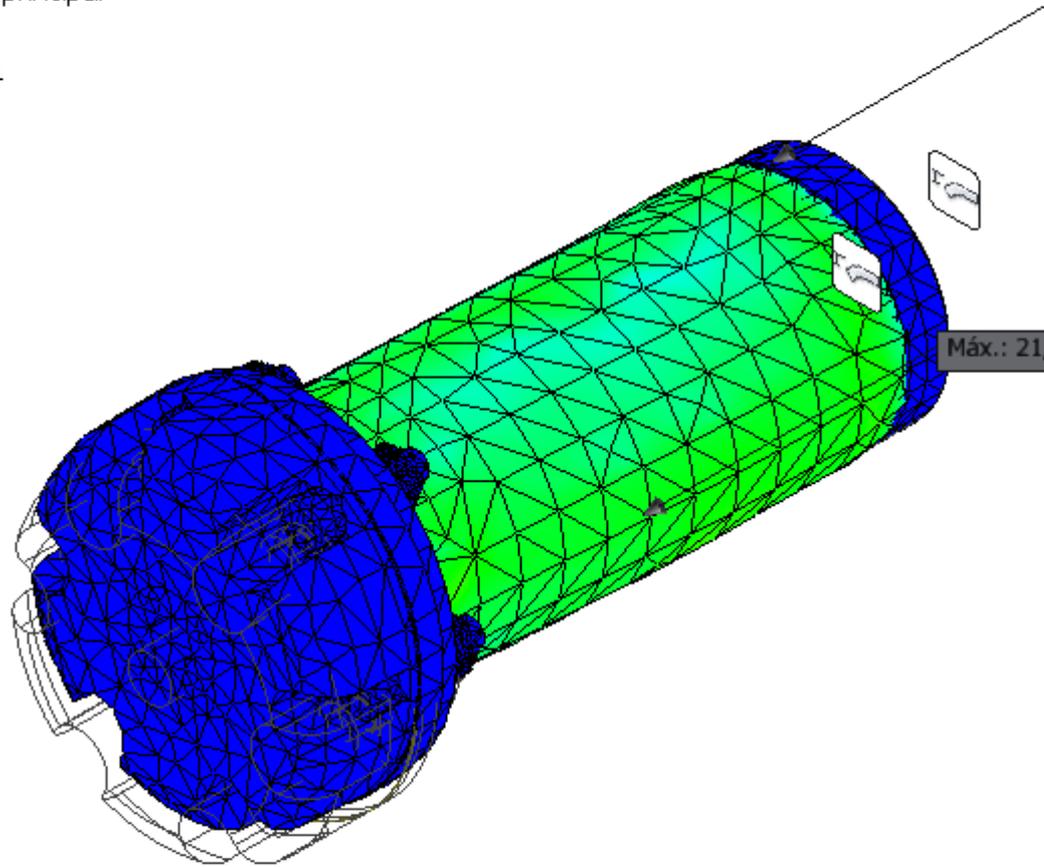
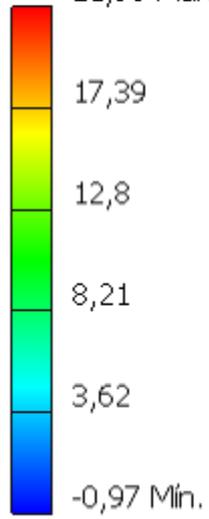
Elementos: 141765

Tipo: Primeira tensão principal

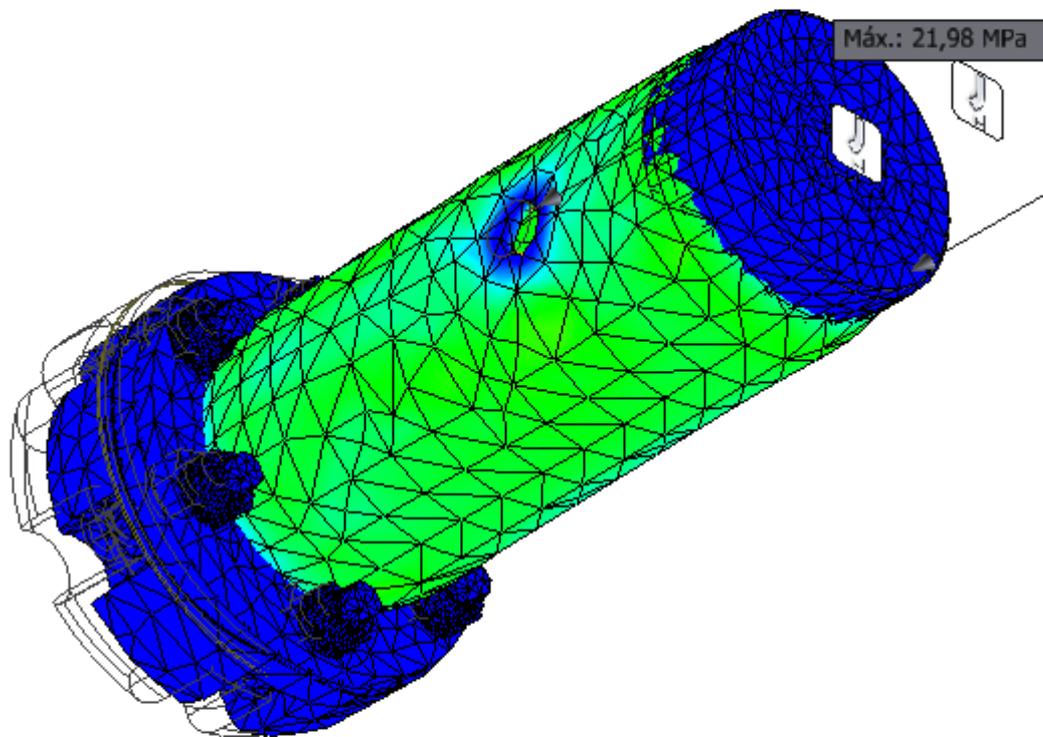
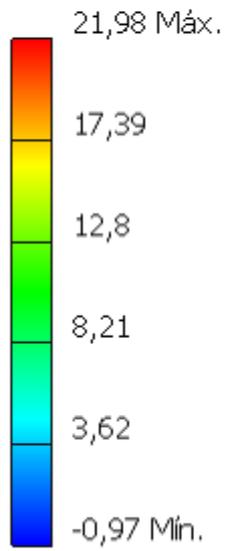
Unidade: MPa

26/03/2024, 22:37:11

21,98 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Primeira tensão principal
Unidade: MPa
26/03/2024, 22:37:11



Terceira tensão principal

Nós:246016

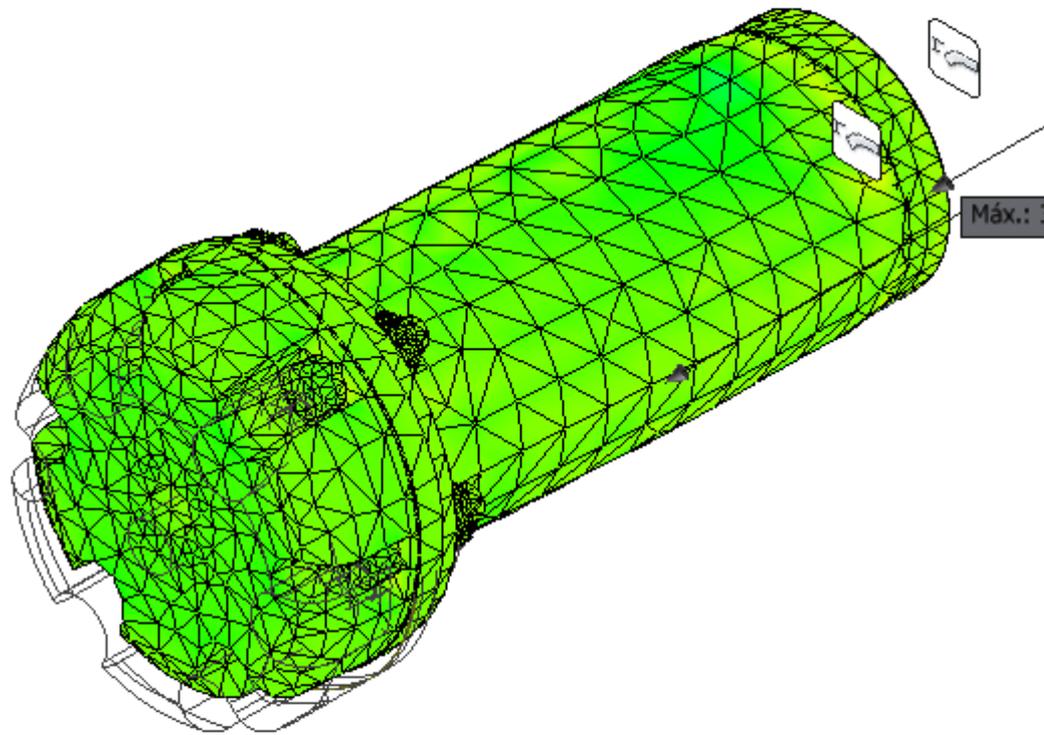
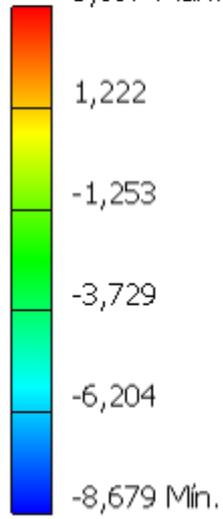
Elementos:141765

Tipo: Terceira tensão principal

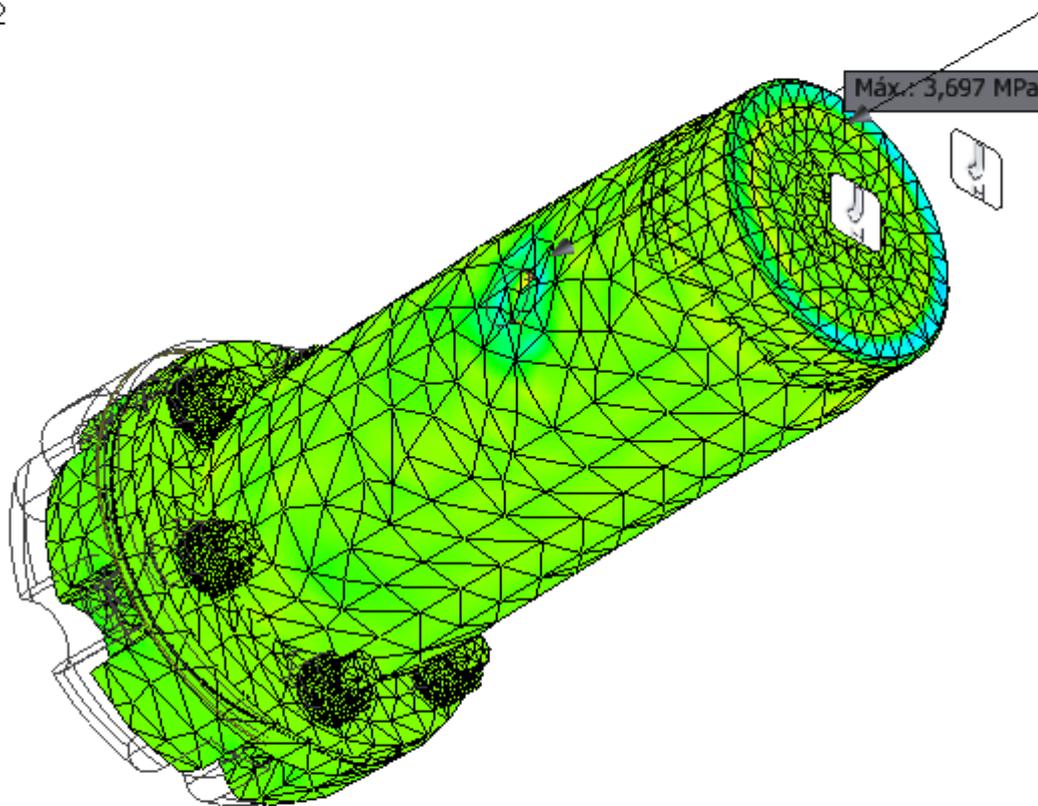
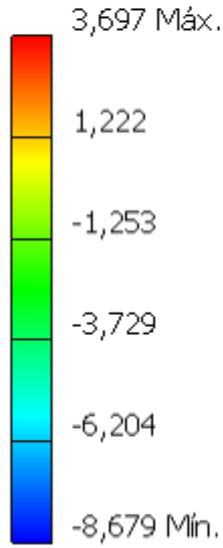
Unidade: MPa

26/03/2024, 22:37:12

3,697 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Terceira tensão principal
Unidade: MPa
26/03/2024, 22:37:12



Deslocamento

Nós: 246016

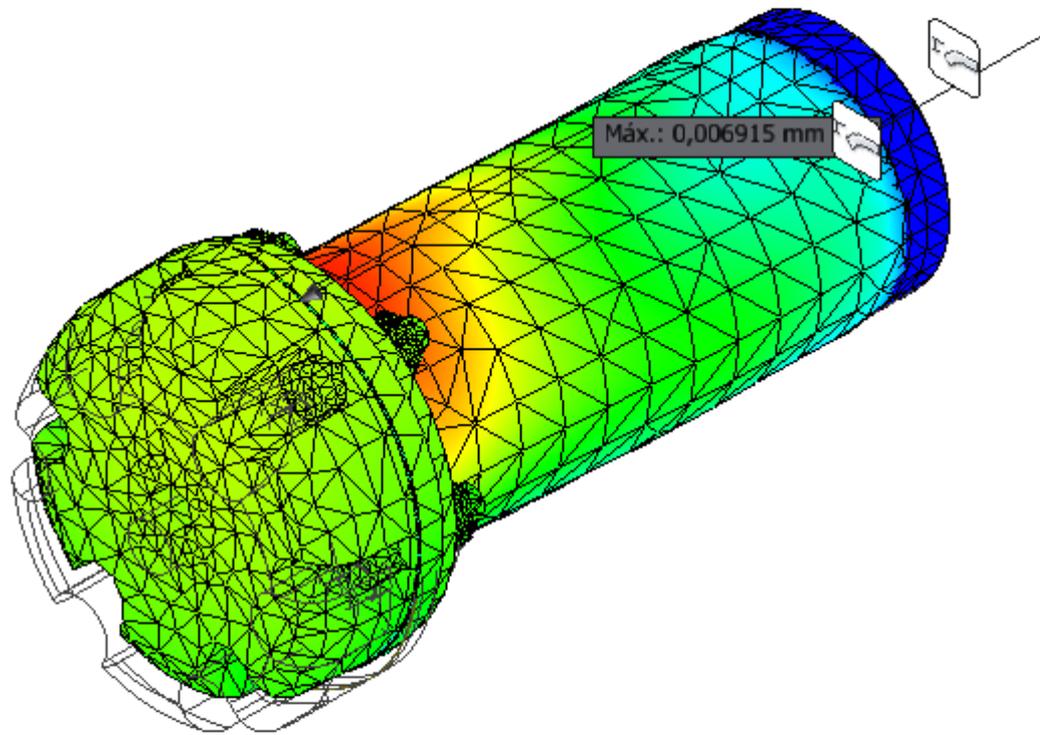
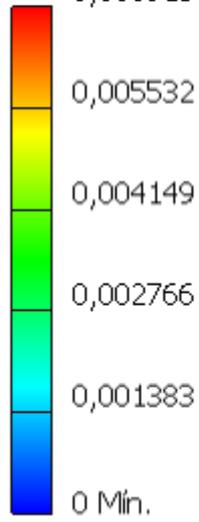
Elementos: 141765

Tipo: Deslocamento

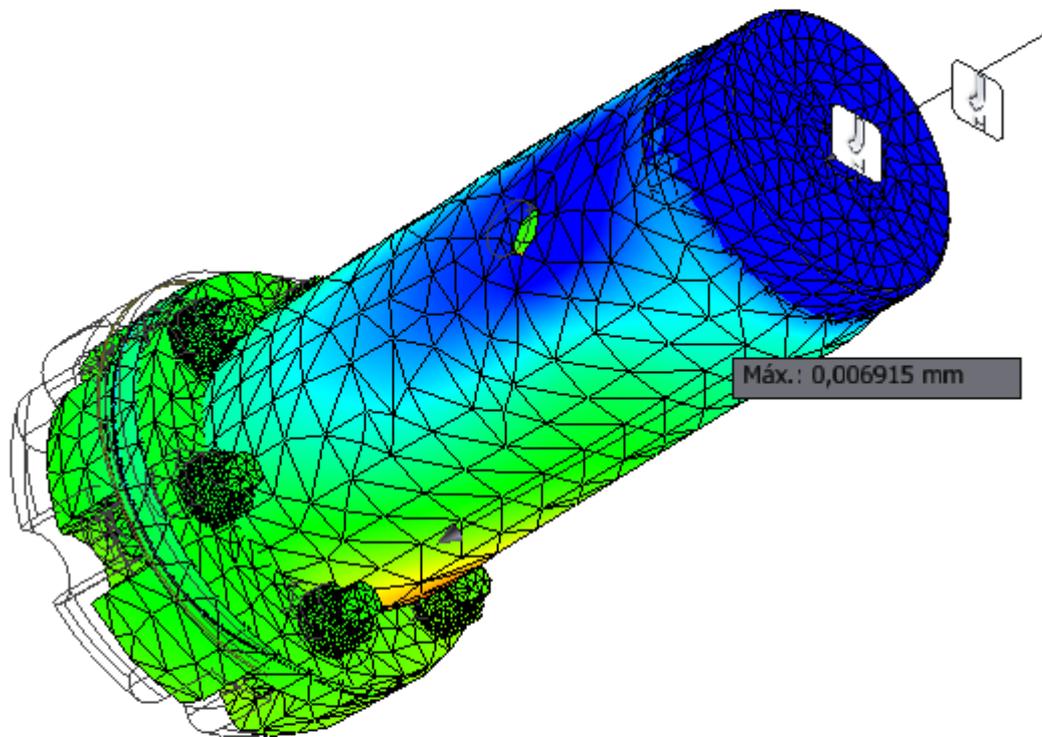
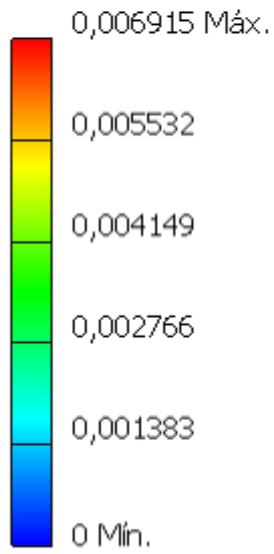
Unidade: mm

26/03/2024, 22:37:19

0,006915 Máx.

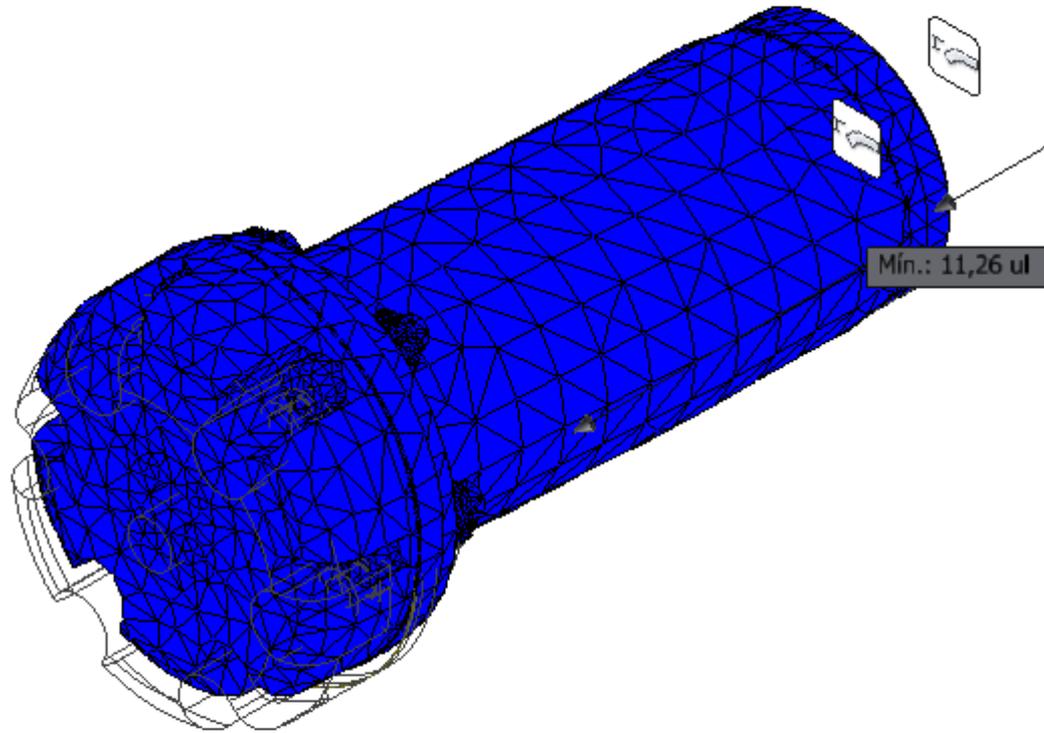
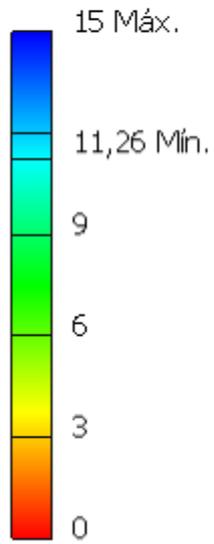


Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Deslocamento
Unidade: mm
26/03/2024, 22:37:19

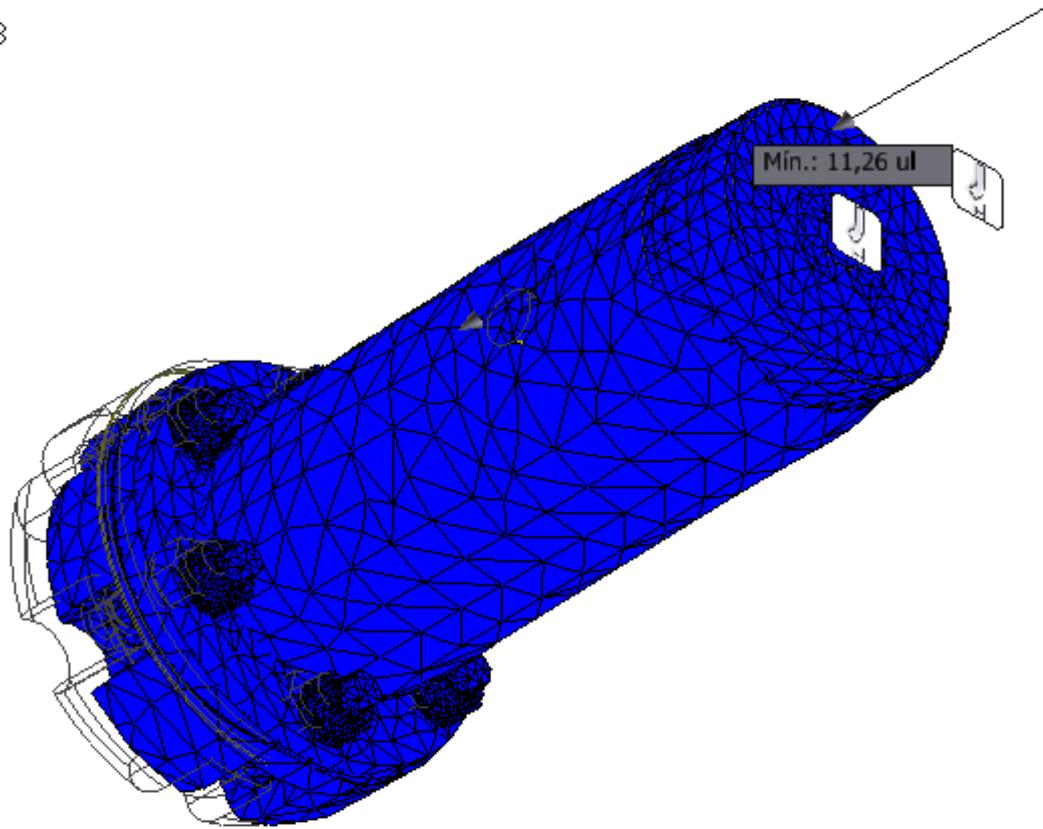
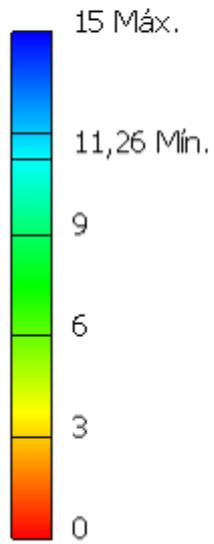


Fator de segurança

Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Fator de segurança
Unidade: ul
26/03/2024, 22:37:18



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Fator de segurança
Unidade: ul
26/03/2024, 22:37:18



Tensão XX

Nós: 246016

Elementos: 141765

Tipo: Tensão XX

Unidade: MPa

26/03/2024, 22:37:13

17,2 Máx.

13,18

9,16

5,13

1,11

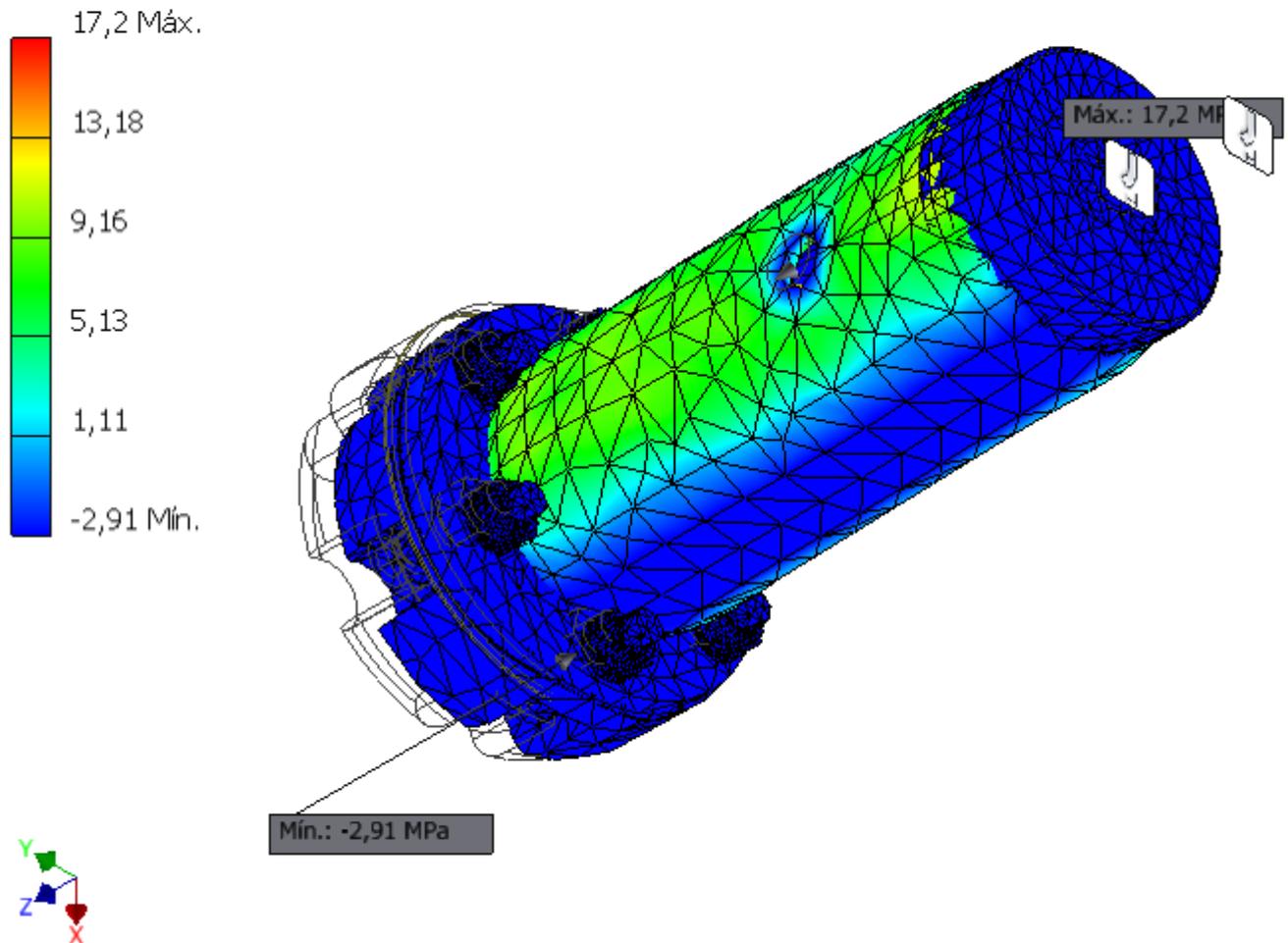
-2,91 Mín.

Mín.: -2,91 MPa

Máx.: 17,2 MPa



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Tensão XX
Unidade: MPa
26/03/2024, 22:37:13



Tensão XY

Nós: 246016

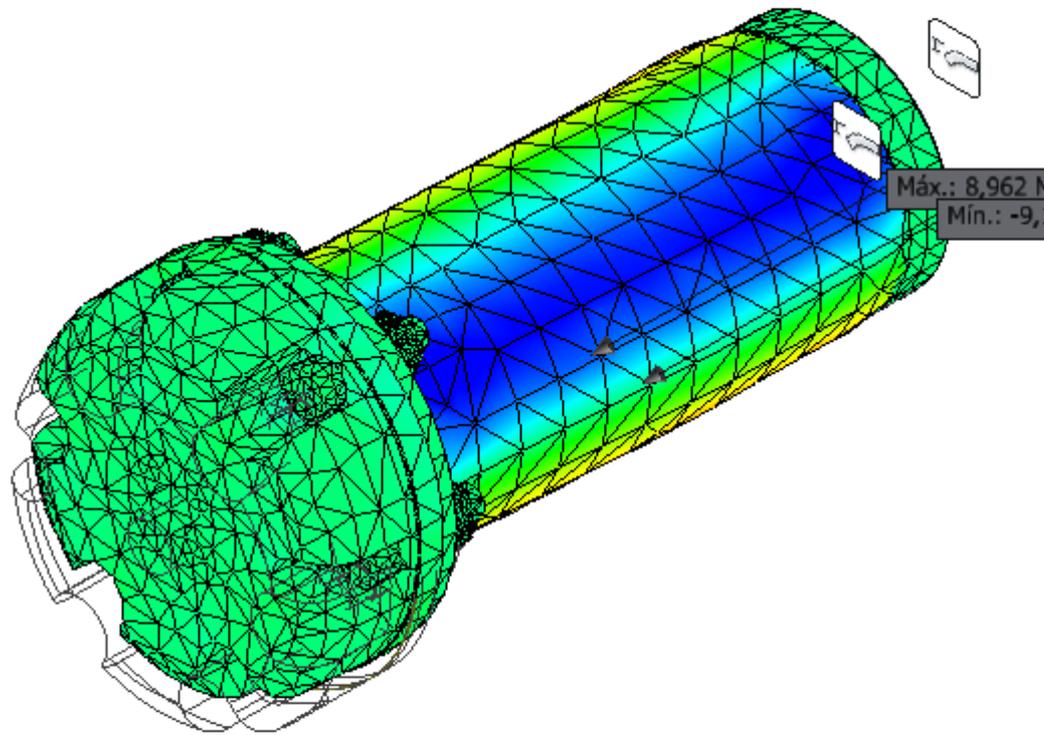
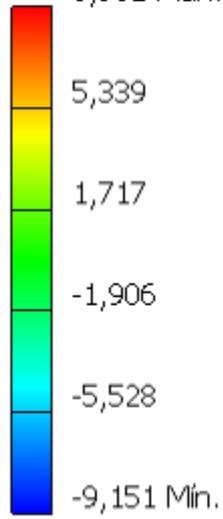
Elementos: 141765

Tipo: Tensão XY

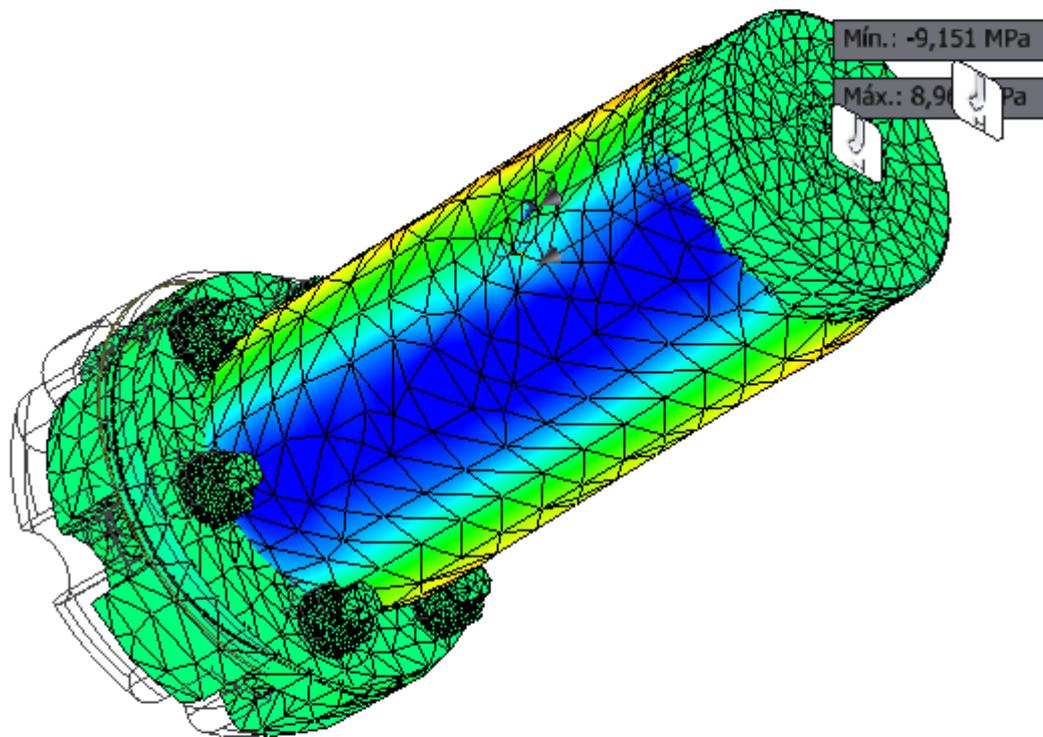
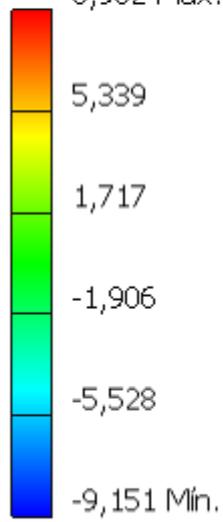
Unidade: MPa

26/03/2024, 22:37:14

8,962 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Tensão XY
Unidade: MPa
26/03/2024, 22:37:14
8,962 Máx.



Tensão XZ

Nós: 246016

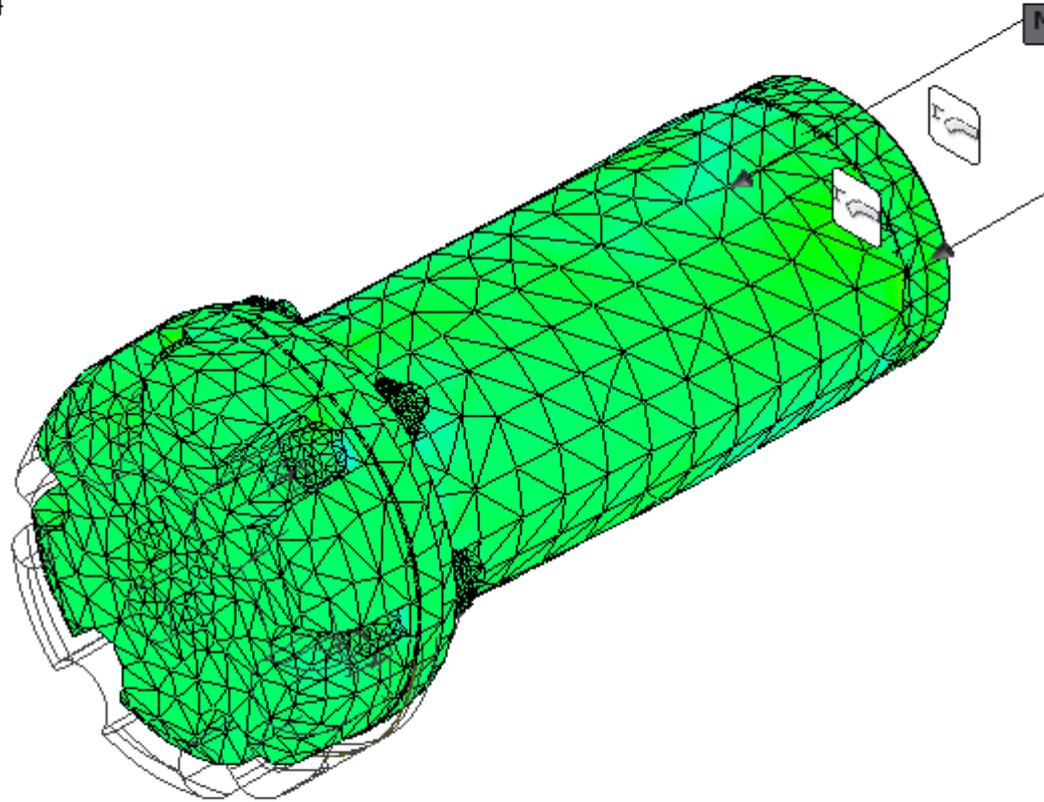
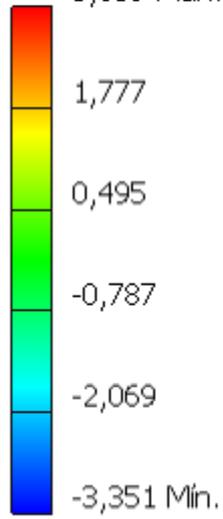
Elementos: 141765

Tipo: Tensão XZ

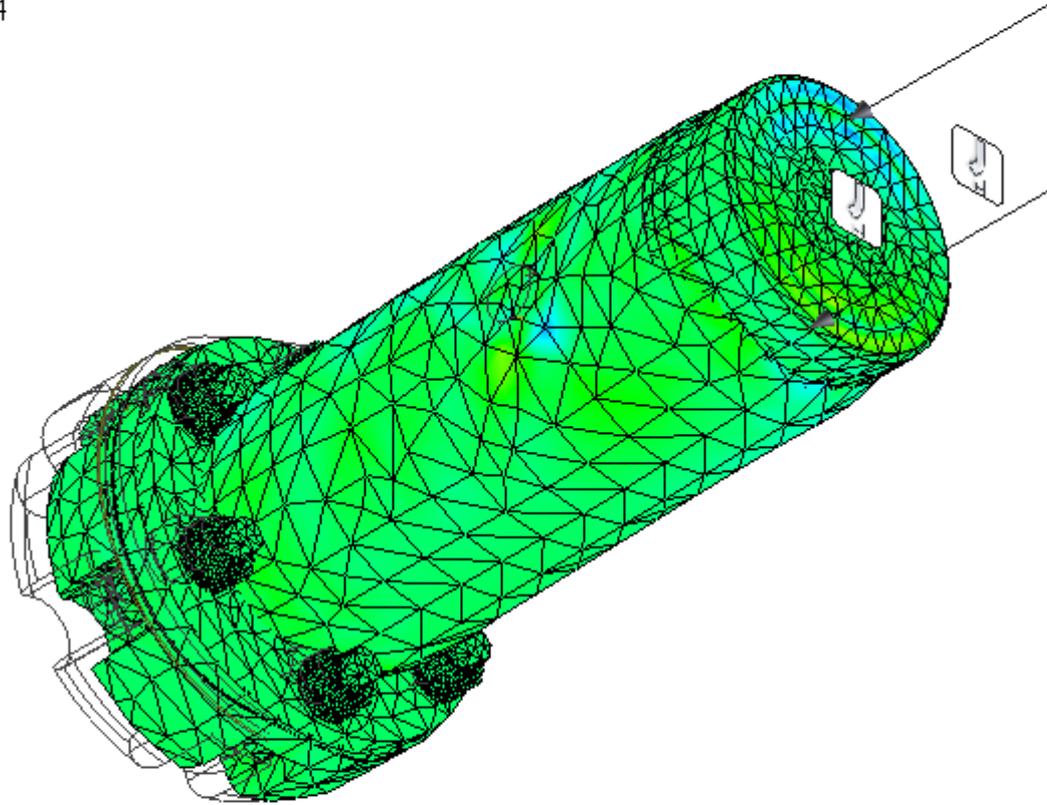
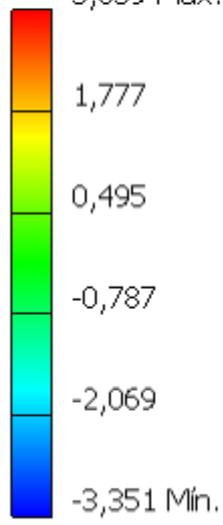
Unidade: MPa

26/03/2024, 22:37:14

3,059 Máx.

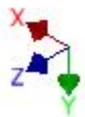
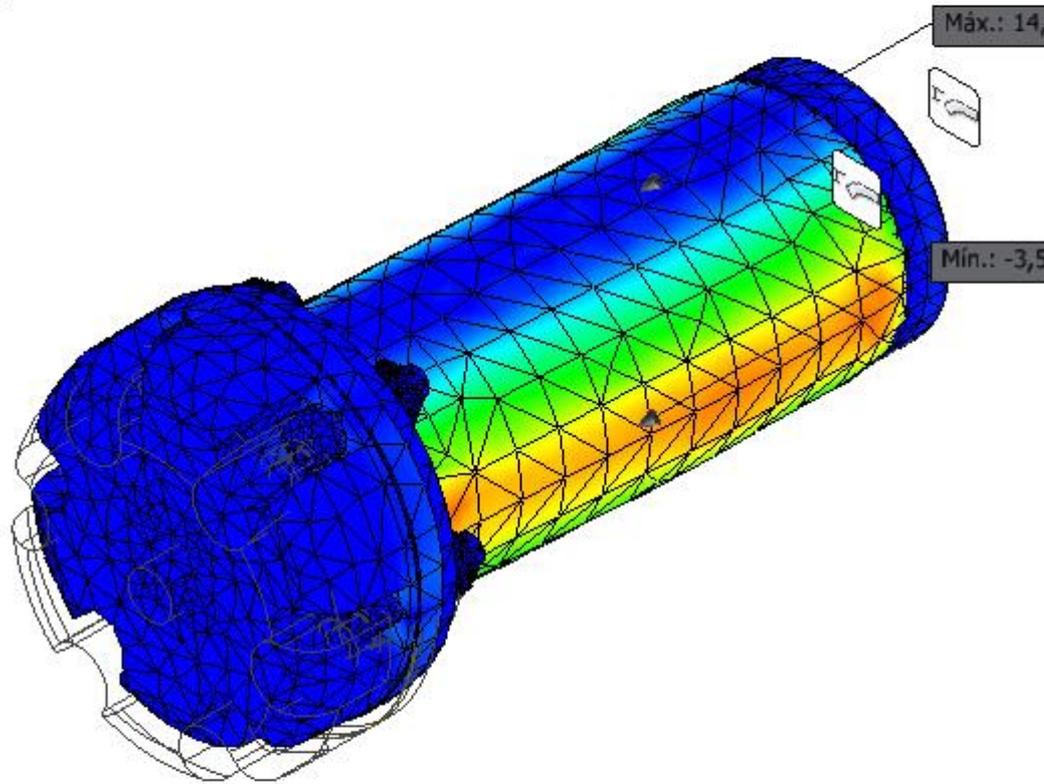
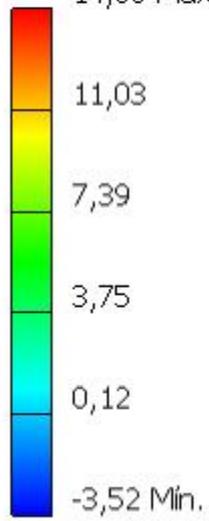


Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Tensão XZ
Unidade: MPa
26/03/2024, 22:37:14
3,059 Máx.

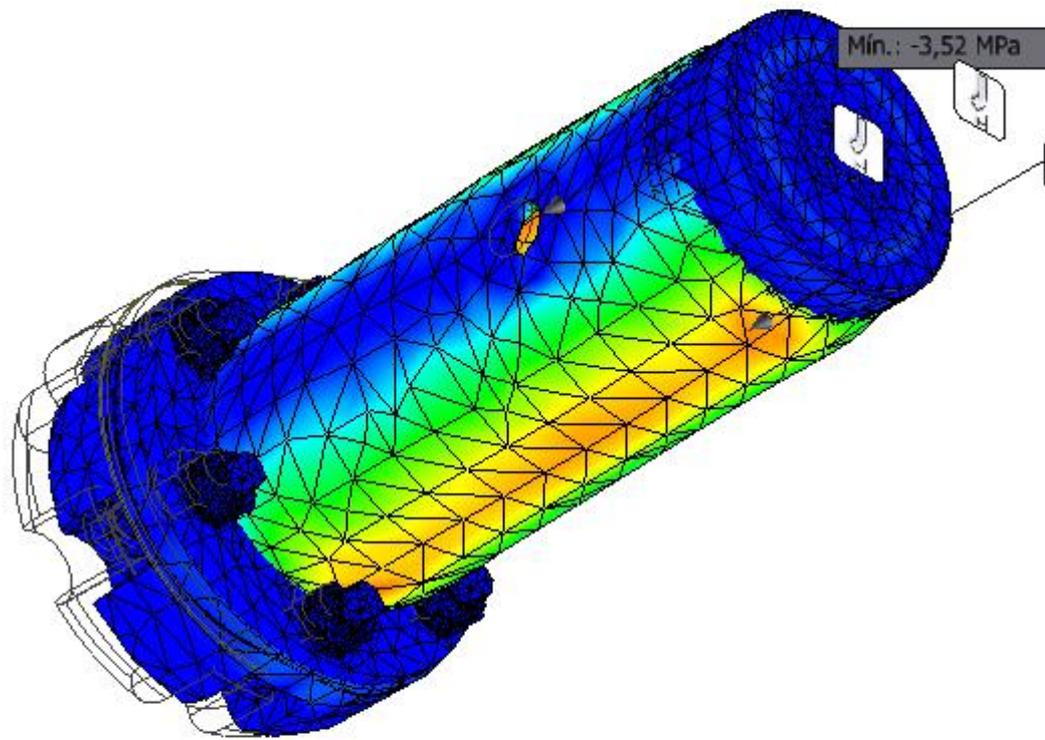
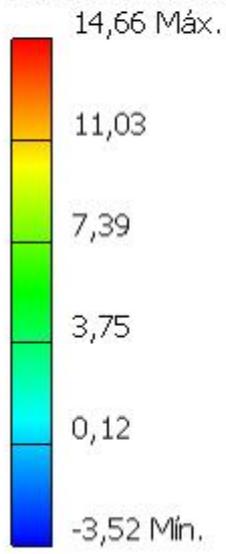


Tensão YY

Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Tensão YY
Unidade: MPa
26/03/2024, 22:37:15
14,66 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Tensão YY
Unidade: MPa
26/03/2024, 22:37:15



Tensão YZ

Nós: 246016

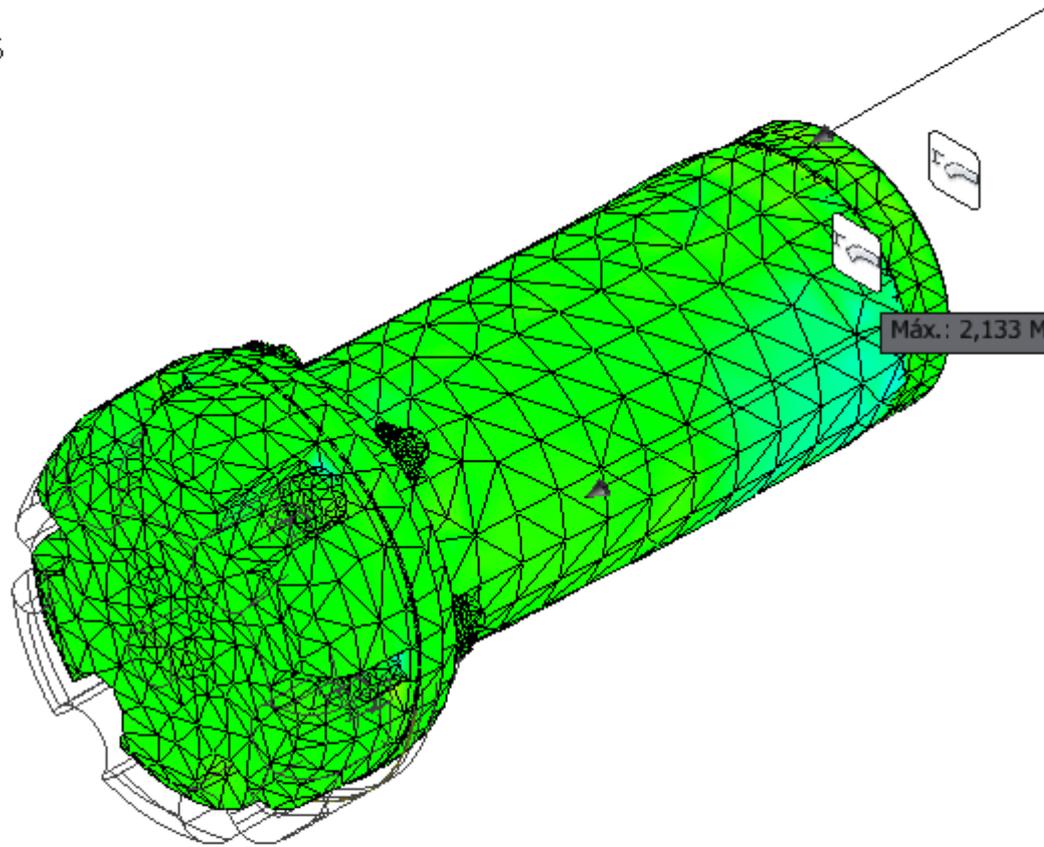
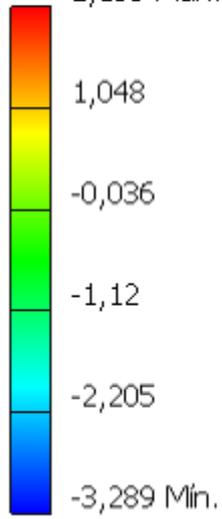
Elementos: 141765

Tipo: Tensão YZ

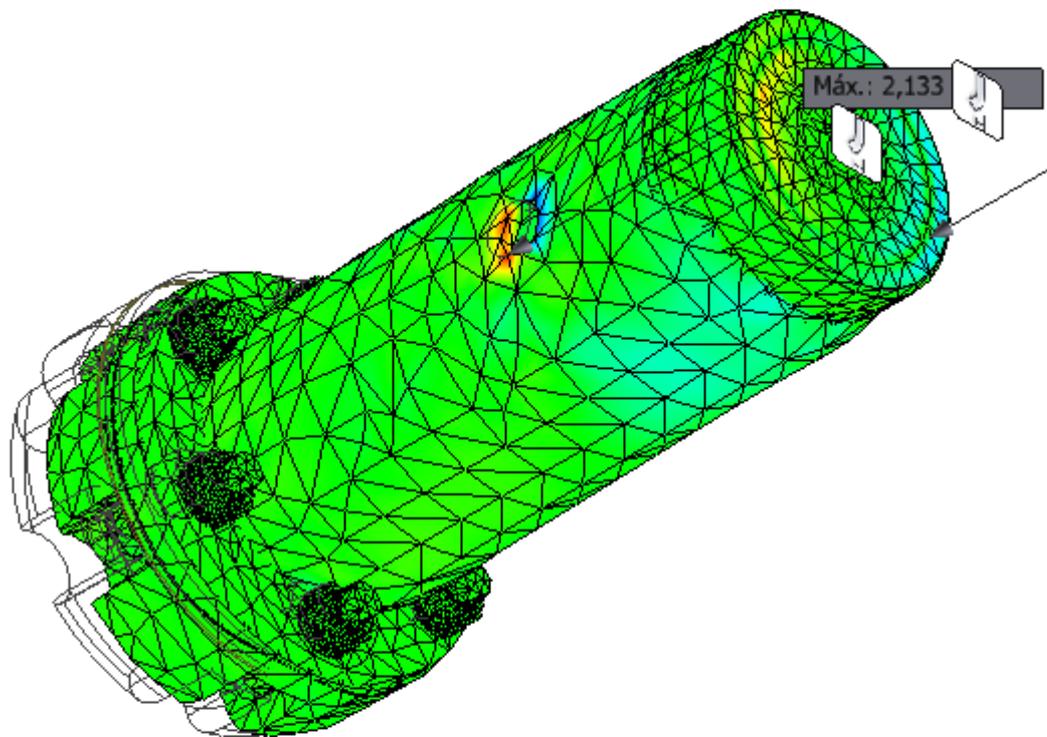
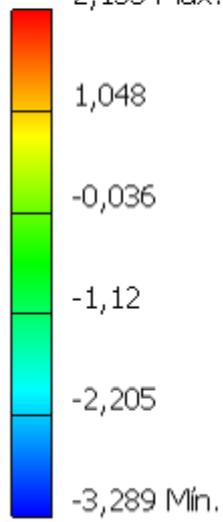
Unidade: MPa

26/03/2024, 22:37:16

2,133 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Tensão YZ
Unidade: MPa
26/03/2024, 22:37:16
2,133 Máx.



Tensão ZZ

Nós: 246016

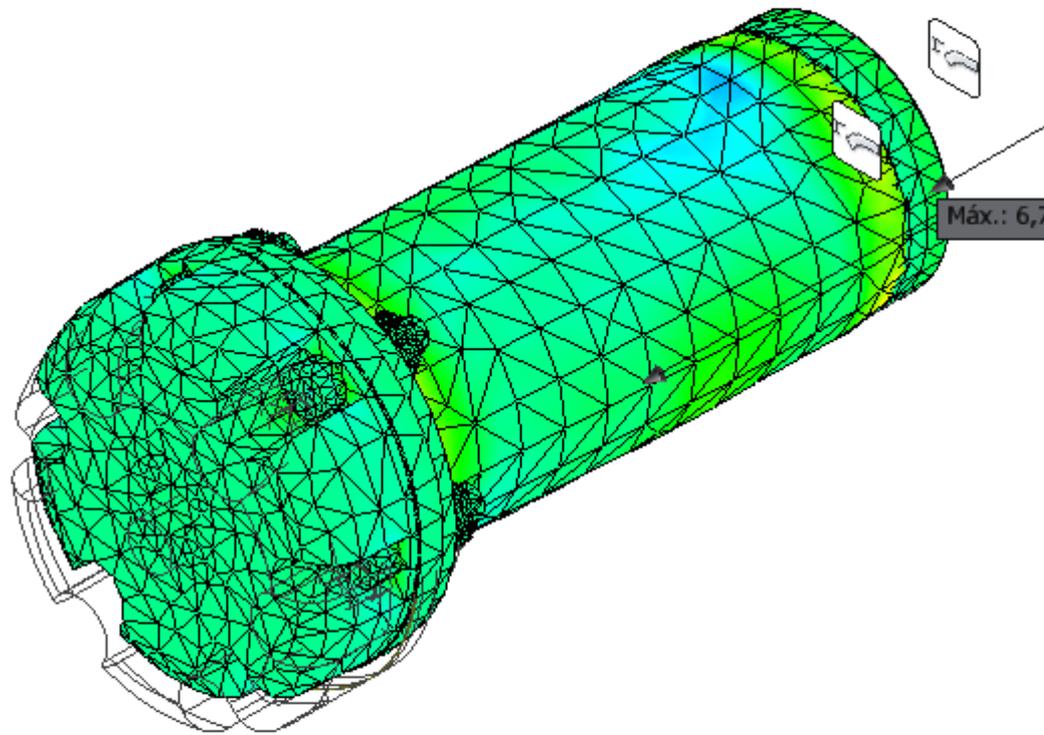
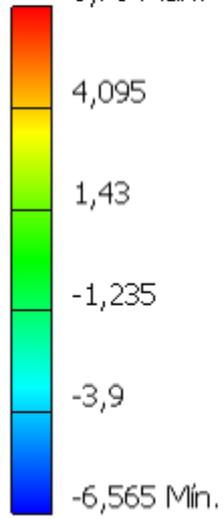
Elementos: 141765

Tipo: Tensão ZZ

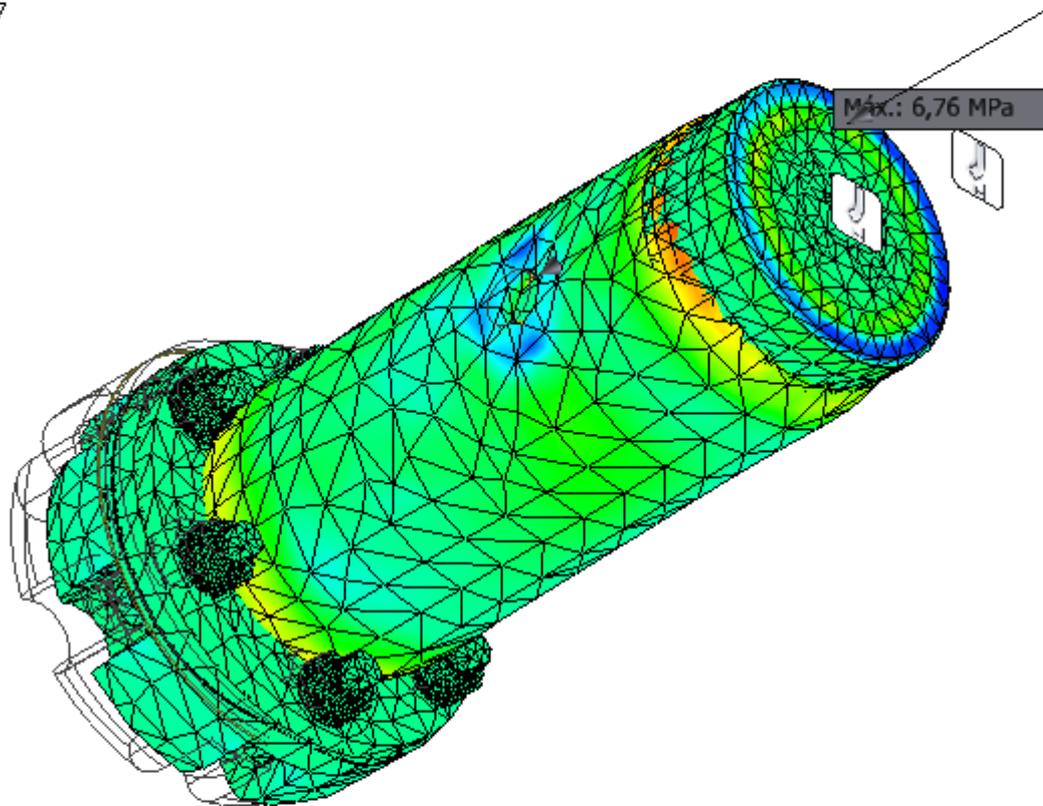
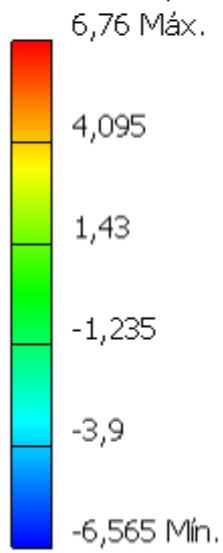
Unidade: MPa

26/03/2024, 22:37:17

6,76 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Tensão ZZ
Unidade: MPa
26/03/2024, 22:37:17



Deslocamento X

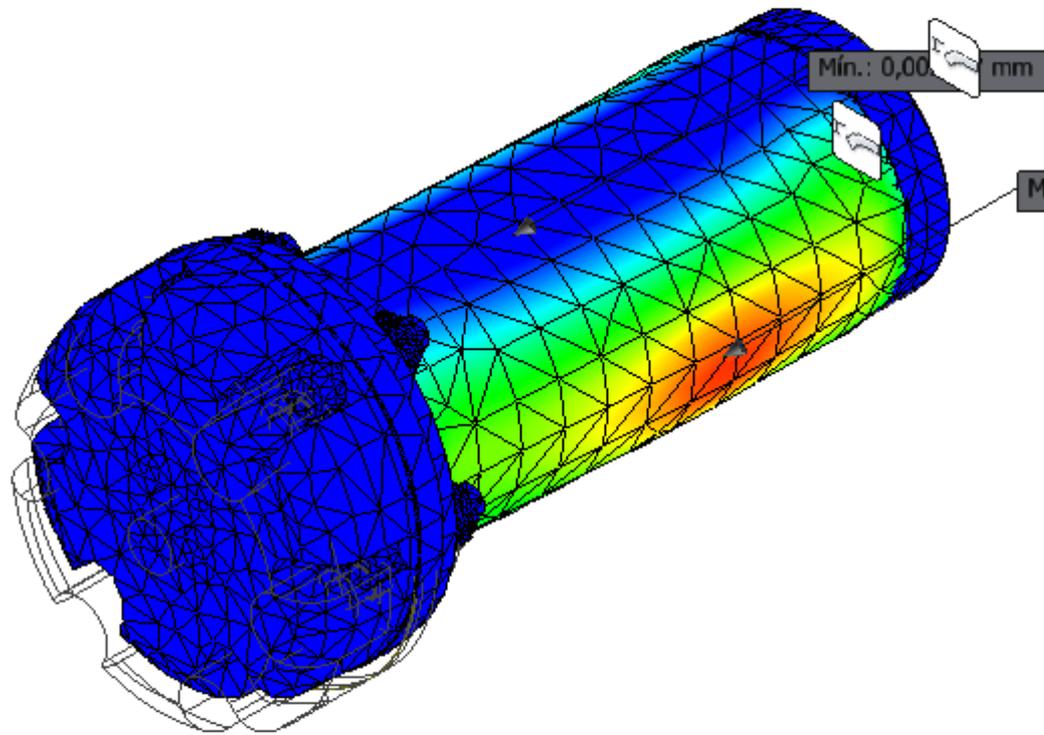
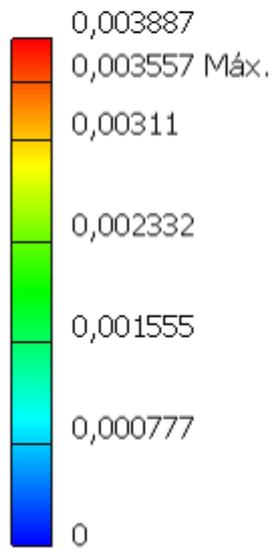
Nós: 246016

Elementos: 141765

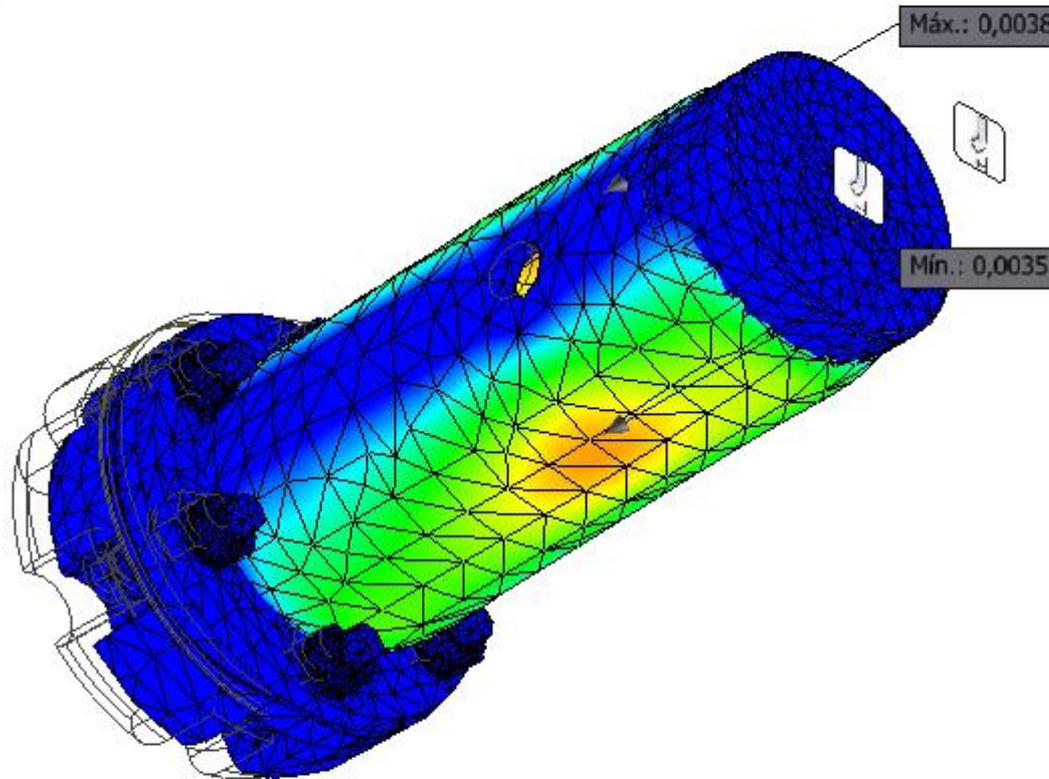
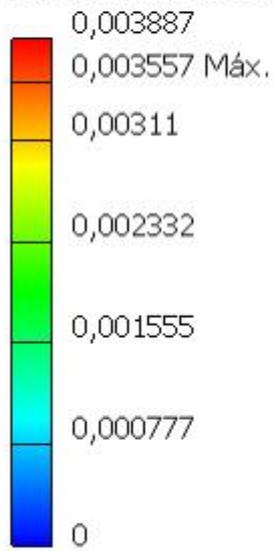
Tipo: Deslocamento X

Unidade: mm

26/03/2024, 22:37:19

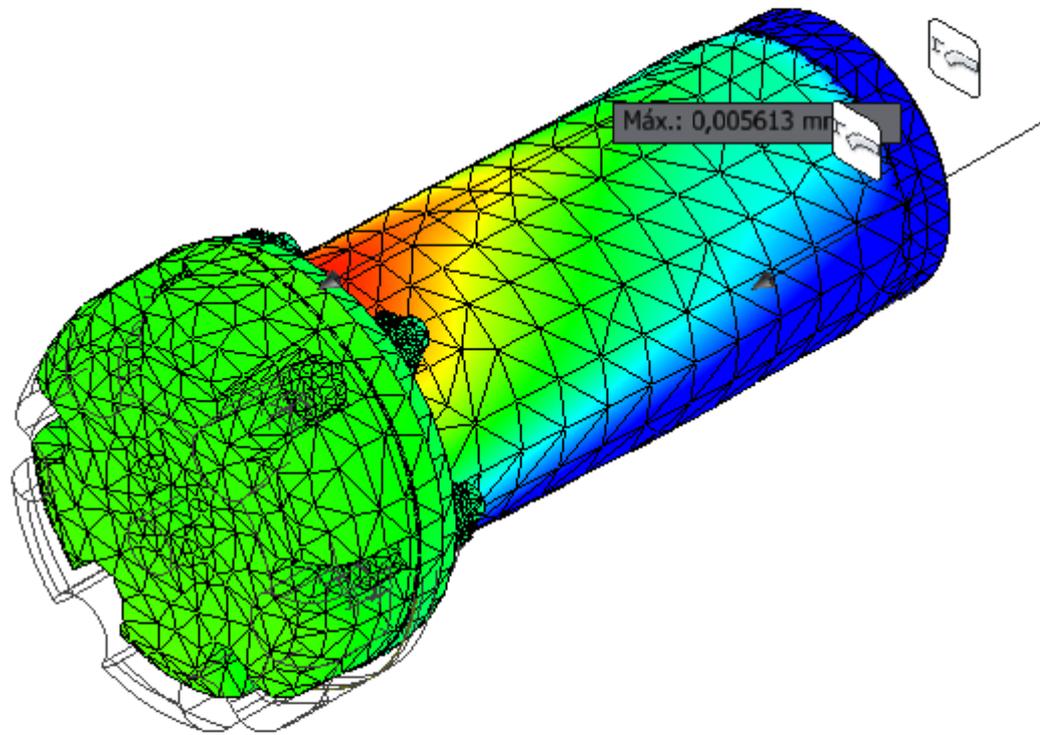
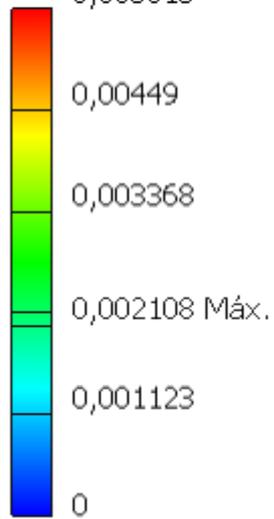


Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Deslocamento X
Unidade: mm
26/03/2024, 22:37:19

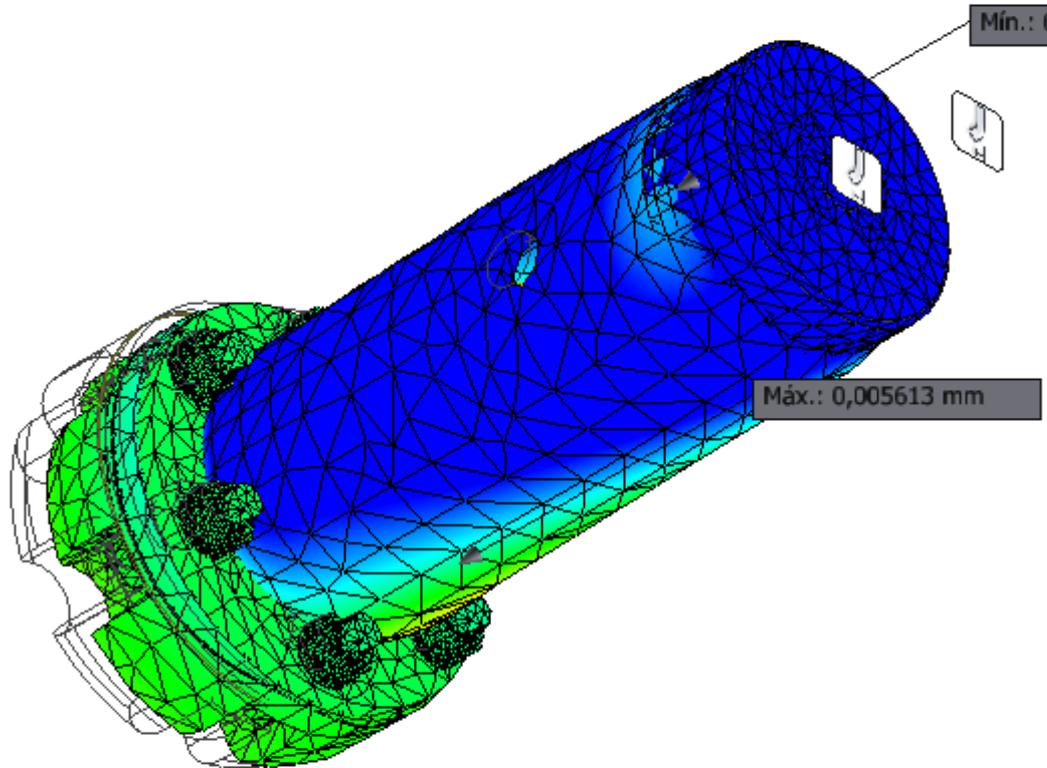
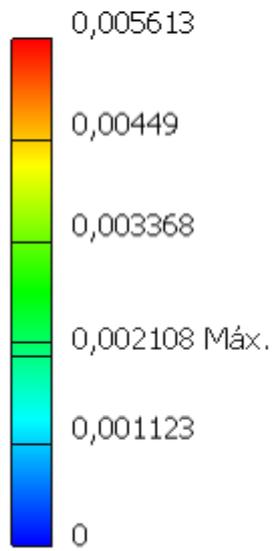


Deslocamento Y

Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Deslocamento Y
Unidade: mm
26/03/2024, 22:37:20
0,005613



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Deslocamento Y
Unidade: mm
26/03/2024, 22:37:20



Deslocamento Z

Nós: 246016

Elementos: 141765

Tipo: Deslocamento Z

Unidade: mm

26/03/2024, 22:37:21

0,004713

0,003771

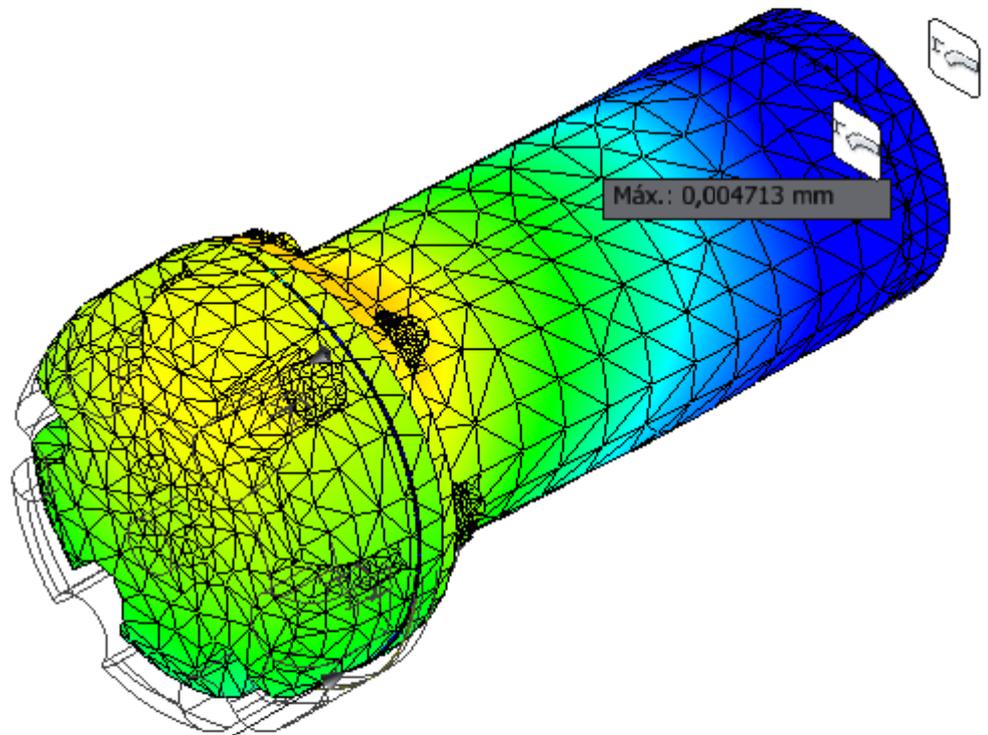
0,002828

0,001885

0,000943

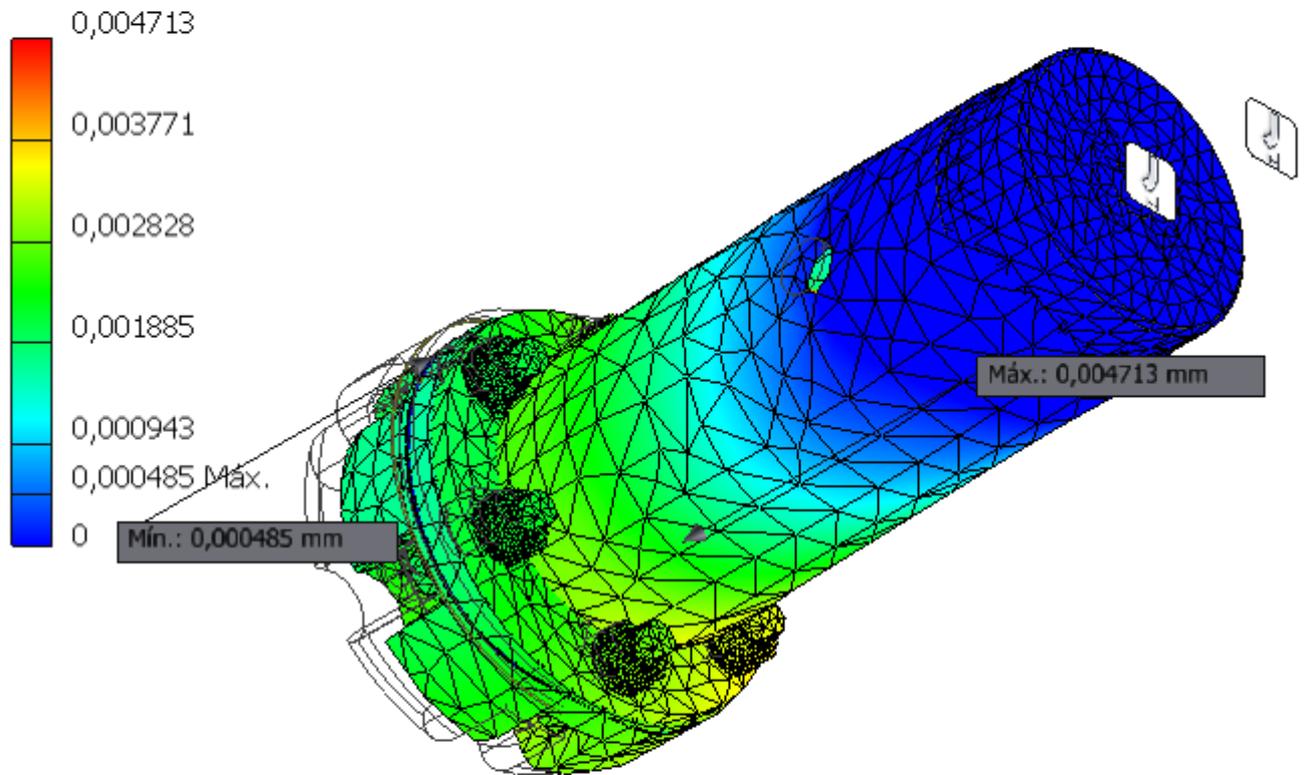
0,000485 M_{áx.}

0



Mín.: 0,000485 mm

Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Deslocamento Z
Unidade: mm
26/03/2024, 22:37:21



Deformação equivalente

Nós: 246016

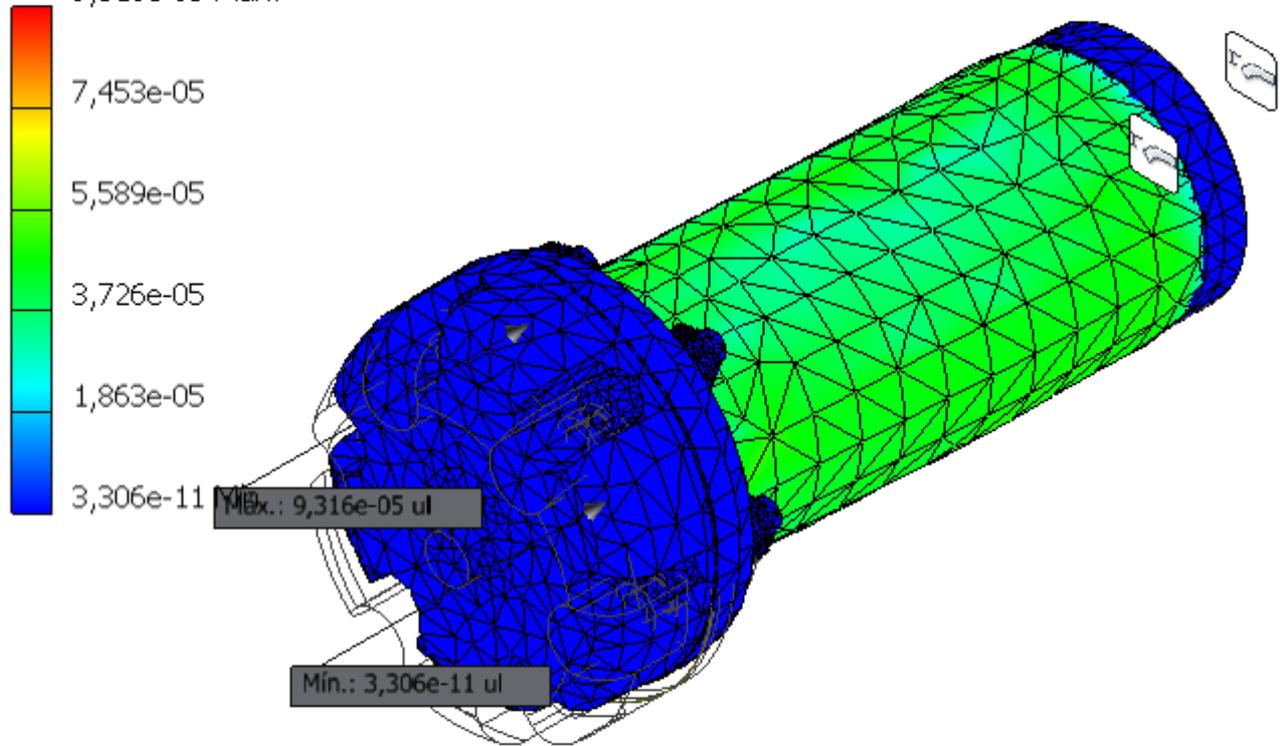
Elementos: 141765

Tipo: Deformação equivalente

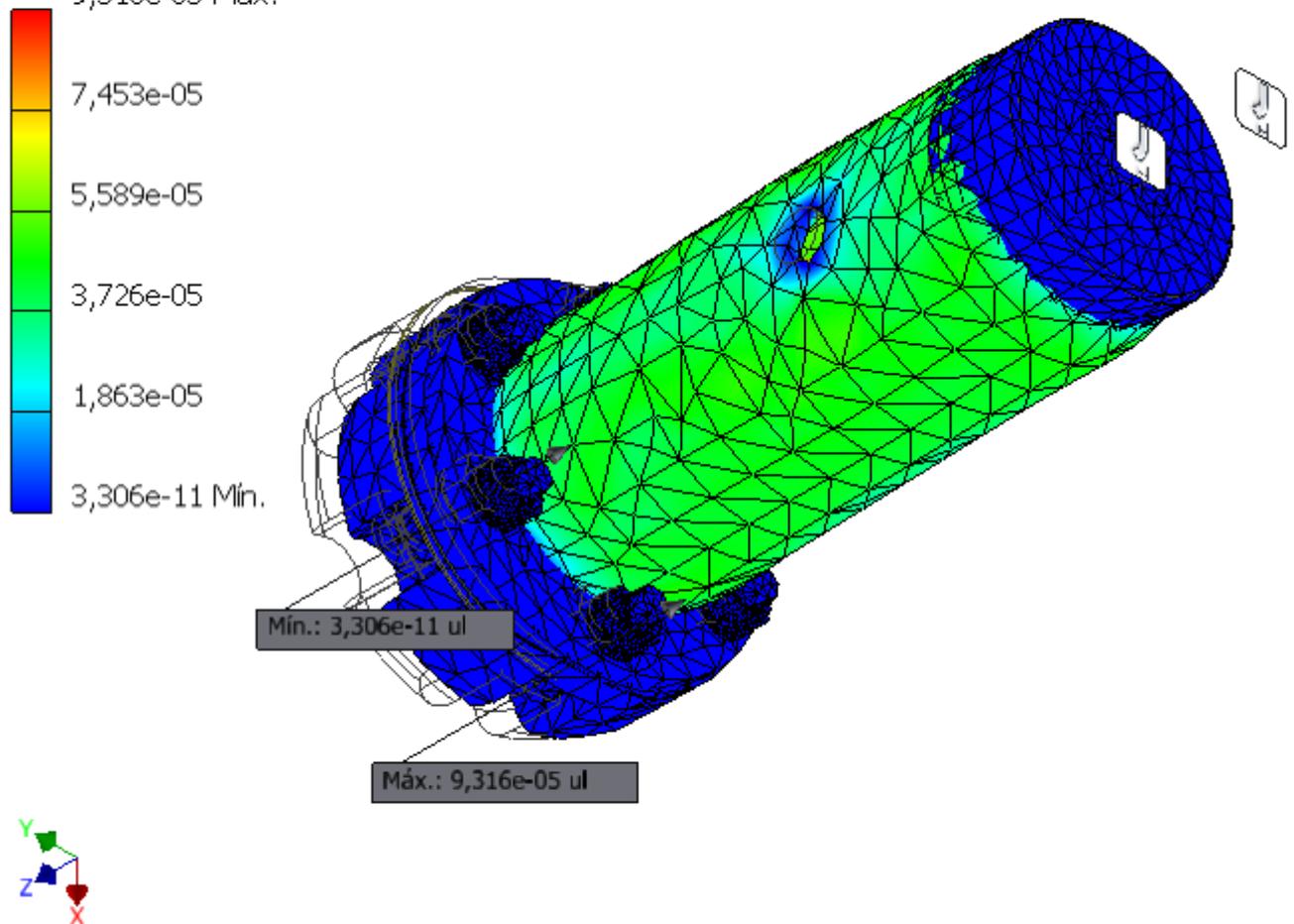
Unidade: ul

26/03/2024, 22:37:22

9,316e-05 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Deformação equivalente
Unidade: ul
26/03/2024, 22:37:22
9,316e-05 Máx.



Primeira deformação principal

Nós: 246016

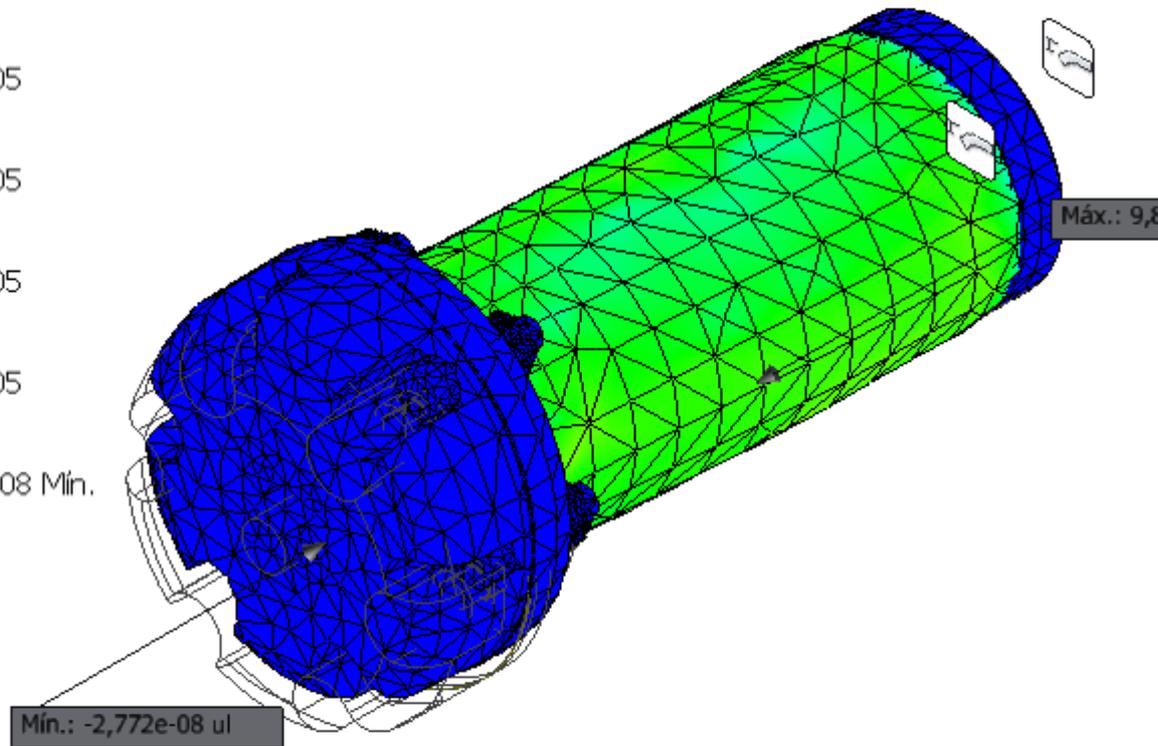
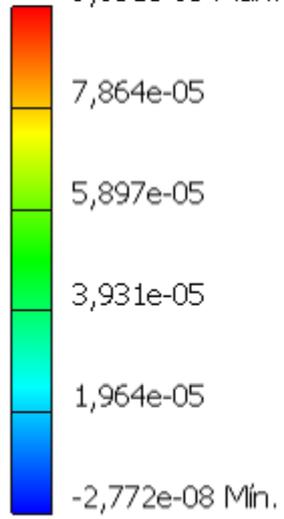
Elementos: 141765

Tipo: Primeira deformação principal

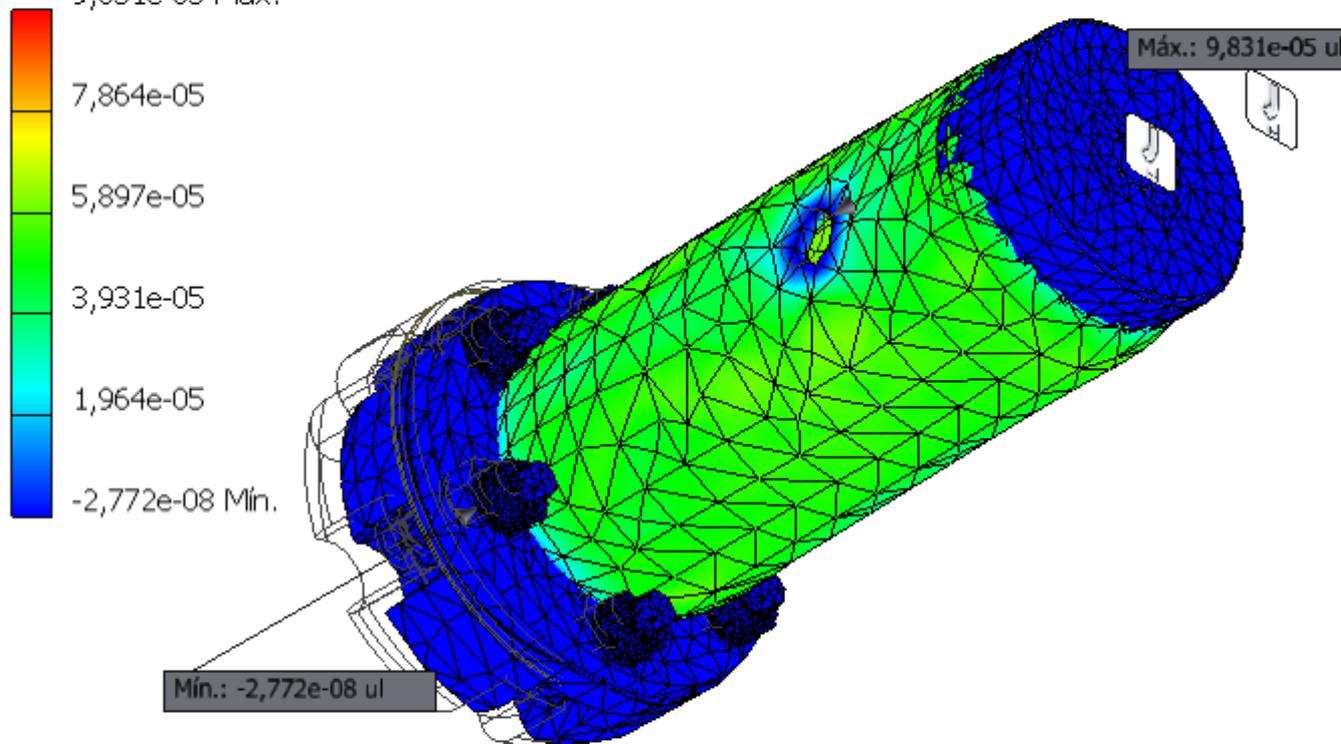
Unidade: ul

26/03/2024, 22:37:23

9,831e-05 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Primeira deformação principal
Unidade: ul
26/03/2024, 22:37:23
9,831e-05 Máx.



Terceira deformação principal

Nós:246016

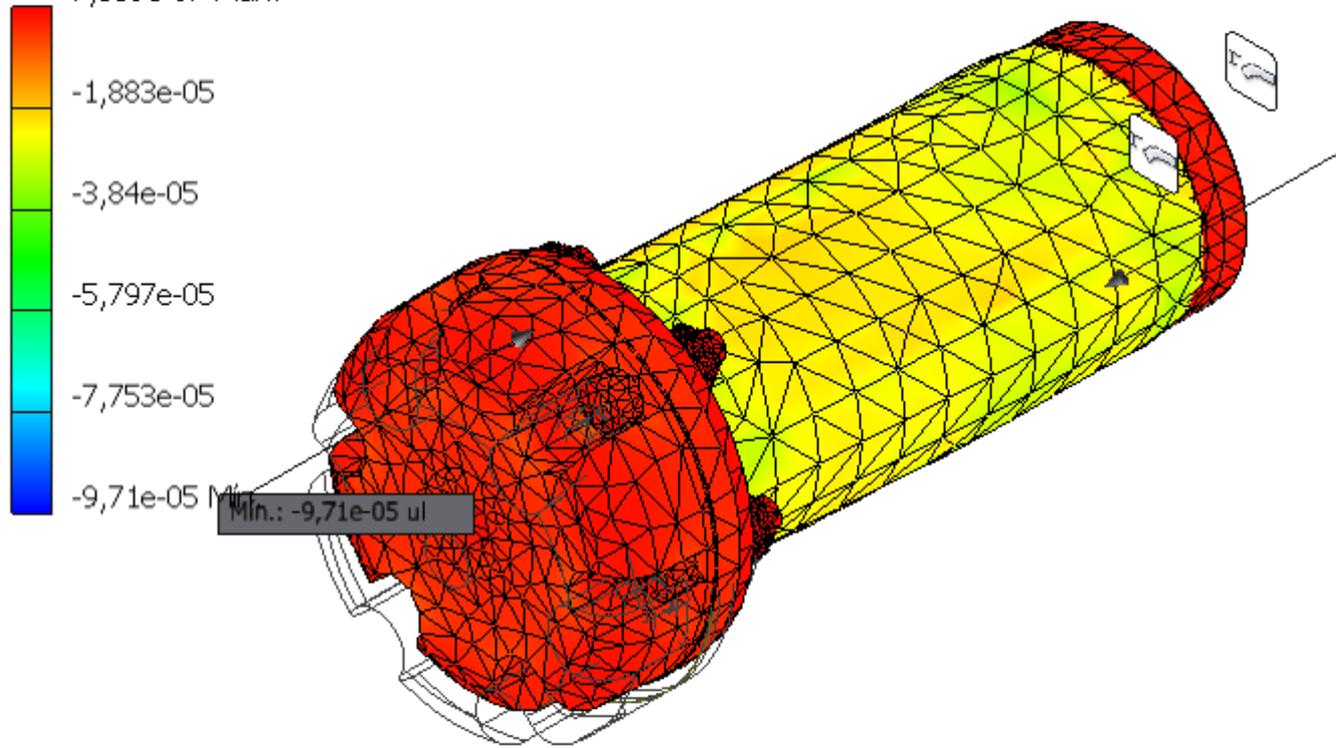
Elementos:141765

Tipo: Terceira deformação principal

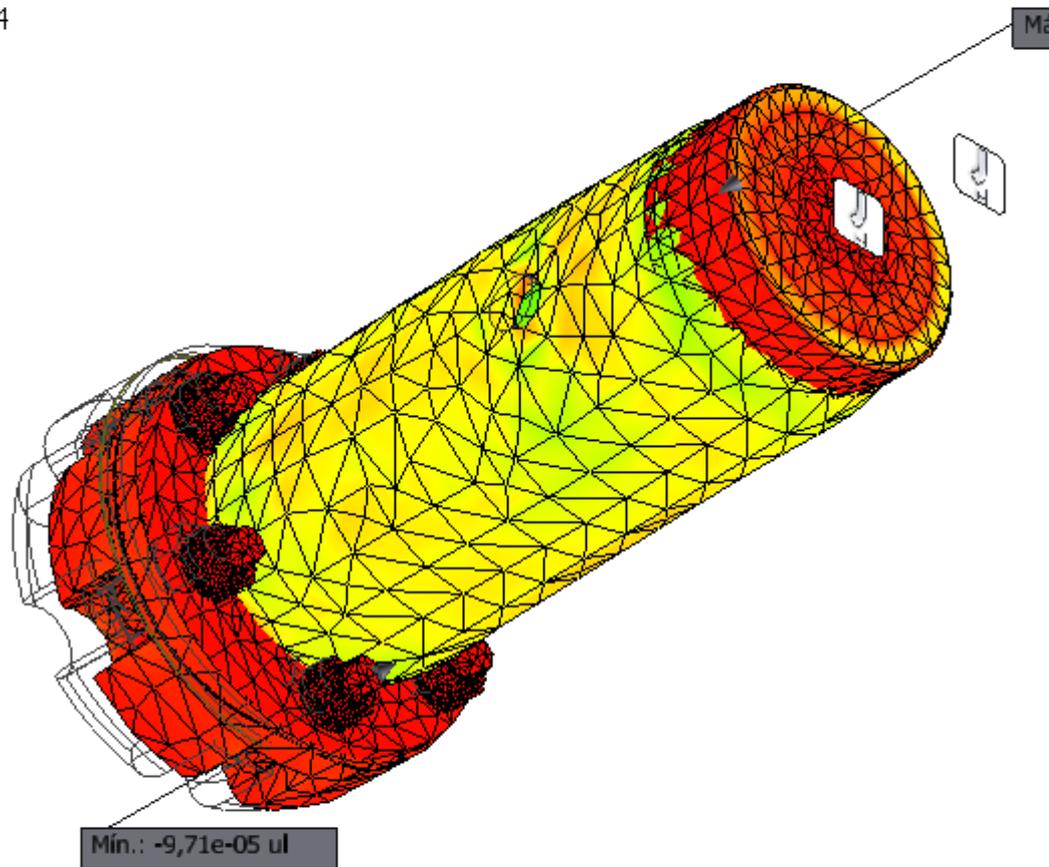
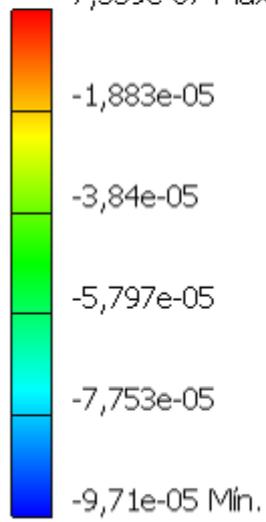
Unidade: ul

26/03/2024, 22:37:24

7,339e-07 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Terceira deformação principal
Unidade: ul
26/03/2024, 22:37:24
7,339e-07 Máx.



Deformação XX

Nós: 246016

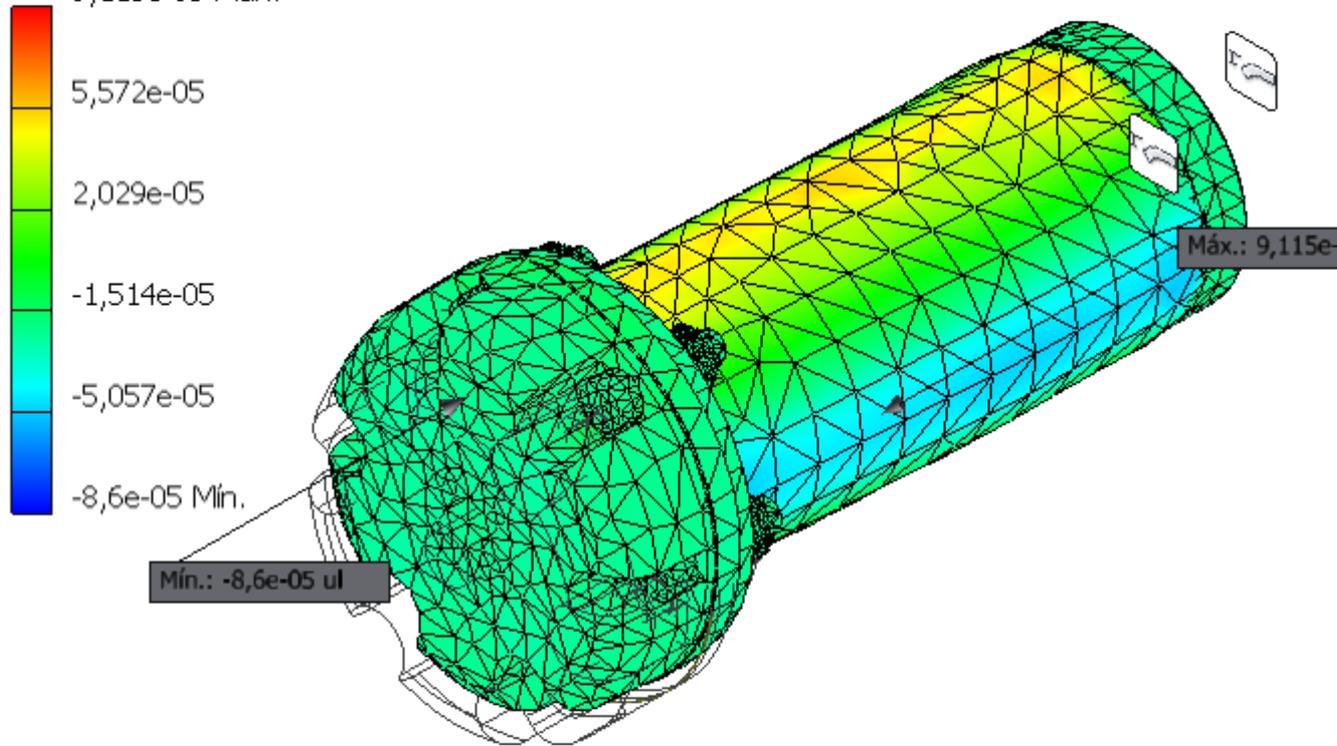
Elementos: 141765

Tipo: Deformação XX

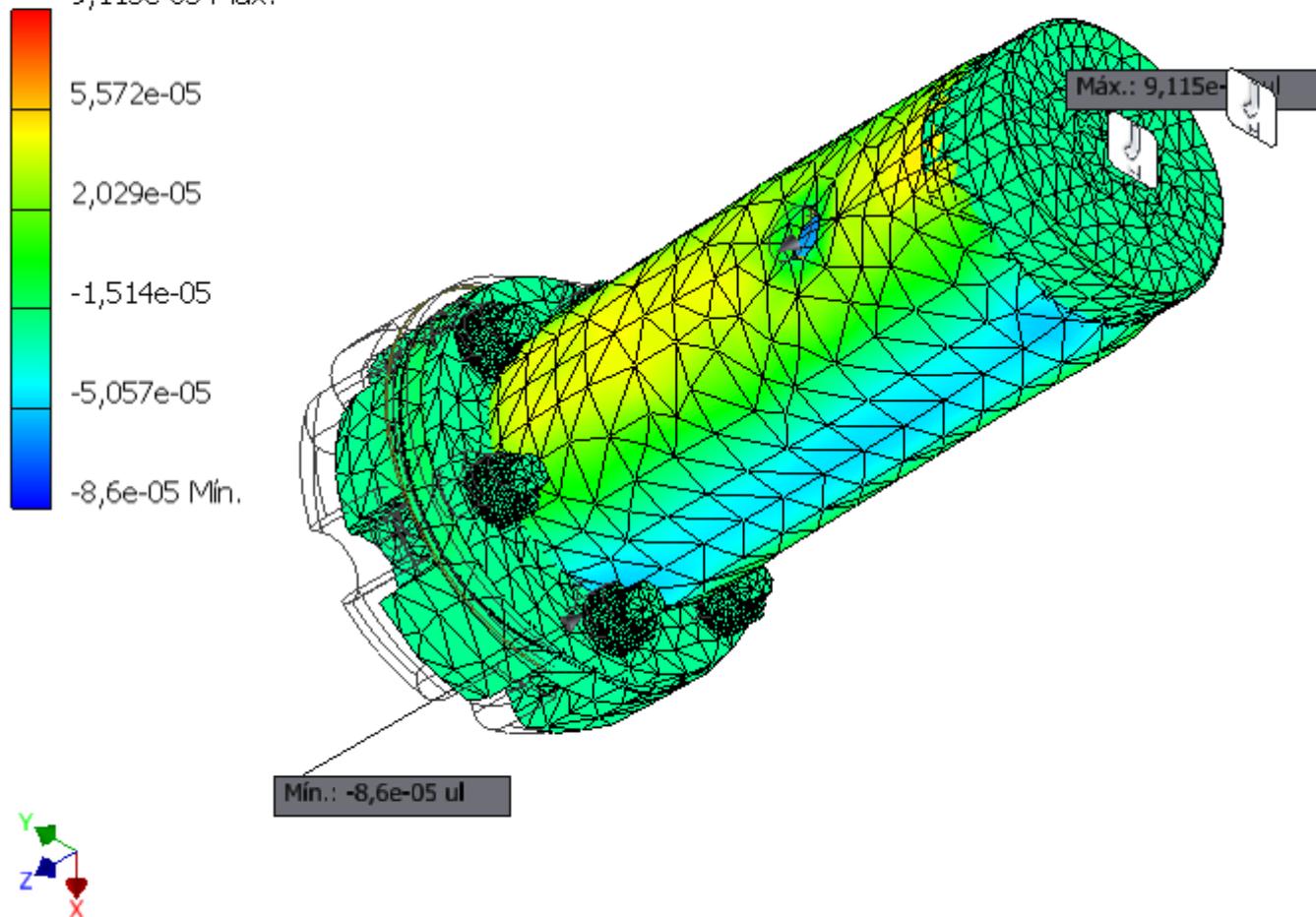
Unidade: ul

26/03/2024, 22:37:24

9,115e-05 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Deformação XX
Unidade: ul
26/03/2024, 22:37:24
9,115e-05 Máx.



Deformação XY

Nós: 246016

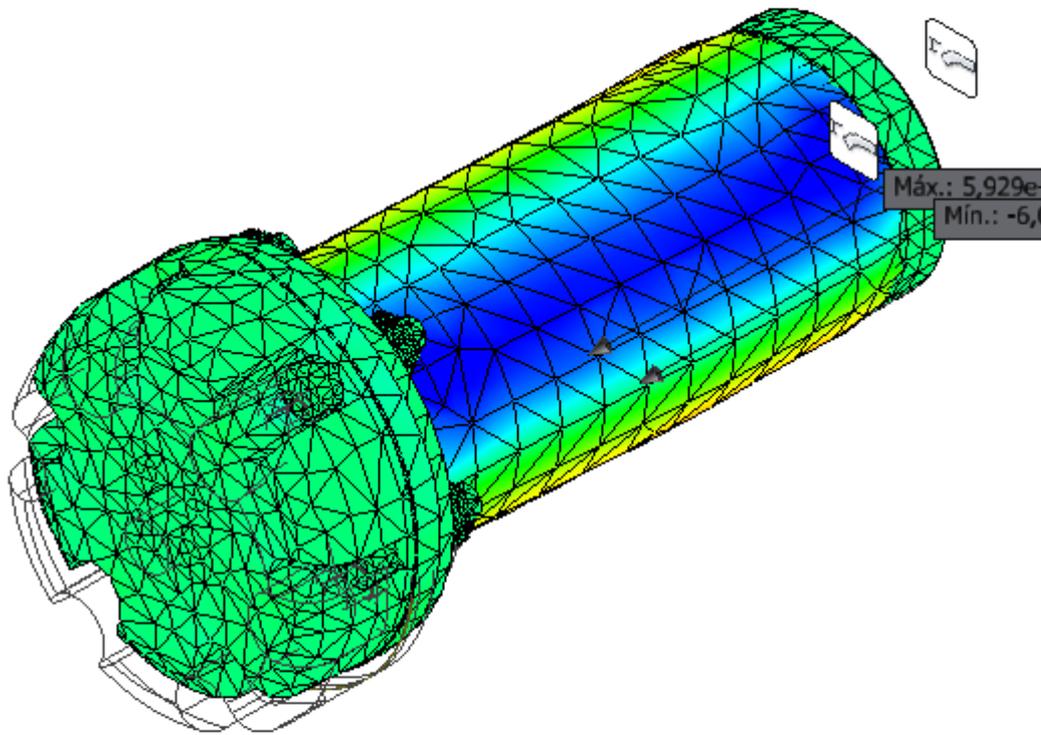
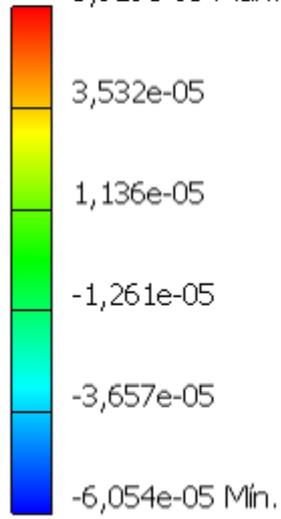
Elementos: 141765

Tipo: Deformação XY

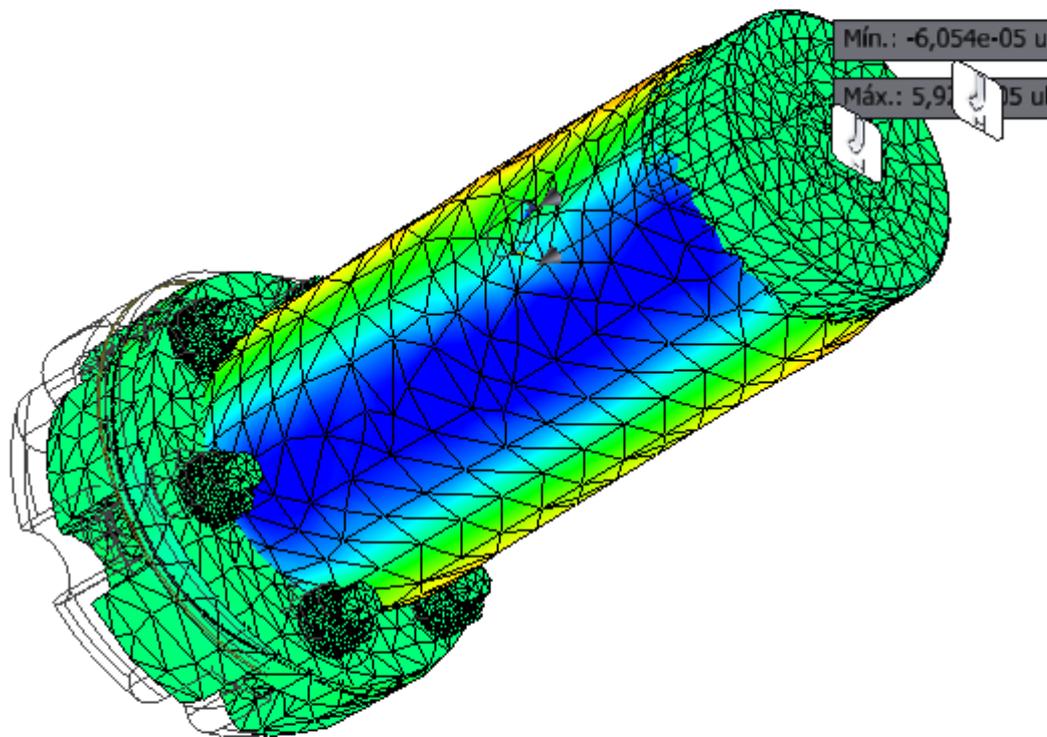
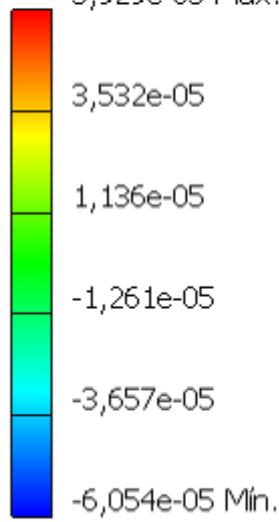
Unidade: ul

26/03/2024, 22:37:25

5,929e-05 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Deformação XY
Unidade: ul
26/03/2024, 22:37:25
5,929e-05 Máx.



Deformação XZ

Nós: 246016

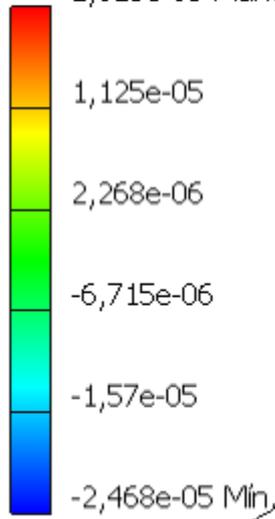
Elementos: 141765

Tipo: Deformação XZ

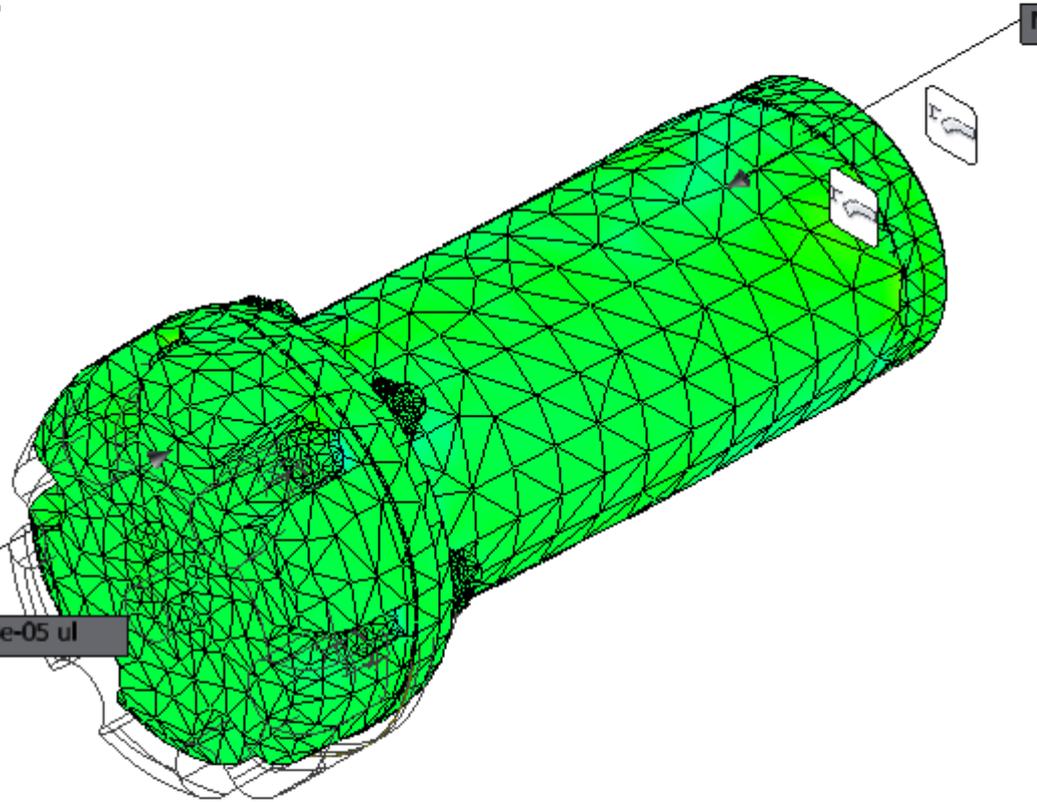
Unidade: ul

26/03/2024, 22:37:26

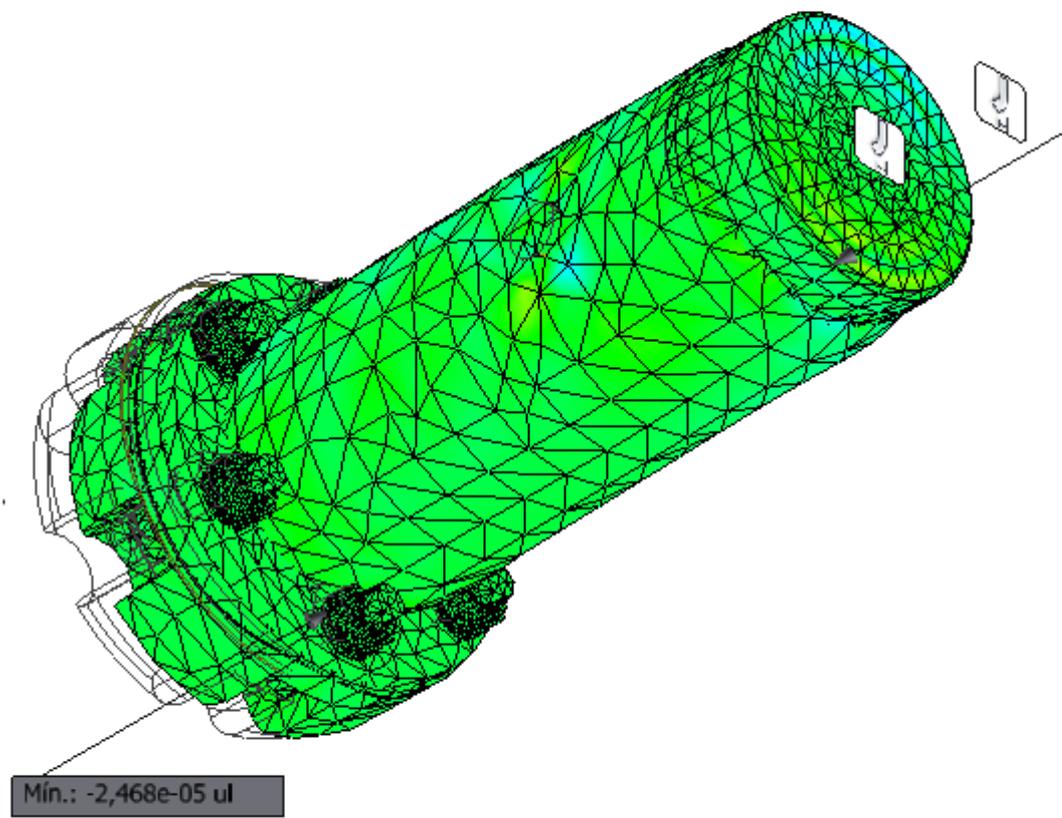
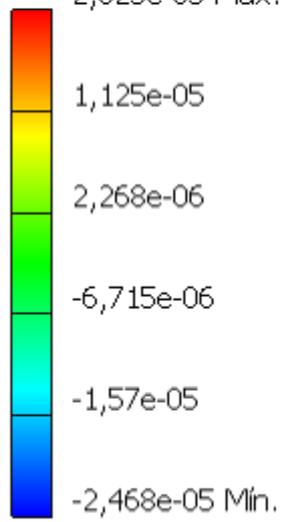
2,023e-05 Máx.



Min.: -2,468e-05 ul



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Deformação XZ
Unidade: ul
26/03/2024, 22:37:26
2,023e-05 Máx.



Deformação YY

Nós: 246016

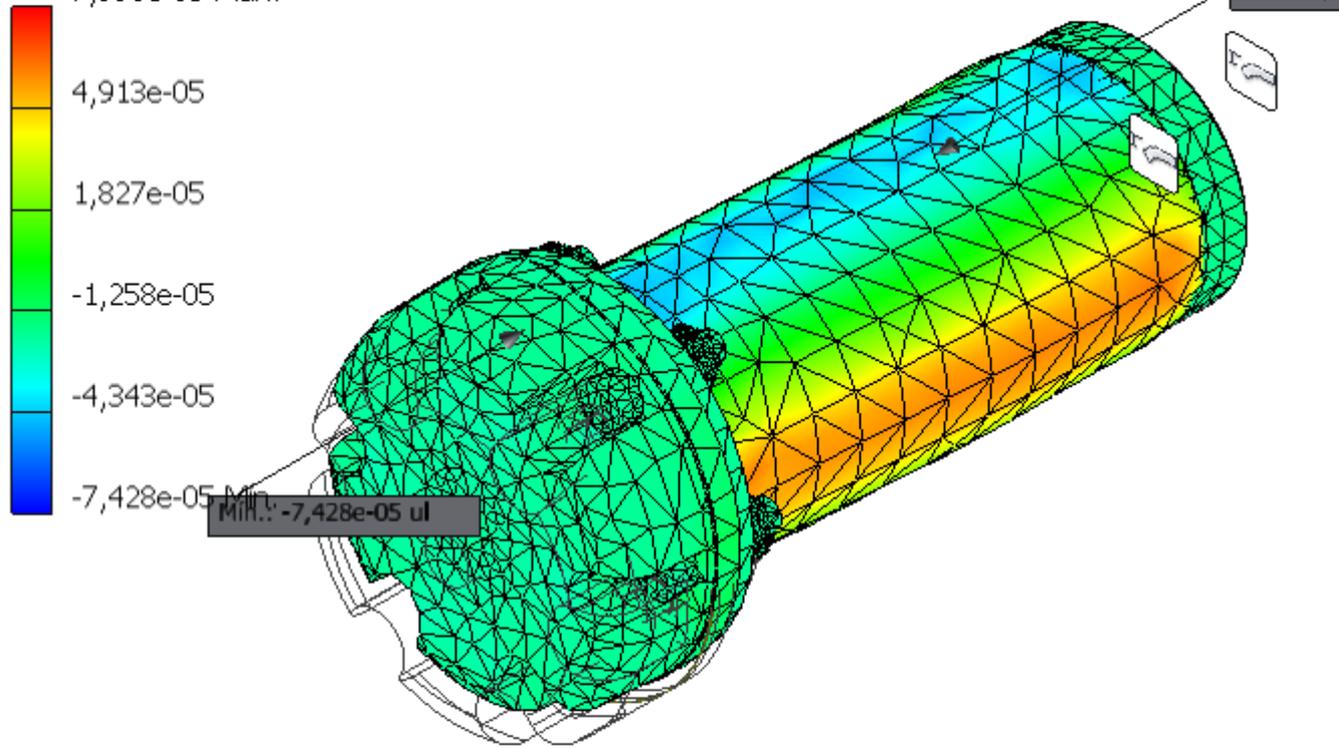
Elementos: 141765

Tipo: Deformação YY

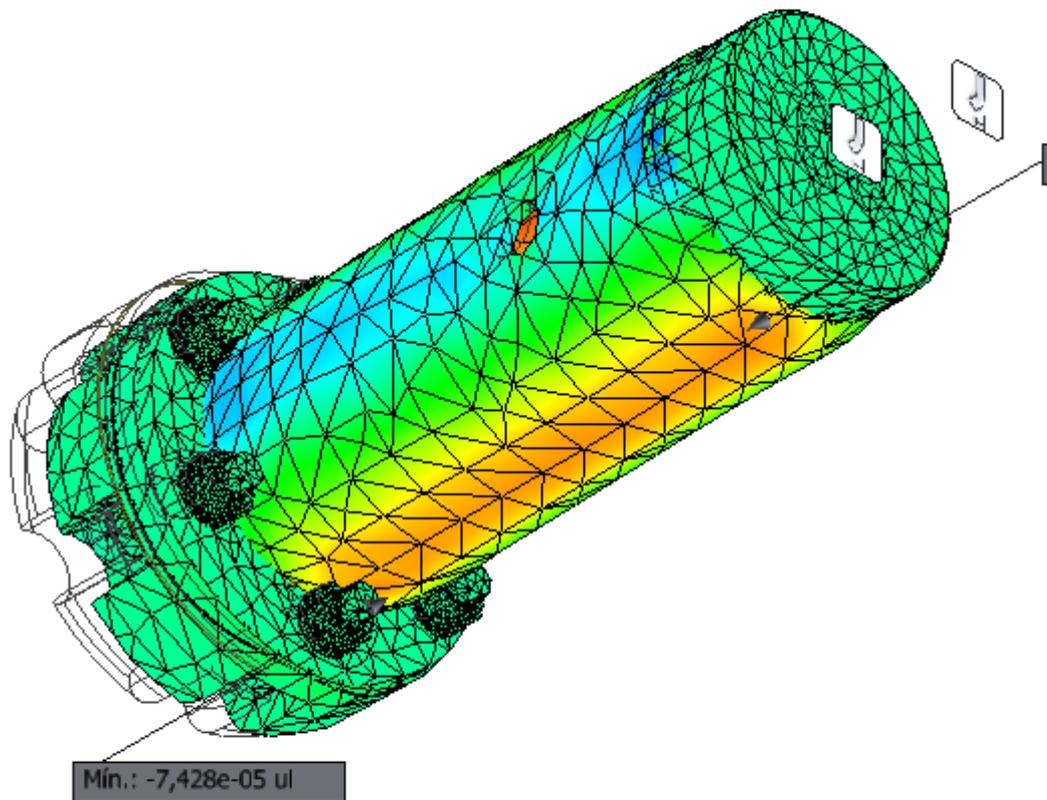
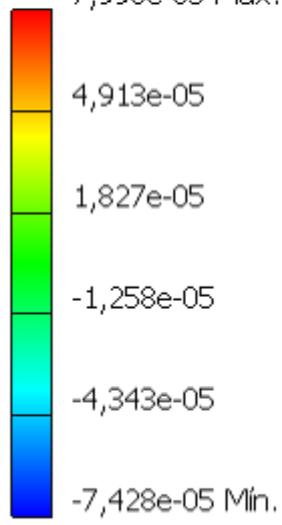
Unidade: ul

26/03/2024, 22:37:27

7,998e-05 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Deformação YY
Unidade: ul
26/03/2024, 22:37:27
7,998e-05 Máx.



Deformação YZ

Nós: 246016

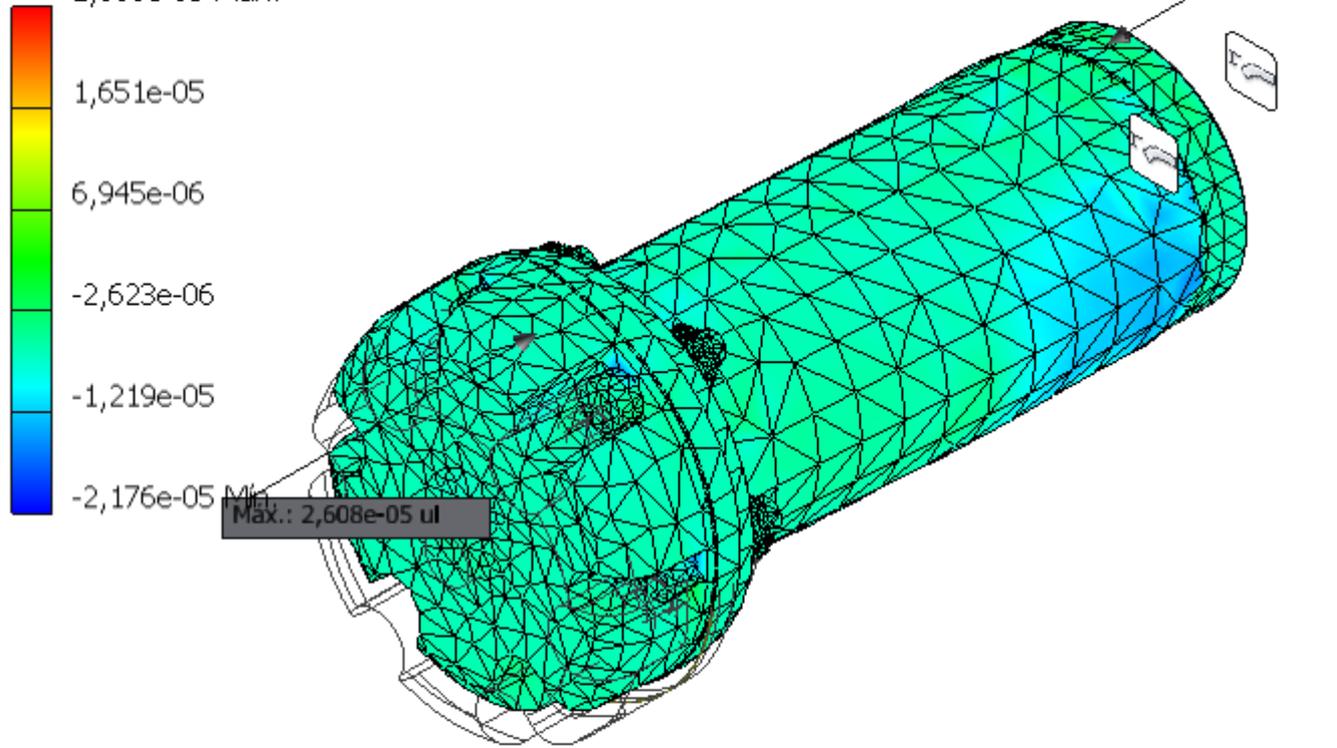
Elementos: 141765

Tipo: Deformação YZ

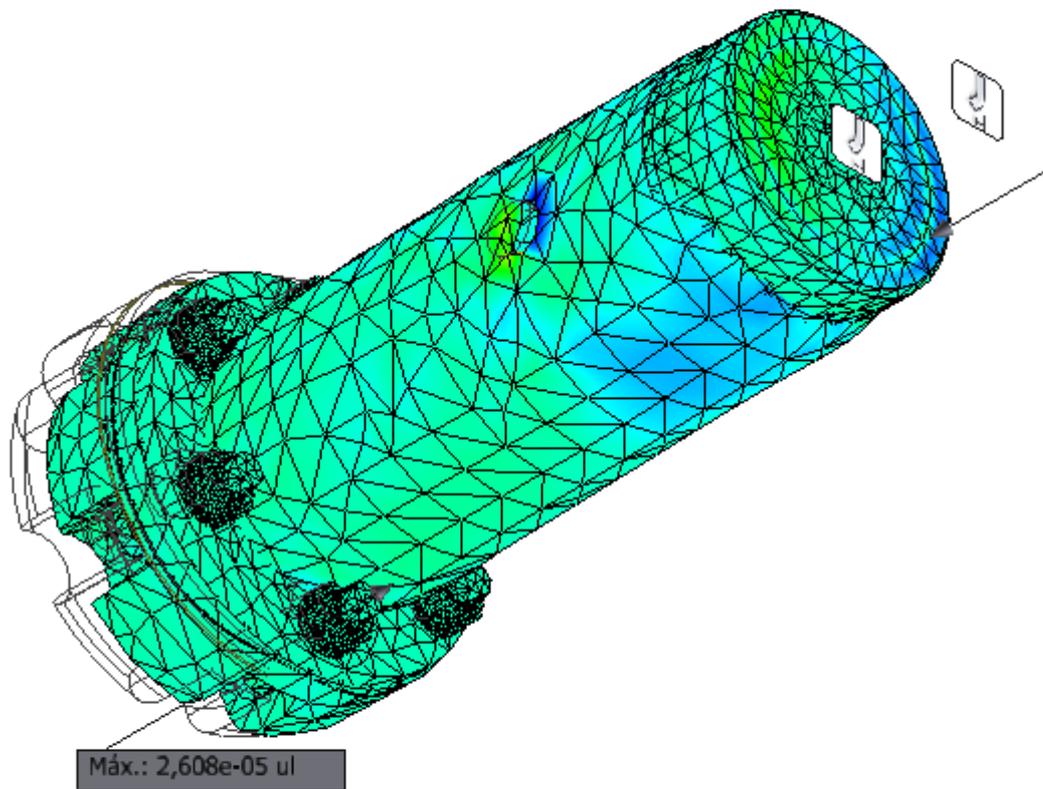
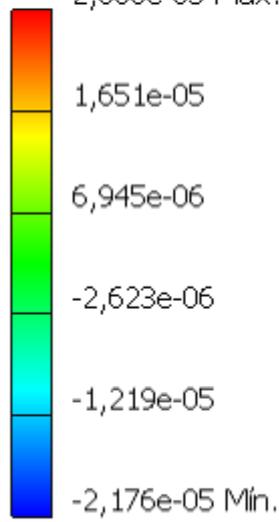
Unidade: ul

26/03/2024, 22:37:28

2,608e-05 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Deformação YZ
Unidade: ul
26/03/2024, 22:37:28
2,608e-05 Máx.



Deformação ZZ

Nós: 246016

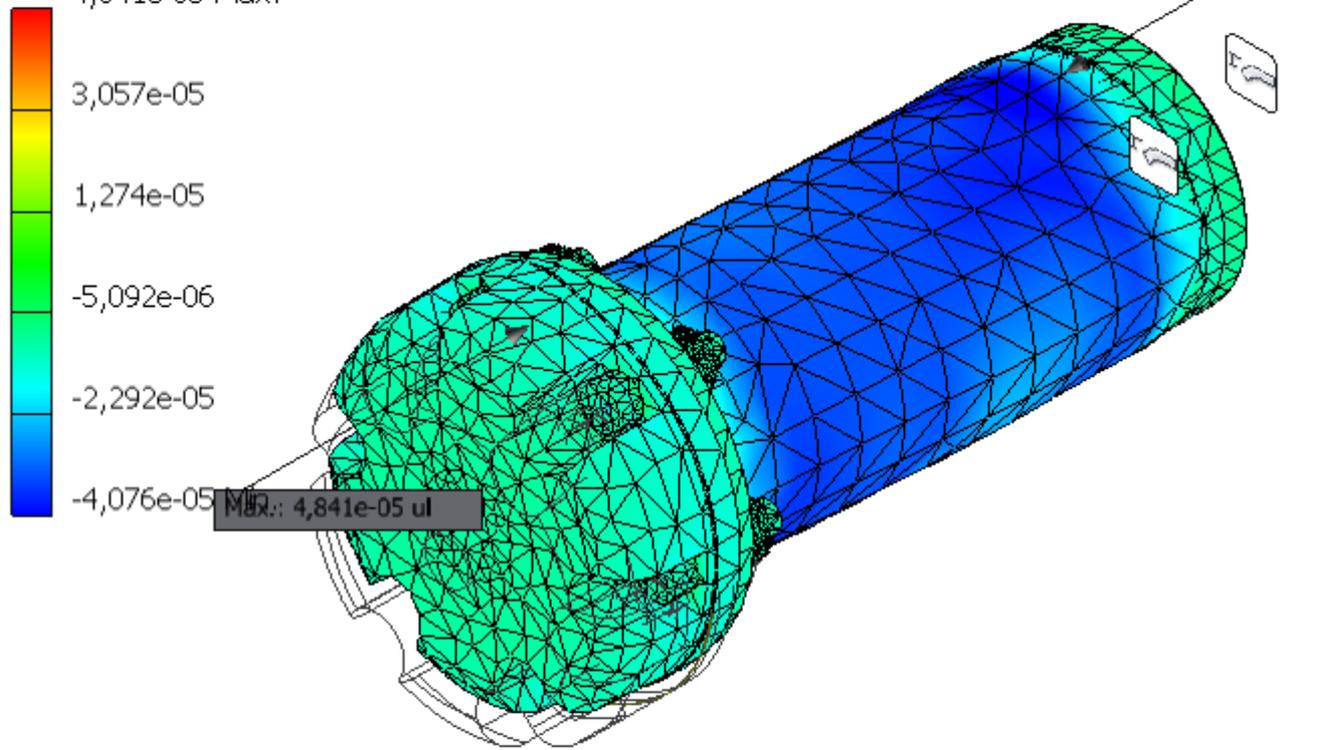
Elementos: 141765

Tipo: Deformação ZZ

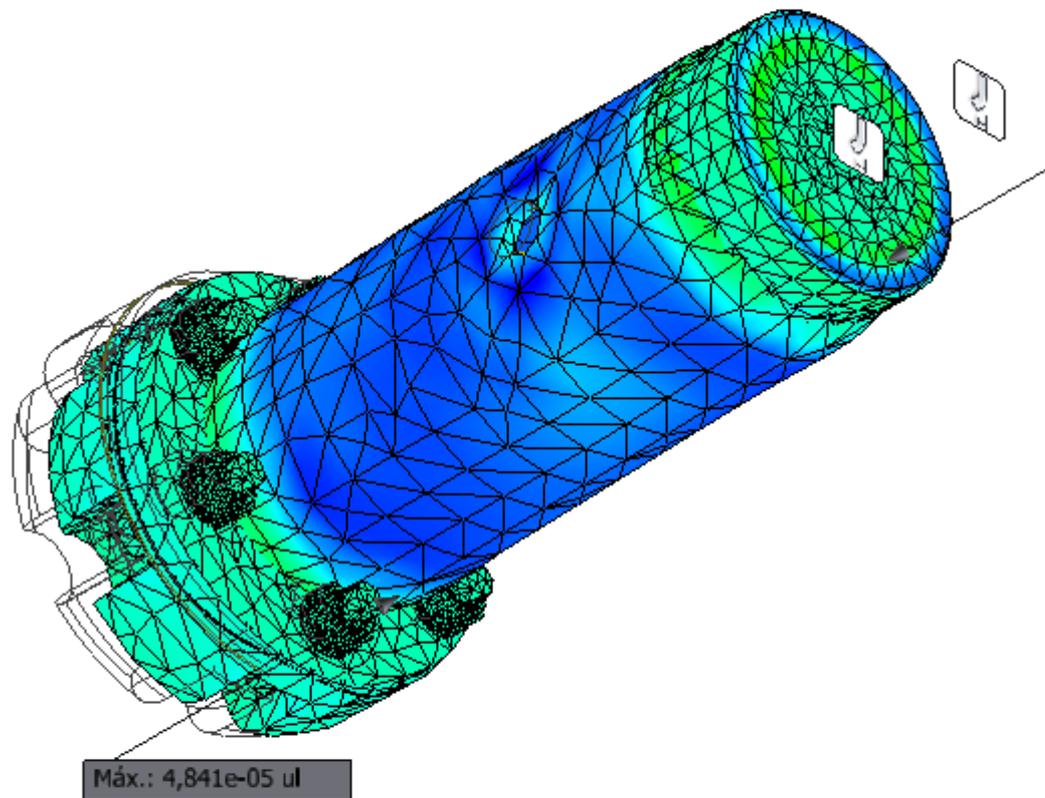
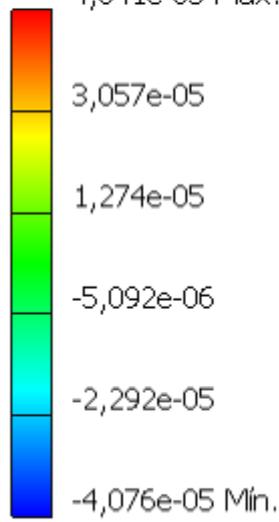
Unidade: ul

26/03/2024, 22:37:29

4,841e-05 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Deformação ZZ
Unidade: ul
26/03/2024, 22:37:29
4,841e-05 Máx.



Pressão de contato

Nós: 246016

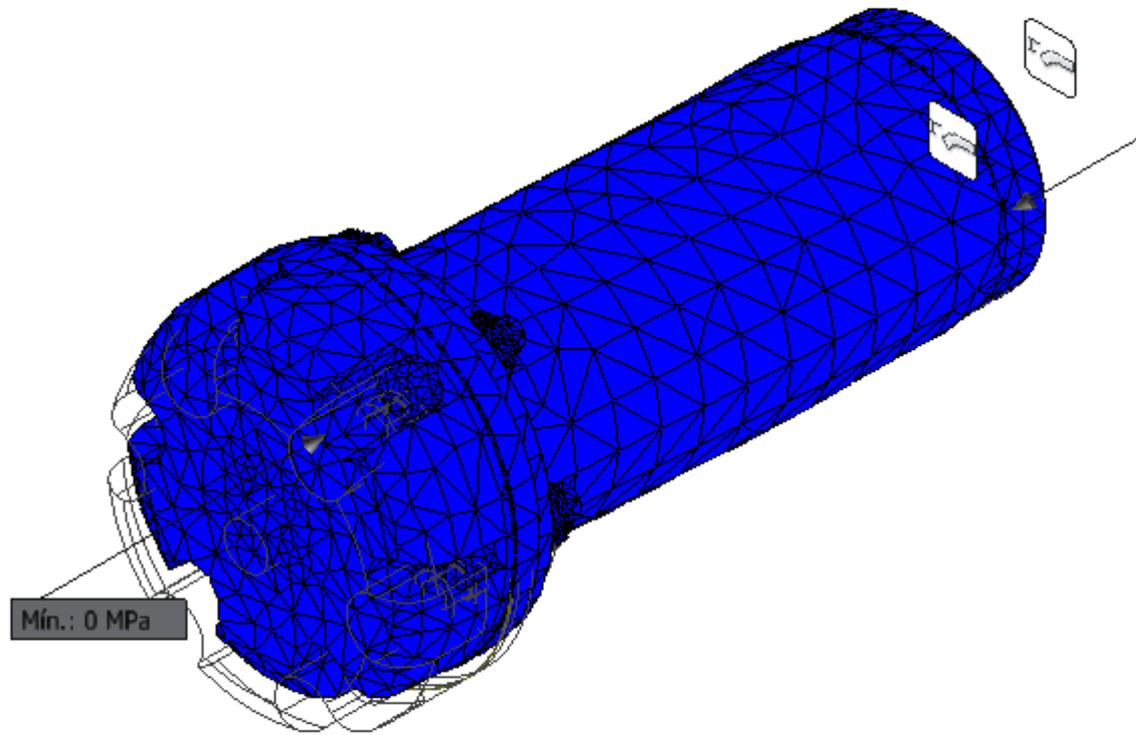
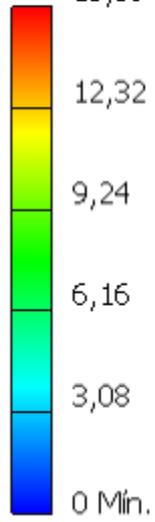
Elementos: 141765

Tipo: Pressão de contato

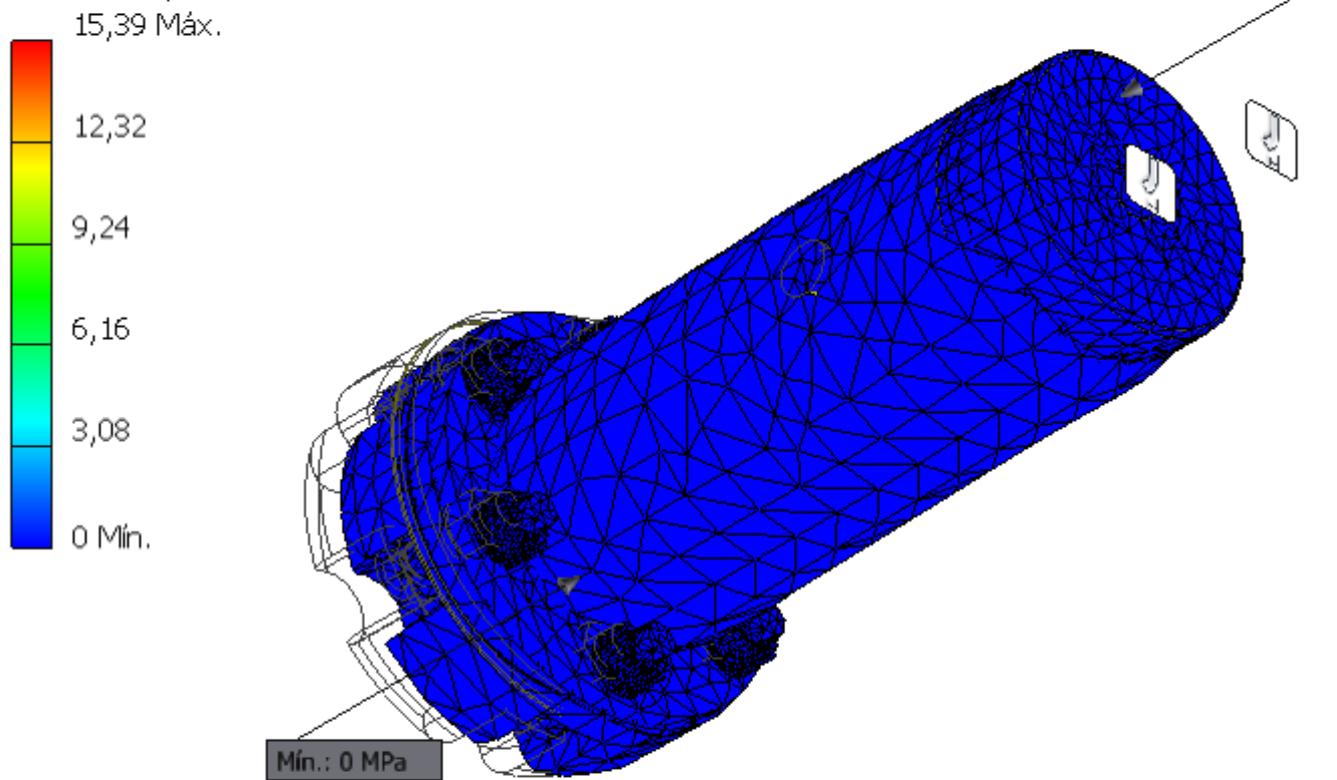
Unidade: MPa

26/03/2024, 22:37:30

15,39 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Pressão de contato
Unidade: MPa
26/03/2024, 22:37:30



Pressão de contato X

Nós: 246016

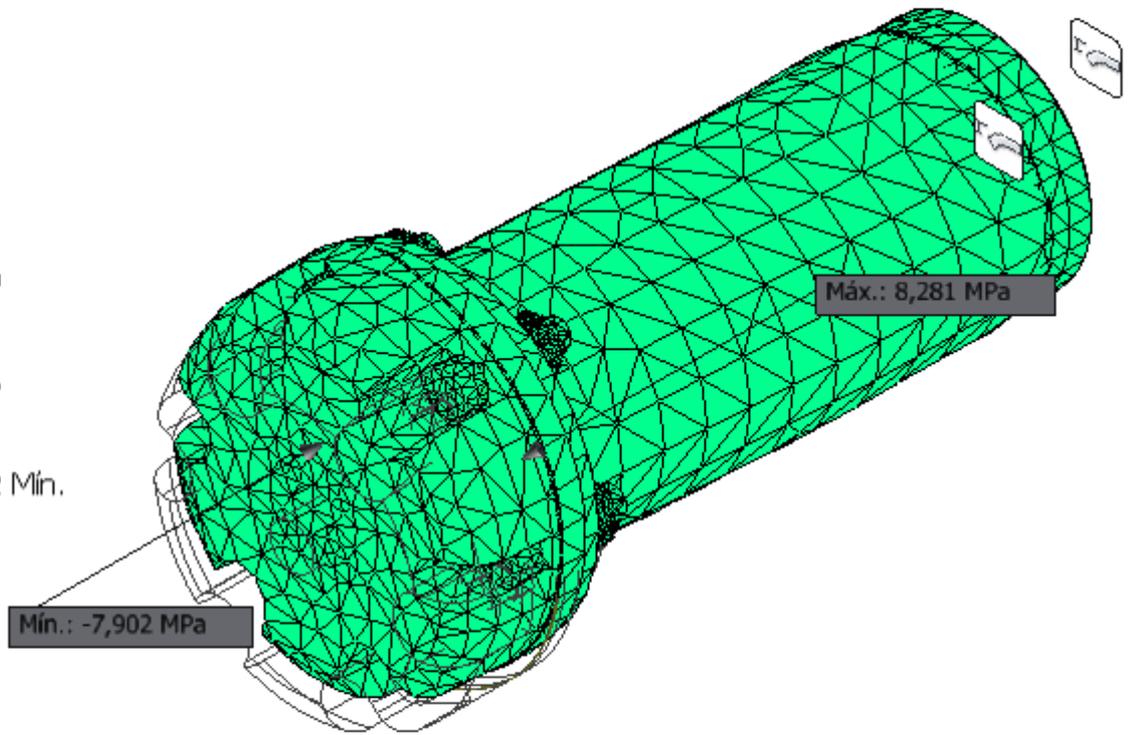
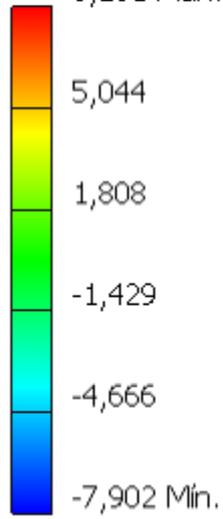
Elementos: 141765

Tipo: Pressão de contato X

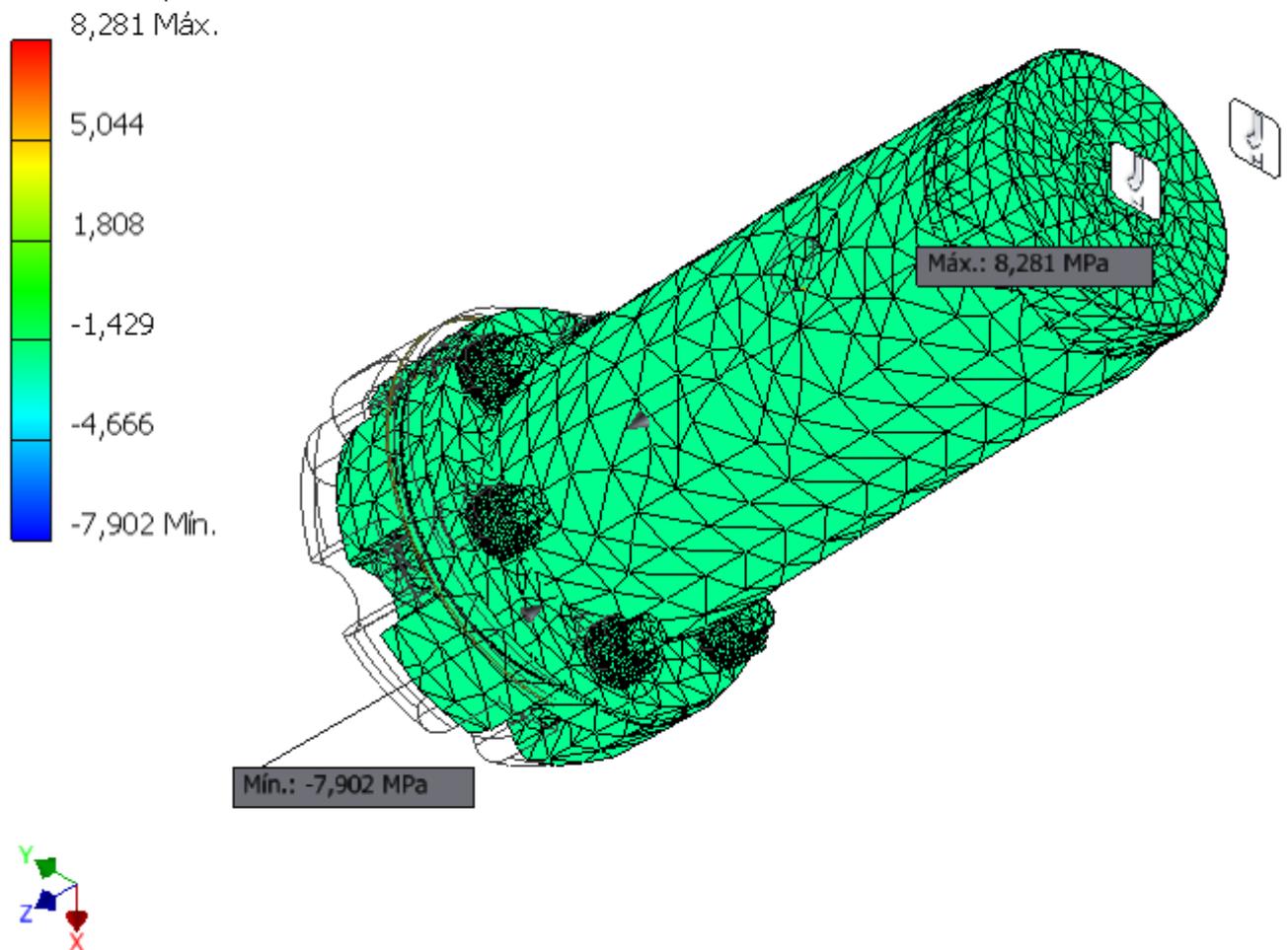
Unidade: MPa

26/03/2024, 22:37:30

8,281 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Pressão de contato X
Unidade: MPa
26/03/2024, 22:37:30



Pressão de contato Y

Nós: 246016

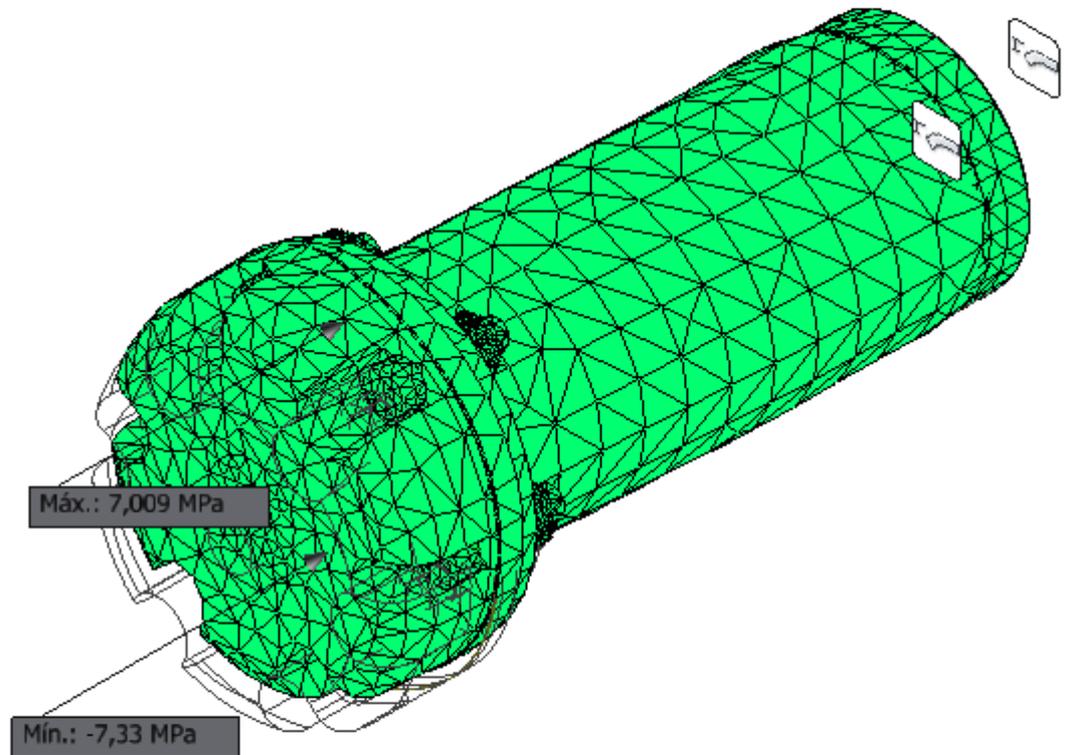
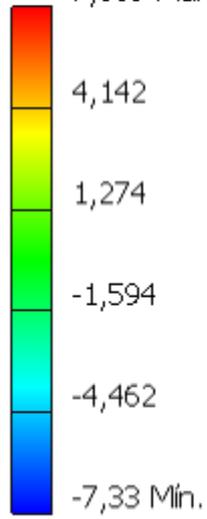
Elementos: 141765

Tipo: Pressão de contato Y

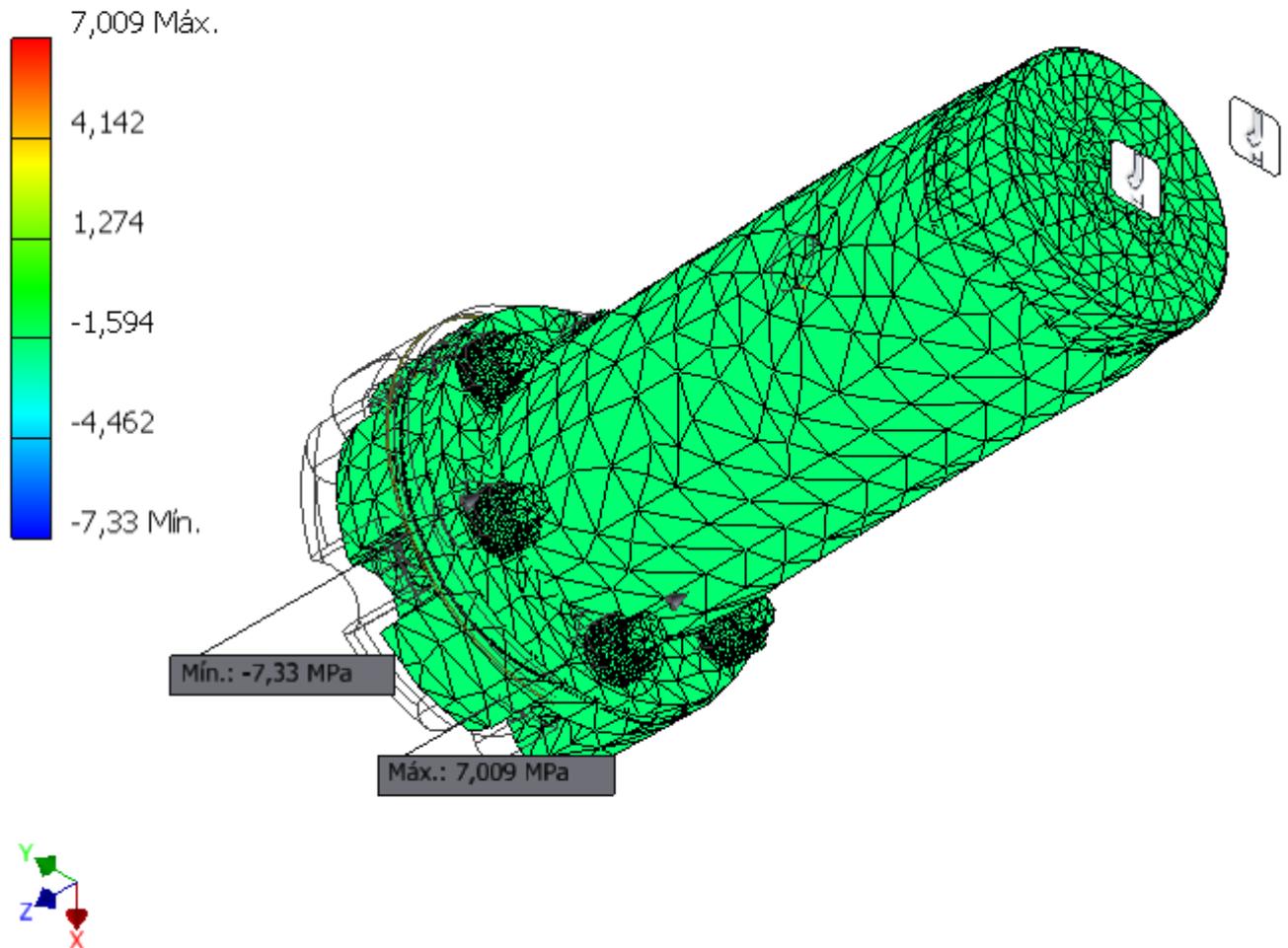
Unidade: MPa

26/03/2024, 22:37:31

7,009 Máx.



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Pressão de contato Y
Unidade: MPa
26/03/2024, 22:37:31



Pressão de contato Z

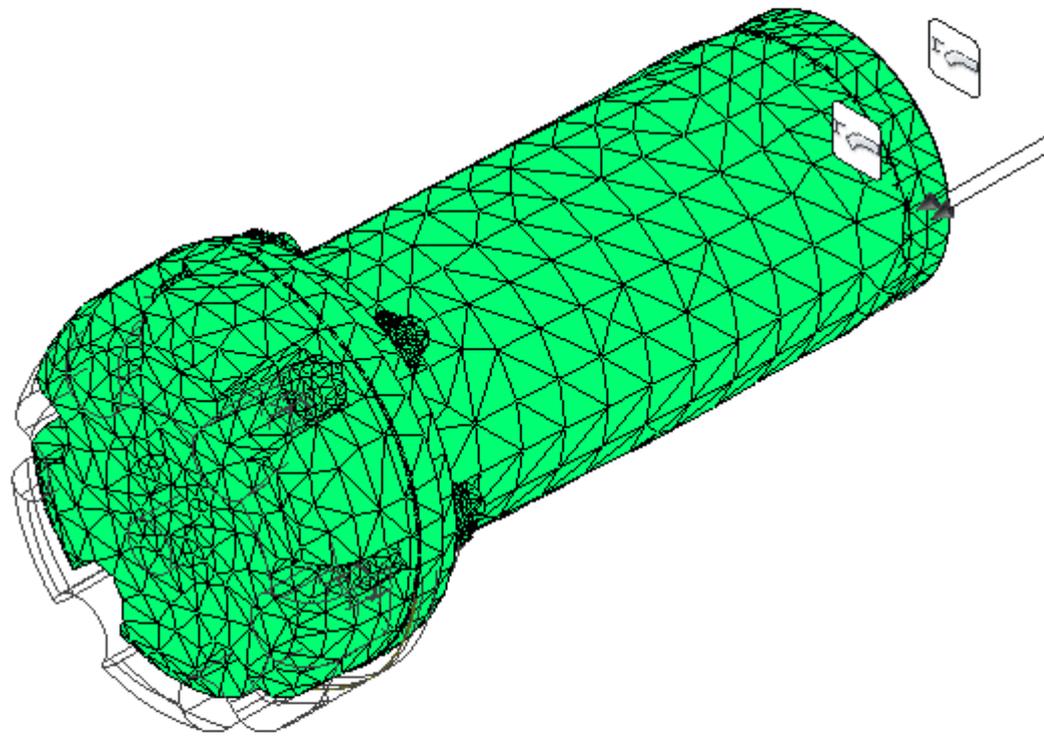
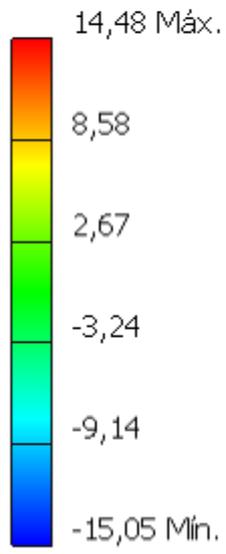
Nós: 246016

Elementos: 141765

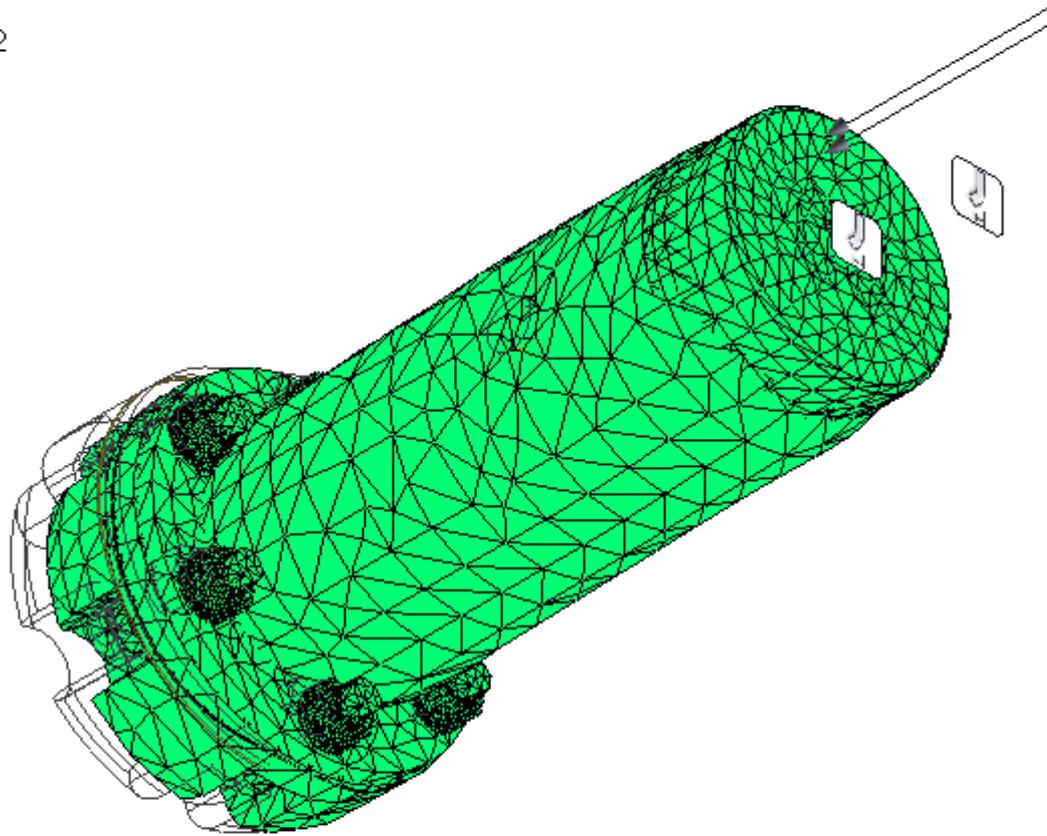
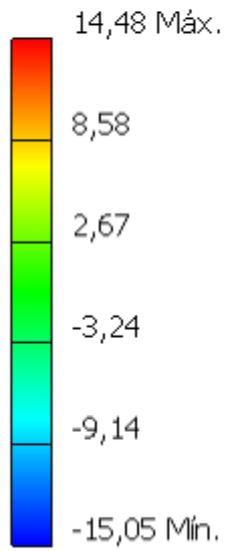
Tipo: Pressão de contato Z

Unidade: MPa

26/03/2024, 22:37:32



Nós: 246016
Elementos: 141765
Tipo: Pressão de contato Z
Unidade: MPa
26/03/2024, 22:37:32



C:\Users\usuario\OneDrive\Área de Trabalho\DISPOSITIVO MESTRADO\Montagem3 PROTOTIPO.iam

Ficha catalográfica automática - SDC/BEM
Gerada com informações fornecidas pelo autor

L864d Lopes, Rafael Nascimento
DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA REALIZAÇÃO DE ANÁLISE DE CORROSÃO EM METAIS INSTALADOS EM UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO COM FLUÍDO DE TRABALHO AMÔNIA ANIDRA EM BAIXA TEMPERATURA E ALTA PRESSÃO / Rafael Nascimento Lopes. - 2024.
153 f.: il.

Orientador: GLÁUCIO SOARES DA FONSECA.
Coorientador: ELIVELTON ALVES FERREIRA.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda, Volta Redonda, 2024.

1. Vaso de pressão. 2. Aço inoxidável. 3. Amônia. 4. Corrosão. 5. Produção intelectual. I. SOARES DA FONSECA, GLÁUCIO, orientador. II. ALVES FERREIRA, ELIVELTON, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda. IV. Título.

CDD - XXX