

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA FONSECA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

**VICTOR GOMES BITTENCOURT
VINÍCIUS VIEIRA DE FARIAS**

**ANÁLISE NUMÉRICA DO USO DE LIGAS NITI EM CONEXÕES
FLANGEADAS DE ALTA PRESSÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RIO DE JANEIRO
2023**

VICTOR GOMES BITTENCOURT
VINÍCIUS VIEIRA DE FARIAS

**ANÁLISE NUMÉRICA DO USO DE LIGAS NITI EM CONEXÕES
FLANGEADAS DE ALTA PRESSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Dr. Orientador: Paulo Cesar da Câmara Monteiro Junior

RIO DE JANEIRO
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

B624 Bittencourt, Victor Gomes

Análise numérica do uso de ligas NITI em conexões flangeadas de alta pressão
/ Victor Gomes Bittencourt [e] Vinícius Vieira de Farias – 2023.
99 f : il. (algumas color.) ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow
da Fonseca, 2023.

Bibliografia: f. 97-99.

Orientadora: Paulo Cesar da Camara Monteiro Junior.

1. Engenharia mecânica. 2. Liga de memória de forma. 3. Liga Nitinol.
I. Farias, Vinícius Vieira de. II. Monteiro Junior, Paulo Cesar da Camara (Orient.).
III. Título.

CDD 620.1

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes – CRB/7 nº 5281

AGRADECIMENTOS VICTOR

Primeiramente agradeço a Deus por ter me guiado e dado forças em todo esse trajeto da graduação.

Agradeço a minha família por toda a base sólida fornecida que foi essencial ao longo do período, em especial meus pais Nilselina e Jayme por todo o apoio, incentivo e esforço, buscando sempre disponibilizar as melhores coisas, e aos meus irmãos Karyna e Raphael que também me incentivaram e apoiaram em todo esse percurso.

Agradeço aos demais familiares, primos e primas, tios e tias por estarem sempre comigo.

Agradeço a minha namorada que também exerceu um papel fundamental ao me incentivar a buscar sempre mais e sair da zona de conforto, sendo também um apoio essencial.

Agradeço aos amigos que me acompanharam em quase todo o percurso da graduação: Daniel Utsch, Daniel Arruda, Lucas Carramona, Thales Queiroz, Anna Carolina Mendonça, Vitor Pastor e Luiz Henrique.

Agradeço a Mud Runner Baja, projeto de extensão que fiz parte por 2 anos e foi extremamente essencial para minha evolução pessoal e profissional, e agradeço aos amigos que fiz durante esse tempo, em especial aos membros de Freio que fizeram parte do meu dia a dia.

Agradeço ainda ao Vinícius Almeida por ter aceitado o desafio que era esse projeto e por todo companheirismo que se formou durante essa fase.

Por fim agradeço ao professor orientador Paulo Camara, por ter nos guiado durante as fases de Projeto Final e ter prestado todo o apoio.

Sem todos vocês eu não teria chegado até aqui, vocês foram extremamente fundamentais.

AGRADECIMENTOS VINICIUS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade de vivenciar experiências incríveis durante a minha trajetória na graduação.

Agradeço aos meus pais, que desde o início da minha vida fizeram de tudo para que eu pudesse ter acesso a melhor educação possível, apoiando minhas escolhas, investindo confiança, tempo e me dando suporte e amor quando meu desempenho não era satisfatório.

Agradeço a minha tia Ruth, que sempre deu suporte aos meus pais para que eu pudesse ter uma educação de qualidade e viu todas as fases da minha evolução como pessoal e profissional.

Agradeço ao meu irmão, Fernando, que sempre acreditou no meu potencial e esteve ao meu lado ao longo dessa trajetória.

Agradeço a todos os meus amigos, que me deram forças quando acreditei não ser capaz de finalizar o curso, fazendo com que eu enxergasse meu potencial.

Agradeço aos meus colegas de trabalho, que foram compreensivos quando a faculdade precisava ser minha prioridade e me deram a oportunidade de me desenvolver como profissional.

Agradeço ao meu colega Victor Gomes, que não cessou esforços para que nosso projeto fosse concluído da melhor forma possível.

Agradeço ao professor Paulo Câmara pela paciência e confiança ao longo da construção do projeto.

Por fim, agradeço aos meus colegas de extensão da Equipe Alpha de Fórmula SAE, que me deram a oportunidade de vivenciar na prática essa ciência incrível que escolhi como profissão.

RESUMO

O uso de flanges de alta pressão está presente em diversos setores, principalmente os industriais, e qualquer falha pode provocar grandes prejuízos, causando acidente e até desastres ambientais dependendo do material transportado, como por exemplo em plataformas de petróleo. Uma constante preocupação presente nesses tipos de conexões são os vazamentos, logo ocorrem constantes manutenções que mesmo sem ter problemas no anel de vedação levam à troca, pois após a aplicação de carga acabam deformando de forma irreversível. Diante disso, o presente trabalho possui como objetivo estudar a Liga Nitinol através de uma análise numérica que é um material com memória de forma, explorando a propriedade de pseudoelasticidade, que permite o material retornar a sua forma original mesmo após aplicação de carga, e assim poderia ser um material substituto aos aços inoxidáveis. Logo, neste projeto, buscou-se explorar os flanges de alta pressão, e principalmente, comparar o comportamento e os resultado de pressão de contato no anel com materiais diferentes e ao ser submetido a variações de pressão e diminuição da pretensão de aperto do flange.

Palavras-chave: Memória de forma. Flanges de Alta pressão. Liga Nitinol. Pseudoelasticidade. Conexões.

ABSTRACT

The use of high-pressure flanges is present in several sectors, mainly industrial, and any failure can cause major losses, causing accidents and even environmental disasters depending on the material transported, such as on oil platforms. A constant concern present in these types of connections is leaks, so there is constant maintenance that, even without problems with the placement ring, leads to replacement, as after applying load they end up deforming irreversibly. Therefore, the present work aims to study the Nitinol Alloy through a numerical analysis, which is a material with shape memory, exploring the property of pseudo-elasticity, which allows the material to return to its original shape even after load application, and thus it could be a substitute material for stainless steels. Therefore, in this project, we sought to explore high-pressure flanges, and mainly, to compare the behavior and result of contact pressure on the ring with different materials and when asked for pressure variations and a decrease in the flange's tightness requirement.

Keywords: Shape memory. High pressure flanges. Nitinol alloy. Pseudoelasticity. Connections.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Temperatura de Transformação de Fase (Zhang. Congrui, 2018).....	22
Figura 2: Diagrama tensão x deformação x temperatura (Adpatado Lagoudas e Kumar, 2008)	23
Figura 3: Ciclo de carregamento (Almeida, 2015).....	24
Figura 4: Queda do potencial de resistência (Godoi, 2015).....	25
Figura 5: Concreto com fios de memória de forma (Song, 2006).....	27
Figura 6: Concreto com trinca (Song, 2006).....	27
Figura 7: Concreto pós aplicação de corrente elétrica (Song, 2006).....	27
Figura 8: Asa Adaptativa (Ligas com memória de forma, 2013).....	28
Figura 9: Asa Adaptativa (Ligas com memória de forma, 2013).....	28
Figura 10: Fio de Nitinol usado em aparelho dental (Quintão, 2009).....	29
Figura 11: Representação do uso de stent (16).....	29
Figura 12: Flange integral (Reis, 2013).....	31
Figura 13: Flange cego (Reis, 2013).....	31
Figura 14: Flange com pescoço (21).....	32
Figura 15: Flange solto (Reis, 2013).....	32
Figura 16: Flange Orifício (20).....	33
Figura 17: Flange roscado (Reis, 2013).....	33
Figura 18: Flange sobreposto (Reis, 2013).....	34
Figura 19: Flange de encaixe (Reis, 2013).....	34
Figura 20: Faceamento com ressalto (Senai, 1997).....	35
Figura 21: Faceamento plano (Senai, 1997).....	35
Figura 22: Faceamento para junta de anel (Senai, 1997).....	36
Figura 23: Faceamento macho e fêmea (Senai, 1997).....	36
Figura 24: Parafuso Prisoneiro(24).....	39
Figura 25: Conexão flangeada com estojo (19).....	39
Figura 26: Parafuso coMParte sem região roscada (Senai, 1997).....	40
Figura 27: Perspectiva isométrica da junta flangeada (Autores).....	42
Figura 28: Vista frontal do flange (Autores).....	43
Figura 29: Vista de seção (Autores).....	43
Figura 30: Vista de detalhe do rasgo do flange (Autores).....	44
Figura 31: Seção transversal do anel BX155 (Autores).....	44
Figura 32: Vista isométrica do anel BX 155 (Autores).....	46
Figura 33: Modelo representado pelo método beam model (Autores)	50

Figura 34: Comparativo de tempo de processamento entre os métodos solid body e beam model (Autores)	51
Figura 35: Comparativo do numero de elementos entre os métodos solid body e beam model (Autores)	51
Figura 36: Definição das superfícies do anel em contato com o flange (Autores)	52
Figura 37: Definição das superfícies de contato entre o flange e o anel (Autores)	53
Figura 38: Exemplo de contatos entre os elementos da junta flangeada (Autores)	53
Figura 39: Força de pretensão aplicada (Autores)	54
Figura 40: Aplicação da pressão de compensação no flange (Autores)	55
Figura 41: Pressão interna aplicada no flange (Autores).....	56
Figura 42: Aplicação de <i>Fixed Support</i> no flange (Autores).....	56
Figura 43: Representação do método <i>Hex Dominant</i> no anel (Autores).....	57
Figura 44: Representação do método <i>Body Sizing</i> no anel de vedação (Autores).....	58
Figura 45: Representação do método <i>Edge Sizing</i> no anel de vedação (Autores).....	58
Figura 46: Junta flangeada com malha de 10mm aplicada (Autores).....	59
Figura 47: Condição inicial de contato do anel com o flange (Autores).....	60
Figura 48: Pressão sofrida pelo anel de vedação do Aço Inox (Autores).....	61
Figura 49: Comportamento do anel com 588kN de pretensão (Autores).....	62
Figura 50: Comportamento do anel com 488kN de pretensão (Autores).....	63
Figura 51: Comportamento do anel com 420kN de pretensão (Autores).....	63
Figura 52: Comportamento do anel com 350kN de pretensão (Autores).....	64
Figura 53: Comportamento do anel com 280kN de pretensão (Autores).....	64
Figura 54: Comportamento do anel com 220kN de pretensão (Autores).....	65
Figura 55: Comportamento do anel com 185kN de pretensão (Autores).....	66
Figura 56: Comportamento do anel com 150kN de pretensão (Autores).....	66
Figura 57: Comportamento do anel com 115kN de pretensão (Autores).....	67
Figura 58: Variação da pressão de contato em relação a força de pretensão (Autores).....	67
Figura 59: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 30ksi (Autores).....	68
Figura 60: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 40ksi (Autores).....	69
Figura 61: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 50ksi (Autores).....	69
Figura 62: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 60ksi (Autores).....	70
Figura 63: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 70ksi (Autores).....	70
Figura 64: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 80ksi (Autores).....	71
Figura 65: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 85ksi (Autores).....	71
Figura 66: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 90ksi (Autores).....	72
Figura 67: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 100ksi (Autores).....	72
Figura 68: Variação da pressão de contato em relação a pressão interna (Autores).....	73

Figura 69: Gráfico tensão x deformação característico de uma liga superelástica (Ansys.inc).	75
Figura 70: Gráfico tensão x deformação da liga Nitinol (Autores).	76
Figura 71: Propriedades do material superelástico no Ansys (Autores).	77
Figura 72: Curva tensão x deformação até a ruptura (Autores).	77
Figura 73: Informação de tensão no Ansys (Autores).	78
Figura 74: Curva tensão x deformação para tração a 23°C (Kyriakides).	79
Figura 75: Curva tensão x deformação para compressão a 23°C (Kyriakides).	79
Figura 76: Curva tensão x deformação para compressão a 43°C (Kyriakides).	80
Figura 77: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 588kN (Autores).	81
Figura 78: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 488kN (Autores).	82
Figura 79: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 420kN (Autores).	82
Figura 80: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 350kN (Autores).	83
Figura 81: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 280kN (Autores).	83
Figura 82: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 220kN (Autores).	84
Figura 83: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 185kN (Autores).	84
Figura 84: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 150kN (Autores).	85
Figura 85: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 115kN (Autores).	85
Figura 86: Variação da pressão de contato com a força de pretensão (Autores).	86
Figura 87: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 30ksi (Autores)	87
Figura 88: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 40ksi (Autores)	87
Figura 89: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 50ksi (Autores)	88
Figura 90: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 60ksi (Autores)	88
Figura 91: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 70ksi (Autores)	89
Figura 92: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 80ksi (Autores)	89
Figura 93: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 85ksi (Autores)	90
Figura 94: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 90ksi (Autores)	91
Figura 95: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 100ksi (Autores)	91
Figura 96: Variação de pressão de contato com a pressão interna (Autores).	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição Química do Aço API 6 ^a 60K	44
Tabela 2 – Composição Física do Aço API 6 ^a 60K	45
Tabela 3 – Composição Química do Aço API 304.....	45
Tabela 4 – Propriedade do Aço API 304.....	45
Tabela 5 – Composição Química do Aço A193 Gr B7	47
Tabela 6 – Características Físicas do Parafuso A193 Gr B	47

LISTA DE SIGLAS

EMF – Efeito de Memória de Forma

LMF – Liga com Memória de Forma

PE – Pseudoelasticidade

SUMÁRIO

SUMÁRIO	13
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 MOTIVAÇÃO	16
1.2 OBJETIVO	16
1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO	17
1.4 METODOLOGIA	18
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	20
2.2 MECANISMO DE TRANSFORMAÇÃO DE FASE.....	21
2.3 COMPORTAMENTOS E PROPRIEDADES.....	21
2.3.1 Efeito de Memória de Forma.....	21
2.3.2 Pseudoelasticidade	23
2.3.3 Resistência à Fadiga	24
2.3.4 Resistência à corrosão.....	25
2.3.5 Biocompatibilidade.....	26
2.4 APLICAÇÕES	26
2.4.1 Engenharia Civil	26
2.4.2 Engenharia Aeronáutica.....	28
2.4.3 Odontologia	28
2.4.4 Cardiologia	29
3 CONEXÕES FLANGEADAS	30
3.1 TIPOS DE FLANGES	30
3.1.1 Flange Integral	30

3.1.2	Flange Cego	31
3.1.3	Flange com Pescoço	31
3.1.4	Flange Solto ou Lap-Joint.....	32
3.1.5	Flange Orifício.....	32
3.1.6	Flange Roscado.....	33
3.1.7	Flange Sobreposto	33
3.1.8	Flange de Encaixe.....	34
3.2	TIPOS DE FACEAMENTOS.....	34
3.2.1	Com Ressalto	35
3.2.2	Plana	35
3.2.3	Para Junta de Anel	35
3.2.4	Macho e Fêmea.....	36
3.3	TIPOS DE JUNTAS	36
3.3.1	Juntas Metálicas	37
3.3.2	Juntas Não Metálicas	38
3.4	ELEMENTOS DE FIXAÇÃO.....	38
3.4.1	Estojo	38
3.4.2	Parafusos de Máquina.....	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1	MATERIAIS	41
4.1.1	Flanges de Alta Pressão	41
4.2	MÉTODOS.....	42
5	DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS.....	49
5.1	FORÇAS E PRESSÕES ATUANTES.....	49
5.2	DEFINIÇÃO DA MALHA	56
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60

6.1	ANÁLISES NO ANEL DE VEDAÇÃO	60
6.2	ANÁLISES NO ANEL DE VEDAÇÃO – AÇO INOX	62
6.2.1	Diminuindo a Força de Pretensão	62
6.2.2	Aumentando a Pressão Interna	68
6.3	ANÁLISE DA LIGA NITINOL	73
6.3.1	Estudo da Liga Nitinol no Ansys	74
6.3.2	Diminuindo a Força de Pretensão	81
6.3.3	Aumentando a Pressão Interna	86
7	Conclusões	93
8	Referências bibliográficas	97

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

No contexto de aplicabilidade da engenharia mecânica as juntas flangeadas são importantes dispositivos de união entre tubulações. Essas juntas são feitas de diferentes materiais dependendo de suas aplicações (não-metálicas, compósitas ou metálicas), e no caso de flanges para alta pressão o aço inoxidável é um dos materiais mais utilizados.

As tubulações industriais de alta pressão estão sujeitas a diversos tipos de problemas, como danos causados pelo desgaste das juntas, corrosão, fadiga, entre outros. Com isso, o material das juntas deve ser projetado, em alguns casos, para suportar além de altas pressões, altas temperaturas internas, fluidos corrosivos e gradientes de temperaturas entre as partes interna e externa, junta-se essas condições adversas com o fato de no processo de instalação (fechamento do estojo), as juntas são submetidas a altas tensões que levam o material a deformações irreversíveis (plastificação) para garantir vedação adequada. Esse processo aliado a oscilações de cargas mecânicas e térmicas ao longo de sua vida útil podem comprometer a integridade do anel, além de inviabilizar sua reutilização após a abertura do estojo para manutenção.

Diante dos aspectos apresentados é de grande importância estudar a aplicação de novos materiais que possam oferecer a mesma resistência das ligas usuais: aço Inox, Inconel, entre outras, mas que possam ser reaproveitadas após a instalação sem comprometer sua funcionalidade. Dito isto, uma das alternativas para o problema apresentado é o uso das LMF (Ligas com Memória de Forma) como: as de Ouro-Cádmio, Cobre-Zinco, Níquel-Titânio (também chamada de Nitinol, entre outras, que apresentam as propriedades de memória de forma e pseudoelasticidade, essa última objeto de estudo da presente proposta de trabalho.

1.2 OBJETIVO

O projeto prevê a análise comparativa da performance entre juntas de aço inoxidável e NiTi considerando as mesmas condições de operação e a

viabilidade de utilização das ligas de NiTi em substituição das de aço inox. Essa análise levará em conta a capacidade de vedação, se o material sofrerá plastificação, caracterizado pela deformação permanente de um material após a aplicação de determinado esforço e recuperação da forma original após o processo de fechamento e abertura do estojo. O estudo proposto de análise comparativa e viabilidade será realizado através da análise numérica e simulações no software Ansys que possui modelos capazes de representar o comportamento mecânico dos materiais em questão.

1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO

As uniões flangeadas são itens que atuam na ligação entre tubos, visando a vedação das conexões, evitando assim vazamentos nos sistemas em que estão inseridas. São compostas por flanges, anéis e elementos de fixação como porcas e estojos.

Devido aos diversos fatores influentes na operação de tubulações, como pressão, temperatura, tipo de fluido transportado e local de operação, as juntas flangeadas podem ser fabricadas de diversos materiais, como aço, polímeros e ligas metálicas e não metálicas, onde a escolha ideal ocorre após uma profunda análise dos parâmetros citados no início do presente parágrafo.

Quando comparadas a juntas soldadas, a vantagem de utilização de juntas flangeadas fica evidente, uma vez que esta promove junções não permanentes, favorecendo os processos de manutenção e substituição dos seus componentes. Destaca-se ainda que a qualidade das conexões flangeadas acabam por ser menos dependentes da aptidão do executante.

Dentre as aplicações em campo, os flanges podem ser usados em diversos seguimentos, tais como usinas nucleares, indústrias químicas, naval, de mineração, petróleo e gás, entre outras.

No contexto de evolução industrial, as juntas flangeadas têm importante papel no aumento de produtividade. Um exemplo disso está na indústria de petróleo e gás, que entre 2010 e 2020 obteve um aumento de mais de 50% na produção quando comparada a períodos anteriores [8]. Esse fato só foi possível por conta da eficiência das instalações industriais, já que além de haver uma

quantidade maior de fluido percorrendo as instalações, as operações nesse tipo de indústria são realizadas, muitas vezes, em águas mais profundas, com alto nível de complexidade, tornando frequente o surgimento de problemas na estrutura das tubulações.

Assim como a indústria de petróleo e gás, outros setores necessitam de componentes mais resistentes, com diferentes propriedades atendendo as mais diversas necessidades de produção, tendo boa durabilidade e facilitando qualquer tipo manutenção necessária nos componentes da tubulação

Nesse contexto, as LMF têm sido cada vez mais empregadas na indústria devido às suas diversas aplicabilidades já existentes. Tais ligas possuem propriedades especiais, como quando submetidas à carregamentos mecânicos, conferindo a habilidade de “memorizar” sua forma inicial (memória de forma) ou de suportar grandes cargas mecânicas sem sofrer deformação irreversível (pseudoelasticidade), além de serem biocompatíveis e apresentarem alta resistência à corrosão e à fadiga.

1.4 METODOLOGIA

A proposta deste trabalho prevê a análise comparativa da performance de dois materiais para utilização em juntas de vedação de alta pressão sob três parâmetros: capacidade de vedação, plastificação e recuperação geométrica. Para isso, serão realizadas as seguintes etapas:

- Escolha do flange a ser analisado com base na literatura e normas disponíveis
- Determinação das características termomecânicas das ligas de NiTi.
- Desenvolvimento do modelo e uso do modelo constitutivo de LMF
- Calibração do modelo numérico do software Ansys
- Simulações
- Análise comparativa dos materiais
- Conclusões

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho possui ao todo oito capítulos, com os seguintes tópicos:

Capítulo 1 – Apresenta na introdução do trabalho seus objetivos e motivações.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica da liga Nitinol, apresentando um resumo sobre sua história, algumas características e propriedades que essa liga possui.

Capítulo 3 – Revisão bibliográfica sobre as conexões flangeadas, com resumo sobre os materiais que as compõem, tipos e suas aplicações.

Capítulo 4 – Metodologia, onde será abordado o modelo no Ansys, desenhos técnicos do flange, assim como parâmetros utilizados.

Capítulo 5 – Resultados, obtidos por meio das simulações com influência da pressão interna e pré-carga dos parafusos com o anel de Aço Inox.

Capítulo 5 – Resultados, obtidos por meio das simulações com influência da pressão interna e pré-carga dos parafusos com o anel de Nitinol.

Capítulo 7 – Conclusões acerca do estudo.

Capítulo 8 – Bibliografias.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

As ligas com memória de forma, também chamadas de materiais inteligentes por conta da sua característica de recuperação elástica e reversível mesmo após ser deformada, foram descobertas por volta de 1932, pelo químico sueco Gustav A. Ölander [3], utilizando a liga Au-Cd, que observou uma característica interessante denominada pseudoelasticidade. Com a continuação dos estudos em 1938, Mooradian e Greninger [9], com a liga de Cu-Zn perceberam que a transformação de fase existente poderia ser induzida por tensão e anulada através de aquecimento.

Em 1949 Georgy Kurdyumov junto com Lev Khandros [12], estudaram o comportamento termoelástico sobre o EMF (Efeito de Memória de Forma), o qual também foi observado em 1951 por Chang e Read [10]. Assim, em 1960 a possibilidade de aplicação industrial ficou marcada pelo pesquisador William J. Buehler [5], no Laboratório de Material Bélico Naval do EUA, que inventou a liga de Níquel-Titânio e observou que também possuía memória de forma como uma de suas características. E com isso a liga recebeu o nome de Nitinol, por conta das iniciais do laboratório.

Na década de 1990 Kari Ullakko [22] realizou os primeiros experimentos com ligas ferromagnéticas de memória de forma, dando “um passo à frente” no estabelecimento de possibilidade aplicação desses materiais.

Tendo isso em vista, atualmente existem diversas ligas metálicas que apresentam o efeito de memória de forma e são utilizadas na indústria em geral, sendo o Nitinol uma das mais utilizadas, não só devido ao seu alto desempenho a respeito do EMF, mas também pelas suas propriedades mecânicas e biocompatibilidade. Contudo, as LMF possuem um alto custo por conta dos elementos de liga e dificuldade de processamento, mas não são grandes limitantes uma vez que as suas características apresentam grande potencial em diversas aplicações de engenharia.

2.2 MECANISMO DE TRANSFORMAÇÃO DE FASE

As propriedades das ligas com memória de forma ocorrem devido as transformações na estrutura cristalina do material (transformações martensíticas), essa é uma transformação de fase sólido-sólido não-difusiva de segunda ordem. Essa liga apresenta duas fases: martensítica e a austenítica.

A fase austenítica é marcada por uma estrutura cúbica de corpo centrado, alto módulo de elasticidade e de grande estabilidade em altas temperaturas, este último é um conceito relativo que dependerá do tipo de material, tratamento térmico, composição, entre outros fatores. Já a martensítica, que é mais estável em baixas temperaturas, é mais complexa, de fácil deformação, monocíclica (quando induzida por temperatura) e ortorrômbica (quando induzida por tensão), e podem apresentar até 24 variantes.

2.3 COMPORTAMENTOS E PROPRIEDADES

As transições de fases acabam propiciando às LMF características interessantes, logo existem comportamentos termomecânicos bem atraentes a serem observados: o Efeito de Memória de Forma e Pseudoelasticidade, além das características de biocompatibilidade, e resistência à corrosão e à fadiga.

2.3.1 Efeito de Memória de Forma

Com relação ao EMF, existem dois aspectos importantes a serem destacados durante esse processo, o fato de ser reversível e poder ocorrer a transformação quando o material é aquecido acima da temperatura de transformação. Tendo isso em vista, quando o material se encontra inicialmente na fase de martensita (variante induzida por temperatura), ao sofrer um carregamento mecânico, gera-se uma alteração na própria fase martensítica (variante induzida por carga mecânica). Durante o processo de carregamento, o material sofre mudanças geométricas macroscópicas (deformação residual) que permanece mesmo após a retirada do carregamento mecânico, este efeito está ligado as reorientações de variantes cristalográficas. Posteriormente ao descarregamento mecânico, ao se aplicar um carregamento térmico até temperaturas superiores à de A_f (temperatura final da transformação de

martensita para austenita), ocorre uma mudança de fase de martensita para austenita e a recuperação da deformação residual, ou seja, o material retorna a sua geometria original. Logo de acordo com a Figura 1, fica mais evidente como ocorrem as transformações. Sendo M_s (temperatura de início da transformação da austenita para martensita) para M_f (temperatura final da transformação da austenita para martensita), quando a liga vai de austenita para martensita e, A_s (temperatura de início da transformação de martensita para austenita) para A_f quando ocorre a transformação de fase de martensita para austenita.

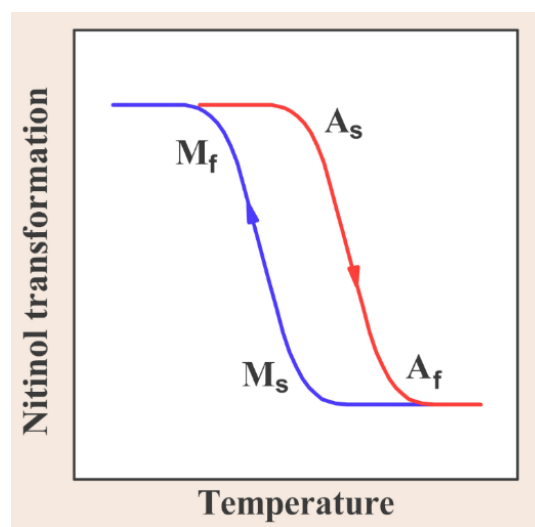


Figura 1: Temperatura de Transformação de Fase (Zhang. Congrui, 2018)

Tendo isso em vista, ao se aprofundar nesse efeito, diante da figura 2, o material se encontra inicialmente na fase de martensita induzida por temperatura, com isso ao sofrer um carregamento gera-se uma alteração nas suas variantes que é melhor explicado abaixo.

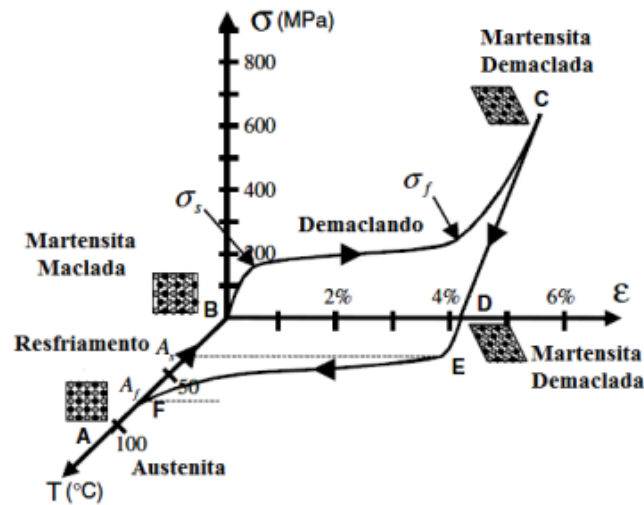


Figura 2: Diagrama tensão x deformação x temperatura (Adaptado Lagoudas e Kumar, 2008)

No ponto A, se tem a fase austenítica. Ocorre o resfriamento sem tensão resultando no ponto B, fase de martensita de variante maclada. Logo, ao ser aplicado um carregamento acima de σ_s inicia-se a variante demaçada, marcada pela reorientação da martensita finalizado no ponto σ_f . E a partir desse ponto começa a fase elástica da martensita demaçada, terminando em C. Assim de C para D retira-se a carga e observa-se que não ocorre a reorientação da martensita. O efeito só ocorre ao se aquecer, sem que haja qualquer tensão aplicada, resultando na transformação reversa, iniciada quando a temperatura chega ao ponto E, e finalizando em F. [1]

O EMF pode ocorrer de forma unidirecional ou bidirecional dependendo do comportamento do material em relação ao seu ciclo térmico. No caso unidirecional, que é o mais comum e utilizado, o material recupera sua forma quando exposto a altas temperaturas, mas ao se resfriar não possui qualquer deformação. Já o bidirecional haveria o retorno do material ao ser resfriado.[7]

2.3.2 Pseudoelasticidade

No que diz respeito a este comportamento é observado com temperaturas abaixo de M_f que é caracterizada por uma grande deformação residual. Com isso ao se analisar a figura 2, já exposta, nota-se que a uma determinada temperatura e livre de tensões, ocorre uma fase chamada de

martensita maclada, que pode apresentar 24 variantes de orientações cristalográficas, que se orientam na direção mais favorável em relação a força aplicada. Sendo então associada a transformação por indução de tensão ocorrendo em temperaturas superiores a A_f , caracterizado pela recuperação de deformação após a retirada de tensão.

Tomando a figura 3 que está logo abaixo como base, ao analisar a liga em temperaturas superiores a A_f , ela se encontra em fase austenítica estável e ao ser aplicada uma tensão, o material sofre deformação elástica até que atinja o ponto de início da transformação para a fase de martensita. A tensão aumenta aos poucos até atingir o valor final da mudança de fase, e no instante de C para D é representado o comportamento elástico da martensita demaclada, e assim ao retirar a carga antes de atingir o limite de escoamento o material retornará a forma inicial, ou seja, reverterá a deformação elástica dando início a transformação austenítica até passar pelo ponto F, primeira região elástica, e chegar ao ponto A. [1]

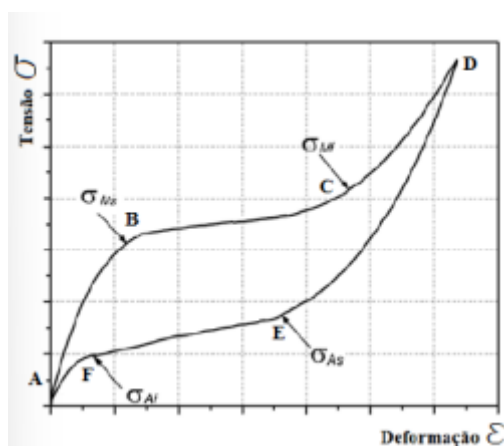


Figura 3: Ciclo de carregamento (Almeida, 2015)

2.3.3 Resistência à Fadiga

Dentre as propriedades da liga Nitinol destacam-se a sua resistência à corrosão, fadiga e sua biocompatibilidade.

A capacidade de resistência à fadiga do material é um fator extrema relevância para os materiais de forma geral, isto porque é um ponto que costuma ser bastante explorado, e assim quanto maior a vida desse material mais utilidades ele pode oferecer ao durar mais que os demais.

Essa capacidade está ligada a natureza não linear existente na transformação de fase, com isso as análises de superfície de fratura e microestrutura evidenciam aspectos incomuns associando-os a domínios de alta densidade de discordâncias, tensões internas, estabilização da martensita e microfissuras. Outros estudos dão maior ênfase a microestrutura, estando a resistência à fadiga atrelada a acomodação da martensita induzida por tensão e essas discordâncias, assim como a formação de precipitados auxiliam no aumento da resistência [7].

2.3.4 Resistência à corrosão

Outro fator de importância dentre os materiais utilizados é a resistência à corrosão que favorece a sua utilização em ambientes mais agressivos. Na liga Nitinol está característica é resultado da presença de um filme passivo estável de TiO_2 , originado de forma natural sendo responsável também pela biocompatibilidade desse material.

Vale ressaltar que esse filme dependendo do meio em que estiver inserido, junto ao tempo de exposição e variadas concentrações de agentes corrosivos pode acabar por romper, como é o caso de soluções altamente ácidas (Íons de Cloreto + Íons de Fluoreto).

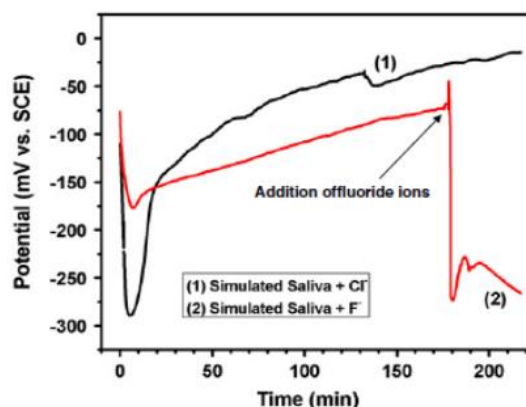


Figura 4: Queda do potencial de resistência (Godoi, 2015)

Analisando a figura 4, fica evidente a queda no potencial de resistência à corrosão, ao se adicionar íons de fluoreto em solução já com íons de cloreto, após cerca de 180 minutos do material em contato com esta solução.

2.3.5 Biocompatibilidade

A Biocompatibilidade pressupõe que a aplicação de um biomaterial não gere ao usuário reações adversas, tóxicas ou carcinogênicas. Ou seja, é a capacidade que o material possui em não se decompor ao estar sob as condições do organismo humano, de forma que assegure também suas propriedades por longos períodos. Tendo isso em vista, a norma ISO 10.993 orienta um modelo adequado de avaliação visando garantir a biocompatibilidade do material, e regulamentado pela ANVISA.

O Nitinol é bastante estudado com relação a essa característica uma vez que um dos materiais de sua composição é consideravelmente tóxico. Apesar de também estar presente em aços inoxidáveis, na liga Nitinol o Níquel possui uma concentração ainda maior o que é preocupante pois em altas concentrações pode até provocar câncer. Logo é importante entender que diferentemente de outras ligas o níquel não é adicionado visando melhorias de propriedades, ele já está presente no composto com o titânio, com isso a forças de ligação entre os elementos acaba sendo maior, evitando seu desprendimento em forma de íons [7], além da camada de TiO_2 formada na superfície, já mencionada anteriormente.

2.4 APLICAÇÕES

As ligas com memória de forma possuem diversas características interessantes além da usual e mais conhecida, que é o retorno a forma inicial, principalmente no ponto de vista cristalográfico, uma vez que são capazes de alterar a resistência elétrica, capacidade de dissipação de energia, rigidez, tanto de forma reversível quanto controlável, ou seja, sua utilidade vai muito além do que a maioria das pessoas imaginam, não sendo atrelada somente ao retorno da forma. Tendo isso em vista, destacam-se algumas aplicabilidades bem conhecidas.

2.4.1 Engenharia Civil

No caso da engenharia civil a aplicabilidade das ligas de memória de forma se dá devido sua alta capacidade de amortecimento, com isso são utilizadas para o controle passivo de vibrações, de modo que o amortecimento

seja adaptável ao aumento da vibração. Inclusive, existe um dispositivo chamado ATVA (Adaptive Turned Vibration Absorber), que é utilizado no interior das estruturas principalmente em locais onde a incidência de terremotos é maior.

Outra aplicação é o concreto reforçado inteligente, que consiste em uma viga de concreto com fios de LMF, que estão integrados a viga no seu sentido longitudinal. Tendo isso em vista a ideia é de produzir um sistema que monitore o surgimento de trincas por meio da alteração da resistência elétrica desses fios que sofrem alguma tensão, e assim aplicar uma corrente elétrica a fim de causar a transformação de fase com o calor gerado, fazendo com que o material volte a sua forma original, e como consequência gere uma força no sentido de fechamento da trinca [20].



Figura 5: Concreto com fios de memória de forma (Song, 2006)



Figura 6: Concreto com trinca (Song, 2006)



Figura 7: Concreto pós aplicação de corrente elétrica (Song, 2006)

2.4.2 Engenharia Aeronáutica

As asas dos aviões possuem estruturas chamadas de flaps, que promovem o ganho ou a perda de altitude, logo a manobra depende da eficiência deste componente, constituído por um sistema hidráulico composto por bombas e atuadores, o que acaba por elevar o peso e o custo, indo contra o que muitas das empresas desejam, a redução de peso junto a um aumento de confiabilidade.

Um bom exemplo da capacidade desses materiais pode ser observado no conceito de estruturas de geometria variável, aplicadas no projeto de asa adaptativa da empresa DARPA, a qual utilizou atuadores com EMF para construir as asas, que de acordo com as necessidades e circunstâncias dos voos a geometria seria otimizada, gerando melhores condições de voo [15].



Figura 8: Asa Adaptativa (Ligas com memória de forma, 2013)

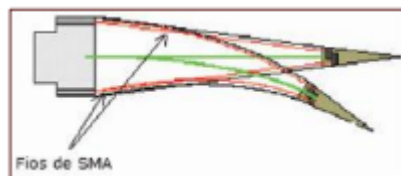


Figura 9: Asa Adaptativa (Ligas com memória de forma, 2013)

2.4.3 Odontologia

É de comum conhecimento a importância do uso de aparelhos para a correção ou prevenção de disfunções na arcada dentária. Com isso uma grande evolução se deu nesse setor ao passar a utilizar fios ortodônticos de Nitinol. Isto porque antes era necessário a aplicação de muita força perante um baixo rendimento na movimentação da arcada, onde antes se utilizava materiais como o aço inoxidável.

O funcionamento desses fios está ligado ao princípio de acumulação de energia elástica, que é convertida em trabalho mecânico fazendo assim a movimentação dentária, essa acumulação é realizada pela deformação do fio durante seu regime elástico, sendo liberada na forma de força [2].



Figura 10: Fio de Nitinol usado em aparelho dental (Quintão, 2009)

2.4.4 Cardiologia

Devido sua biocompatibilidade, alta resistência à corrosão junto a sua memória de forma, o Nitinol teve grande importância na cardiologia com o desenvolvimento de stents. Esse material é um pequeno tubo que é colocado dentro da artéria visando mantê-la aberta para que se possa restaurar ou evitar a diminuição do fluxo sanguíneo, geralmente sendo utilizados como emergência em tratamentos em que se têm 70% da via obstruída.

A desobstrução ocorre com a expansão desse material, que quando inserido possui um diâmetro menor, e com o calor do corpo humano ocorre o aquecimento fazendo com que ele retorne à sua geometria de acordo com o que foi planejado [4].

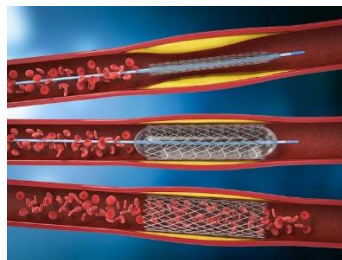


Figura 11: Representação do uso de stent (16)

3 CONEXÕES FLANGEADAS

3.1 TIPOS DE FLANGES

Flanges são peças utilizadas como elementos de ligação entre dois componentes de um sistema de tubulação, de modo a serem fáceis, rápidos e práticos de serem desmontados, evitando processo destrutivos. São muito utilizados na indústria auxiliando no pleno funcionamento dos sistemas e garantindo maior segurança ao ambiente, sendo normalmente fixados por parafusos e montados em pares, possuindo a função básica de vedação.

A escolha dessa peça ocorre mediante as necessidades, variando de acordo com a finalidade, material - sendo o mais requisitado e resistente os de aço carbono devido sua alta resistência mecânica - e o ambiente em que estará inserido, pontos que acabam por afetar a durabilidade do flange, apesar de geralmente resistirem por muitos anos.

Possuem variações em seu diâmetro de 1,8 a 64 polegadas, de acordo com as normas ANSI B16.5 e B16.47, podendo transportar diversos fluidos como óleos, vapores, gases e combustíveis. Dentre alguns exemplos de aplicação, destacam-se:

- Companhias de cimento e mineração;
- Petrolíferas;
- Setores de abastecimento água, gás;

3.1.1 Flange Integral

São flanges fundidos junto ao tubo, o que a faz uma das mais resistentes. No caso de ligações de tubos com válvulas, bombas, entre outros, os flanges costumam ser integrados ao equipamento.



Figura 12: Flange integral (Reis, 2013)

3.1.2 Flange Cego

É o tipo mais popular, encontrado facilmente no mercado. Não possui furo no centro, sendo utilizado principalmente para extremidades de sistemas de tubulação, possibilitando o fechamento de linhas e seções flangeadas, ou seja, interrompe a passagem dos fluidos, o que facilita inspeções na linha e sua continuação futura, além de poder ser aplicado em diversas condições de temperatura e pressão.



Figura 13: Flange cego (Reis, 2013)

3.1.3 Flange com Pescoço

Este tipo de flange possui um corpo projetado, denominado como pescoço, que serve para transferir tensão para a tubulação, reduzindo a concentração de pressão na sua base.

Possui como características a resistência à deformação, uma extremidade chanfrada, que favorece a solda de topo. O que deixa sua face interna perfeitamente lisa, sem a ocorrência de imperfeições que gerem concentradores de tensões ou facilite o processo corrosivo, este processo acabar deixando sua montagem mais cara, devido a pouca tolerância para erros.

Pode ser utilizado em variadas condições de pressão e temperatura, além de reduzirem as turbulências e erosões dentro das tubulações.



Figura 14: Flange com pescoço (21)

3.1.4 Flange Solto ou Lap-Joint

Sua fabricação foi pensada para aplicação em tubulações que requerem desmontagem frequentes, pois podem girar e permitem maior facilidade de alinhamentos dos furos, sua fixação ocorre somente por parafusos, e são recomendadas para tubulações de baixa pressão.

Este tipo de flange não fica preso de forma direta na tubulação, e necessitam de uma solda de topo de uma peça especial, cujo nome é virola, que servirá de batente para o flange permitindo que o mesmo deslize sobre a tubulação. [17]



Figura 15: Flange solto (Reis, 2013)

3.1.5 Flange Orifício

Este tipo de flange possui orifícios utilizados para medir a vazão dos líquidos e gases que passam no sistema. Quando comparado aos demais tipos, possui a vantagem da existência de parafusos adicionais para facilitar a separação dos flanges para que sejam efetuadas inspeções ou manutenções.



Figura 16: Flange Orifício (20)

3.1.6 Flange Roscado

É utilizado em diferentes aplicações, de fácil montagem, pode ser unido ao tubo sem a necessidade de soldas por ter rosca interna, mais indicado a médias pressões e temperatura ambiente.

A presença desse tipo de rosca se deve ao fato da existência de metais não soldáveis em determinadas tubulações, como os de ferro fundido e no caso de não metálicos, o plástico.

Com a relação à sua resistência é inferior as já citadas, isto porque conta com um aperto permissível, que provoca o aumento de tensões além de facilitar vazamentos. Até por isso, que para determinados fluidos – inflamáveis, tóxicos, entre outros – a mesma não pode ser utilizada, ponto previsto pela norma ANSI.B.31. [17]



Figura 17: Flange roscado (Reis, 2013)

3.1.7 Flange Sobreposto

Esse flange desliza sobre a tubulação antes de ser soldado e a mesma deve ser realizada tanto interna quanto externamente. Utilizado em diversas temperatura e pressão moderada, sendo ideal para baixas por não permitir ligação direta com conexão tubular, nem ensaio de radiografia na linha.

Com relação as ligações com o tubo, esta ocorre por duas soldas em ângulo. Sua montagem se torna bem mais barato que quando comparada com a de pescoço, pois existe um encaixe entre a ponta do tubo e a estrutura do flange, evitando a necessidade de corte da tubulação para eventuais manutenções. No entanto sua aplicação se restringe a condições de pouca severidade, pois sua resistência mecânica pode ser inferior à do próprio tubo, além disso apresenta descontinuidade de seção favorecendo a concentração de tensões [17].



Figura 18: Flange sobreposto (Reis, 2013)

3.1.8 Flange de Encaixe

Sua conexão é parecida com a do flange sobreposto, porém apresenta um encaixe para a ponta do tubo, dispensando a necessidade de solda interna e o deixa mais resistente. É mais utilizado para tubulações de pequeno diâmetro, cerca de 2 polegadas, em linhas de alta pressão. Por conta da descontinuidade interna é recomenda a limitação de uso em locais onde não há corrosão por contato.[17]



Figura 19: Flange de encaixe (Reis, 2013)

3.2 TIPOS DE FACEAMENTOS

A face é a região em que ocorre de fato o contato com as terminações das tubulações, de modo a assegurar a estanqueidade do sistema. Sendo assim, existem diversos tipos utilizados nas indústrias.

3.2.1 Com Ressalto

É o mais comum dentre os faceamentos para flanges de aço sendo utilizados em qualquer temperatura e pressão. O ressalto pode variar de acordo com a pressão em que está sendo aplicado, classes de pressão de 150 e 300, o ressalto é de 1/16 polegada, enquanto para pressões maiores possui 1/4 polegada. [17]

Ressalta-se ainda que existem os com ranhura, de acabamento mais comum e barato, e os livres ou lisos, com diversos graus de acabamento de acordo com o serviço ou junta. [13]

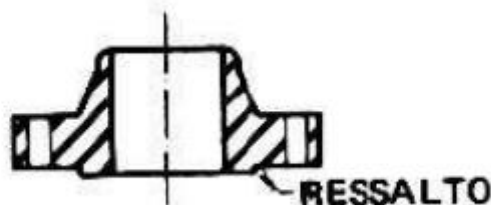


Figura 20: Faceamento com ressalto (Senai, 1997)

3.2.2 Plana

Muito comum em flanges de ferro fundido e materiais poliméricos, possui uma menor resistência ao aperto quando comparada a face de ressalto. Isto ocorre pois são fabricadas de materiais mais frágeis, e caso tivessem ressaltos isso tornaria o flange mais suscetível a fraturas devido a flexão de suas bordas.

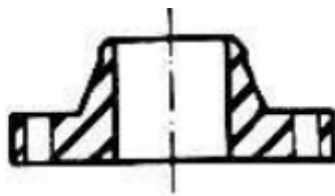


Figura 21: Faceamento plano (Senai, 1997)

3.2.3 Para Junta de Anel

As faces para junta de anel foram pensadas para aplicações mais severas em que o fluido se encontra em altas temperaturas e pressões, e até

mesmo caso seja tóxico uma vez que esta face possui mais segurança contra vazamentos.

Diferentes das demais faces está apresenta um rasgo circular concêntrico, para que seja encaixado um anel, atuando como junta, favorecendo uma maior vedação. É de extrema importância que o material do anel seja de menor dureza que o do flange, para que a vedação ocorra da melhor forma, já que existe tanto a ação de cunha da junta nos rasgos do flange, quanto a dilatação devido à pressão interna que pressiona as paredes dos rasgos. [17]



Figura 22: Faceamento para junta de anel (Senai, 1997)

3.2.4 Macho e Fêmea

Usada praticamente no transporte de fluidos corrosivos, uma vez que a estrutura do flange permite o seu fechamento de maneira a minimizar o contato da junta com o fluido, visando reduzir os desgastes para uma maior segurança.

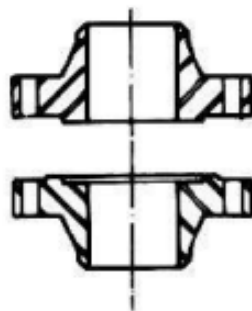


Figura 23: Faceamento macho e fêmea (Senai, 1997)

3.3 TIPOS DE JUNTAS

A junta é o mecanismo que auxilia a vedação em conexões flangeadas, uma vez que por estar localizadas entre os flanges acaba sendo comprimida ao ser apertado os parafusos junto a uma força cisalhante que acontece pela pressão interna. Com isso é suma importância que a pressão exercida pelos

parafusos seja maior que a interna, caso contrário ocorrerá vazamentos, além da junta ser resistente o suficiente para suporte os dois esforços presentes. [17]

Por outro lado, também é necessário que as juntas sejam elásticas e modulares para que se molde as faces irregulares. Logo, em juntas mais duras resistem a maiores temperaturas e pressões, porém são menos deformáveis, necessitando de um acabamento mais detalhado e preciso. [13]

Cada tipo de flangeamento precisa de uma junta específica. A de ressalto usam as de coroa circular; a de face plana é coberta pela junta incluindo os parafusos; a macho e fêmea necessitam de uma circular estreita; e a de junta de anel precisam de um anel que costuma ser metálico e maciço, e é de suma importância que independentemente do material a ser adotado as juntas devem possuir dureza inferior à do flange.

3.3.1 Juntas Metálicas

Estas se dividem em:

- Folheada: Estas juntas são compostas por um centro de amianto e coberta por uma placa de metal, normalmente de aço carbono, inoxidável ou Monel (liga de níquel-cobre). Sua utilização é muito parecida com as semimetálicas em espiral, excetuando-se o fato de possuir vedação mais difícil. Com relação ao acabamento das faces dos flanges, pode ser liso, com baixa rugosidade ou com ranhuras concêntricas.[17]
- Maciça: Costumam ser mais utilizadas junto a faces com ressalto; macho e fêmea, de ranhura ou lingueta, junto a serviços com altas pressões. Suas juntas podem possuir suas faces lisas ou ranhuradas, normalmente de aço 14 carbono e aço inox ser inferior à das faces do flange. [13]
- De Anel: É feita em forma de anéis que são maciços com secção transversal ovalada ou octogonal, costumam ser fabricados em aço inox, aços liga, aço carbono e utilizados em serviços de grande risco, com altas temperaturas (>500°C).

3.3.2 Juntas Não Metálicas

Costumam ser juntas planas utilizadas nas faces com ressalto ou plana, normalmente possuem entre 0,7 e 3 mm, feita de materiais como:

- Borracha Natural; para água, ar e condensado de até 60°C
- Borracha Sintética; para óleos de até 80°C
- Materiais Plásticos; para fluidos corrosivos em pressões baixas
- Papelão Hidráulico seguindo normas de ABNT (EB - 216; EB – 212; EB - 313). [17]

3.4 ELEMENTOS DE FIXAÇÃO

A escolha dos elementos de fixação corretos é uma das principais etapas de um projeto mecânica, podendo ser crucial para evitar falhas e garantir um adequado funcionamento do sistema projetado.

No contexto das juntas flangeadas de alta pressão, não é diferente. Para garantir o pleno funcionamento da junta na tubulação aplicada, é essencial que todos os elementos estejam bem dimensionados e fixados.

No caso das juntas flangeadas, fatores como direção do carregamento, carga, geometria e massa das partes unidas são fatores essenciais a se considerar durante o projeto. Vale levar em consideração que é de responsabilidade do engenheiro projetista definir esses fatores e escolher a fixação adequada para os componentes.

Além de garantir o pleno funcionamento do sistema, os elementos de fixação também são responsáveis por garantir facilidade na desmontagem do conjunto, uma vez que se deve considerar que o conjunto deverá ser desmontado para realização de manutenção.

3.4.1 Estojo

O estojo é um elemento de fixação mecânica composto por um fuso com uma parte lisa, também chamado de parafuso prisioneiro, com porcas em suas extremidades, responsáveis pela fixação do conjunto mecânico.



Figura 24: Parafuso Prisioneiro (24)

São usados, em geral, em projetos onde há a previsibilidade de montagem e desmontagem frequente dos equipamentos fixos.

Uma grande vantagem do uso de estojos é que, por conta da parte lisa, característica de um parafuso prisioneiro, a parte interna do elemento a ser fixado não é danificada, ao contrário do que acontece em parafusos convencionais.

O estojo possui diversas aplicações no ramo da mecânica, sendo constantemente utilizado em conexões flangeadas, válvulas e bombas.



Figura 25: Conexão flangeada com estojo (19)

Em relação a normalização, cinco normas regem a escolha do estojo ideal e seus respectivos elementos para o projeto: ASME B 16.5, responsável por definir comprimento e diâmetro ideal do estojo, ASME B 1.1, responsável por definir o rosqueamento ideal das porcas e prisioneiros, ASME B 18.2.2, responsável pela padronização das porcas e ASTM A 193, responsável por definir o tipo de material do prisioneiro e ASTM A 194, responsável por definir o tipo de material utilizado na porca.

3.4.2 Parafusos de Máquina

Estes parafusos possuem a cabeça integral sextavada ou quadrada, e a região rosqueada não ocupa toda sua extensão, ficando somente mais ao final do parafuso onde a porca ficará após a montagem. Quando comparada aos estojos, seu uso se resume a aplicações com uma menor exigência, uma vez que a norma ANSI.B.21 prescreve seu uso para flanges inferiores a #300, temperatura de até 260°C e juntas não metálicas.

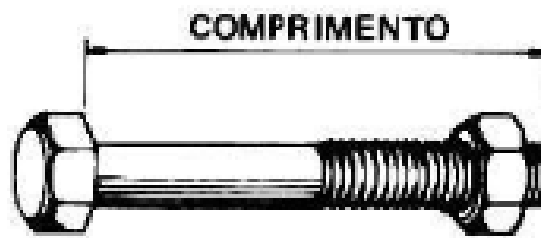


Figura 26: Parafuso com parte sem região rosçada (Senai, 1997)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Este trabalho tem como objetivo comparar o comportamento de um anel de vedação em uma junta flangeada de alta pressão considerando dois materiais: Aço inoxidável, material constantemente utilizado no contexto citado e liga de NiTi, objeto de estudo a ser considerado nas pesquisas descritas a seguir, é necessário entender melhor sobre os flanges de alta pressão, sua utilização e o papel desta liga ao ser utilizada.

4.1.1 Flanges de Alta Pressão

Os flanges de alta pressão são equipamentos de união muito utilizados em diversos setores da indústria, principalmente quando se é necessário suportar altíssimas pressões além de temperaturas elevadas. Sendo assim, nota-se que esses tipos de flanges precisam suportar a operação em condições extremas, o que os tornam componentes essenciais para o transporte de fluidos, e assim, precisam ser constituídos de materiais de alta resistência para evitar falhas durante o processo.

Diante disso, o presente trabalho escolheu esse tipo de flange, devido principalmente a necessidade de materiais de maior resistência, assim como suas vedações através do uso de componentes metálicos. E assim visa-se comparar o uso da liga Nitinol com o aço inoxidável, como anel de vedação da conexão, já que esta liga possui ótimas propriedades elétricas e mecânicas, alta resistência à corrosão e à fadiga.

Além dos pontos destacados, a liga Nitinol é uma opção interessante para esse tipo de aplicação, posto que faz parte das LMF, logo pode retornar a sua forma original após o descarregamento de certo esforço aplicado, como já exposto anteriormente diante do seu comportamento pseudoelástico. Assim este tipo de liga permitiria a reutilização do mesmo anel quando efetuado qualquer tipo de reparo ou manutenção nas instalações, o que a longo prazo ajudaria a reduzir custos.

4.2 MÉTODOS

Para que o modelo de junta flangeada pudesse ser descrito e analisado, se fez necessário a utilização do software SOLIDWORKS® com o objetivo de realizar a confecção do desenho técnico da junta flangeada ideal para a condição de alta pressão.

A partir da condição citada, definiu-se que seria utilizada a junta de pescoço, visto que é a que melhor corresponde ao tipo de aplicação, e possui a capacidade de reduzir a pressão na base do flange. Essa característica é de extrema importância para o projeto, uma vez que a tubulação a ser considerada trabalha a elevadas pressões

Para definir as dimensões do elemento, considerou-se a norma API 6A, uma vez que esta especifica o flange por intermédio da classe de pressão de trabalho. Através do objetivo da pesquisa, definiu-se que a classe de pressão escolhida seria de 20 ksi e o diâmetro nominal da tubulação de 4" 1/16.

Tendo definido o tipo de junta flangeada e as condições de operação, foi possível definir as dimensões do flange, bem como os parafusos utilizados para sua fixação. Na figura 27, é possível observar o resultado do modelo em perspectiva isométrica.

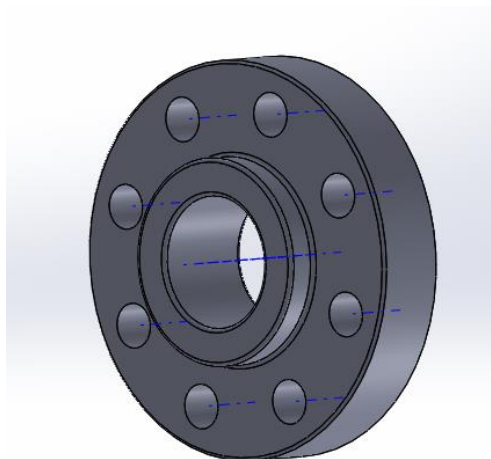


Figura 27: Perspectiva isométrica da junta flangeada (Autores)

A partir do modelo 3D criado e demonstrado no parágrafo anterior, foi possível gerar as vistas ortogonais da junta flangeada, onde na figura 28 pode-se observar a vista frontal, e na figura 29 a vista de seção E-E.

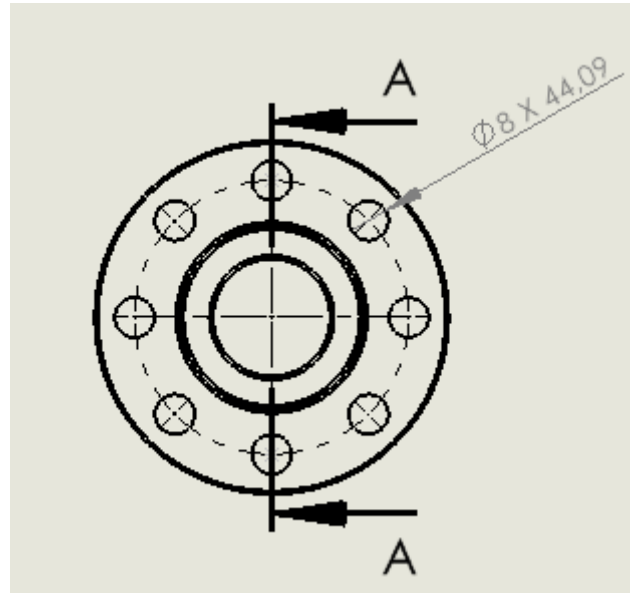


Figura 28: Vista frontal do flange (Autores)

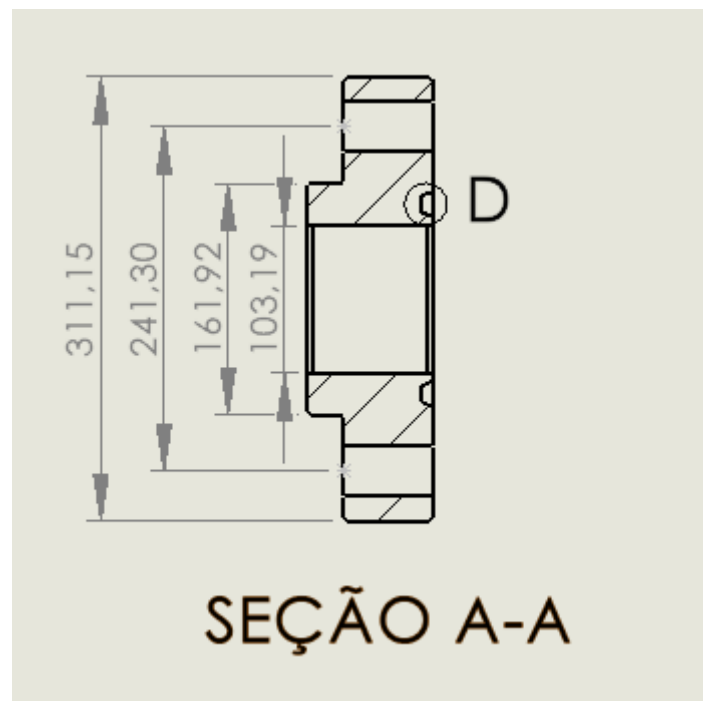


Figura 29: Vista de seção (Autores)

A norma API também especifica o rasgo que será responsável por fixar o anel de vedação compreendido entre os dois flanges. O detalhamento do rasgo pode ser observado na figura 30, que demonstra a vista de detalhe D, exposta na vista de seção A-A.

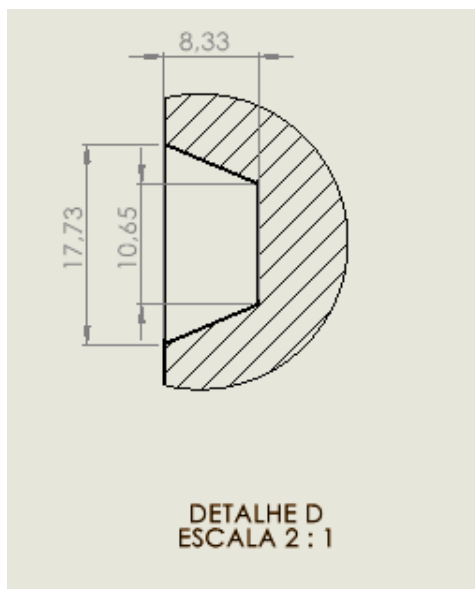


Figura 30: Vista de detalhe do rasgo do flange (Autores)

Vale ressaltar que o material considerado para os desenhos foi o aço API 60K, definido através da norma API 6A. A composição química do aço em questão pode ser observada na tabela 1. [26]

Tabela 1: Composição química do aço API 6A 60K

Elemento	Símbolo	Composição (%)
Carbono	C	0,28 - 0,33
Manganês	Mn	0,40 - 0,60
Silício	Si	0,20 - 0,35
Fósforo	P	Máx. 0,035
Enxofre	S	Máx. 0,040
Cromo	Cr	0,80 - 1,10
Molibdênio	Mo	0,15 - 0,25

Já as propriedades físicas do material, também definidas pela norma API 6ª, podem ser observadas na tabela 2. [26]

Tabela 2: Composição física do aço API 6A 60K

Resistência a tração	560 MPa
Tensão de escoamento	460 MPa
Redução	59,6 % (Máximo)
Dureza	95 HRB

É importante frisar que o material da junta será o mesmo para os dois tipos de anéis estudados durante o projeto.

O segundo elemento a ser confeccionado utilizando o software foi o anel de vedação, principal objeto de estudo do projeto. As dimensões do anel também podem ser definidas através da norma API, uma vez que, cada classe de pressão relacionada ao tipo de serviço possui uma especificação de anel diferente.

Para uma pressão de trabalho de 20 ksi, o anel mais apropriado é o BX 155 feito de aço inoxidável API 304, também definido pela norma API 6A. A composição química do material está especificada na tabela 3 [25] e as propriedades físicas na tabela 4 [25].

Tabela 3: Composição química do aço API 304

Elemento	Símbolo	Composição (%)
Carbono	C	0,08
Manganês	Mn	2,0
Silício	Si	0,75
Fósforo	P	0,045
Enxofre	S	0,03
Níquel	Ni	8 - 10,5
Cromo	Cr	18 - 20

Tabela 4: Propriedades do aço API 304

Resistência a tração	515 MPa
Tensão de escoamento	205 MPa
Alongamento	40 % (Mínimo)
Dureza	92 HRB

Os anéis da classe BX possuem formato octogonal e têm como principal característica a presença de um furo em sua superfície externa, responsável por equilibrar a pressão no elemento. É importante ressaltar que o anel BX 155 é um item de prateleira, ou seja, pode ser facilmente encontrado em catálogos específicos e possui ampla utilização no mercado.

Com as dimensões adquiridas pela norma API 6A, foi possível confeccionar o anel especificado através do SOLIDWORKS®, tendo o resultado apresentado nas figuras abaixo.

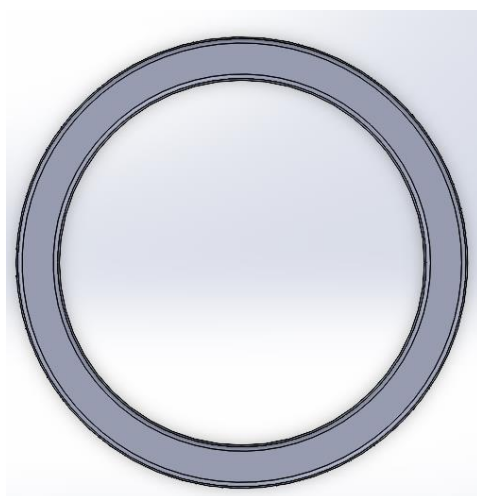


Figura 31: Seção transversal do anel BX 155 (Autores)



Figura 32: Vista isométrica do anel BX 155 (Autores)

A norma API 6A também especifica o tipo de parafuso ideal para realizar a fixação do flange na tubulação. De acordo com a norma, o parafuso ideal para a operação deve possuir 1" 3/4 de diâmetro e comprimento de 190 milímetros.

O material do parafuso é definido pela norma ASTM. Para a aplicação estudada no presente trabalho, o parafuso escolhido foi o A193 Gr B7.

De acordo com a norma ASTM o parafuso A193 Gr B7 pode ser aplicado para todas as classes de pressão de flanges e qualquer tipo de junta de vedação, uma vez que resiste a elevados esforços presentes em tubulações. A norma define a composição química do material [28], especificado na tabela 5.

Tabela 5: Composição química do aço A193 Gr B7

Elemento	Símbolo	Composição (%)
Carbono	C	0,37 - 0,49
Manganês	Mn	0,65 - 1,10
Silício	Si	0,15 - 0,35
Fósforo	P	Máx. 0,040
Enxofre	S	Máx. 0,035
Cromo	Cr	0,75 - 1,20
Molibdênio	Mo	0,15 - 0,25

A norma ASTM também define as propriedades físicas do material, informação fundamental para os estudos realizados na proposta apresentada. Essas propriedades são definidas para parafusos de até 2" ½ e podem ser observadas na tabela 6 [28].

Tabela 6: Características físicas do parafuso A193 Gr B7

Resistência a tração	860 MPa
Tensão de escoamento	720 MPa
Alongamento	16 % (Mínimo)
Redução	50 % (Máximo)
Dureza	35 HRB

Vale ressaltar que, segundo a norma interna da Petrobras N – 76 [29], o parafuso escolhido é amplamente utilizado em juntas flangeadas aplicadas em tubulações de transporte de petróleo.

Tendo em vista que o objetivo de realizar uma análise qualitativa entre os anéis confeccionados de aço inoxidável e Nitinol, houve a necessidade de analisar o comportamento dos materiais nas condições de trabalhos definidas previamente, ou seja, em tubulações com pressão de operação de 20 ksi. Dito isto, é de suma importância a escolha de um software capaz de realizar simulações de cunho estrutural no anel de vedação já especificado.

Para realizar a escolha do software adequado, é necessária a seleção de um método capaz de analisar as tensões em que o elemento é submetido e analisar os pontos onde pode ocorrer falha. Dentro desse contexto, o método escolhido foi o de elementos finitos.

O método de elementos finitos tem como objetivo descrever um sistema em várias partes e analisar como cada uma dessas partes se comporta em relação ao todo. Com a aplicação de carregamentos, cada uma das partes que o material é dividido, conhecido como malha, se desloca a fim de encontrar-se respostas sobre o comportamento de um corpo submetido a determinadas circunstâncias, como tensão, deformação e deslocamento.

Diante das circunstâncias apresentada, o software escolhido para realizar as análises de elementos finitos foi o ANSYS®, plataforma amplamente utilizada por engenheiros em todo o mundo, especialmente nas indústrias aeroespaciais, automotivas e de energia.

Através da entrada de dados do aço inoxidável API 304 e da liga de níquel-titânio, o software será capaz de fornecer informações suficientes para comparar a utilização dos dois materiais nas condições de utilização já citadas.

5 DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS

Antes da realização das análises e suas provenientes discussões, foi necessário definir alguns parâmetros cruciais para entendimento do projeto, como, por exemplo, a força de pretensão, a malha e os diversos contatos existentes entre os componentes da junta flangeada. A definição correta desses parâmetros será utilizada a fim de se obter os melhores resultados para o modelo utilizado, além de verificar a possibilidade de execução das simulações com o software na versão estudantil, que oferece diversas limitações.

5.1 FORÇAS E PRESSÕES ATUANTES

Para entender o comportamento do flange em relação as condições de operação em que ele é submetido, faz-se necessário um estudo aprofundado sobre as cargas presentes no elemento e como seus componentes se comportam. A fim de analisar esse comportamento, houve a necessidade de inserir o modelo desenhado em Solidworks® no software Ansys®.

O primeiro passo para realizar a análise das tensões é a definição dos contatos entre os elementos que compõem a junta flangeada: parafusos, porcas, arruelas, flanges e anel de vedação. O estudo dos contatos permite que o software entenda a relação de esforços entre os parafusos e a face do flange, permitindo definir corretamente o impacto da pressão de aperto no corpo do flange.

Durante as análises iniciais dos contatos, bem como no estudo de convergência de malha, percebeu-se que o modelo de junta flangeada contendo parafusos, arruelas e porcas gerou um elevado número elementos no arquivo simulado. Como a versão estudantil do Ansys® limita o número de elementos possíveis em uma simulação, foi necessário buscar por uma solução que propusesse um resultado satisfatório para o sistema, sem exceder as limitações impostas pelo software.

Diante disso, a solução encontrada para a problema com o número de elementos foi a utilização do método *beam model*. E optou-se por este método e não pelo de simetria, pois pretende-se realizar variações de aperto no seguimento do projeto ao utilizar o Ansys® profissional.

Sendo assim, no campo da engenharia, o método *beam model* é utilizado como uma poderosa ferramenta capaz de simular o efeito de um parafuso sem que haja necessariamente o corpo sólido representado.

O método *beam model* consiste em representar os parafusos de um elemento de máquina através de vigas. Essas vigas são responsáveis por estabelecer o contato entre os elementos da mesma forma que ocorre com um parafuso, porém, o corpo representado como viga, não possui nós, reduzindo consideravelmente o número de elementos presente na estrutura estudada.

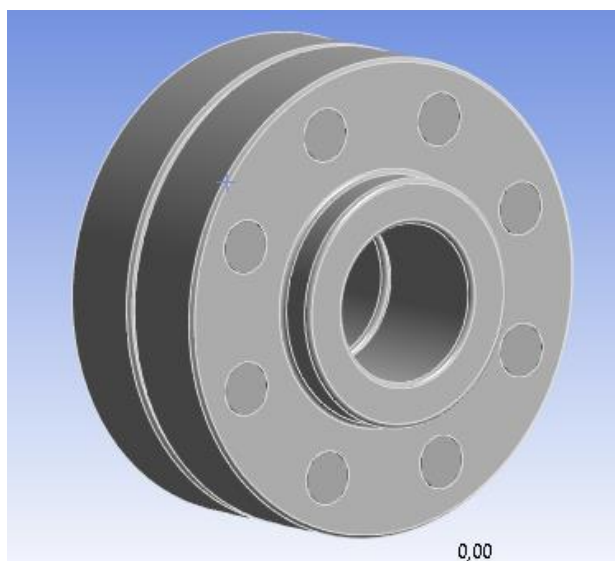


Figura 33: Modelo representado pelo método *Beam Model* (Autores)

A redução no número de elementos se deve a diversos fatores. O primeiro deles está relacionado a quantidade de elementos considerados para simulação. No modelo anterior, além dos flanges e anel de vedação, a junta flangeada foi representada com 8 parafusos, 8 porcas e 16 arruelas, aumentando consideravelmente o número de elementos gerados pela malha. No modelo *beam model*, todos os elementos de fixação podem ser removidos e substituídos por 8 vigas. Vale ressaltar que as vigas consideradas no modelo *beam model* não incrementam o número de nós gerado no Ansys®.

Tendo em vista as vantagens de utilização do modelo *beam model*, foram realizadas simulações comparativas considerando os métodos *beam*

model e solid body, a fim de se obter resultados numéricos que expressassem o benefício da troca de modelo.

Ao comparar o tempo de processamento entre os dois modelos, foi verificado que o método beam model apresentou uma redução de tempo de processamento da simulação de 93% em relação ao método solid body, como pode ser observado na figura 34.

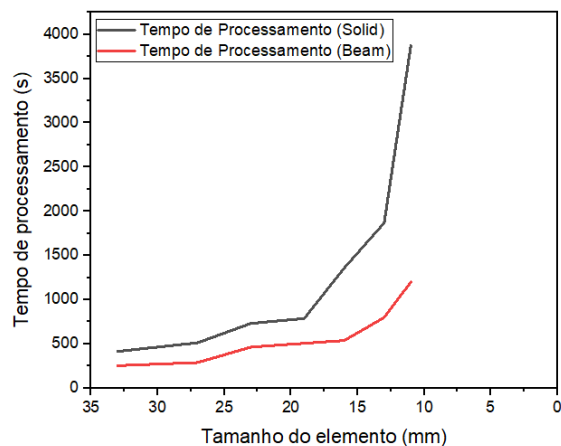


Figura 34: Comparativo de tempo de processamento entre os métodos solid body e beam model (Autores)

Considerando o número de elementos gerados pela malha, foi possível perceber uma redução considerável ao adotar o método beam model, chegando a uma redução de 112% em relação ao método solid body, comportamento exposto na figura 35.

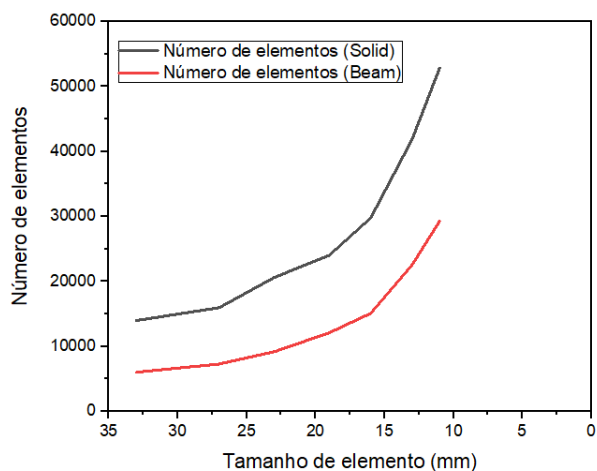


Figura 35: Comparativo de número de elementos entre os métodos solid body e beam model (Autores)

Outro fator que contribui para acelerar a execução do programa é a definição dos contatos. Como os elementos de fixação puderam ser removidos da junta flangeada, os contatos definidos para esses elementos puderam ser suprimidos, diminuindo, dessa forma, o espaço ocupado pelo programa na memória do computador.

É importante frisar que o modelo *beam model* só deve ser usado em casos em que não há necessidade de se estudar os efeitos da aplicação das cargas no parafuso, caso contrário, o método indicado é o *solid body*, onde todos os elementos de fixação são representados.

A viga gerada no modelo *beam model* é capaz de representar o aperto do parafuso, definido pela ferramenta *bolt pretension*, avaliando o efeito da compressão do flange no anel, objeto de estudo do presente trabalho.

Tendo definido os contatos que representariam o efeito dos parafusos, foi preciso estipular os contatos entre o anel de vedação e os flanges que compõem o sistema.

Os contatos do anel de vedação foram classificados como *frictional*, configuração na qual as geometrias em contato podem suportar tensões de cisalhamento até começar a deslizar, gerando, dessa forma, uma tensão de cisalhamento equivalente, em que o deslizamento da geometria começa como uma fração da pressão de contato. Quando a tensão de cisalhamento equivalente é excedida, as duas geometrias deslizam entre si.

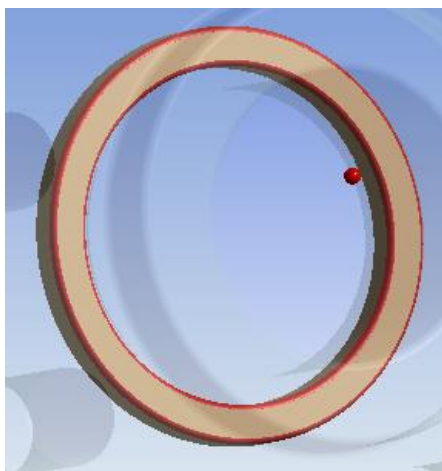


Figura 36: Definição de superfícies do anel em contato com o flange (Autores)

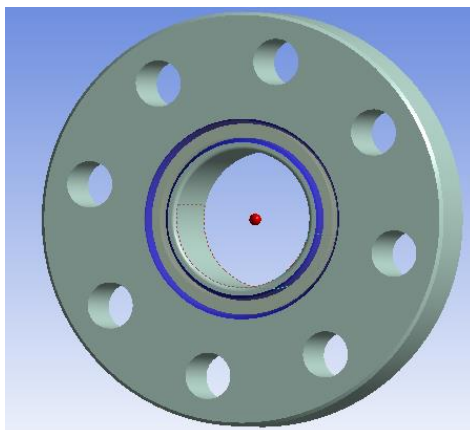


Figura 37: Definição das superfícies de contato entre o flange e o anel (Autores)

O principal contato do anel com o flange ocorre entre as bordas do anel (figura 36, em vermelho) e as paredes laterais do flange (figura 37, azul) e não diretamente nas faces superior e inferior, como em outros tipos de anéis existentes. Por exemplo, o anel ilustrado na figura 38 não possui dobras laterais e o flange não possui rebaixos e ranhuras, responsáveis pelo encaixe do anel.

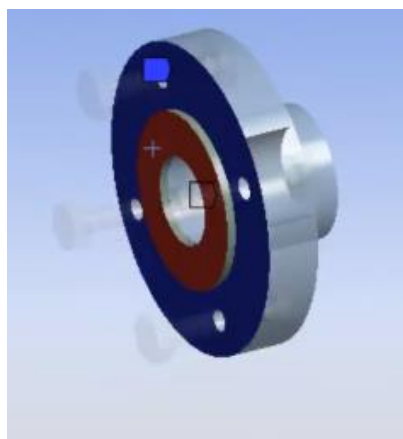


Figura 38: Exemplo de contatos entre os elementos da junta flangeada (Autores)

Tendo os contatos bem definidos, foi preciso entender o comportamento da face do flange ao ser submetido a pressão de aperto exercida pelos parafusos. Como informado anteriormente no presente do texto, a junta flangeada estudada é composta por oito parafusos A193 Gr.B7 de 1" $\frac{3}{4}$ de diâmetro.

Através da norma ASTM 193, foi possível determinar a composição química do material, bem como o limite de escoamento do material do parafuso, informação importante a ser considerada no cálculo de pretensão dos parafusos.

Por definição, a força de pretensão é responsável por gerar pressão de contato entre superfícies que serão unidas por um parafuso. Ela pode ser definida em função do diâmetro do parafuso e da tensão de escoamento do material, podendo ser calculada pela seguinte expressão:

$$Fp = 0,5 f_y \frac{\pi d^2}{4}$$

Em que:

Fp é a força de pré-carga no parafuso (N);

f_y é a tensão de escoamento do material do parafuso (MPa);

d é o diâmetro do parafuso (mm).

Dessa forma, utilizando o valor de tensão de escoamento do material, definida como 720 MPa, pode-se concluir que a força de pretensão para o sistema estudado é de 558,6 kN para cada parafuso que compõe a junta flangeada.

Dessa forma, a carga de aperto encontrada pôde ser inserida em cada um dos elementos de viga que representam os parafusos da junta flangeada, utilizando-se a ferramenta *bolt pretension*.

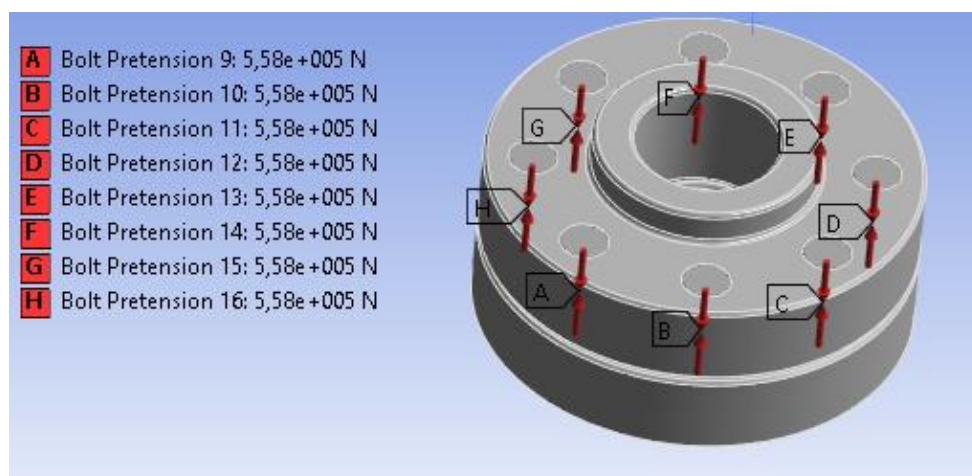


Figura 39: Força de pretensão aplicada (Autores)

Outro ponto importante a ser considerado é pressão de compensação, definida como o controle do fluxo responsável por administrar as mudanças na pressão de carga. Esse parâmetro pode ser calculado por intermédio da fórmula abaixo.

$$P_c = -\frac{P_i}{\left(\frac{D_o}{D_i}\right)^2 - 1}$$

Onde:

P_c é a pressão de compensação (MPa);

P_i é a pressão interna (MPa);

D_o é o diâmetro externo do flange (mm);

D_i é o diâmetro interno do flange (mm).

Aplicando os parâmetros do flange, têm-se que a pressão de compensação inicial tem magnitude de -96,723 MPa.

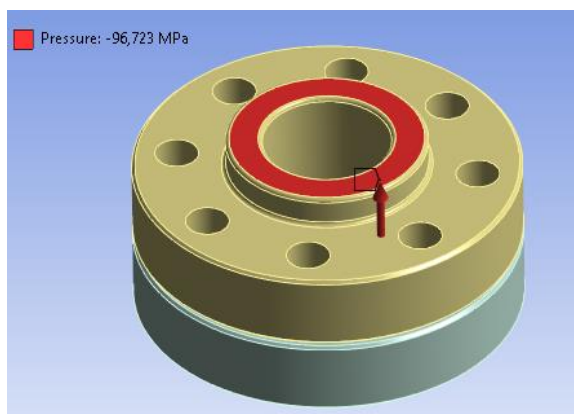


Figura 40: Aplicação da pressão de compensação no flange (Autores)

Além da pressão de compensação definida anteriormente, a pressão interna utilizada no sistema também precisa ser definida dentro do software. Para o caso estudado, a pressão possui magnitude de 20 ksi ou 137,9 MPa.

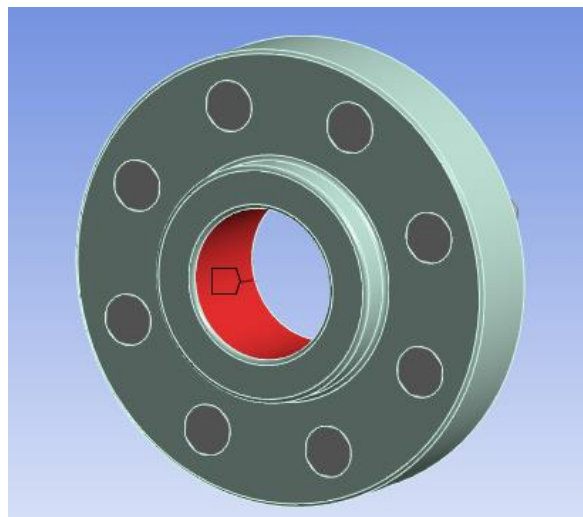


Figura 41 – Pressão interna aplicada no flange (Autores)

A última consideração a ser feita foi a definição do elemento *fixed support*, responsável por restringir os graus de liberdade do corpo selecionado. Sua localização foi definida no flange oposto ao definido para a pressão de compensação, impedindo a movimentação do sistema.

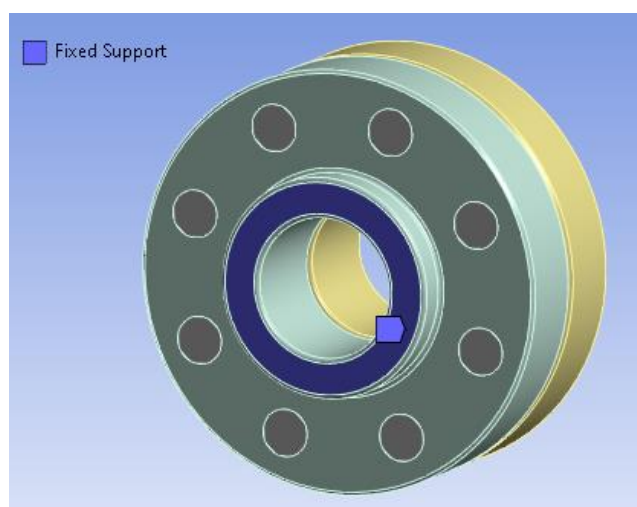


Figura 42: Aplicação de *Fixed Support* no flange (Autores)

5.2 DEFINIÇÃO DA MALHA

Um passo importante para a realização das simulações no Ansys® é a definição da malha, uma vez que esta é responsável por dividir a estrutura do material a ser analisado em vários pequenos pedaços, possibilitando examinar as forças e pressões exercidas de elemento em elemento. Logo, quanto menor

é a malha, mais divisões existem, maior é o número de nós e, conseqüentemente, maior é a precisão. No entanto, o refino da malha exige um alto gasto computacional e tempo de processamento.

Para o caso estudado no presente texto, o foco é entender como as solicitações de projeto afetam o comportamento do anel de vedação. Para se obter uma malha mais refinada sem que ocorra sobrecarga de processamento computacional [29], escolheu-se utilizar no projeto o método *Hex Dominant*. Esse método permitiu isolar um corpo e dividi-lo em elementos hexaédricos.

Esse tipo de método permite uma melhor representação de geometrias tridimensionais complexas e é conhecido por ser mais estável numericamente [30].

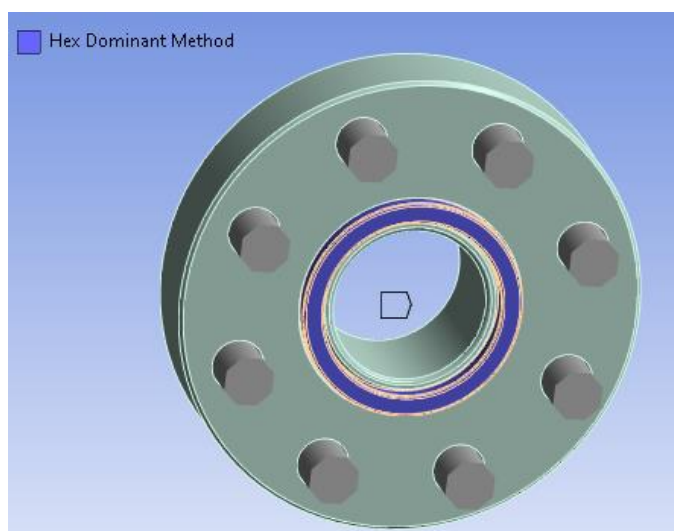


Figura 43: Representação do método *Hex Dominant* no anel (Autores)

Seguindo os estudos de refino de malha no anel de vedação, outro método utilizado foi o *Body Sizing*. Esse método permite isolar um corpo específico de uma estrutura e aplicar um tamanho de malha exclusivo para esse elemento, o que possibilita refinar o tamanho da malha sem prejudicar o desempenho computacional. Para o anel de vedação, o tamanho de elemento escolhido foi 5mm, uma vez que a versão estudantil do Ansys®, utilizada no projeto em questão, não permite tamanho de elementos menor, e baseado no refino de malha realizado, acredita-se que esse tamanho seja suficiente para mostrar bons resultados.

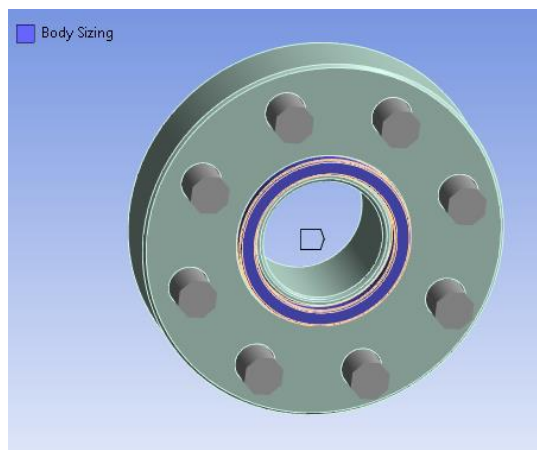


Figura 44: Representação do método *Body Sizing* no anel de vedação (Autores)

O último método de refino de malha aplicado no anel foi o *Edge Sizing*. Esse método possui função parecida com o método *Body Sizing*, porém sua utilização se restringe a arestas. Como citado anteriormente, o principal ponto de contato entre anel de vedação e o flange se dá por meio das arestas do anel, sendo assim, foi necessário o uso de um método que representasse de forma assertiva as solicitações aplicadas nessas arestas.

Vale ressaltar que o método *Edge Sizing* não é definido por tamanho de elemento. Sua aplicação se dá por número de divisões de elementos, responsáveis por controlar a densidade da malha ao longo da aresta selecionada.

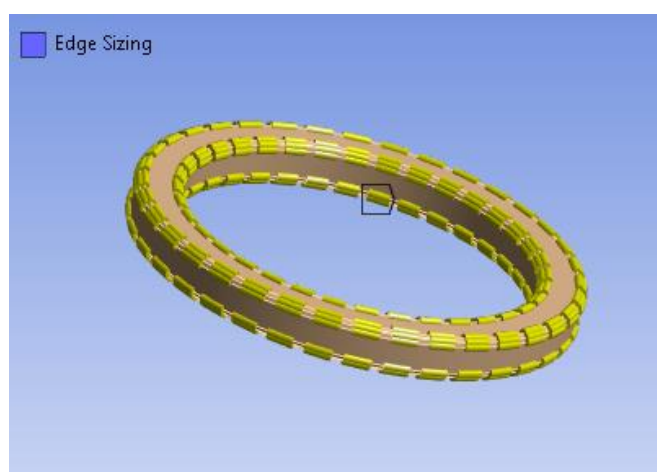


Figura 45: Representação do método *Edge Sizing* no anel de vedação (Autores)

Tendo definidos os métodos a respeito da malha no anel de vedação, foi possível definir o tamanho de elemento para a malha do flange.

Como citado anteriormente, o foco do projeto em questão é a obtenção de resultados precisos para o anel de vedação, sendo assim, o refino da malha aplicada no flange não foi um ponto focal do estudo. Logo, o tamanho de elemento escolhido para a malha do flange foi de 10 mm, representando o dobro do tamanho de elemento escolhido no método *Body Sizing*. O tamanho de elemento citado permitiu que a versão estudantil do Ansys® não bloqueasse a simulação por excesso de número de elementos e facilitou de forma expressiva o funcionamento do software.

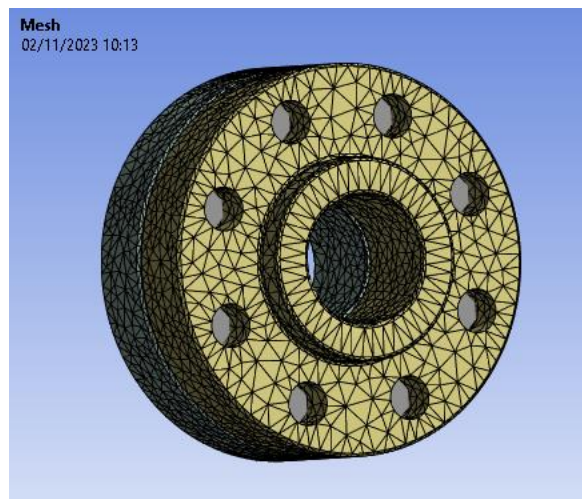


Figura 46: Junta flangeada com malha de 10 mm aplicada (Autores)

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como o principal objetivo do presente trabalho diz respeito a aplicação das solicitações já definidas no anel de vedação, buscou-se analisar através de simulações computacionais o comportamento deste componente confeccionado com materiais diferentes. Dessa forma, foi possível verificar as diferenças nos dados de pressão de contato ao variar a pressão interna e a força de pretensão dos parafusos.

6.1 ANÁLISES NO ANEL DE VEDAÇÃO

O primeiro passo realizado foi a análise da confiabilidade dos valores definidos até o momento, garantindo que a força de pretensão encontrada fosse capaz de gerar os contatos definidos no Ansys®. Para tal, existe uma ferramenta chamada *Contact tool*, cujo objetivo é mostrar, através de um gráfico de gradiente de cores, se o contato gerado entre as superfícies analisadas é suficiente para gerar aderência ou não.

A figura 47 representa a situação inicial de contato do flange, considerando a força de pretensão definida em projeto. Isto pode ser observado na aba de *Status* da ferramenta *Contact tool*.

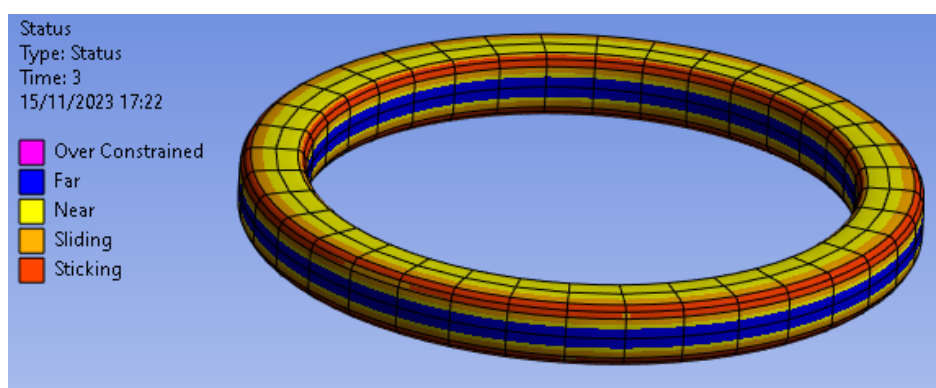


Figura 47: Condição inicial de contato do anel com o flange (Autores)

De acordo com a imagem, é possível notar que a maior parte dos contatos acontece de forma deslizante, uma vez que o tipo de contato definido entre flange e anel é do tipo *frictional*. Isso indica que, conforme a carga de

pretensão é aplicada, há o deslocamento do anel em direção aos rasgos dos flanges, provocando a pressão necessária para que ocorra vedação completa.

Vale ressaltar que o principal ponto de contato do anel com o flange devem ser as bordas externas e internas do anel, uma vez que o fluido de trabalho, em hipótese alguma, deve ultrapassar essas regiões, garantindo a vedação do componente, ou seja, a pressão de contato entre anel e flange precisa ser maior que zero.

Com isso, torna-se fundamental a realização de uma análise comportamental da pressão de contato entre o anel e o flange, considerando pressão interna de 20 ksi e força de pretensão de 558kN. Essa conclusão pode ser observada também utilizando o item *pressure* da ferramenta *contact tool*.

Analisando a figura 48, é possível notar que as bordas mais externas possuem pressão mais elevada quando comparadas as faces internas, indicando que não há vazamento nesses pontos.

Sendo assim, somente existirá vazamento caso a extremidade do anel, que está em contato com a parede do flange, obtiver uma pressão nula ou próxima de zero, evidenciado pela cor azul. Vale ressaltar que a partir do momento que a borda interna do anel não realizar mais contato com o flange, pode-se considerar que o sistema apresentará criticidade e qualquer variação na força de pretensão e pressão interna, assim como qualquer outro fator externo, poderão ocasionar em vazamento de fluido.

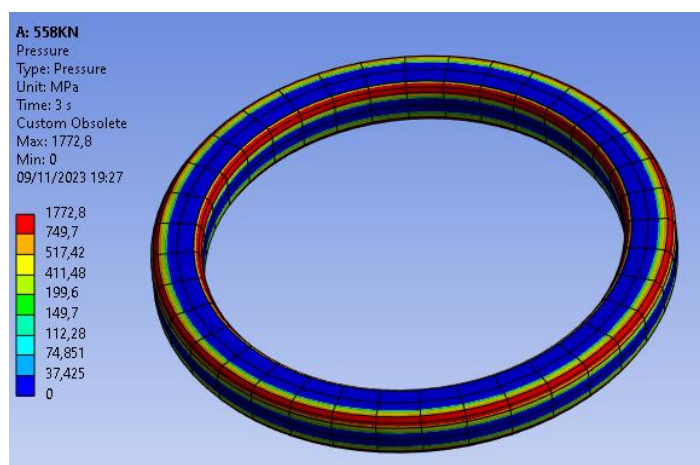


Figura 48: Pressão sofrida pelo anel de vedação de Aço Inox (Autores)

6.2 ANÁLISES NO ANEL DE VEDAÇÃO – AÇO INOX

Como mencionado anteriormente, não foi possível realizar rodadas de simulações na junta flangeada considerando os parafusos e porcas, utilizando uma malha mais refinada, já que a versão estudantil do Ansys® limita o número de elementos no sistema. Sendo assim, todos os resultados foram obtidos considerando o método *Beam Model*, já que este reduz consideravelmente o número de nós e representa de forma assertiva a pressão exercida pelos parafusos e porcas.

6.2.1 Diminuindo a Força de Pretensão

Primeiramente, é importante analisar o comportamento do anel quando submetido a pretensão original de 558 kN e pressão interna de 20 ksi. Logo, na figura 49, pode-se observar que, tanto na parte interna, quanto na externa, as pressões de contato foram elevadas e a distribuição de pressão ocorreu de forma bem uniforme ao longo da superfície do anel, evidenciando que o conjunto está bem fechado, sem possibilidade de ocorrer vazamento.

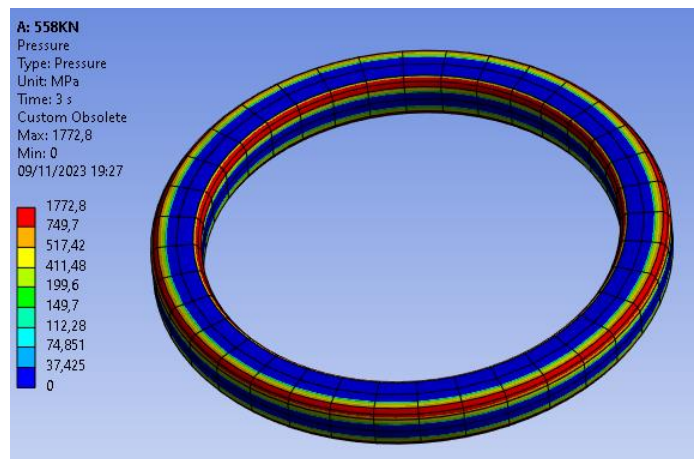


Figura 49: Comportamento do anel com 588 kN de pretensão (Autores)

Para as demais simulações definiu-se uma redução entre 60 e 70 kN, indicando variação de 1/8 da carga inicial.

Tendo isso em vista, a primeira simulação com variação paramétrica considerou uma força de pretensão de 488 kN. Na figura 47, percebe-se que

houve uma diminuição na pressão máxima aplicada no anel, no entanto, pouquíssimo significativa, não havendo alterações na integridade do sistema.

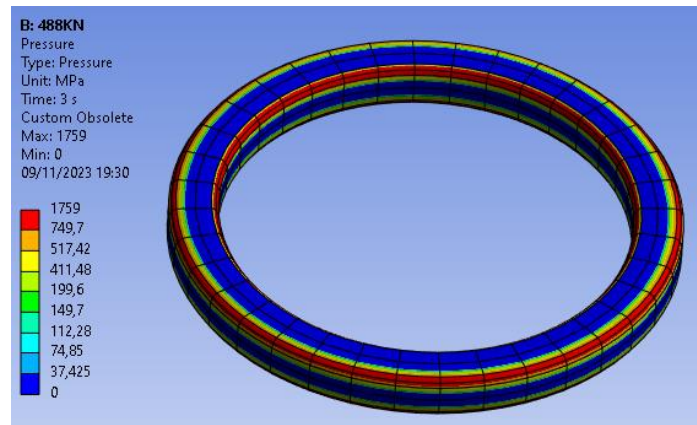


Figura 50: Comportamento do anel com 488 kN de pretensão (Autores)

A segunda redução considerou força de pretensão de 420 kN. É possível notar que a pressão de contato diminuiu, porém sem indicar criticidade para o sistema, já que a pressão nas bordas do anel continuou elevada. Logo, o anel permaneceu sem alterações.

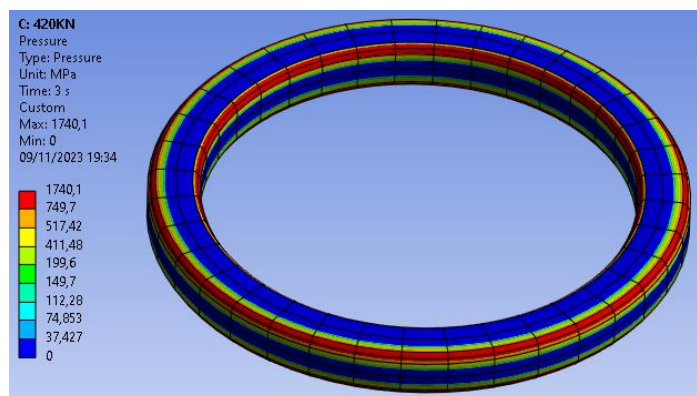


Figura 51: Comportamento do anel com 420 kN de pretensão (Autores)

Seguindo o estudo de comportamento do anel de vedação com a diminuição da força de pretensão, a terceira redução considerou uma força de 350 kN de magnitude. Para a carga em questão, percebeu-se que houve uma redução de cerca de 10% em relação à anterior, sendo possível notar pequenas diminuições nas áreas avermelhadas e aumento de áreas com pressões mais

baixas, porém sem grandes alterações na integridade do sistema, conforme observado na figura 52.

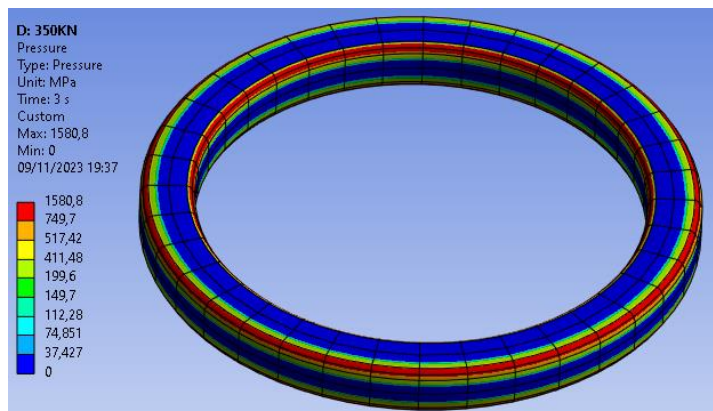


Figura 52: Comportamento do anel com 350 kN de pretensão (Autores)

Seguindo o padrão estabelecido, o comportamento do anel de vedação foi analisado considerando uma pretensão de 280 kN. Neste ponto, fica evidente que as pressões estão diminuindo com maiores decréscimos, já que além redução de mais de 20% da pressão de contato, observou-se um crescimento acentuado das áreas azuis e verdes, bem como a diminuição das áreas em vermelho.

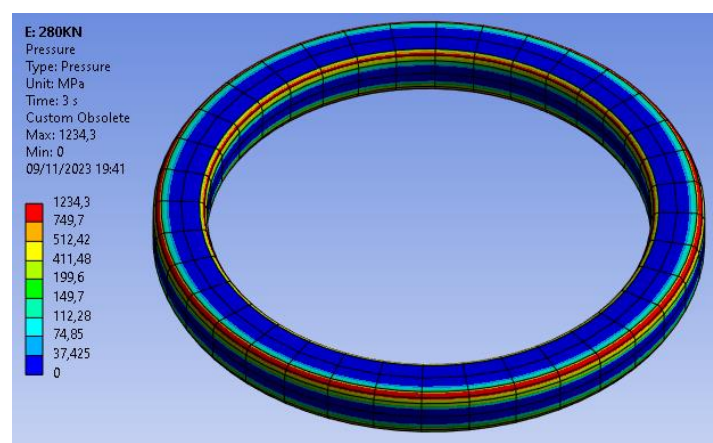


Figura 53: Comportamento do anel com 280 kN de pretensão (Autores)

O comportamento do anel na simulação considerando pretensão de 220 kN indicou que a pressão interna, juntamente com a perda da carga dos parafusos, provocou no conjunto uma tendência ao descolamento dos seus

componentes, ocasionando o aumento das áreas com pressões mais baixas. Esse tipo de comportamento indica que o vazamento do sistema está se aproximando, como pode ser notado na figura 54.

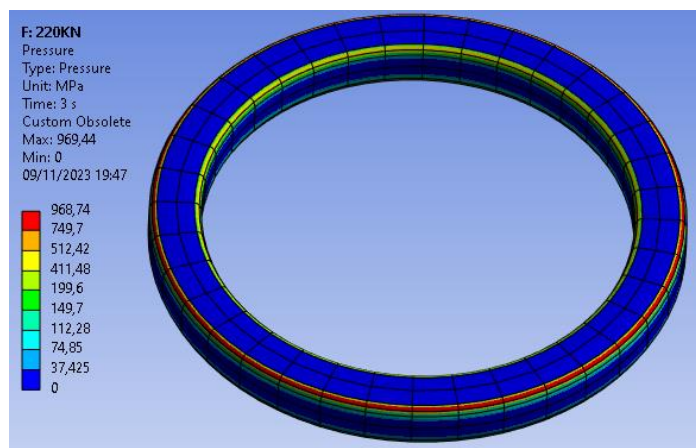


Figura 54: Comportamento do anel com 220 kN de pretensão (Autores)

Como a tendência indica que com a perda de carga dos parafusos, a pressão interna passe a separar ainda mais os componentes, decidiu-se executar reduções com variações menores de magnitude, quando comparadas as anteriores, com o objetivo de acompanhar de forma detalhada o decréscimo de pressão, que tende a ser maior.

Assim, a carga seguinte considerada foi a de 185 kN e, como se esperava, mesmo com uma diferenciação de carga menor, a pressão decaiu de forma significativa. É possível notar que a pressão em todo o anel diminuiu consideravelmente, bem como as demais áreas de pressões intermediárias, passando a ter um predomínio da área azulada, indicando não haver contato com as paredes do flange. Nessa área azulada, a pressão de contato é nula.

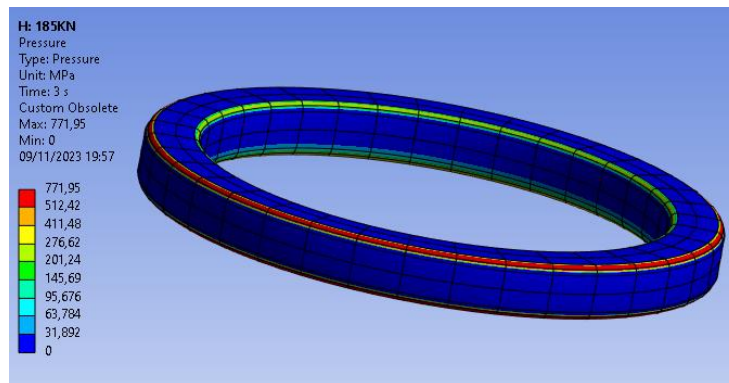


Figura 55: Comportamento do anel com 185 kN de pretensão (Autores)

Seguindo a análise, a carga seguinte considerada foi de 150 kN. Neste ponto, é possível observar que a área da borda interna do anel, que antes estava em contato com o flange, não possui mais pressão de contato, uma vez que somente parte da borda externa do anel ainda está tocando o flange, tornando o sistema consideravelmente crítico a partir desse momento. Esse comportamento indica que qualquer aumento de pressão interna, bem como uma leve diminuição da carga de pretensão ou algum motivo externo ao conjunto, possa levar ao vazamento da junta flangeada ou a explosão do sistema, devido à pressão interna vencer a carga aplicada.

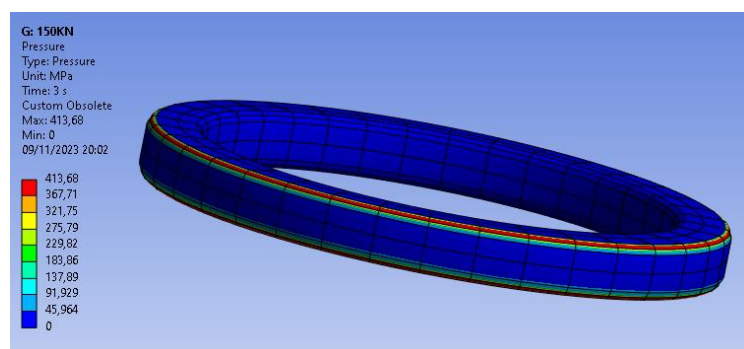


Figura 56: Comportamento do anel com 150 kN de pretensão (Autores)

Visando encontrar o limiar de vazamento, ou seja, momento aproximado onde ocorre a plena separação entre anel e flanges, reduziu-se a carga para 115kN. Como evidenciado pela figura 57, a magnitude da pressão interna acabou por separar os elementos. Com isso é possível perceber que o conjunto suporta uma grande diminuição das cargas sem sofrer grandes alterações,

provavelmente por conta do seu alto coeficiente de segurança, já que, como mencionado anteriormente, esse componente é extremamente importante nas instalações hidráulicas dos mais diversos setores.

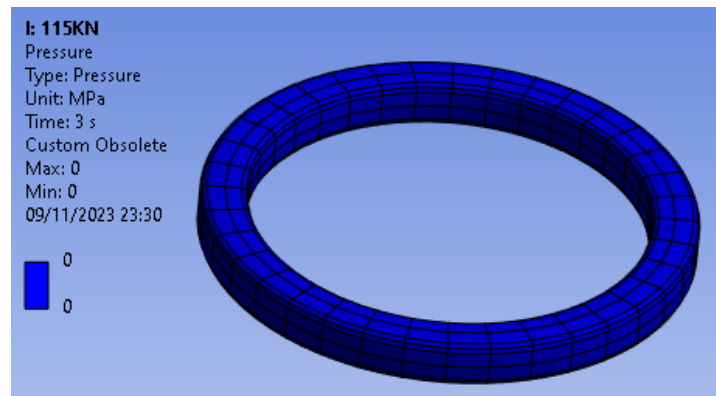


Figura 57: Comportamento do anel com 115 kN de pretensão (Autores)

Conforme esperado, a diminuição constante da força de pretensão na junta flangeada provocou uma queda acentuada da pressão entre anel e flanges, indicando que haverá vazamento no sistema com a diminuição da magnitude dos parâmetros. A variação da pressão de contato em relação a força de pretensão pode ser observada na figura 58.

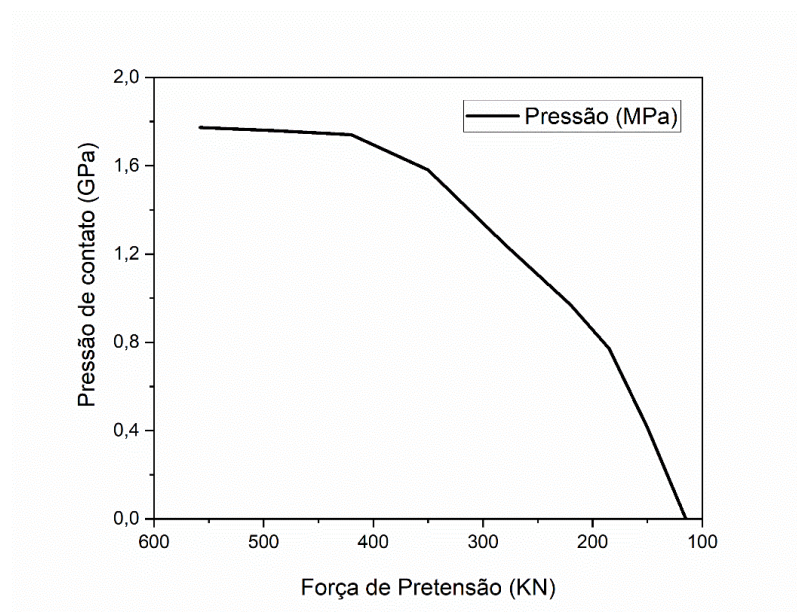


Figura 58: Variação da pressão de contato em relação a força de pretensão (Autores)

6.2.2 Aumentando a Pressão Interna

Seguindo as análises de variação paramétrica, o próximo item a ser estudado é a pressão interna. Acredita-se que o comportamento do anel de vedação seja parecido com as análises obtidas para variação da carga de pretensão, uma vez que, o aumento da pressão interna tende a tornar este parâmetro mais intenso que a carga de pretensão, provocando a separação do sistema.

Vale ressaltar que o comportamento da pressão de contato considerando pressão interna de 20 ksi pode ser observado na figura 48, não sendo necessário reinserir a imagem.

Com relação ao aumento de pressão, buscou-se aumentar 100 ksi em cada rodada, isso porque, em instalações hidráulicas, podem ocorrer grandes variações de pressão, chegando a valores superiores a 4 vezes ou mais a pressão indicada para uso.

Assim, o primeiro aumento de pressão interna considerado foi de 30 ksi de magnitude. Na figura 59, percebe-se que a diminuição da pressão de contato foi pequena, mesmo com um aumento significativo da pressão interna.

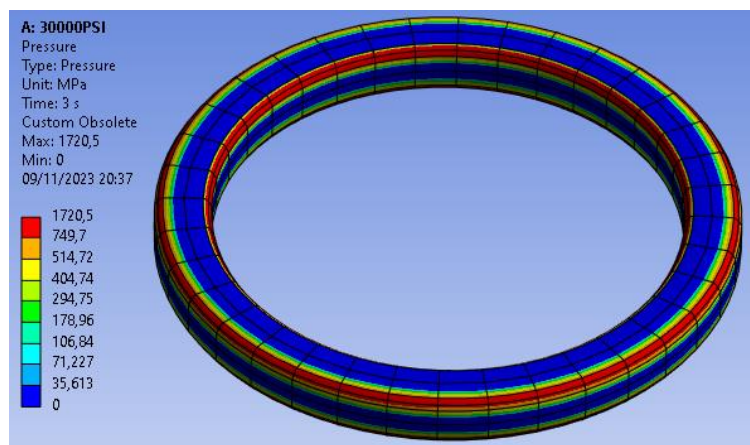


Figura 59: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 30 ksi (Autores)

A segunda variação de pressão interna aplicada para o sistema considerou magnitude de 40 ksi. Para a carga em questão, percebeu-se comportamento similar a primeira redução e, conforme observado na figura 60, as pressões de contato continuam elevadas.

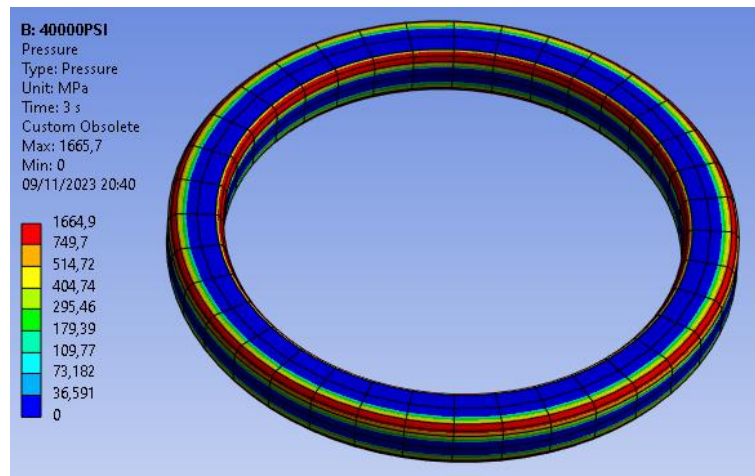


Figura 60: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 40 ksi (Autores)

Seguindo com as análises de variação da pressão interna, o terceiro aumento considerou uma carga com magnitude de 50 ksi. Observando os resultados da simulação, o único ponto de mudança perceptível foi a leve redução na pressão de contato.

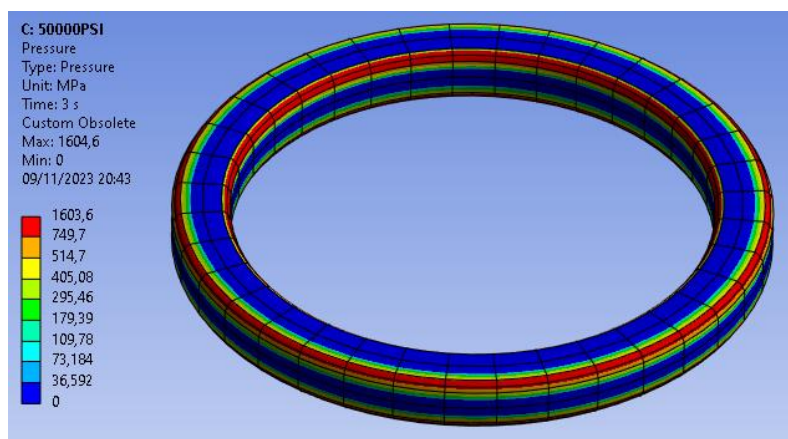


Figura 61: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 50 ksi (Autores)

Prosseguindo, agora com 60 ksi, foi possível perceber que além de uma redução acentuada da pressão no anel, houve também uma diminuição da área vermelha e crescimento da área em azul claro. Esse comportamento indica que a pressão de contato nas bordas do anel está diminuindo consideravelmente.

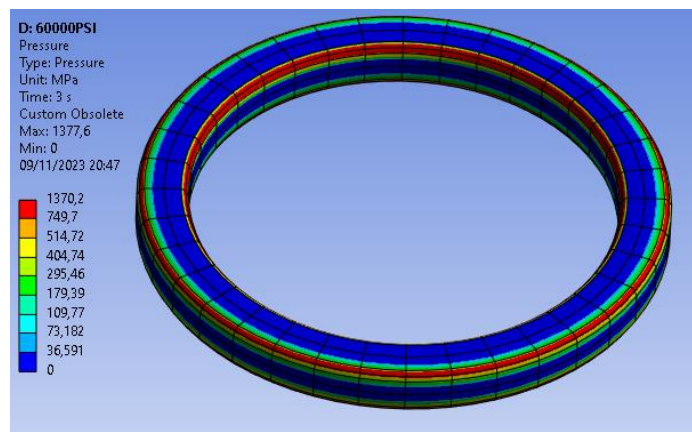


Figura 62: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 60 ksi (Autores)

Adiante, na análise de 70 ksi, pôde-se observar um aumento da área em azul escuro, principalmente em direção a borda externa. Na parte mais interna, houve diminuição acentuada da área avermelhada, comportamento similar com o ocorrido nas simulações de diminuição da carga de pretensão.

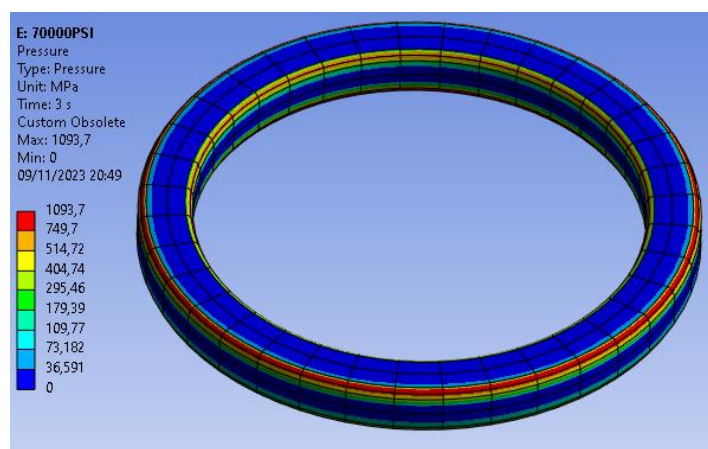


Figura 63: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 70 ksi (Autores)

Aumentando a pressão interna para 80 ksi, nota-se que a área em vermelho praticamente deixou de aparecer, indicando que o limiar de vazamento se aproxima.

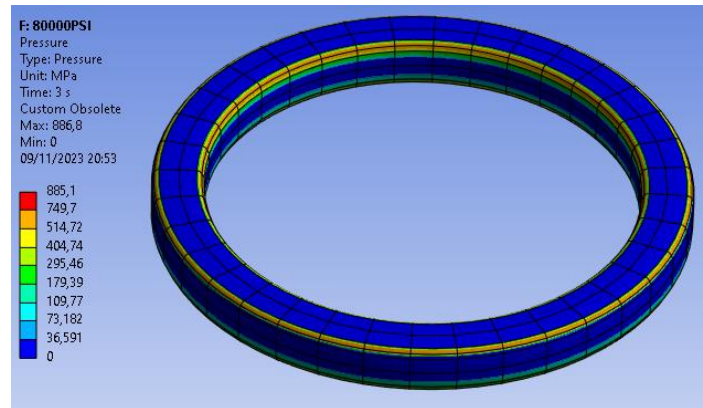


Figura 64: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 80 ksi (Autores)

Como a pressão de contato já estava em um nível menor, decidiu-se diminuir o intervalo de variação da pressão interna, a fim de se acompanhar de forma detalhada o decréscimo da pressão de contato. A figura 65 representa a pressão de contato considerando pressão interna de 85 ksi. Nota-se que a área azulada continuou a aumentar, indicando um decréscimo significativo na pressão de contato.

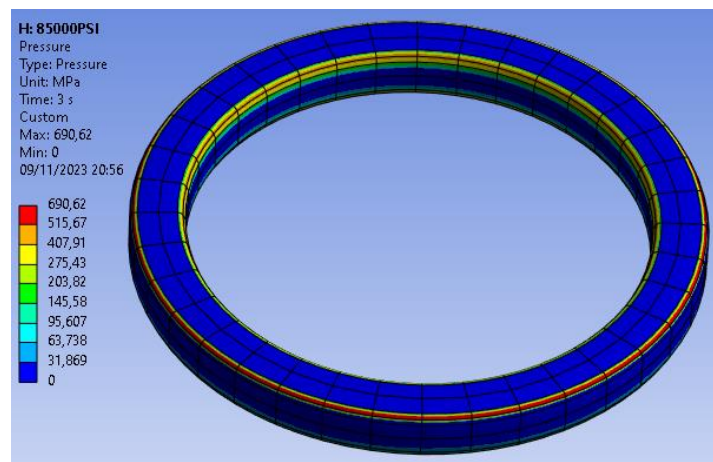


Figura 65: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 85 ksi (Autores)

Considerando pressão interna de 90 ksi, foi possível notar que a borda interior inferior não estabeleceu nenhum contato com o flange e a borda superior teve área predominantemente preenchida em azul bem claro, indicando que o contato com o flange está cessando. Sendo assim, é possível concluir que o

sistema está com confiabilidade crítica, pois qualquer mudança de parâmetro pode ser prejudicial ao conjunto, levando ao vazamento.

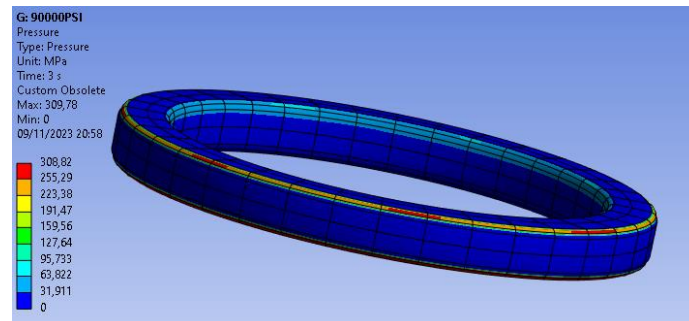


Figura 66: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 90 ksi (Autores)

Por fim, com 100 ksi de pressão interna, ocorreu a separação dos elementos. Com isso, fica evidente que a pressão máxima que o conjunto pode suportar chega a ser maior que 4 vezes a pressão interna inicial, uma vez que o rompimento ocorreu entre 90 e 100 ksi.

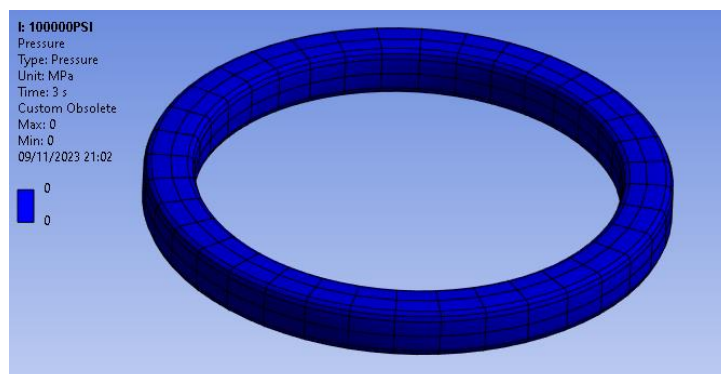


Figura 67: Comportamento do anel submetido a pressão interna de 100 ksi (Autores)

Assim como mostrado no item anterior, onde a pressão de contato diminuiu consideravelmente com a queda da força de pretensão, a pressão de contato também diminuiu consideravelmente com o aumento da pressão interna.

O comportamento de separação entre anel de vedação e flanges pode ser observado na figura 68, onde a variação de pressão de contato por pressão interna é representada graficamente.

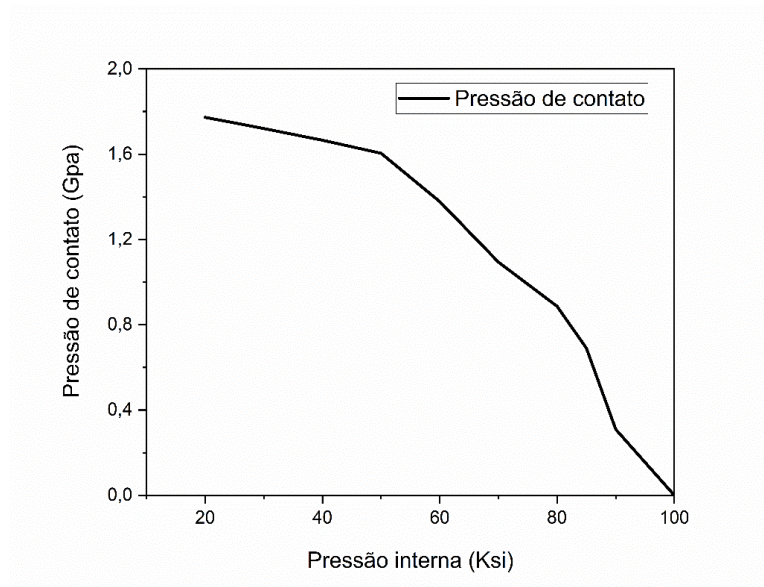


Figura 68: Variação da pressão de contato em relação a pressão interna (Autores)

6.3 ANÁLISE DA LIGA NITINOL

Até o presente momento, todas as simulações realizadas ao longo do trabalho consideraram o aço inoxidável API 304 como material do anel de vedação. De acordo com os dados obtidos ao longo dos experimentos, para uma pressão interna de 20 ksi e pretensão de parafusos equivalente a 556 kN, o aço inoxidável ultrapassa sua zona de escoamento, alcançando facilmente seu limite plástico.

Como citado anteriormente, o limite de escoamento do aço inoxidável API 304 é de 205 MPa [25]. De acordo com os dados obtidos durante o texto, a tensão máxima exercida sobre o anel pode chegar a 715 MPa, sendo possível concluir que o anel de aço inoxidável atinge seu estado plástico durante o aperto do sistema.

Ao atingir seu limite plástico, o anel de vedação não pode ser reutilizado, uma vez que, já deformado, o anel perderá suas propriedades de vedação. Dentro desse contexto, as ligas com memória de forma surgem como uma grande oportunidade visando o uso a longo prazo.

Por conta da sua capacidade superelástica, as ligas com memória de forma possuem capacidade de alcançar tensões elevadas sem atingir o seu limite plástico e ainda assim, voltar a seu estado original. Logo, o objetivo do

presente projeto é estudar o comportamento do Nitinol recebendo as mesmas solicitações do aço inoxidável API 304 e com isso, poder estudar a sua viabilidade como material para o anel de vedação do sistema apresentado anteriormente.

6.3.1 Estudo da Liga Nitinol no Ansys

Para estudar o efeito do uso do Nitinol como material do anel de vedação, fez-se necessário a configuração correta do Ansys a fim de parametrizar o material com suas devidas características. O modelo de plasticidade escolhido para simular o efeito superelástico foi o do Auricchio [34]. Este modelo de plasticidade tem como característica a descrição do material em duas fases distintas.

Na primeira fase, o material se deforma elasticamente até atingir um ponto de transição onde passará a ter comportamento plástico. Esse ponto de transição é conhecido como limite de escoamento e, a partir desse ponto, o material atinge a segunda fase do modelo.

Os materiais superelásticos podem apresentar grandes deformações e voltar para seu estado original por conta de uma característica microestrutural muito particular. Com o aumento da tensão, o material superelástico apresenta duas estruturas cristalográficas, uma caracterizada pela austenita e outra caracterizada pela martensita.

Inicialmente, os materiais superelásticos possuem uma estrutura cristalográfica austenítica, caracterizada por ser uma microestrutura mais ordenada. Ao ser submetido a uma tensão inicial, o material superelástico inicia uma transformação de fase, de austenita para martensita. A tensão necessária para ativar essa transformação de é definida por σ_s^{AS} .

Durante essa transformação, a deformação sofrida pelo material é considerável, porém, graficamente, é possível observar que a variação de tensão é pequena.

A transformação de fase termina quando o material alcança a tensão σ_f^{AS} , definida como a tensão final da transformação de fase austenita-martensita.

Ao chegar nesse ponto, o material assume a fase martensítica, caracterizada por ter uma estrutura cristalográfica menos ordenada.

Ao atingir a fase martensítica, o material passa a se deformar menos com o aumento de tensão, podendo alcançar elevadas tensões sem que atinja seu limite plástico.

Com o alívio da tensão aplicada, o material superelástico inicia uma segunda transformação de fase, dessa vez de martensita para austenita. A tensão necessária para iniciar a transformação citada é definida por σ_s^{SA} . Ao chegar nesse ponto, a variação de tensão do material diminui consideravelmente e ao mesmo tempo, observa-se uma deformação reversa no material, com movimento de volta ao seu estado original. Ao alcançar o ponto σ_f^{SA} , definido como a tensão final da transformação martensita-austenita, o material finalmente volta ao seu estado original.

Esse ciclo de transformação executado pelo material é conhecido graficamente como loop de histerese.

As transformações de fases citadas podem ser observadas na figura 66, onde é possível observar o gráfico tensão-deformação de um material superelástico e a ocorrência do loop de histerese, definido pela cor azul.

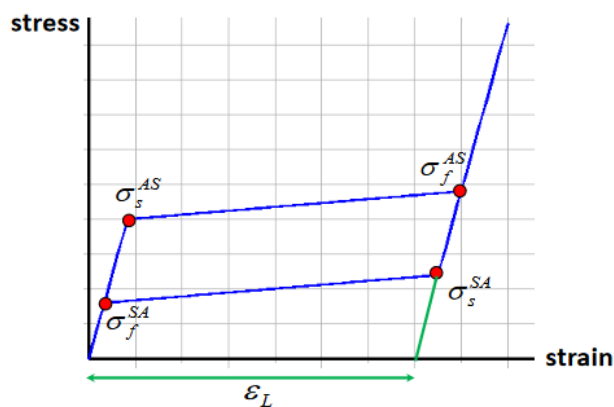


Figura 69: Gráfico tensão x deformação característico de uma liga superelástica (Ansys, Inc.)

O parâmetro ε_L é definido como a tensão residual máxima sofrida pelo material durante as transformações de fase austenita-martensita e martensita-austenita.

Um sexto parâmetro não representado no gráfico tensão-deformação estuda a diferença de resposta do material quando submetido a tensões de tração e compressão. Esse parâmetro é definido por α , tendo seu valor variando entre 0 e 1. Quanto mais próximo de zero for o valor de α , mais uniforme será o comportamento do gráfico em tensão e compressão.

Através de um ensaio de tração, realizado pelo professor orientador, foi possível encontrar a curva tensão deformação do Nitinol, representada pela figura 70.

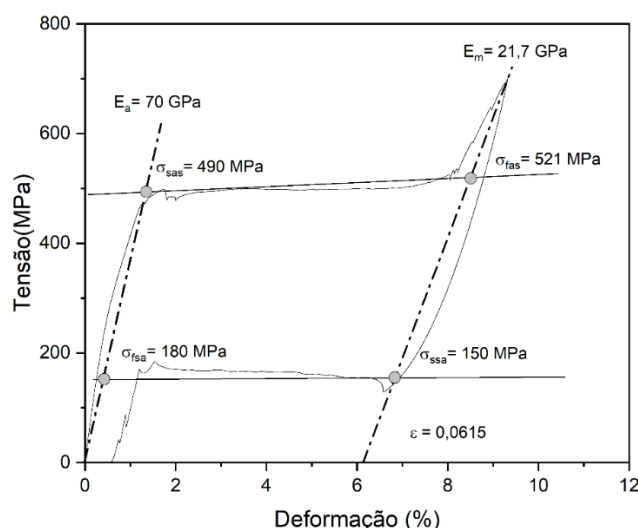


Figura 70: Gráfico tensão x deformação da liga Nitinol (Autores)

No gráfico mostrado, é possível observar o valor de todas as tensões apresentadas ao longo do presente texto. Vale ressaltar que o parâmetro E_a representa o módulo elástico da fase austenítica do material e o parâmetro E_m representa o módulo elástico da fase martensítica do material.

Esses valores foram transferidos para o Ansys na ferramenta parâmetros do material e proporcionaram ao software a capacidade de simular o comportamento exato do Nitinol no sistema estudado.

16	 Superelasticity			<input type="checkbox"/>
17	Sigma SAS	490	MPa	▼
18	Sigma FAS	521	MPa	▼
19	Sigma SSA	180	MPa	▼
20	Sigma FSA	150	MPa	▼
21	Epsilon	0,0615	m m ⁻¹	▼
22	Alpha	0		

Figura 71: Propriedades do material superelástico no Ansys (Autores)

Com relação ao valor de *Alpha*, parâmetro que mede a diferença entre as respostas do material a tensão em compressão, foi considerado como 0, pois não se possui a relação para esse material.

Além dos parâmetros já citados anteriormente, é importante definir a tensão de escoamento e tensão de ruptura do Nitinol, já que esses fatores influenciam diretamente no comportamento do material no sistema estudado. Para obter os parâmetros citados, foi realizado pelo professor orientador um ensaio de tração até a ruptura do corpo de prova, representado pela figura 72.

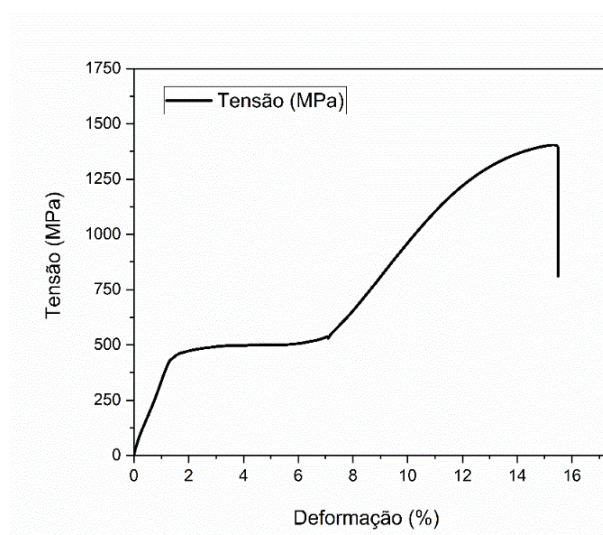


Figura 72: Curva tensão x deformação até a ruptura (Autores)

Através do gráfico acima, é possível perceber que o corpo de prova atinge o escoamento no ponto onde a tensão aproximada é de 1000 MPa, enquanto sua ruptura ocorreu no ponto que representa a tensão equivalente de 1400 MPa.

 Tensile Yield Strength	1000	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
 Tensile Ultimate Strength	1400	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 73: Informação de tensões do Ansys® (Autores)

Os valores citados acima foram inseridos no Ansys® para a análise do comportamento do anel, porém, algumas considerações precisam ser feitas acerca do comportamento das solicitações de projeto.

De acordo com Benchle e Kyriakides [31], a curva tensão-deformação do Nitinol sofrerá variações a depender do tipo de tensão aplicado ao corpo de prova. Caso o material seja submetido a solicitações compressivas, o comportamento da curva será diferente do apresentado nas figuras 67 e 69. Através de um ensaio de flexão, utilizando um tubo de Nitinol de paredes finas, Benchle e Kyriakides estudaram o comportamento da curva tensão-deformação considerando os dois tipos de solicitações.

Na figura 74, é possível observar o comportamento da curva quando o material é tracionado em temperatura ambiente, 23°C. Percebe-se que para as condições citadas, o corpo de prova foi carregado até a tensão de 527 MPa. A tensão de transformação austenita-martensita, σ_s^{AS} , é definida por 381 MPa. Ao descarregar o corpo de prova, a tensão diminui até 119 MPa, dando início a transformação martensita-austenita, caracterizada por σ_s^{SA} . A deformação máxima observada no teste foi de 7,5%.

E analisando o gráfico representado na figura 75, é possível observar que os resultados para solicitações compressivas em temperatura ambiente são diferentes. Percebe-se que o material suportou uma tensão mais elevada sem que houvesse a ruptura, atingindo aproximadamente 700 MPa. A tensão de transformação austenita-martensita, σ_s^{AS} , pode ser observada na faixa de 600 MPa e a transformação martensita-austenita, σ_s^{SA} , tem início em 440 MPa.

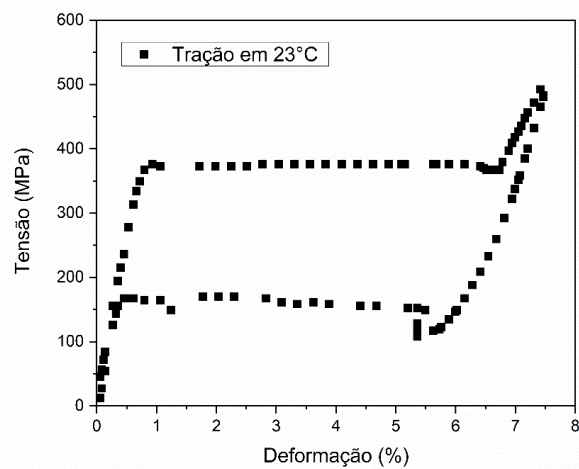


Figura 74: Curva tensão x deformação para tração a 23°C (Kyriakides, 2014)

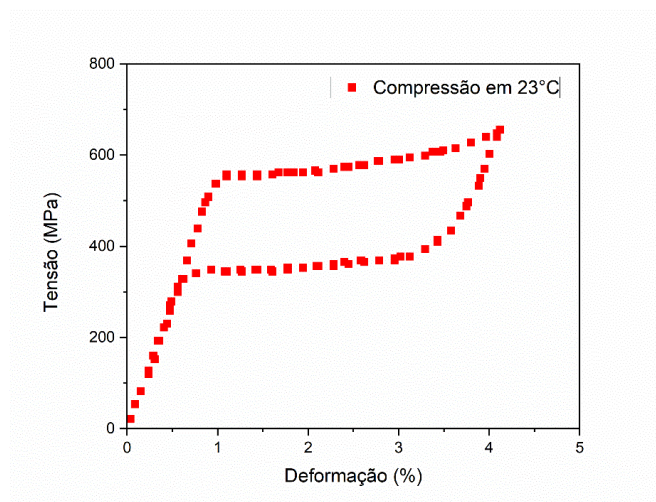


Figura 75: Curva tensão-deformação para compressão a 23°C (Kyriakides, 2014)

O comparativo acima mostra que os resultados obtidos influenciam diretamente no exemplo estudado no presente texto, uma vez que os flanges que compõem o sistema comprimem o anel de vedação, sendo necessário considerar este efeito para os resultados que serão expostos no próximo item.

Outro fator que influencia o comportamento da curva tensão-deformação em ligas com memória de forma é a temperatura de trabalho. De acordo com Benchie e Kyriakides, as tensões de transformação e tensões de escoamento e

ruptura de uma liga LMF variam consideravelmente com o aumento de temperatura.

Na figura 76, é possível observar o comportamento da curva tensão-deformação em compressão considerando temperatura de 43°C.

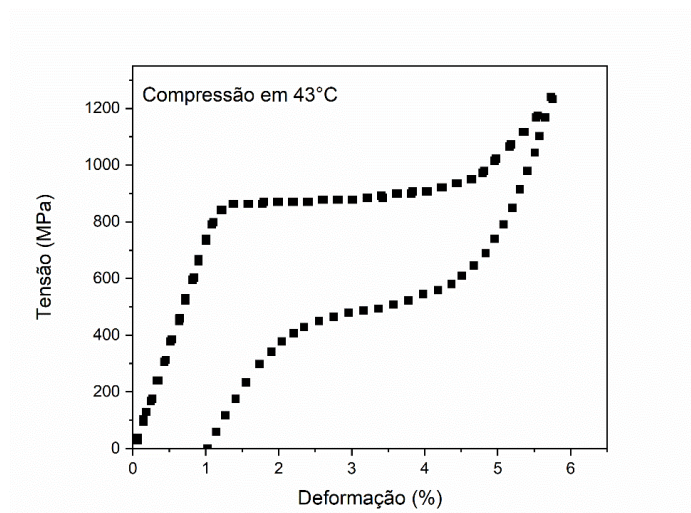


Figura 76: Curva tensão x deformação para compressão a 43°C (Kyriakides, 2014)

Ao comparar os resultados com a figura 75, é possível notar que a tensão máxima exercida sobre o material aumentou consideravelmente, chegando à magnitude de, aproximadamente, 1200 MPa. Esse comportamento demonstra que o aumento de temperatura de trabalho influenciará diretamente na tensão de escoamento e tensão de ruptura do material.

A influência da compressão e temperatura devem ser consideradas na análise dos resultados do presente trabalho, uma vez que, devido a condições de limitação laboratorial, não foi possível realizar ensaio de compressão com controle de temperatura para o Nitinol. Diferente do ensaio de tração, que pode ser realizado com um fio do material estudado, o ensaio de compressão exigiria corpo de prova em formato de tubo, dificultando a execução do ensaio.

Vale ressaltar que a temperatura de operação para sistemas como o estudado no presente texto podem chegar a 80°C, como visto em tubulações offshore de extração de petróleo [32].

6.3.2 Diminuindo a Força de Pretensão

Partindo para as análises considerando o Nitinol como material do anel de vedação, foram realizadas rodadas de simulação com as mesmas forças de pretensão utilizadas para o aço inox. O objetivo da análise paramétrica foi comparar os resultados entre os dois materiais e buscar entender como o Nitinol se comporta recebendo tais solicitações.

Espera-se que a análise comparativa entre os dois materiais tenha resultados relativamente parecidos, principalmente na rodada de 588 kN de força de pretensão com 20 ksi de pressão interna, condições iniciais de funcionamento da junta flangeada estudada.

É de extrema importância saber a máxima pressão de contato que o anel sofrerá, uma vez que esta indicará se o elemento irá se deformar plasticamente ou não.

Diante da figura 77, nota-se que a distribuição de pressão no anel de Nitinol segue comportamento similar à distribuição no anel de aço inox, porém a pressão máxima de contato aumentou em mais de 26%.

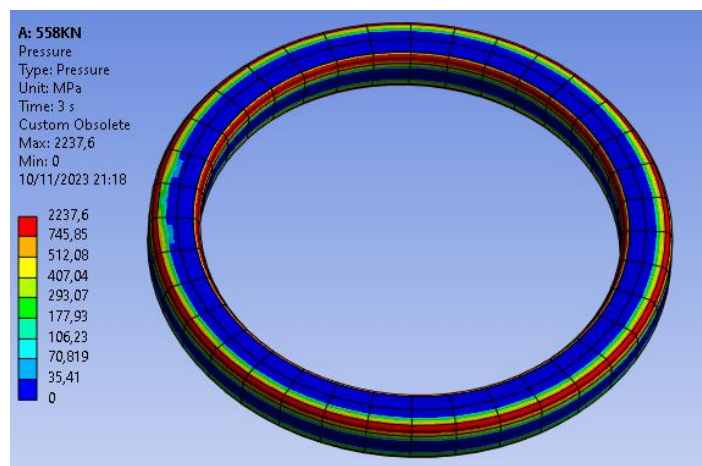


Figura 77: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 588 kN (Autores)

Na figura 78, considerando pretensão de 488 kN, pôde-se perceber que a redução da pressão de contato manteve-se praticamente inalterada, sem indicar mudanças perceptíveis de distribuição de pressão.

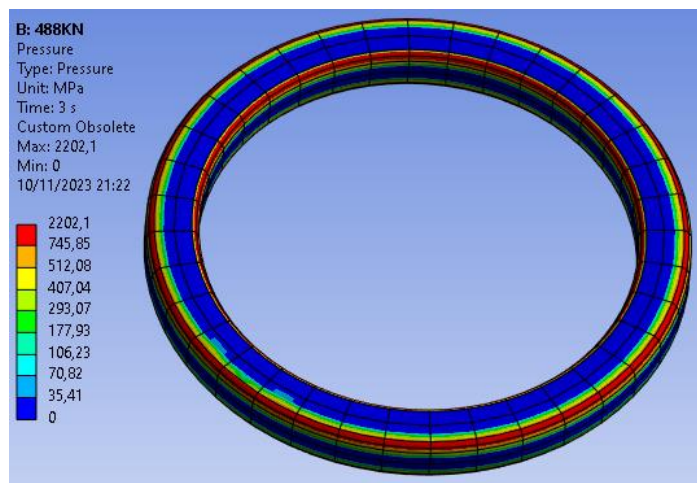


Figura 78: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 488 kN (Autores)

Considerando 420 kN, a única mudança notável foi relacionada a pressão de compressão do anel, sendo possível observar um pequeno decréscimo em sua magnitude máxima. Percebeu-se que a distribuição de pressão seguiu comportamento similar às duas outras simulações realizadas

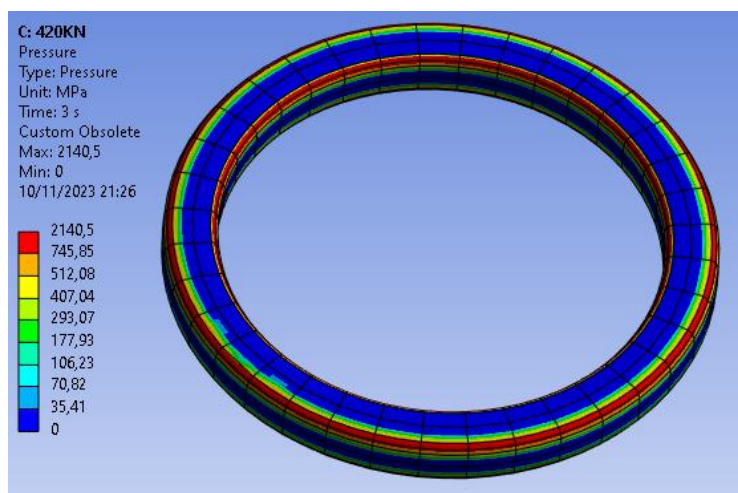


Figura 79: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 420 kN (Autores)

Seguindo com as análises de variação paramétrica, considerando pretensão com magnitude de 350 kN, foi possível observar a primeira redução acentuada na pressão máxima e uma leve mudança de comportamento relacionado a distribuição de pressão ao longo da área do anel.

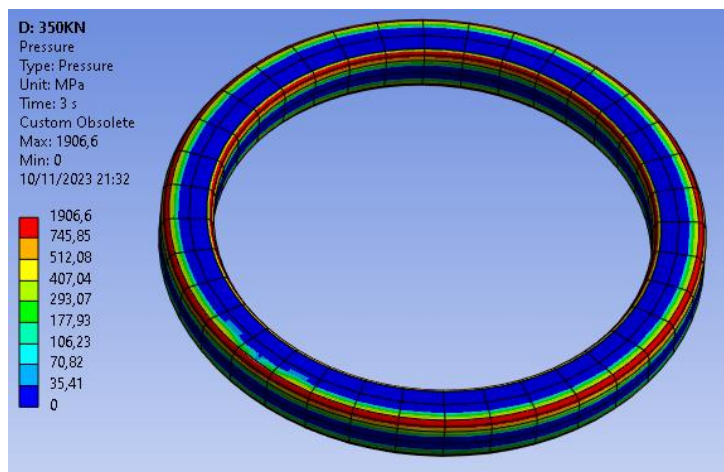


Figura 80: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 350 kN (Autores)

Com a força de pretensão em 280 kN, verificou-se uma redução ainda mais significativa de pressão de contato, junto a uma redução bem perceptível da área avermelhada. Foi possível ver que a área em azul claro cresceu na borda externa do anel, indicando comportamento mais propício ao vazamento, mas sem comprometer a integridade do sistema.

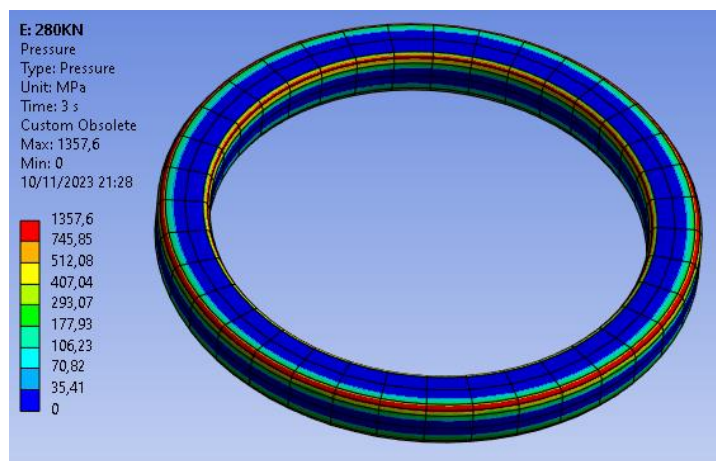


Figura 81: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 280 kN (Autores)

Utilizando pretensão de 220 kN, a área azulada se tornou ainda mais predominante ao longo do anel, observando-se contato apenas nas bordas externas e internas. A pressão máxima de contato apresentou grande decréscimo em comparação à simulação anterior. Esse comportamento indica que o sistema está se aproximando do vazamento.

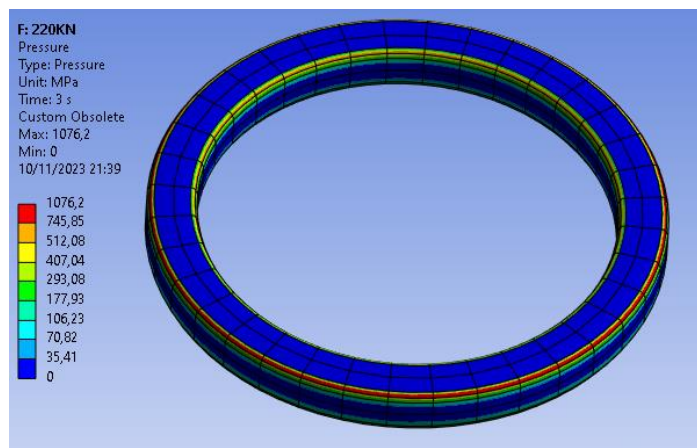


Figura 82: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 220 kN (Autores)

Levando em consideração o comportamento apresentado pelo anel na simulação anterior, decidiu-se diminuir o intervalo de pretensão considerado até o momento. Dessa forma, foi possível verificar com maior precisão o intervalo de força de pretensão que representará o vazamento completo do sistema, além de seguir o mesmo parâmetro utilizado nas análises de Aço Inox.

Considerando pretensão de 185 kN de magnitude, percebeu-se que a pressão pouco decaiu em relação ao resultado encontrado anteriormente. A principal mudança foi na alteração de distribuição de pressão. A área avermelhada passou a ficar mais alaranjada, indicado uma redução acentuada nas pressões de contato, conforme visualização na figura 83.

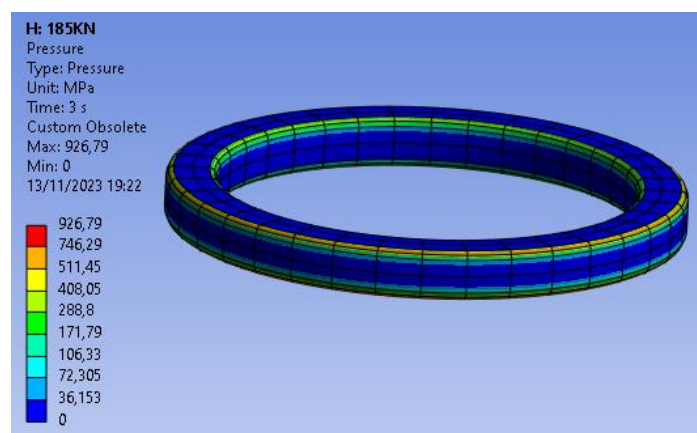


Figura 83: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 185 kN (Autores)

Na simulação considerando 150 kN de carga, pôde-se notar que o sistema alcançou seu ponto crítico. Seguindo comportamento parecido às simulações de aço inox, foi possível perceber que uma das bordas internas já não possuía contato com o flange, indicando vazamento completo do sistema.

A diferença entre os materiais estudados se deu na distribuição de pressão. Considerando o Nitinol, a pressão de contato não foi nula nas bordas internas superior e inferior, apesar das magnitudes serem bem próximas nos dois modelos. Com isso, nota-se um comportamento diferente para o anel de Nitinol, relacionada, provavelmente, às suas propriedades elásticas.

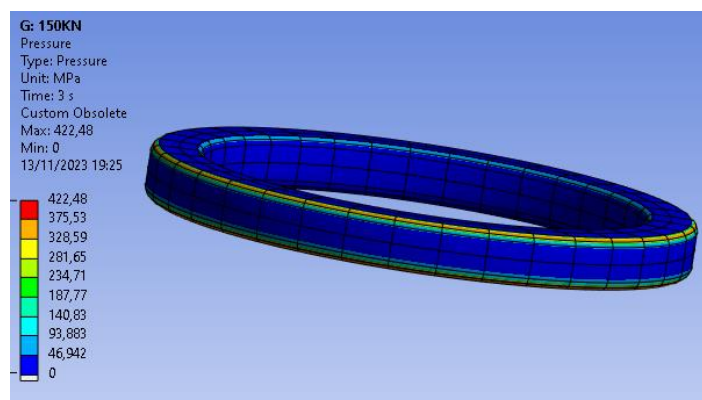


Figura 84: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 150 kN (Autores)

Por fim, considerando 115 kN de magnitude, não houve mais pressão no anel, indicando que o elemento se descolou do flange para o caso em questão, fato que provocou o comprometimento total da integridade do sistema.

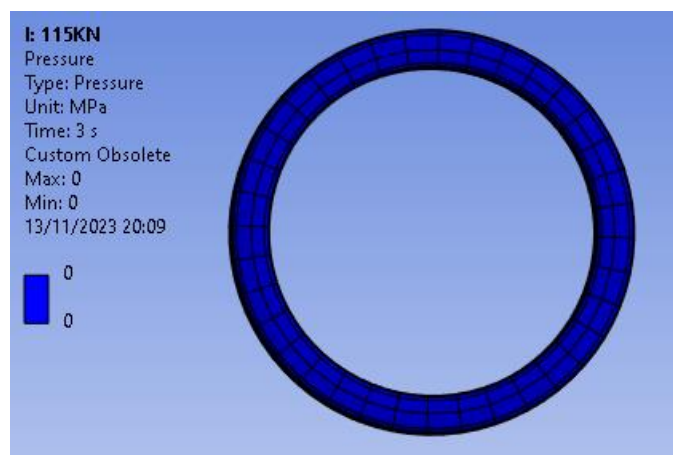


Figura 85: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pretensão de 115 kN (Autores)

O comportamento do anel de vedação simulado com Nitinol foi similar ao comportamento do anel simulado com aço inox. Apesar de considerar pressão de contato inicial maior e diferente distribuição de pressão ao longo das rodadas de simulação, o anel fabricado com os dois materiais vazou ao considerar força de pretensão com magnitude de 150 kN.

A variação da pressão de contato com a força de pretensão para o anel fabricado com Nitinol pode ser observada graficamente na figura 86.

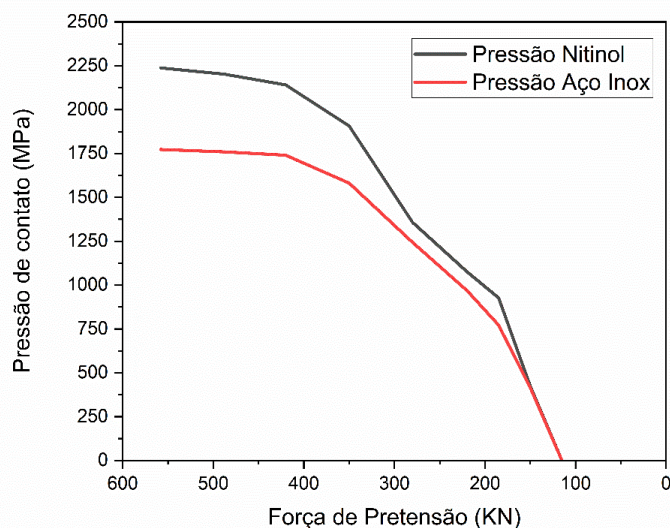


Figura 86 – Variação da pressão de contato com a força de pretensão (Autores)

6.3.3 Aumentando a Pressão Interna

Continuando a análise das variações paramétricas, o próximo parâmetro a ser investigado é a pressão interna. Nas análises que serão apresentadas a seguir, optou-se por empregar o mesmo intervalo de variações utilizado para o aço inoxidável, possibilitando comparações relacionadas aos resultados entre ambos os materiais.

Assim sendo, comparando os resultados mostrados na figura 77, considerando 20 ksi de pressão interna, com a figura 87, considerando 30 ksi, percebeu-se uma redução da pressão máxima de contato, indicando variação

26% maior para o anel fabricado com Nitinol. No entanto, o comportamento da pressão máxima não indicou mudanças perceptíveis na distribuição de pressão.

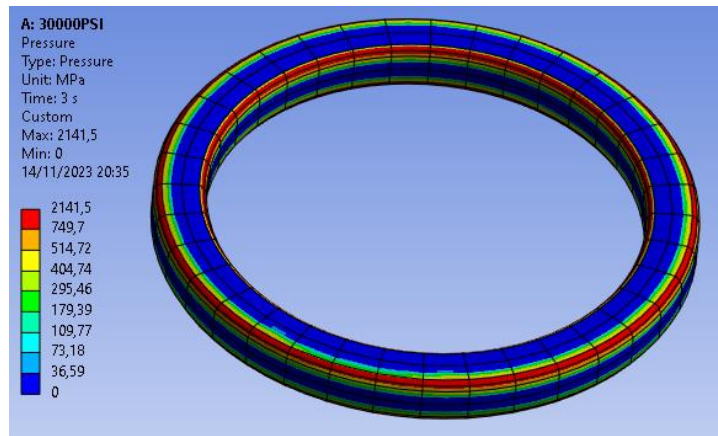


Figura 87: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 30 ksi (Autores)

Nas imagens 88 e 89, é possível notar que a pressão de compressão no anel continuou por diminuir, mantendo, contudo, uma distribuição ao longo de sua superfície que não apresentou alterações consideráveis. Esse padrão seguiu comportamento semelhante ao modelo de aço inoxidável observado anteriormente.

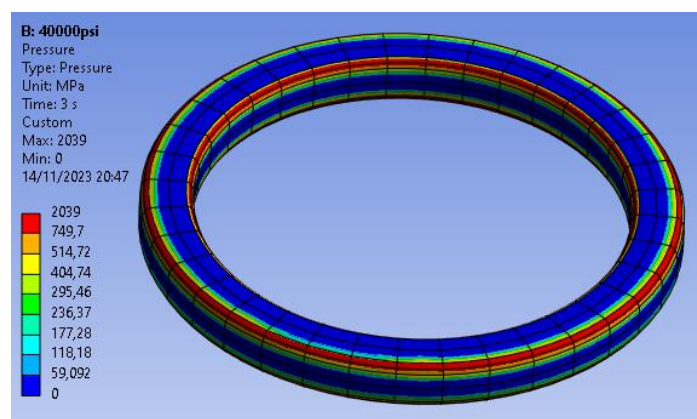
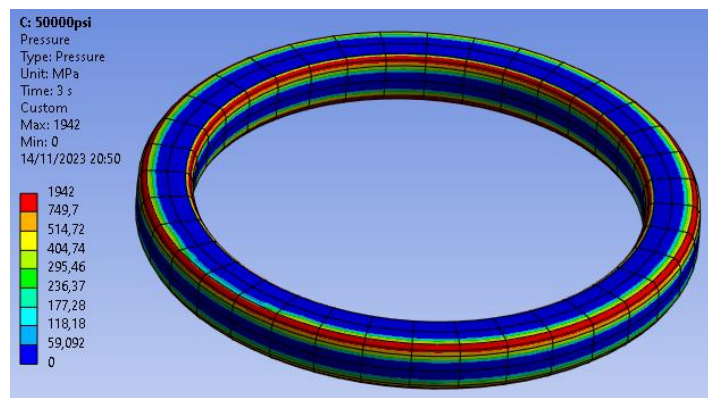
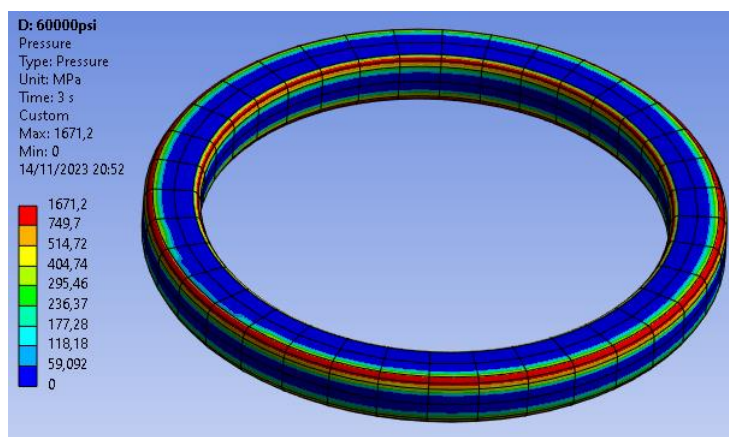


Figura 88: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 40 ksi (Autores)



**Figura 89: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 50 ksi
(Autores)**

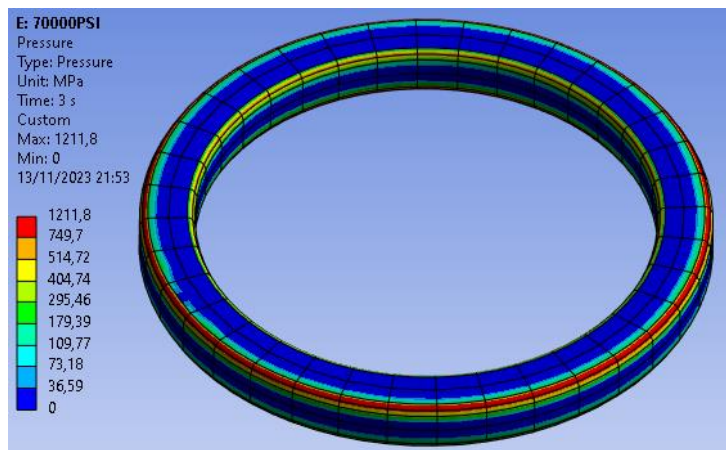
Com a pressão interna de 60 ksi, observou-se a ocorrência de diferentes mudanças além da queda acentuada da pressão interna. Quando comparada com a mesma simulação feita para o aço inox, pôde-se perceber que houve uma leve alteração na coloração da borda interior, indicando que o anel de Nitinol apresentou pressões de contato máximas mais elevadas. Esse comportamento é evidenciado pela presença predominante das áreas amareladas nas bordas do anel.



**Figura 90: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 60 ksi
(Autores)**

Na figura abaixo, considerando pressão interna de 70 ksi, quando comparada à simulação de aço inox, percebeu-se o mesmo comportamento mencionado acima, em que mesmo com pressão mais elevada, a borda interna

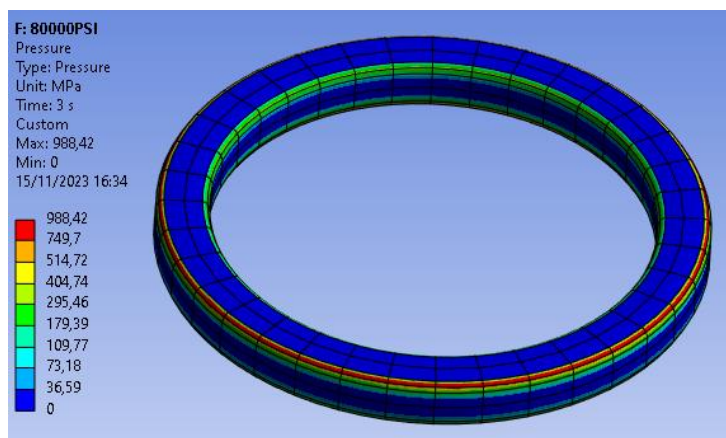
do anel de Nitinol apareceu menos avermelhada, diferente da borda externa, onde houve predominância da área em azul claro.



**Figura 91: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 70 ksi
(Autores)**

Mediante pressão interna de 80 ksi, a pressão de contato continuou diminuindo, principalmente na borda interna. Comparando os resultados do Aço Inox, foi possível notar diferenças consideráveis, uma vez que se visualizou uma área predominantemente esverdeada.

Pode-se destacar ainda, que na borda externa do anel de Nitinol, encontrou-se uma área relativamente maior em contato com o flange, o que não ocorre na análise do outro material.



**Figura 92: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 80 ksi
(Autores)**

De 80 para 85 ksi, o anel de Nitinol apresentou uma redução da pressão máxima bem menor quando comparado ao aço inox, decaindo quase que o dobro.

Durante todas as análises feitas para o anel de aço, notou-se que na borda interna a presença de pressões máximas de contato, o que não aconteceu no anel de Nitinol, onde desde a de pressão interna de 70 ksi, praticamente não foi possível observar tal comportamento. Logo, os comportamentos dos anéis estão sendo relativamente diferentes, devido às propriedades de cada um.

Ressalta-se que, na diminuição de pretensão, essas variações de comportamento foram mais parecidas, mostrando que o aumento da pressão interna possui uma maior influência no anel de Nitinol.

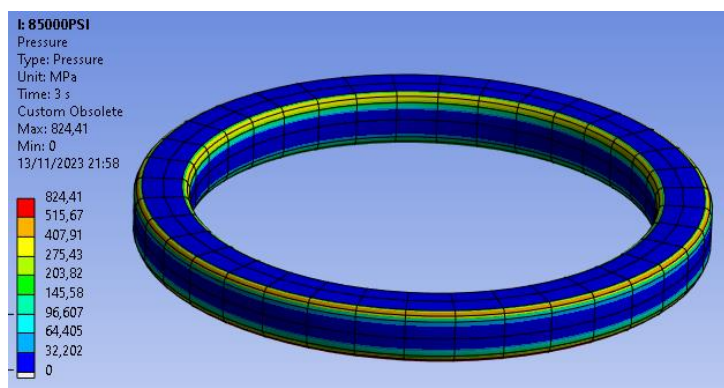
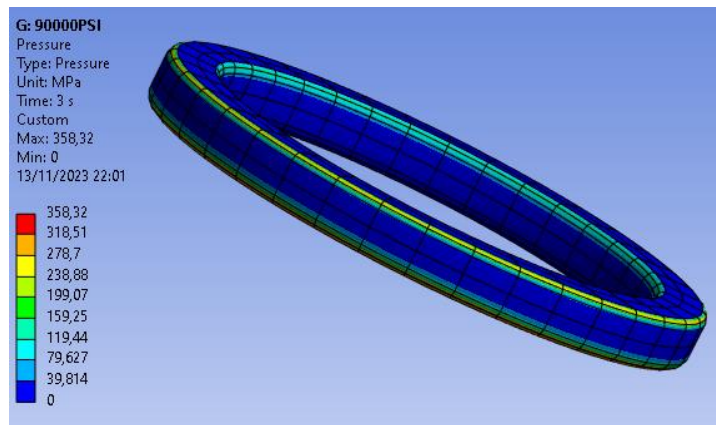


Figura 93: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 85 ksi (Autores)

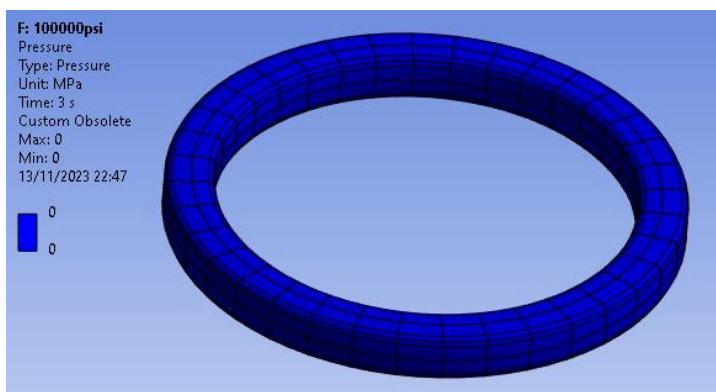
Considerando 90 ksi de pressão interna, notou-se que a magnitude das pressões de contato teve valores reativamente próximos, quando comparado ao aço inox. A diferença se deu na distribuição de pressão, onde foi possível notar diferenças na coloração de cada área.

Em relação a borda interna inferior, em ambas as análises, não se registrou pressão de contato, demonstrando que os anéis chegaram ao ponto crítico e qualquer alteração, interna ou externa, pode provocar o vazamento.



**Figura 94: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 90 ksi
(Autores)**

Enfim, com 100 ksi de pressão interna, não houve nenhuma região do anel que estabelecesse contato com o flange, comportamento que demonstra que a integridade do sistema foi corrompida



**Figura 95: Comportamento do anel de Nitinol submetido a pressão interna de 100ksi
(Autores)**

A variação paramétrica de pressão interna no anel de Nitinol mostrou comportamento parecido com os resultados obtidos para o anel de aço inox. Analisando a figura 96, é possível notar o comportamento da pressão de contato com a variação da pressão interna.

Percebe-se que a curva que representa a pressão de contato no anel seguiu comportamento similar a curva do aço inox. A principal diferença se deu no valor da pressão máxima de contato, evidenciando as características superelásticas do Nitinol.

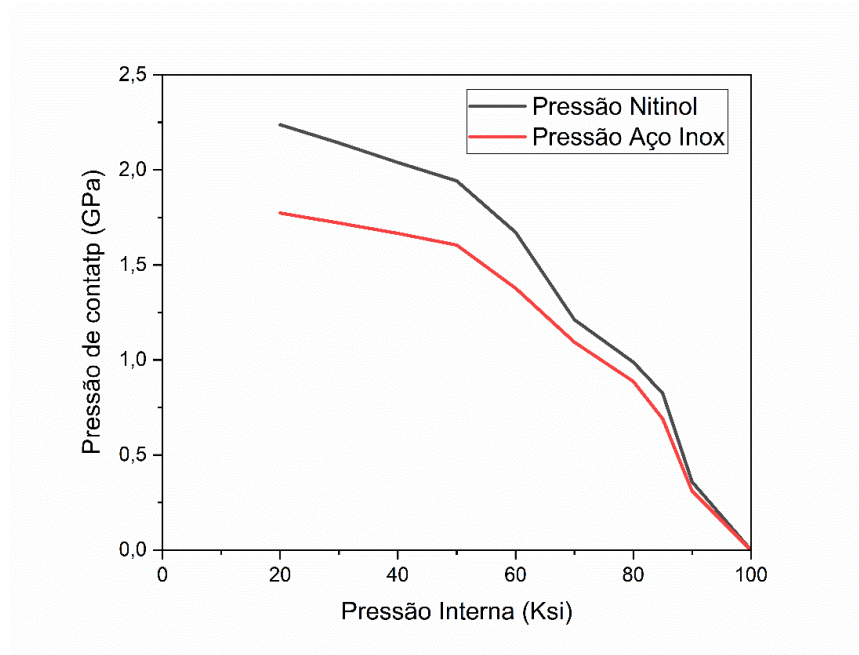


Figura 96 – Variação da pressão de contato com a pressão interna (Autores)

7 Conclusões

Diante das análises numéricas apresentadas durante o texto, é possível concluir que alguns parâmetros possuem grande influência em relação ao comportamento da junta flangeada.

Ao projetar um sistema de tubulações, o principal objetivo do projetista é escolher componentes que resistam às solicitações do sistema, sem que ocorra vazamento do fluido de trabalho. Nesse contexto, as juntas flangeadas possuem um papel importante, já que são responsáveis pela união entre tubos que compõem um sistema.

Tendo definidas as condições de operação, é fundamental que ocorra um estudo de variação dos parâmetros inicialmente estabelecidos, a fim de se analisar o funcionamento da junta flangeada em diversas condições. No presente texto, o primeiro parâmetro variado foi a força de pretensão exercida pelos parafusos.

Diversos motivos podem fazer com que a carga de pretensão seja diminuída, como vibração, deformação elástica dos materiais e cargas térmicas, relacionadas ao fluido de trabalho.

Ao realizar uma queda gradativa na pretensão, pôde-se perceber que a pressão provocada pelo aperto dos parafusos diminuiu gradativamente, gerando diversos pontos de vazamento entre o anel de vedação e o flange. Dentro desse contexto, se faz interessante um acompanhamento regular de manutenção da tubulação, evitando que as condições de operação naturais do sistema sejam alteradas, provocando falhas na tubulação. Em alguns casos, o monitoramento via sensores do aperto dos parafusos pode ser uma importante ferramenta para mitigar a falha completa do sistema, sendo possível evitar que as cargas compreendidas entre o intervalo de pretensão mínima sejam evitadas. Vale ressaltar que as juntas flangeadas são elementos de união favoráveis a manutenção, uma vez que possuem facilidade na desmontagem.

Outro parâmetro importante analisado nas discussões foi a influência da pressão interna no comportamento da junta flangeada. Sabe-se que, durante a operação de uma tubulação, a pressão interna não permanece constante,

podendo ser reduzida ou acrescida, dependendo das condições em que o sistema estiver submetido. Sendo assim, o estudo do comportamento da pressão interna precisa ser aprofundado ao realizar o projeto de juntas flangeadas.

Aplicando um aumento gradativo na pressão interna, notou-se que, em um primeiro momento, não se observou uma grande influência na integridade do sistema. Ao realizar outras análises de aumento gradativo de pressão interna, foi possível observar a partir de um dado momento diversos pontos de vazamento na superfície externa do anel, indicando falha no sistema.

Dessa forma, pode-se concluir que o projeto de escolha de uma junta flangeada adequada precisa contemplar a variação de parâmetros de operação, como pressão interna e força de pretensão dos parafusos. Dentro desse contexto, a escolha correta dos componentes da junta e a adequada manutenção dos equipamentos se mostram como fundamentais na garantia de plena operação de um sistema.

Tendo em vista a importância dos parâmetros iniciais do sistema, é de extrema importância entender como os diferentes materiais para anéis de vedação se comportam de acordo com essas solicitações. Para o presente trabalho, os materiais estudados foram o Aço Inox e o Nitinol.

Dentro das análises realizadas, os resultados encontrados para os dois materiais seguiram comportamento parecido. Ao considerar a variação da força de pretensão, percebeu-se que anel fabricado com ambos os materiais vazou com uma carga de 150 kN. Considerando o aumento da pressão interna, é possível notar que o anel fabricado com ambos os materiais vazou considerando pressão com magnitude de 90 ksi. Isto porque considerou-se que com esses valores a confiabilidade do conjunto está crítica e qualquer variação de parâmetro de agentes internos ou externos poderia provocar o vazamento.

A maior diferença entre os materiais se deu na pressão máxima de contato, havendo uma diferença de 464,8 MPa a favor do Nitinol em comparação com o aço inoxidável. Essa diferença deve ser considerada ao analisar a capacidade de reutilização dos materiais.

Sendo assim, conclui-se que ambos os anéis possuem capacidade de receber grandes solicitações sem corromper a integridade do sistema. Porém, o principal objetivo do estudo é entender se o anel de LMF, tendo característica de material com memória de forma, poderia ser reaproveitado após a desmontagem da junta flangeada.

Essa análise pôde ser realizada considerando a tensão de escoamento do Nitinol. Entende-se que, ao ultrapassar sua tensão de escoamento, qualquer solicitação recebida pelo material fará com que este atinja seu limite plástico, sendo impossível reutilizá-lo. Para o presente estudo, a tensão de escoamento em tração, considerando temperatura ambiente de 23°C é de 1000 MPa, como informado ao longo do texto.

Ao obter-se o resultado de pressão de contato do anel com a junta flangeada, percebe-se que a magnitude dessa solicitação atinge 2237,6 MPa, indicando não seria possível reutilizar o anel para nova montagem da junta flangeada. Porém, um fator importante que deve ser levado em consideração e pode mudar esse contexto é o tipo de solicitações que o anel receberá ao longo de sua operação.

Como elucidado ao longo do texto, as solicitações do tipo compressivas elevam a tensão de escoamento do material, fazendo com que este atinja o limite de escoamento em tensões mais elevadas. O mesmo comportamento ocorre com o aumento de temperatura de trabalho. O tipo de junta flangeada considerada para as análises é constantemente usada na indústria petrolífera, onde a temperatura do fluido pode chegar a 80°C.

Sendo assim, é possível concluir que a tensão de escoamento para o Nitinol nas condições de trabalho apresentadas poderá ser maior que a magnitude de 1000 MPa apresentada ao longo do texto. Por isso, como futuro estudo, seria de grande valia realizar um teste de compressão considerando temperaturas mais elevadas. A partir desse resultado, será possível obter a tensão de escoamento precisa para o material e tirar conclusões mais precisas quanto a reutilização do anel. Vale ressaltar que o ensaio citado não foi realizado no presente trabalho por conta de limitações de estrutura laboratorial.

Outro ponto a se evoluir diz respeito a malha considerada no sistema. Como exposto ao longo do texto, a versão estudantil do Ansys® limita o número de elementos nas simulações numéricas. Sendo assim, não é possível realizar grande refino de malha nos flanges e no anel. Tendo acesso a versão profissional, malhas com tamanhos de elementos menores poderiam ser consideradas em um estudo de convergência de malha, gerando resultados ainda mais precisos para as simulações realizadas.

Vale ressaltar ainda que não ocorreu a variação simultânea de mais de um parâmetro ao mesmo tempo de forma a simplificar o estudo. Logo, a fim de se obter resultados ainda mais realistas existem diversos estudos e variações que podem ser realizadas como por exemplo o estudo de aperto não uniformes.

Por fim, é de extrema importância também que seja realizada uma análise custos, buscando entender a viabilidade econômica dessa aplicação.

8 Referências bibliográficas

- [1] ALMEIDA, RODRIGO ROQUE. **INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ENCHARQUE DO TRATAMENTO CRIOGÊNICO NO MÓDULO ELÁSTICO E NO AMORTECIMENTO DE UMA LIGA NiTi EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.** 2015.
- [2] ALMEIDA, PAULO MANUEL MARQUES. **MATERIAIS INTELIGENTES EM APLICAÇÕES ORTODÔNTICAS: NITINOL.** 2021. Tese de Doutorado Universidade de Coimbra.
- [3] A.OLANDER. **THE CRYSTAL STRUCTURE OF AuCd.** 83^a, 1932, p.145.
- [4] COSTA, LUANDERSON CARLOS FERNANDES DA. **ESTUDO DE DANO E RECUPERAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS PARA UTILIZAÇÃO NA INDÚSTRIA.** 2022.
- [5] F.E. WANG, W.J. BUEHLER AND S.J.PICKART. **CRYSTAL STRUCTURE AND A UNIQUE MARTENSITIC TRANSFORMATION OF NiTi.** 36, 1965, p.3232.
- [6] QUINTÃO, CÁTIA CARDOSO ABDO; BRUNHARO, IONE HELENA VIEIRA PORTELLA. **FIOS ORTODÔNTICOS: CONHECER PARA OTIMIZAR A APLICAÇÃO CLÍNICA.** Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial, v. 14, p. 1440157, 2009
- [7] GODOI, RENAN PEREIRA DE. **ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DA LIGA NITINOL.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2015
- [8] **GOV.BR.** Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias.
- [9] GRENINGER, ALDEN B. MOORADIAN, VICTOR G. **STRAIN TRANSFORMATION IN METASTABLE BETA COPPER-ZINC AND BETA COPPER-Ti ALLOYS.** Aime Trans, v.128, p.337-369. 1938.
- [10] G.V. KURDYMOV AND L.G. KHANDROS, **ON THE 'THERMOELASTIC' EQUILIBRIUM IN MARTENSITIC TRANSFORMATIONS.** Doklady Akademi Nauk SSSR, 66 (1949), pp.211-214.
- [11] KUMAR, P.K.; LAGOUDAS, D.C. **INTRODUCTION TO SHAPE MEMORY ALLOYS. IN: SHAPE MEMORY ALLOYS: MODELING AND ENGINEERING APPLICATIONS.** Boston, MA: Springer US, 2008. p. 1-51
- [12] KURDJUMOV, G. V.; KHANDROS, L.G. **FIRST REPORTS OF THE THERMOELASTIC BEHAVIOUR OF THE MARTENSITIC PHASES OF Au-Cd ALLOYS.** Doklady Akademii Nauk SSSR.

[13] LEITE, LEONARDO AMARAL DOS SANTOS BARROSO. **UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA NO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE UM FLANGE API17D.** 2021.v. 66, n. 1949,p. 211-213, 1949.

[14] **LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA.** Disponível em:
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4919253/mod_resource/content/0/Material%20Apoio%20Memoria%20Forma.PDF.

[15] MARQUES, LUCAS FERNANDO FARIAS; JUNIOR, MONTEIRO. **ESTUDO EM ELEMENTOS FINITOS DA VIABILIDADE DO USO DE LIGAS NiTi EM JUNTAS METÁLICAS FLANGEADAS PARA TUBULAÇÕES DE ALTA PRESSÃO.** 2023

[16] **PROCEDIMENTO DE ANGIOPLASTIA COM BALÃO DE RENDERIZAÇÃO 3D COM STENT NA VEIA.** Disponível em:
https://br.freepik.com/fotos-premium/procedimento-de-angioplastia-com-balao-de-renderizacao-3d-com-stent-na-veia_17862530.htm#query=stent&position=12&from_view=keyword&track=robertav1_2_sidr.

[17] REIS, PAULA KOZLOWSKI PITOMBEIRA. **USO DE ARRUELAS COM MEMÓRIA DE FORMA EM FLANGES DE CONECTORES SUBMARINOS.** 2013.

[18] SENAI. **TUBULAÇÃO INDUSTRIAL**, pp 47-61, 1997

[19] **SIENA VEDAÇÕES INDUSTRIAIS.** Disponível em:
<https://sienavedacoes.com.br/fixacao-industrial-parafuso-estoj/>.

[20] SONG, GANGBING; MA,N.;LI,H,-N. **APPLICATIONS OF SHAPE MEMORY ALLOYS IN CIVIL STRUCTURES.** Engineering structures, v. 28, n. 9, p. 1266-1274, 2006

[21] **TUBOS ABC.** Disponível em:
<https://www.tubosabc.com.br/produtos/flanges-e-suas-aplicacoes/>.

[22] ULLAKKO, KARI. **MAGNETICALLY CONTROLLED SHAPE MEMORY ALLOYS: A NEW CLASS OF ACTUATOR MATERIALS.** Journal of materials engineering and performance, v. 5, p. 405-409, 1996.

[23] ZHANG, CONGRUI. **JOINING TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING STENT.** 2018

[24] **CRV INDUSTRIAL PARAFUSOS.** Acesso em:
<https://www.crvindustrial.com/blog/conheca-o-parafuso-prisoneiro>.

- [25] **HYDROGRAND STEEL PIPE**. Acesso em:
<https://www.hgsteelpipe.com/ASTM-A-312-304-Stainless-Steel-tubes-p.html>
- [26] **RCM R C METAL CORP**. Acesso em:
<https://www.rcmetal.co.in/aisi-4130-flanges.html#specifications>
- [27] **INTERVÁLVULAS**. Acesso em:
<https://intervalvulas.com.br/wp-content/uploads/2017/12/EP-059-04-Elementos-Fixac%CC%A7a%CC%83o-ASTM-A193-Gr.-B7.pdf>
- [28] **DOKUMEN**. Acesso em:
<https://dokumen.tips/documents/n-0076-g-materiais-tubulacao.html?page=13>
- [29] **ABPE**. Acesso em:
http://www.abpe.org.br/trabalhos2021/ID_132.pdf
- [30] **ENGINEERYOURSOUND**. Acesso em:
<https://engineeryoursound.com/hex-mesh-vs-tet-mesh-which-is-better-and-why/#:~:text=Greater%20Accuracy,and%20more%20consistent%20element%20size.>
- [31] BECHLE, NATHAN J.; KYRIAKIDES, STELIOS. **LOCALIZATION IN NITI TUBES UNDER BENDING**. International Journal of Solids and Structures, v. 51, n. 5, p. 967-980, 2014.
- [32] **MATRIZ ENERGÉTICA**. Acesso em:
https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/22080/22080_2.PDF
- [33] BECHLE, NATHAN J.; KYRIAKIDES, STELIOS. **LOCALIZATION IN NITI TUBES UNDER BENDING**. International Journal of Solids and Structures, v. 51, n. 5, p. 967-980, 2014.
- [34] AURICCHIO, F.; REALI, A.; STEFANELLI, U. **A THREE-DIMENSIONAL MODEL DESCRIBING STRESS-INDUCED SOLID PHASE TRANSFORMATION WITH PERMANENT INELASTICITY**. International Journal of plasticity, v. 23, n. 2, p. 207-226, 2007.