

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

**ESTUDO EM ELEMENTOS FINITOS DA VIABILIDADE DO USO DE
LIGAS NiTi EM JUNTAS METÁLICAS FLANGEADAS PARA
TUBULAÇÕES DE ALTA PRESSÃO**

Lucas Fernando Farias Marques

Orientador: Paulo Cesar da Camara
Monteiro Junior

**RIO DE JANEIRO
2023**

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

**ESTUDO EM ELEMENTOS FINITOS DA VIABILIDADE DO USO DE
LIGAS NiTi EM JUNTAS METÁLICAS FLANGEADAS PARA
TUBULAÇÕES DE ALTA PRESSÃO**

Lucas Fernando Farias Marques

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do departamento de educação superior do CEFET-RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em engenharia mecânica

Orientador: Paulo Cesar da Camara Monteiro Junior

**RIO DE JANEIRO
2023**

SUMÁRIO

1-INTRODUÇÃO	5
1.1-OBJETIVO	6
2- LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA.....	7
2.1- O EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA	8
2.2- OS CICLOS DE MEMÓRIA DE FORMA E PSEUDOELÁSTICO	10
2.3-INFLUÊNCIA DO PROCESSAMENTO NAS PROPRIEDADES FINAIS DO NITINOL.....	13
2.4- POTENCIAL E APLICABILIDADE DE LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA.....	14
3-CONEXÕES FLANGEADAS.....	19
3.1- JUNTAS NÃO-METÁLICAS.....	20
3.1.1- Acabamento superficial das juntas não-metálicas	21
3.2- JUNTAS METÁLICAS.....	22
3.2.1-Juntas planas	23
3.2.2-Juntas planas ranhuradas	24
3.2.3-Juntas corrugadas	24
3.2.4-Juntas de anel metálico	25
3.3- ELEMENTOS DE FIXAÇÃO	26
3.3.1-Parafusos de máquina.....	27
3.3.2-Estojos.....	27
3.4- FORÇAS EM CONEXÕES FLANGEADAS	27
3.5-COMPRESSIBILIDADE, RECUPERAÇÃO E RELAXAMENTO	29
4- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	30
4.1- Caracterização do modelo numérico	31
4.1.1-Geometria.....	31
4.1.2- Malhas	32
4.1.3- Contatos	35
4.1.4-Entrada de propriedades dos materiais	36
5-RESULTADOS.....	40
6-CONCLUSÃO	52
7-TRABALHOS FUTUROS	53
8-REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	55

FIGURAS

Figura 1: (a) Diagrama esquemático do ciclo de memória de forma, (b) gráfico tensão-deformação-temperatura do comportamento de memória de forma idealizado. (ZIÓLKOWSKI, 2015).....	11
Figura 2: Gráfico tensão deformação do comportamento pseudoelástico idealizado. (ZIÓLKOWSKI, 2015).....	12
Figura 3: Chevron na turbina GE90-115 e detalhes dos atuadores. (HARTL, et al, 2009)	16
Figura 4: Viga IRC durante carregamento. (SONG, 2003).....	17
Figura 5: Viga IRC após carregamento. (SONG, 2003)	18
Figura 6: Esquema ilustrativo dos componentes típicos de uma união flangeada. (TELLES, 2001).....	20
Figura 7: Ilustração dos perfis superficiais ranhurado concêntrico e espiral fonográfica. (VEIGA, 2014)	22
Figura 8: Junta metálica plana. (VEIGA, 2014)	23
Figura 9: Junta metálica ranhurada. (VEIGA, 2014).....	24
Figura 10: Junta metálica corrugada. (VEIGA, 2014).....	25
Figura 11: Juntas de anel metálico. À esquerda anel oval, à direita, anel octogonal. (VEIGA, 2014)	26
Figura 12: Diagrama esquemático das forças atuantes numa união flangeada (VEIGA, 2014).....	28
Figura 13: conjunto da conexão flangeada montado.....	32
Figura 14: conjunto montado utilizado nas simulações	32
Figura 15: malha gerada para os flanges (6mm).....	33
Figura 16: Malha gerada para o anel (3mm)	34
Figura 17: Contatos entre anel e flange superior	36
Figura 18: Contatos entre anel e flange inferior	36
Figura 19: Curva tensão x deformação do aço AISI 316, (T.W. Gibbs, 1961).....	37

Figura 20: Curva experimental do loop superelastico	38
Figura 21: Ensaio de tração experimental até ruptura.....	38
Figura 22: Sobreposição da curva teórica e experimental	39
Figura 23: Gradiente de tensões com anel em inox para carga de 123 KN	41
Figura 24: Gradiente de tensões com anel em aço NiTi para carga de 123 KN	42
Figura 25: Deformação com anel em inox para carga de 123 KN.....	42
Figura 26: Deformação com anel em NiTi para carga de 123 KN.....	43
Figura 27: Gradiente de tensões com anel em inox para carga de 543 KN	44
Figura 28: Gradiente de tensões com anel em NiTi para carga de 543 KN	44
Figura 29: Deformação com anel em inox para carga de 543 KN.....	45
Figura 30: Deformação com anel em NiTi para carga de 543 KN.....	45
Figura 31: Gradiente de tensões com anel em inox para carga de 1023 KN	46
Figura 32: Gradiente de tensões com anel em NiTi para carga de 1023 KN	46
Figura 33: Deformação com anel em inox para carga de 1023 KN.....	47
Figura 34: Deformação com anel em NiTi para carga de 1023 KN	47
Figura 35: Fração martensítica no anel de NiTi durante fechamento completo.....	48
Figura 36: Tensão máxima no anel em inox.....	49
Figura 37: Tensão máxima no anel em NiTi.....	49
Figura 38: Deformação ao longo da compressão e recuperação após descarga (NiTi)	50
Figura 39: Deformação ao longo da compressão (AISI 316)	51
Figura 40: curvas tensão deformação em compressão para diferentes temperaturas de tratamentos de envelhecimento por 2h (a) 200 °C (b) 300 °C (c) 400°C (d) 500°C, (LU, et al, 2017).....	52

1-INTRODUÇÃO

O estudo de Juntas flangeadas é de explícita relevância para a engenharia visto a ubiquidade desse tipo de ligação e da indispensabilidade de sua função sobretudo no âmbito de tubulações industriais. Comparado às tradicionais juntas soldadas a vantagem mais óbvia associada a essa classe de método de ligação é a capacidade de propiciar junções não permanentes adequando grande conveniência em termos de processos de manutenção ou substituição de elementos e equipamentos conectados à tubulação. Um segundo aspecto favorável à adoção deste tipo de ligação está relacionado às considerações na execução dos procedimentos de união em si, sendo a qualidade destes normalmente muito menos dependentes da aptidão manual do operário ou do emprego de maquinários de automação onerosos em campo.

Por outro lado, enquanto o produto de uma união soldada é, grosso modo, um único segmento contínuo, nas uniões flangeadas os segmentos são meramente mantidos unidos pelo tensionamento das faces dos flanges e elementos de vedação, a natureza de tal arranjo produz seu próprio conjunto de complexidades no projeto adequado da junta tal que seu êxito depende não só da integridade estrutural e da vedação inicial, mas da capacidade de manter as emissões fugitivas abaixo do limite aceitável por um período adequadamente longo à aplicação a qual a junta está destinada. Tratando-se de tubulações de alta pressão a dificuldade de satisfazer tais requisitos está relacionada ao controle da deformação dos flanges e anéis de vedação, perda de torque associadas a ciclos térmicos e relaxamento dos parafusos, capacidade de conformação do anel de vedação e resistência química dos elementos da junta.

Devido aos requisitos mecânicos e de resistência ao desgaste, juntas flangeadas de alta pressão utilizam anéis metálicos ou semimetálicos (híbridos metal-não metal) como elemento de vedação, entretanto, em virtude do módulo de elasticidade relativamente alto de materiais metálicos a capacidade de conformação, e por consequência, de vedação entre as interfaces com os flanges é negativamente

afetada. Em tal contexto um estudo de aplicação de Nitinol, o exemplar mais promissor de material com memória de forma, como material para estes anéis constitui uma oportunidade de aprimorar a confiabilidade de tais juntas onde os custos inerentes da adoção de tal material seriam economicamente justificáveis, visto o potencial para redução da necessidade dos trâmites de manutenção e dos custos a estes atrelados, bem como da redução de riscos à saúde e ao meio ambiente, por conta de possíveis vazamentos de fluidos tóxicos.

A justificativa da compatibilidade do Nitinol com a aplicação aqui proposta junto a expectativa de que dito material apresente desempenho superior a outros materiais comumente utilizados, abrange não somente a presença do efeito de memória de forma propriamente dito, mas de sua coexistência com propriedades mecânicas adequadas e boa estabilidade química. Quanto a relevância dos fenômenos de memória (recuperação de largas deformações por carregamento térmico) e particularmente da pseudoelasticidade (recuperação espontânea) o módulo de elasticidade do Nitinol em seu estado martensítico é relativamente baixo favorecendo melhor conformabilidade do anel de vedação durante o acoplamento dos flanges, enquanto projetar a junta para e manter-se dentro da faixa de temperatura do regime pseudoelástico durante operação permite a melhor vedação da mesma.

1.1-OBJETIVO

O presente trabalho pretende prover uma avaliação da viabilidade da utilização dos fenômenos associados à liga pseudoelástica Nitinol no aprimoramento da capacidade de vedação de juntas flangeadas de alta pressão, baseando dita análise na simulação por modelos numéricos.

2- LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA

As chamadas ligas de memória de forma enquadram-se na classificação de materiais inteligentes, neste caso, caracterizam-se primordialmente por apresentar a capacidade de recuperar elástica e reversivelmente grandes deformações, regredindo à forma original não deformada após aquecimento e descarregamento da tensão aplicada, ou no caso do efeito pseudoelástico, após descarregamento da tensão aplicada.

Embora tal fenômeno seja observado em um número considerável de ligas, na prática devido a considerações econômicas o uso desse tipo de material largamente se restringe a ligas de NiTi, ligas à base de CuAl (como CuAlNi e CuZnAl) e ligas ferrosas, dessas três, as ligas de NiTi são vastamente mais preponderantes na indústria não só pelo maior desempenho como liga de memória de forma mas também por suas propriedades mecânicas e biocompatibilidade, sendo esta última uma razão fundamental para sua preeminência em aplicações médicas. Por outro lado, o custo associado a estas ligas é elevado não só por conta do custo dos elementos de liga, mas pela dificuldade de processamento. Assim ligas de memória de forma de CuAl e ferrosas compõem alternativas de menor qualidade, porém de maior viabilidade econômica.

Historicamente a primeira aplicação prática deste tipo de material foi como constituinte de um sistema de acoplamento de junta na aeronave de combate americana F-14 Tomcat (MELTON, 1999). Aplicações subsequentes apareceram inicialmente nas indústrias militares, de aviação e na área médica, setores onde a criticidade de eficiência predomina sobre a necessidade de redução de custos. Atualmente, no entanto é possível encontrar artigos mais “ordinários” produzidos com ligas de memória de forma como armações de óculos por exemplo, muito embora o custo de tais materiais ainda seja relativamente elevado. Apesar da complexidade de se trabalhar com essa classe de materiais e do custo associado, grande interesse pelo estudo de ligas de memória de forma tem sido fomentado na comunidade científica já que suas propriedades características fornecem um claro potencial para diversas

aplicações de engenharia com a função de atuadores, amortecimento, acoplamento e sensores.

Em geral, essa qualidade de conservar informação do estado original não deformado e a capacidade de “reverter” a deformação sofrida, está intimamente ligado à presença de uma transição entre uma fase metaestável (martensita) e a fase parente (austenita). Nota-se que estas mesmas terminologias não são particulares ao estudo de ligas de memória de forma sendo também utilizadas para descrever fases similares em outras ligas como o aço por exemplo. Embora existam similaridades nos mecanismos de transformação de fase entre as duas classes no sentido de que ambas se referem à transformações não difusivas, metaestáveis, promovidas por ação de cisalhamento ao invés do movimento de discordâncias, nas ligas de memória de forma há necessariamente a particularidade de que tal processo de transição de fase ocorre de forma termoelástica. Os chamados efeitos de memória de forma e pseudoelasticidade ocorrem por conta destas particularidades na fase metaestável somados ao condicionamento de um volume adequado de discordâncias no material.

2.1- O EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA

Como mencionado na seção anterior o efeito de memória de forma está relacionado com a presença de uma fase martensítica ocorrendo por processo termoelástico. Importa dizer que, a rigor, nas ligas de Nitinol esse efeito bem como o de pseudoelasticidade pode estar relacionado também a uma segunda fase denominada fase R (MYAZAKI,1988), a qual pode ocorrer em um estágio separado da transformação martensítica, concomitantemente a mesma ou até mesmo ser suprimida inteiramente, nesta seção no entanto o efeito de memória de forma será inicialmente explanado com relação à transformação martensítica já que esta é responsável pela maior magnitude do efeito nas ligas de NiTi em adição ao fato de que o efeito causado pela fase R foge ao caso geral do fenômeno.

Tal como todo grupo de materiais incluso na categoria de materiais inteligentes as ligas de memória de forma respondem a um estímulo externo coordenando sua mudança de estado, neste caso as transformações de fase podem ser induzidas por

carregamento puramente térmico (martensita para austenita), carregamento puramente mecânico (austenita para martensita) ou por um carregamento simultâneo de ambos (termomecânico). O fato de que essas transformações ocorrem espontaneamente quando um estímulo externo de magnitude suficiente é aplicado é obviamente de vital importância para a utilidade dessas ligas e justifica a especificidade do requerimento anteriormente mencionado de que a transformação de e para a fase metaestável ocorra de forma termoelástica. Assim detalha-se as diferenças entre as transformações de fase observadas nas ligas de memória de forma e aquelas presentes por exemplo nos aços carbono.

No processo termoelástico a mudança de volume específico entre fases é mínima normalmente abaixo de 0.2% (ZIÓLKOWSKI, 2015, pág 14), diferentemente da típica martensita encontrada no aço aqui a transformação não vem acompanhada de um estado de alto tensionamento interno no material, embora algum grau de deformação plástica possa ocorrer em conjunto com a deformação elástica esta é muito menor do que a associada à martensita obtida nos aços temperados (especialmente após os ciclos iniciais de carga e descarga), mais adiante as interfaces entre fases martensita-austenita e entre variantes cristalográficas de martensita (planos de hábito) são mais móveis do que na martensita rica em carbono. Assim o próprio processo de nucleação e crescimento da martensita ocorre de forma notoriamente mais espontânea na martensita observada nas ligas metálicas de memória de forma onde as placas de martensita avançam ou retrocedem prontamente em conjunção com o estímulo externo exercido ou retraído sobre o material. Este conjunto de espontaneidade de transição de fases somado a baixa incidência de deformação plástica associada e ao fato de que o arranjo atômico das posições relativas dos átomos do cristal é preservado (ou seja, não há mudança da composição química mesmo localmente) durante a transformação martensítica, promove a intuição da fenomenologia por trás da capacidade do material de “lembrar” sua forma original.

Uma segunda distinção de relevância no estudo da transformação de fases em ligas de memória de forma distingue a morfologia da fase martensíticas de acordo com o estímulo geratriz da transição. Além dos aspectos anteriormente discutidos o efeito de memória de forma é somente possível devido a própria natureza do contraste entre

as fases austenítica e martensítica, sendo a primeira altamente estável e de alta simetria enquanto a última admite uma gama de variantes cristalográficas. Assim como a fase austenítica não admite múltiplas variantes e a transformação de fases preserva as ligações atômicas da fase parente a informação do estado original (não deformado) é preservada por outro lado a variabilidade da fase martensítica permite que o material se adéque ao estado de solitação termomecânica de forma que tanto a morfologia em placas da martensita quanto a morfologia do arranjo de variedades cristalográficas sejam ordenadas de forma a diminuir a energia elástica do sistema (De acordo com a teoria fenomenológica da cristalografia martensítica de Bowles-Mackenzie). Segue que a fase martensítica gerada puramente por ação térmica (redução da temperatura) é composta de múltiplas variedades cristalográficas (martensita maclada) tal arranjo é auto-acomodativo tendo a auto-deformação associada nula (eigenstrain) por outro lado a martensita induzida puramente por tensão tem suas variantes orientadas pelo tensor da tensão aplicada com sendo a fase composta de poucas variantes, ou comumente tendo uma única variante, neste caso a auto-deformação não é nula. Numa sequência onde o material parta de uma estrutura martensítica maclada após carregamento térmico e é em seguida tensionada ocorre reorientação das variantes através de um processo de coalescência e eliminação das variantes de orientações desfavoráveis ao tensor de tensão até a estrutura seja constituída de uma única variante (ou poucas) esse processo é denominado demaclação.

2.2- OS CICLOS DE MEMÓRIA DE FORMA E PSEUDOELÁSTICO

Em um ciclo típico de fenômeno de memória de forma, partindo do estado em que o material está a uma temperatura baixa o suficiente para encontrar-se no estado martensítico maclado um carregamento mecânico é então imposto conduzindo-o ao processo de demaclação até que uma única variedade de martensita seja estabelecida, o tensionamento após esse ponto levaria o material a deformar-se elasticamente e posteriormente plasticamente. Concluído o processo de demaclação

o material é descarregado mecanicamente, a deformação elástica da martensita demaada é recuperada, mas a deformação anterior ao começo da deformação elástica permanece até que o material seja aquecido até o término da transformação austenítica progressivamente recuperando a forma original (não deformada) da peça. Nota-se que essa sequência de eventos é um caso específico de ciclo, na prática é comum que haja um carregamento mecânico e variação de temperatura agindo simultaneamente, mesmo que às condições de operação tendam ao ciclo descrito o próprio efeito do calor latente de transformação pode influenciar o ciclo. Um acréscimo de temperatura age no sentido de desestabilizar a fase martensita enquanto um acréscimo de carregamento mecânico age no sentido estabilizá-la, assim embora seja útil determinar as temperaturas de transformação as mesmas estão sempre sujeitas a variar de acordo com o carregamento mecânico e vice-versa.

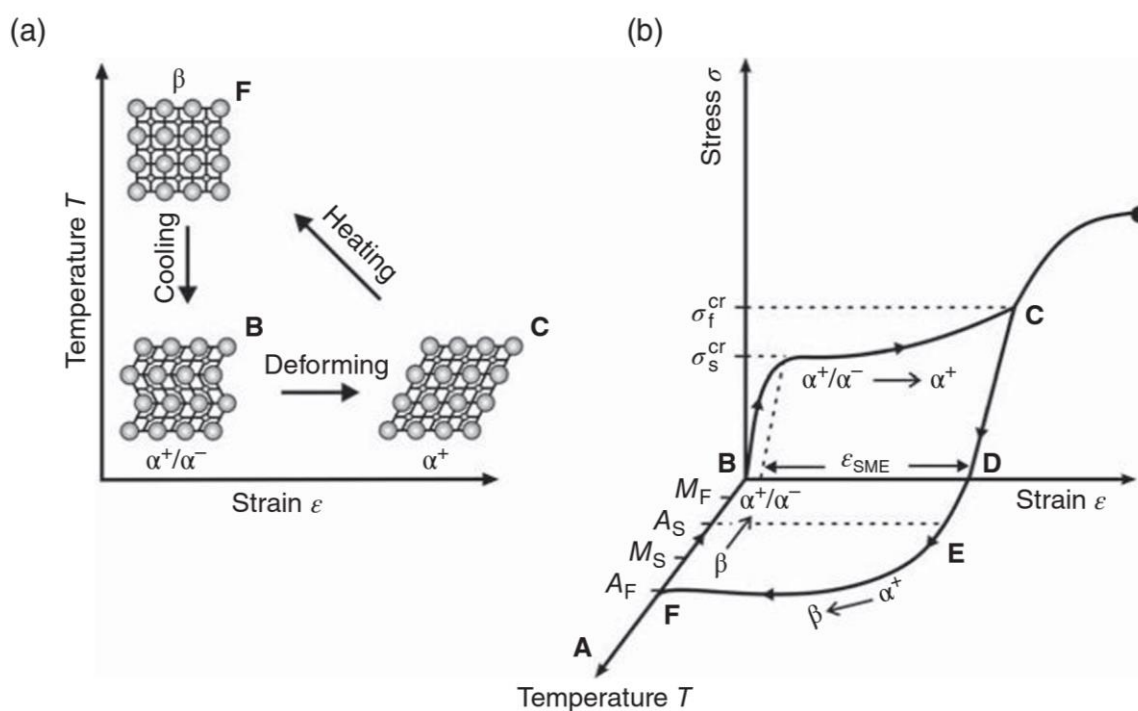


Figura 1: (a) Diagrama esquemático do ciclo de memória de forma, (b) gráfico tensão-deformação-temperatura do comportamento de memória de forma idealizado. (ZIÓLKOWSKI, 2015)

Um segundo fenômeno associado a ligas de memória de forma é denominado pseudoelasticidade que de forma similar ao efeito de memória de forma também consiste na recuperação de deformação, porém neste caso o material está submetido a uma temperatura alta o suficiente para estar no estado austenítico, o material é então tensionado de forma a induzir a transição para a fase martensítica e deformando-o no processo quando o material é descarregado mecanicamente a fase martensita torna-se instável novamente e o material recupera sua forma original ao retornar ao estado austenítico. Nota-se que existe tanto uma faixa de temperatura quanto de tensão para que este efeito ocorra, primeiramente a temperatura deve ser alta o suficiente para que o material seja austenitizado porém baixa o suficiente para que a martensita possa ser induzida por tensão sem que ocorra deformação plástica concomitantemente, de forma similar a faixa de tensão é delimitada no limite inferior pela menor tensão capaz de induzir a transição martensítica e no limite superior pela tendência a deformar plasticamente o material.

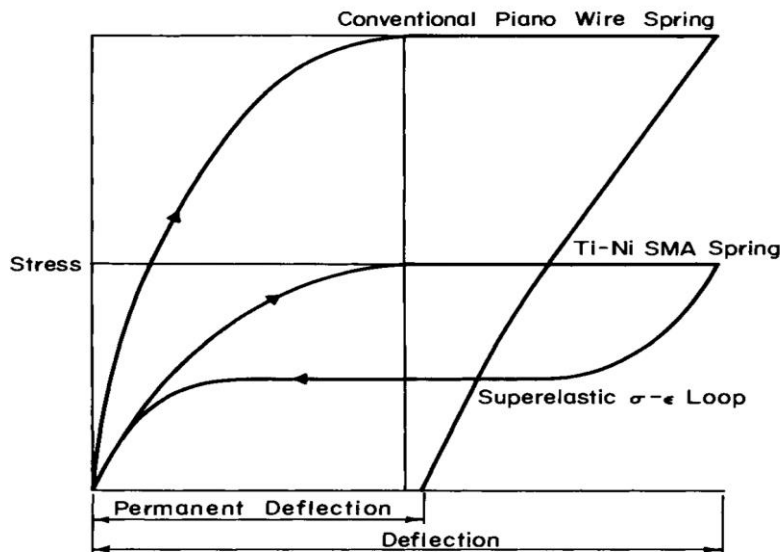


Figura 2: Gráfico tensão deformação do comportamento pseudoelástico idealizado. (ZIÓLKOWSKI, 2015)

2.3-INFLUÊNCIA DO PROCESSAMENTO NAS PROPRIEDADES FINAIS DO NITINOL

Tal como contumaz no estudo de ligas metálicas em geral, considerações em toda a trajetória de processamento do material são fatores necessariamente intrínsecos na determinação das propriedades finais do material. Aqui a menção de tais fatores engloba composição química, métodos de fabricação e tratamentos térmicos ou termomecânicos sendo a determinação destes uma função da finalidade de aplicação, considerações econômicas e de disponibilidade da tecnologia de processamento, coordenando o esforço de balanceamento das propriedades finais no contexto de que a otimização de certas propriedades desejáveis sempre terá relações antagônicas na otimização de outras.

Previsivelmente tais preocupações continuam plenamente pertinentes ao tratar-se de ligas de memória de forma, porém com ampliação do grau de complexidade já que neste caso a preocupação com tal balanço entre relações antagônicas deve expandir-se para considerar implicações nos aspectos dos efeitos de memória. Assim além de influenciar nas propriedades mecânicas do material seu processamento influi na temperatura de transformação, extensão do loop de histerese, amplitude da deformação recuperável, número de etapas de transformação de fase, participação da fase R nos efeitos de memória de forma, controle da composição química etc. Primordialmente, no entanto, o processamento do Nitinol deve assegurar as condições necessárias para que o efeito de memória de forma seja possível em primeiro lugar.

Como antes mencionado os ciclos de memória de forma devem idealmente ser isentos de deformação plástica concomitante à deformação associada a transformação de fase e ao processo de reorientação das variedades martensíticas, para que tal seja possível o material deve possuir resistência mecânica alta o suficiente para que a deformação pela transição de fases seja favorecida o suficiente para suprimir a deformação por deslizamento, portanto normalmente o material é exposto a trabalho a frio de forma a produzir um volume suficiente de discordâncias para ancorar a rede cristalina por outro lado o próprio processo de transição para a fase

martensítica está intimamente ligada a um volume e orientação adequadas de discordâncias. Assim no limite mínimo a densidade de discordâncias é ditada tanto pela necessidade de resistência mecânica quanto pela necessidade de promover o processo de escorregamento entre planos cristalográficos, por outro lado no limite superior uma densidade excessiva promove interações indesejáveis entre discordâncias já que para a nucleação da martensita é necessário que haja um alinhamento das discordâncias de forma que ocorra deslocamento não difusional (BHADESHIA, 2020).

Similarmente ao grau de encruamento, a temperatura de posteriores tratamentos térmicos é limitada entre o ganho em resistência mecânica pelo refino da granulometria pela recristalização e a aniquilação de discordâncias e reorientação delas, devido ao acréscimo de mobilidade em temperaturas mais elevadas (LEXCELLENT, 2013). Mais adiante existe é claro efeitos ligados a composição química da matriz, os parâmetros do efeito de memória de forma estão obviamente ligados à sua composição química, fato que é de especial consideração devido a reatividade do Nitinol o que pode reduzir a fração de elementos na matriz sobretudo do titânio ao reagir com o oxigênio ou carbono. Assim um fator que encarece o processamento desse material é a necessidade crítica de controlar o grau de impurezas, no caso do oxigênio processos a vácuo reduzem a formação de óxidos de titânio (embora a formação desses óxidos pode ser benéfica quanto a resistência à corrosão) já no caso do carbono a contaminação provém tipicamente do contato com o cadinho de grafita de forma que o teor deste elemento pode ser controlado por processos de fusão por indução (VAR).

2.4- POTENCIAL E APLICABILIDADE DE LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA

Ligas de memória de forma são comumente descritas de maneira sucinta pela característica que dá origem ao seu nome, a capacidade de “lembrar” sua forma após grandes deformações. No entanto, pensar em tais materiais do ponto de vista

cristalográfico, onde efetivamente estas ligas são capazes de alterar significativamente propriedades como rigidez, resistência elétrica e capacidade de dissipação de energia, de forma controlável e reversível, oferece uma melhor contemplação da variedade de aplicações potenciais disponíveis. Isto equivale a dizer que a utilidade dessas ligas não é limitada às aplicações onde o objetivo é meramente restaurar uma peça à sua geometria original, ao contrário, procura-se utilizar tais propriedades especiais na confecção de dispositivos ativos, passivos e semi-passivos, destinados a áreas diversas.

Consequentemente o interesse científico na exploração e aprimoramento de aplicações utilizando a fenomenologia associada à memória de forma, é largamente fomentado. Em 1999 o número estimado de patentes centradas na utilização de propriedades relacionadas ao fenômeno de memória de forma excedia 10.000 (MELTON, 1999). Já em 2014 estima-se que esse número tenha crescido para acima de 20.000 patentes mundialmente. (JANI et al, 2014).

Uma área natural de aplicação onde o emprego dessas ligas é bastante desejável é na atuação de superfícies de controle de veículos navais e aeronáuticos, especialmente neste último, onde a confiabilidade e redução de peso são qualidades altamente prezadas pelo setor. Um exemplo de capitalização da alta densidade de força dessas ligas pode ser observado no conceito de estruturas de geometria variável, como por exemplo, as asas de geometria variável estudadas no projeto “smart wing” da DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) que fez uso de atuadores de memória de forma na construção de asas, em escala, capazes de otimizar sua geometria relativo às circunstâncias simuladas de voo (KUDVA, 2004).

Um projeto desenvolvido pela Boing caracteriza um segundo exemplo do mesmo conceito. Dessa vez aplicado a estruturas dedicadas à redução de poluição sonora chamadas Chevron testadas numa turbina GE90-115. Neste caso a variação de geometria possibilita que a estrutura se adeque à performance aerodinâmica (atenuação do arrasto) durante o voo, ou sonora durante pousos e decolagens (HARTL, et al, 2009).

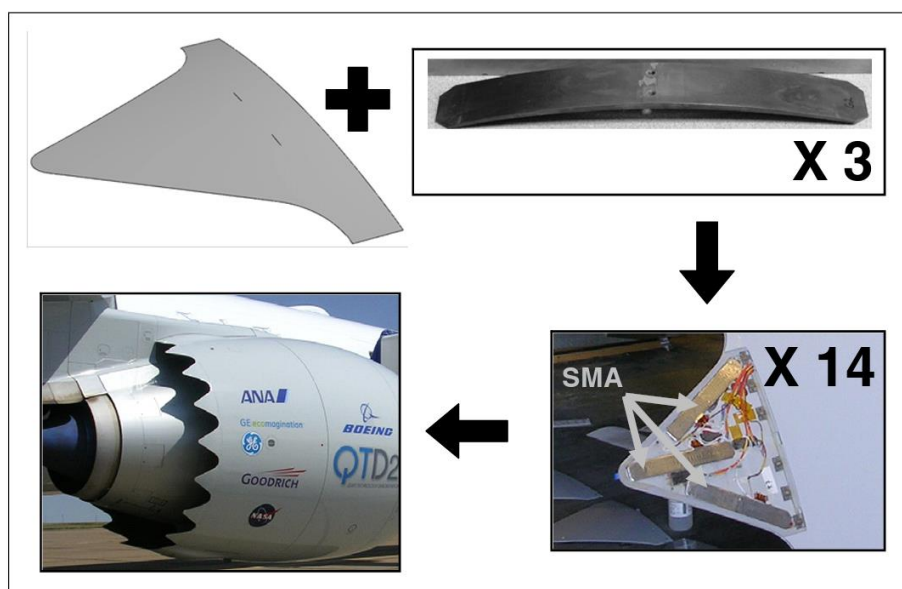


Figura 3: Chevron na turbina GE90-115 e detalhes dos atuadores. (HARTL, et al, 2009)

No âmbito aeroespacial, ligas de memória de forma podem ser usados nos mecanismos de abertura de painéis solares de veículos não tripulados. Tradicionalmente esses procedimentos são executados por métodos pirotécnicos, e portanto, empregando componentes consumíveis. A substituição desses mecanismos por mecanismos atuados por Nitinol constitui uma alternativa de maior confiabilidade, uma vez que os componentes são passíveis de testagem não destrutiva, um aspecto crucial para esse tipo de aplicação (GUZIK & BENAFAN, 2018).

Já no âmbito de estruturas civis Sakai et al (2003) estudaram o emprego de ligas de memória de forma na composição de uma estrutura com restauração de forma utilizando o efeito superelástico de fios de Nitinol embutidos no interior de uma viga de concreto. Dito estudo demonstrou experimentalmente que é possível recompor a forma estrutural da viga, após ela ter sofrido trincamento severo, através da ação de compressão exercida pelos fios de NiTi entre as partes fissuradas de forma a “fechar” a trinca. Em um estudo posterior realizado pela universidade de Houston um experimento similar ao descrito anteriormente conseguiu resultados ainda melhores

ao utilizar uma configuração com cabos trançados no lugar de fios de memória de forma e grampos especiais para prevenir o escorregamento dos cabos.

Um terceiro estudo com foco semelhante por Song (2003) promoveu um experimento propondo o conceito de “Intelligent Reinforced Concrete” (IRC) ou concreto reforçado inteligente. Consistindo em uma viga de concreto com fios de material de memória de forma integrados no sentido longitudinal da viga e em seu interior, pré-comprimindo o concreto. O conceito consiste em produzir um sistema capaz de monitorar o surgimento de trincas na viga através da alteração da resistência elétrica dos fios durante transformações induzidas por tensão, de modo a possibilitar uma ação compensadora no sentido de fechar as trincas mediante aplicação de corrente elétrica nos fios (causando transformação de fase nos mesmos devido ao calor gerado). Novamente o experimento mostrou resultados positivos uma vez que as trincas induzidas durante o teste foram quase plenamente fechadas pelo sistema interno de fios de Nitinol.



Figura 4: Viga IRC durante carregamento. (SONG, 2003)



Figura 5: Viga IRC após carregamento. (SONG, 2003)

Uma outra variedade de aplicação está relacionada a capacidade de amortecimento dos materiais de memória de forma. Tal qualidade origina-se da capacidade de dissipação de energia pelo fenômeno pseudoelástico e pela reorientação das variedades internas de martensita. Kim et al (2011) demonstraram a utilidade desse aspecto das ligas pseudoelásticas com um experimento baseado em um modelo numérico para simulação de emprego de filmes de material pseudoelástico (Nitinol), como componentes de materiais compósitos, estudando a resistência ao impacto desses compósitos propostos para impactos de baixa velocidade, incluindo na modelagem o efeito da perda de resistência progressiva em modos típicos de falha em compósitos (trincamento da matriz, esmagamento e falha das fibras). O estudo concluiu que a resistência à impacto dos compósitos com filme pseudoelástico foi notoriamente aprimorada, com o filme de Nitinol reduzindo o volume da região danificada durante o impacto e, portanto, limitando a progressão abrupta de trincas iniciadas (modo de falha comum em materiais compósitos).

Enemark e Santos (2015) conduziram um estudo investigando a atenuação de vibrações em máquinas rotativas, utilizando uma montagem com um rotor sustentado por mancais magnéticos, esses por sua vez, foram acoplados à molas de material pseudoelástico intermediando a conexão com a estrutura de suporte da montagem. Além de comprovar um coeficiente de amortecimento para as molas pseudoelásticas de até 7 vezes a do aço, o experimento concluiu que embora a temperatura atue no sentido de aumentar proporcionalmente a rigidez e inversamente o coeficiente de

amortecimento, o êxito na atenuação das vibrações está primeiramente ligado a mudança das frequências naturais do sistema em relação as respectivas velocidades de operação.

As potenciais aplicações anteriormente citadas exemplificam a versatilidade dessa classe de materiais, na prática, no entanto, grande parte das aplicações tradicionais encontra-se voltada para o setor da medicina, devido a biocompatibilidade e ao fato do corpo humano manter-se em um espectro de temperatura estreito e previsível (HUMBEECK, 1999). Exemplos de aplicações do gênero incluem: stents, fios guia, implantes ortopédicos, dentários e cardiovasculares e instrumentos de operação. Aplicações tradicionais não associadas à medicina incluem: dispositivos de acoplamento, elementos de fixação, atuadores para robótica, armações oculares e até mesmo artigos decorativos.

3-CONEXÕES FLANGEADAS

Descrita de forma generalizada, uma conexão flangeada é composta de um par de flanges (podendo ambas as peças serem idênticas ou não), um conjunto de elementos de fixação (parafusos de máquina ou estojos) e uma junta de vedação. A vedação é, portanto, obtida pelo tensionamento conjunto de tais elementos pelo torque aplicado aos elementos de fixação. Tal fato resulta que, além das considerações econômicas relacionadas ao custo deste tipo de conexão e do peso, essas conexões configuram pontos de maior suscetibilidade a vazamentos, embora essas considerações produzam a tendência a redução do número de conexões do gênero numa tubulação, a relevância de tais inconvenientes é corriqueiramente supressa pela necessidade de uma união não-permanente, por exemplo em casos onde espera-se uma tendência alta a degradação devido à corrosividade do fluido de trabalho ou do meio do ambiente de trabalho. Similarmente a capacidade de desacoplamento da conexão é desejável quando se trabalha com fluidos que tendem a produzir acúmulos nas paredes da tubulação, obstruindo o fluxo dentro dela.

Do fato de que conexões flangeadas atendem a uma grande variedade de serviços, variando em grau de severidade das condições de trabalho, surge também uma variedade de tipos de flanges e juntas disponíveis bem como dos materiais utilizados nas juntas, podendo esses serem não-metálicos, metálicos ou um conjunto de ambos.

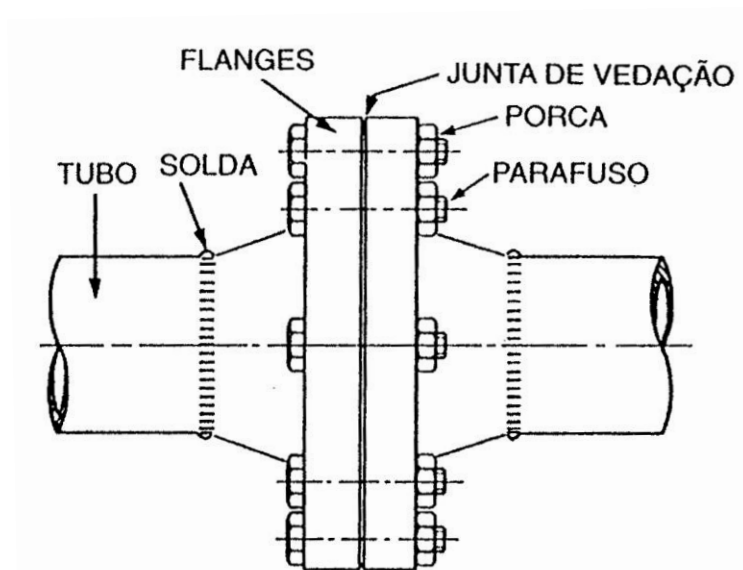


Figura 6: Esquema ilustrativo dos componentes típicos de uma união flangeada. (TELLES, 2001)

3.1- JUNTAS NÃO-METÁLICAS

Em geral juntas não-metálicas são utilizadas em aplicações comparativamente menos severas de pressão e temperatura em relação à suas contrapartes metálicas ou semimetálicas. A gama de materiais que podem ser utilizados para produção de juntas não metálicas é particularmente extensiva, porém destacam-se em relevância:

Elastômeros: a utilização de borrachas para juntas é atrativa pela razoável resistência química, baixa permeabilidade e resistência a deformações cíclicas. Podem ser utilizadas tanto borrachas naturais quanto sintéticas na confecção de juntas.

PTFE (Teflon®): devido a sua excelente resistência química é empregado para fluidos corrosivos em serviços em baixa pressão e temperatura ambiente. Suas propriedades podem ser modificadas através do uso de aditivos durante o processo de fabricação por sinterização, extrusão ou laminação.

Papelão hidráulico: o termo refere-se a nomenclatura genérica que designa uma variedade de materiais compósitos formados por diversas fibras sintéticas ou naturais e materiais de reforço com boa estabilidade térmica mescladas com elastômeros. A versatilidade dos compósitos confeccionáveis e a boa relação custo-efetiva fazem desse tipo de material um dos mais utilizados na indústria atual.

3.1.1- Acabamento superficial das juntas não-metálicas

Embora o acabamento superficial ideal varie com dependência do material da junta, de maneira generalizada, os materiais não-metálicos contrastam com os metálicos quanto a rugosidade das faces dos flanges. Enquanto para juntas metálicas o acabamento superficial deve ser liso nas juntas não-metálicas um certo grau de irregularidade da superfície é necessário, isso porque as juntas não-metálicas precisam ser “mordidas” pelos flanges de forma que não ocorra extrusão ou expulsão do material da junta para fora dos flanges durante o aperto dos mesmos. Por outro lado, a rugosidade ainda varia entre materiais devido à persistência da necessidade de se evitar vazios ou canais entre a junta e as faces dos flanges. Na prática embora uma superfície áspera possa ser produzida pelo próprio processo de fabricação ranhuras são propositalmente usinadas no material, essas ranhuras podem ser em círculos concêntricos (ranhurado concêntrico) ou na forma de uma espiral contínua (espiral fonográfica), embora a primeira seja menos suscetível a vazamentos. A rugosidade destes acabamentos deve estar no limite entre 3.2 e 6.3 micrômetros.

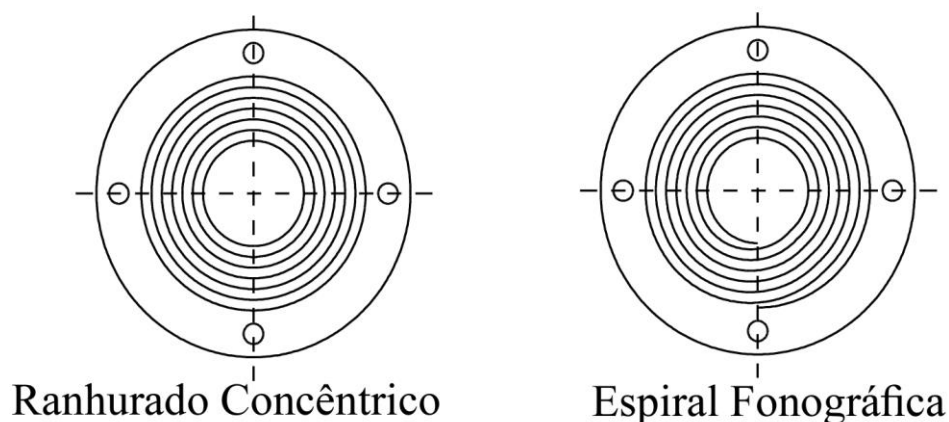


Figura 7: Ilustração dos perfis superficiais ranhurado concêntrico e espiral fonográfica. (VEIGA, 2014)

3.2- JUNTAS METÁLICAS

Para aplicações em alta pressão e/ou temperatura pode ser necessário o uso de juntas metálicas. Por um lado, o uso de metais como material da junta confere uma resistência mecânica mais elevada a junta e com escolha adequada de material é possível confeccionar juntas com alta resistência química e resistência a fluência. Por outro lado, a baixa maleabilidade dos metais demanda que a superfície dos flanges seja adequadamente polida, trata-se não só da rugosidade em si, mas também da rejeição de peças com superfícies riscadas, já que heterogeneidades do tipo dificilmente serão preenchidas pelo escoamento do metal durante o esmagamento da junta. Uma segunda generalização que é particularmente importante no contexto de juntas metálicas é o requisito de que o material da junta deve ser mais macio que o material do flange, ou a junta causaria deformação plástica excessiva nos flanges e consequente falha do selo. Essa diferença de dureza é primordialmente obtida pela seleção apropriada dos materiais do flange e juntas, mas pode ser concomitantemente induzida por tratamentos térmicos também.

Embora encontre-se uma variedade significativa de juntas metálicas, em geral, estas podem ser basicamente enquadradas em duas categorias principais: as juntas metálicas planas e as juntas de anel.

3.2.1-Juntas planas

Como o nome sugere, são juntas maciças em formato de disco plano. Devido a sua geometria e superfície de contato com os flanges a pressão necessária para o escoamento desse tipo de junta é mais elevado do que aquelas encontradas em juntas em anel ou juntas maciças corrugadas. Portanto só são aplicáveis em condições em que os parafusos ou estojos possam prover uma força suficiente para conformar esse tipo de junta. São favorecidas em situações em que não se exija alta compressibilidade para compensar desalinhamentos, empenamentos e irregularidades superficiais, e normalmente utilizadas em flanges com ressaltos, de ranhuras ou de linguetas.

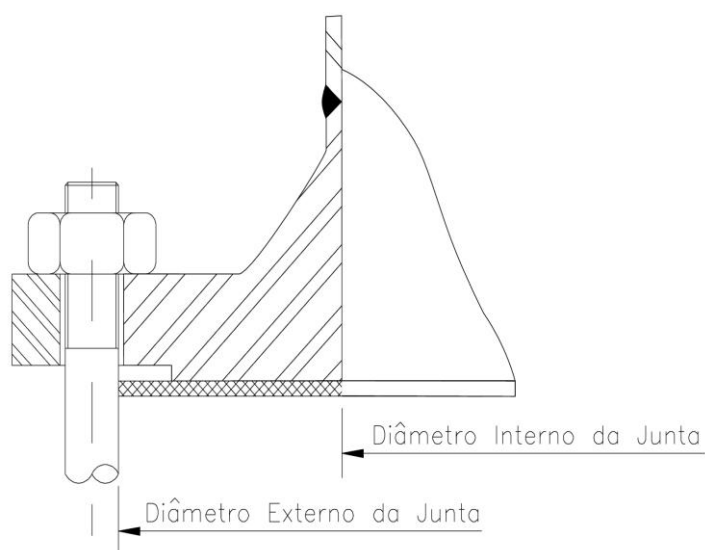


Figura 8: Junta metálica plana. (VEIGA, 2014)

3.2.2-Juntas planas ranhuradas

Se assemelham às juntas planas anteriormente mencionadas, porém com uma geometria disposta em círculos concêntricos (com a secção radial dando a impressão de um perfil serrilhado), reduzindo a área de contato com os flanges e tornando a junta mais fácil de vedar. Devido a isto são utilizadas onde exista a necessidade de adoção de uma junta metálica, mas a força disponível para esmagamento da junta é limitada (inferior à necessária para vedar uma junta plana comum).

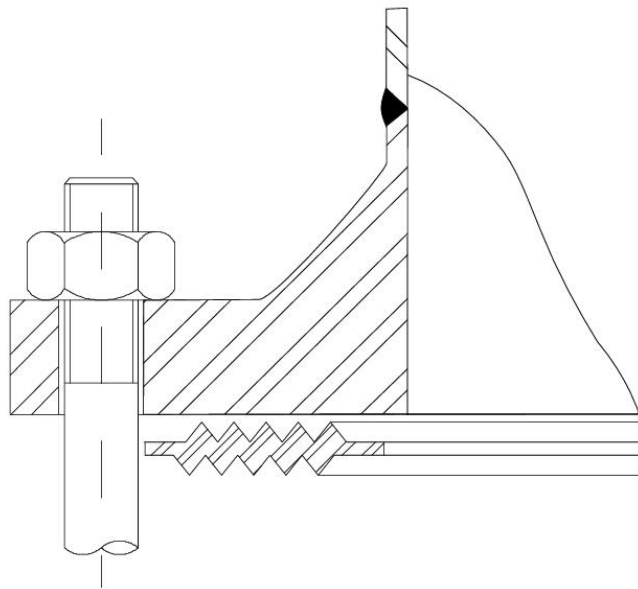


Figura 9: Junta metálica ranhurada. (VEIGA, 2014)

3.2.3-Juntas corrugadas

são utilizadas onde há necessidade de uma junta metálica, porém em serviços de pressão relativamente baixa onde em adicionalmente exista a necessidade de redução de peso e espaço disponível. Similarmente as juntas ranhuradas a geometria dessas

juntas assume uma disposição em círculos concêntricos, porém o perfil da seção radial tem um aspecto ondulado ao invés de “serrilhado”, essa configuração presta-se ainda mais ao esmagamento devido a menor área de contato e a própria geometria com espessura reduzida. Um mínimo de três corrugações é necessário para a vedação adequada com o passo entre corrugações geralmente entre 1.1 mm e 6.4 mm e a espessura total seguindo uma relação aproximada de 40% a 50% do passo.

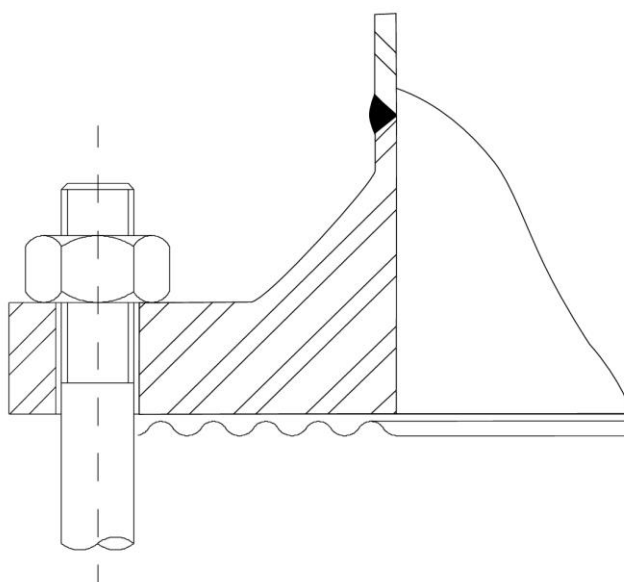


Figura 10: Junta metálica corrugada. (VEIGA, 2014)

3.2.4-Juntas de anel metálico

São juntas maciças em formato anelar, normalmente possuem seção de perfil oval ou octogonal, sendo a última associadas a um melhor desempenho, porém normalmente requerem cargas mais elevadas para vedação. Esses elementos devem ser montados em juntas específicas dotadas de ranhuras de perfil trapezoidal em ambas as faces de forma que durante o processo de esmagamento da junta ocorra uma ação de cunha ao deformar o material, simultaneamente, a pressão do fluido de trabalho durante operação tende a comprimir a junta, no sentido radial, contra a parede mais externa da ranhura de vedação, acrescentando ao efeito de vedação em condições adequadas de operação., tal arranjo confere a esse tipo de junta alta confiabilidade

para aplicações críticas, motivo pelo qual são largamente aplicadas na indústria petroquímica, por exemplo em conexões das “árvores de natal” . A desvantagem é de que o projeto e processamento (usinagem e acabamento) devem ser estritos para garantir tolerâncias adequadas, assim a usinagem destes anéis metálicos deve estar em conformidade com a padronização estabelecida pelo American Petroleum Institute, API 6A e 17D, ou pelo American Society of Mechanical Engineers ASME B16.20. Tal como todas as juntas metálicas a dureza da junta deve ser estritamente menor que a dos flanges, no caso das juntas em anel, sugere-se uma diferença mínima de 30 Brinell.

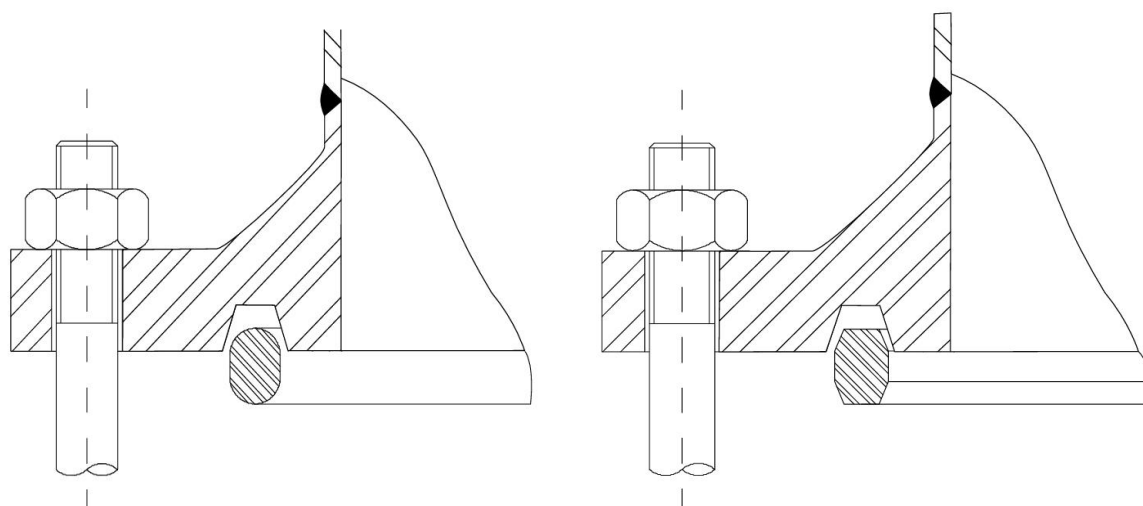


Figura 11: Juntas de anel metálico. À esquerda anel oval, à direita, anel octogonal. (VEIGA, 2014)

3.3- ELEMENTOS DE FIXAÇÃO

Como explanado anteriormente, conexões flangeadas são mantidas vedadas por meio de tensionamento entre os flanges e junta. Embora dispositivos extras possam ser empregados em casos específicos para auxiliar a integridade da vedação, esse tensionamento é primordialmente exercido por um conjunto de parafusos de máquina ou estojos montados em padrão circular em torno dos eixos dos flanges a serem ligados.

Importa mencionar que embora o uso destes elementos configura uma união não-permanente, tanto os parafusos de máquina quanto os estojos não devem ser

reutilizados na montagem subsequente devido ao fato de que espera-se que estes elementos sofram deformação considerável durante montagem e serviço, efetivamente inutilizando-os após desmontagem.

3.3.1-Parafusos de máquina

Parafusos de máquina são parafusos de cabeça integral sextavada ou quadrada cuja região rosqueada nunca compreende toda a extensão do corpo. Em relação aos estojos, estes elementos de fixação têm seu uso limitado a aplicações menos exigentes, na prática sendo utilizados majoritariamente para flanges de ferro fundido ou ocasionalmente para flanges de aço de classe até 150.

3.3.2-Estojos

Estojos por outro lado são elementos cilíndricos com as extremidades rosqueadas ou com corpo inteiramente rosqueado, sendo o aperto mantido por porcas e contraporcas independentes. Estes são os elementos empregados em montagens de conexões para serviços mais estridentes. Nos parafusos de máquina a região entre a cabeça e o corpo do elemento configuram uma região de concentração de tensões durante o aperto, limitando o torque máximo permissível. Assim, os estojos permitem uma carga superior de aperto já que o elemento onde o torque de aperto é aplicado (roscas) é distinto do estojo propriamente dito

3.4- FORÇAS EM CONEXÕES FLANGEADAS

A correta análise para o ato de projeto e seleção de materiais das uniões flangeadas deve, naturalmente, considerar o estado de tensionamento da montagem, assim convencionou-se distinguir as forças atuantes na conexão como:

- Força radial
- Força de separação
- Força dos elementos de fixação
- Força de vedação

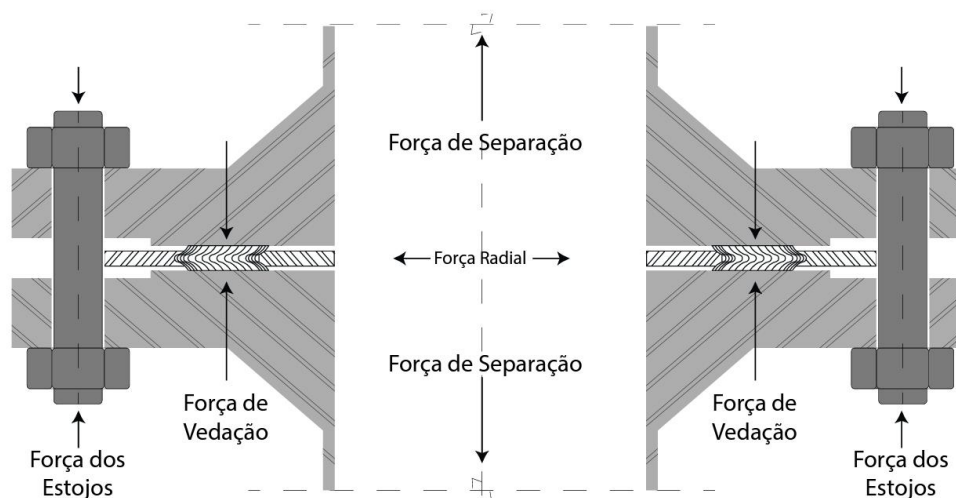


Figura 12: Diagrama esquemático das forças atuantes numa união flangeada (VEIGA, 2014).

Observa-se que o estado de tensão da conexão é originário tanto das condições de serviço quanto das de montagem. A pressão interna causada pelo fluxo do fluido causa as forças radial e de separação, a primeira tende a “expulsar” a junta radialmente embora para certos tipos de juntas essa componente da pressão do fluido tende também a contribuir com a vedação. Já a força de separação refere-se à componente da pressão que age no sentido de separar as faces dos flanges.

A força dos elementos de fixação depende do torque aplicado aos parafusos ou estojos, esse aperto inicial além de contrapor e superar a força de separação deve também ser suficiente para deformar plasticamente a junta o suficientemente para conformá-la às faces dos flanges de forma a vedar a junta e por último a magnitude do torque inicial deve ser compensar a perda esperada da força dos parafusos/estojos devido a ação de ciclos térmicos e deformação dos elementos da conexão.

A força de vedação refere-se a força atuando no sentido de compressão da junta, inicialmente correspondendo a magnitude da força dos elementos de fixação e, posteriormente à pressurização da tubulação, correspondendo a força dos elementos de fixação subtraída pela força de separação.

3.5-COMPRESSIBILIDADE, RECUPERAÇÃO E RELAXAMENTO

Antes de prosseguir com a discussão experimental, cabe aqui discutir algumas propriedades de importância que qualificam o desempenho de materiais de vedação.

A compressibilidade de um material está relacionada, como o nome sugere, à propensão do material a sofrer compressão, no contexto de elementos de vedação boa compressibilidade indica que o material pode ser comprimido até o ponto de vedação com uma carga razoável, como este parâmetro está associado a rigidez do material geralmente maior compressibilidade está relacionada a melhor capacidade de conformação com a interface de vedação.

Recuperação por outro lado pode ser entendido como a capacidade do material de recuperar elasticamente a deformação, esta propriedade é importante porque o estado de tensões e deformações não é plenamente estático ao longo da vida útil da junta devido a variações de pressão e temperatura ao longo dos ciclos de serviço. Um material com boa capacidade de recuperação é mais apto a compensar essas variações, tendo maior tendência a manter o contato na interface de vedação.

Por ultimo, relaxamento está ligado as variações descritas anteriormente. Ciclos de temperatura e/ou carregamento podem fazer com que os componentes da conexão deformem após a montagem, propiciando a possibilidade de vazamento, o fenômeno de fluência é um dos pontos de maior preocupação e dificuldade de projeto de juntas no contexto de relaxamento. O termo fluência denota a ocorrência de deformação plástica abaixo do limite macroscópico de escoamento. Diferentes mecanismos estão associados a esse fenômeno mas em geral o risco de fluência escala com o aumento de temperatura já que em temperaturas mais elevadas a coesão nos contornos de grão é mais fraca, promovendo o risco de deslizamento. Ao mesmo tempo a maior mobilidade atômica e densidade de vacâncias facilita a deformação por difusão assistida.

Além do fenômeno de fluência, o relaxamento pode ser causado por reações químicas alterando as propriedades mecânicas do material de vedação e por diferenças na dilatação e contração dos materiais dos componentes da conexão devido a diferentes coeficientes de expansão térmica e gradiente de temperatura.

4- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o experimento numérico a metodologia adotada baseou-se na análise comparativa do comportamento compressivo de uma junta flangeada quando substituindo o material do anel metálico por uma liga NiTi superelástica. O flange adotado segue o dimensionamento da norma API specification 6A de 4 1/16" em aço inox AISI 304 com o correspondente anel de vedação (BX-155) em AISI 316 como padrão de comparação com o material superelástico.

Importa esclarecer que a norma em questão admite o uso de flanges com e sem faces ressaltadas para ambas as faces. No presente trabalho optou-se por utilizar faces planas em ambos os flanges para o par na conexão, em geral juntas destinadas a serviços com pressão nominal mais elevadas adotam faces com ressalto. Como a tensão de compressão é exercida pelos estojos espera-se que a menor área de contato centrada na região no entorno do anel de vedação corresponda a transferência de tensão com um gradiente focado na vizinhança do anel de vedação. Flanges com faces sem ressalto por outro lado apresentam melhor resistência a deformação por conta de maiores momentos de inercia. Aqui a preferência dada aos flanges sem ressalto é motivada pelo fato de que a tensão de compressão foi exercida por deslocamento do flange superior em relação e em direção ao flange inferior, como o módulo de elasticidade dos materiais adotados apresenta magnitudes significativamente diferentes optou-se pela geometria de maior rigidez de forma que a diferença de deformação dos flanges nos dois casos tivesse menor influência na

comparação, conseqüentemente priorizando a interação entre o anel metálico e a vizinhança da interface de contato.

4.1- Caracterização do modelo numérico

4.1.1- Geometria

Quanto a descrição do modelo numérico utilizado, todo o experimento foi executado dentro do módulo “static structural” do Software Ansys workbench. Como mencionado anteriormente a geometria adotada corresponde a especificação API 6A para um flange de 4 1/16”.

Na montagem final os estojos foram suprimidos inteiramente já que optou-se pela compressão por deslocamento até o limite de contato entre faces. Uma segunda simplificação foi possível devido a simetria radial do conjunto, assim a simulação foi executada para $\frac{1}{2}$ do conjunto, esta segunda simplificação foi aplicada puramente para diminuir a carga computacional embora a omissão dos estojos implique numa simplificação adicional do ponto de vista computacional. O conjunto montado e sua versão simplificada podem ser vistos nas imagens abaixo:

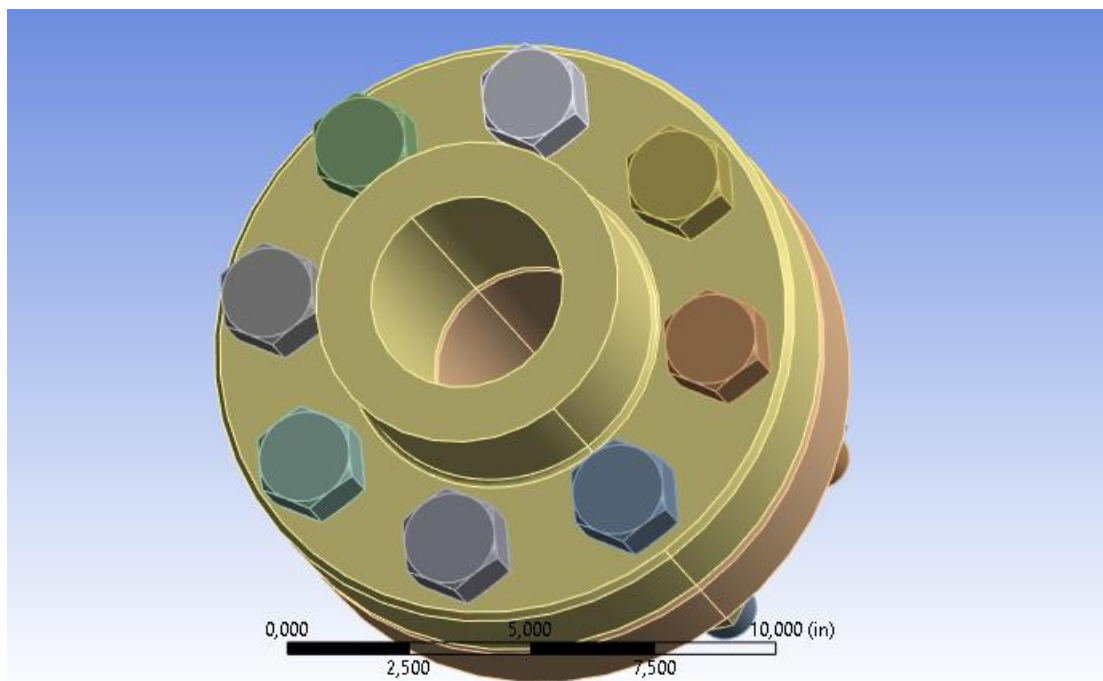


Figura 13: conjunto da conexão flangeada montado

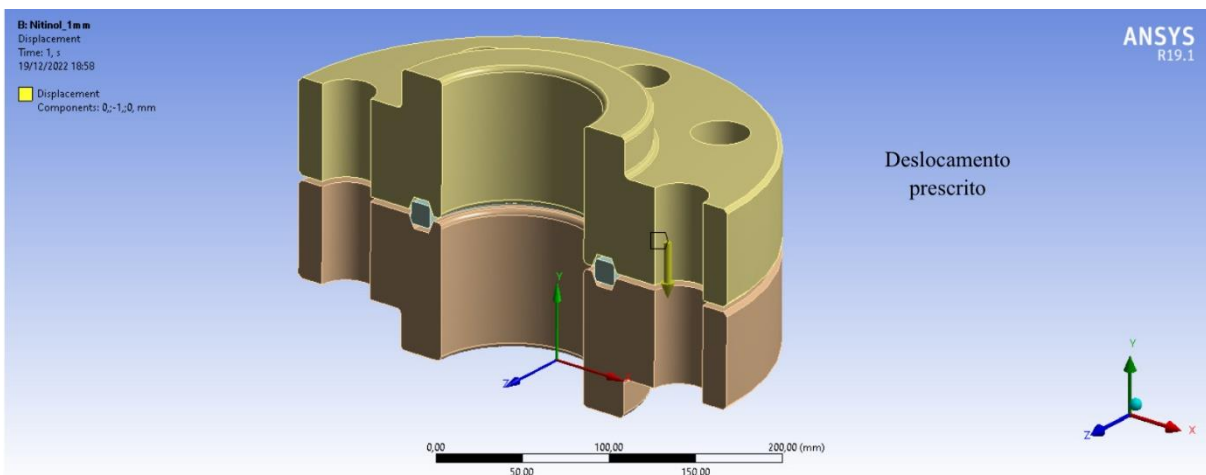


Figura 14: conjunto montado utilizado nas simulações

4.1.2- Malhas

Para a geração das malhas foram utilizados dois tipos de elementos inclusos na biblioteca padrão do ansys. O primeiro, designado para a composição das malhas dos

flanges, foi o solid 187 de 6 mm com morfologia tetraédrica e composto por 10 nós. A adequação deste elemento em particular se dá pelo fato de que a morfologia tetraédrica é mais adequada a composição de malhas de sólidos cuja geometria dificulta a subdivisão regular.

Adicionalmente a melhor adaptabilidade dessa morfologia para malhas irregulares possibilita a transição menos abrupta entre elementos similares porém de tamanhos diferentes em uma mesma geometria sem a necessidade da criação de subdivisões no volume, este ponto é relevante porque na interface de contato entre o anel de vedação e os canais de acoplamento nos flanges é necessário uma densidade maior de elementos (elementos menores) já que espera-se interações mais intensas nessa região, por outro lado poupa-se recursos computacionais mantendo o tamanho nominal de elementos para o resto do volume dos flanges.

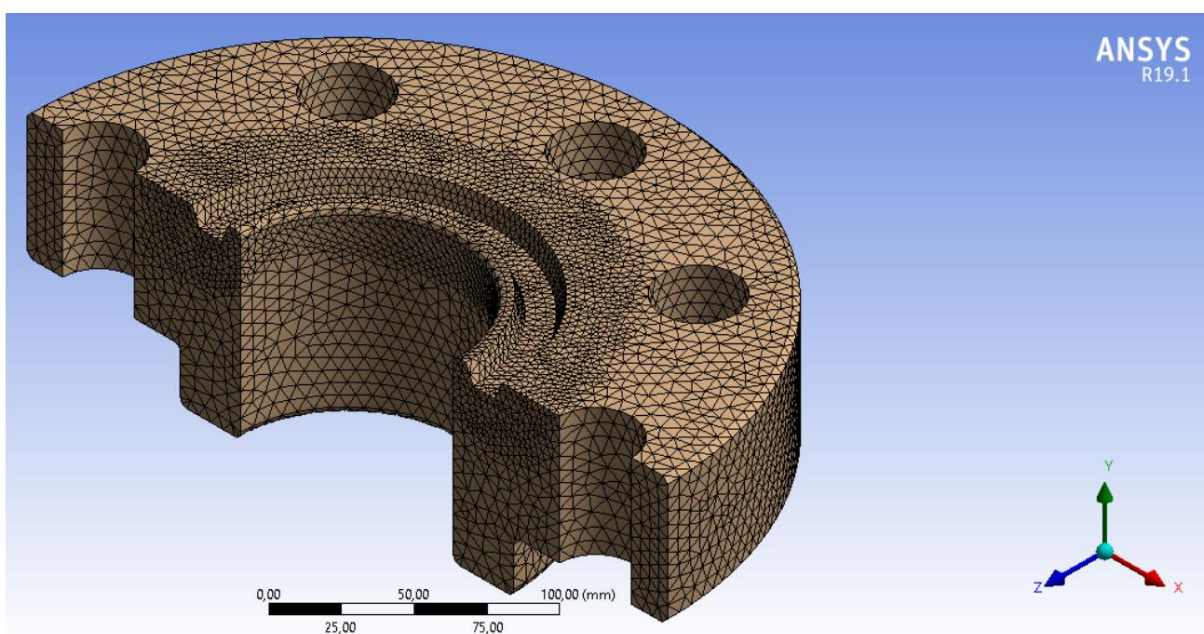


Figura 15: malha gerada para os flanges (6mm)

O segundo elemento de malha, designado para ambos os anéis de vedação foi o solid 186 de 3 mm com morfologia hexaédrica e 20 nós. Este tipo de sólido é menos tolerante de irregularidades e descontinuidades na geometria da malha, mas quando

aplicável resulta numa malha altamente simétrica com boa densidade de nós. Neste caso a adequação deste tipo de elemento se dá pela simetria radial do próprio volume modelado (anel). Adicionalmente o volume de graus de liberdade do elemento permite deformações largas e simulação do efeito superelástico.

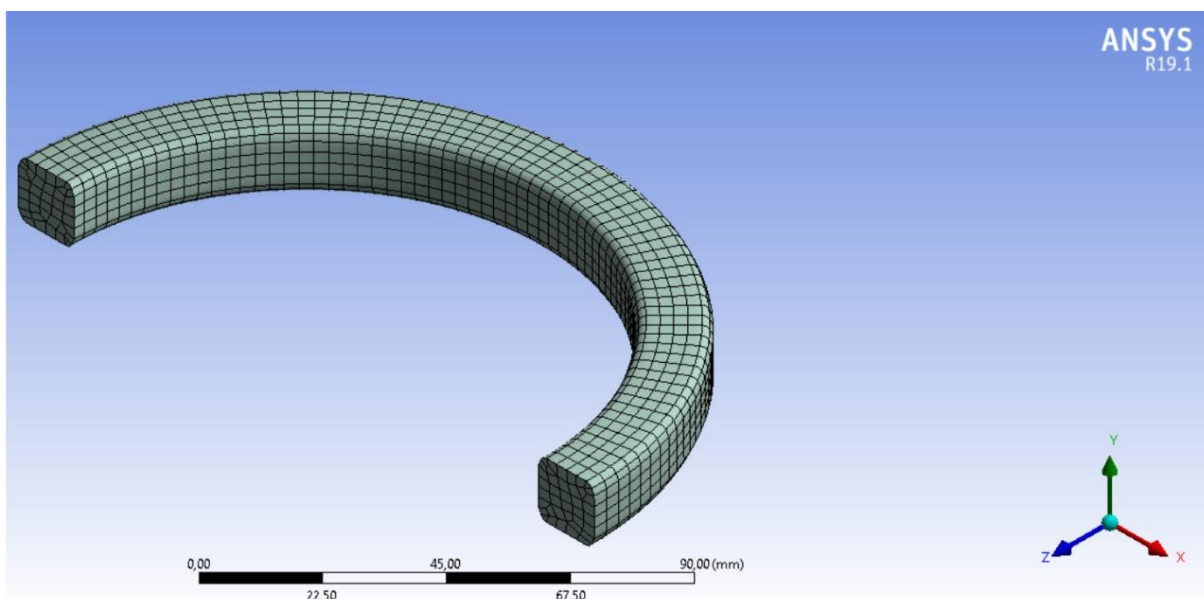


Figura 16: Malha gerada para o anel (3mm)

Ambos os elementos citados são classificados como elementos tridimensionais de ordem superior e comportamento de deslocamento quadrático. Comparado à elementos lineares, a introdução de nós nos pontos médios de cada aresta em adição aos nós nos vértices apresenta custo computacional mais elevado mas apresentam um grau de confiabilidade notoriamente maior do que o método de interpolação por pontos de integração dos elementos lineares. Notoriamente esse arranjo elimina a diferença significativa de desempenho entre elementos hexaédricos e tetraédricos enquanto simultaneamente conserva as vantagens atreladas a morfologia citadas anteriormente.

4.1.3- Contatos

Numa junta flangeada típica a “fixação” do anel de vedação é exercida meramente pela constrição do anel metálico nos canais dos flanges mediante o tensionamento compressivo dos flanges. Devido à natureza de como o selo entre as interfaces depende da deformação do anel enquanto este é esmagado, o tipo de contato mais adequado para a modelagem numérica é o contato do tipo friccional ($\mu = 0,4$), o qual é definido pela liberdade de separação entre superfícies e de deslizamento com atrito porém mantendo a restrição apenas no sentido de penetração entre superfícies.

Quanto a designação da superfície “contato” e a superfície “alvo”, a prática tradicional é designar a superfície “contato” para a malha de maior densidade de elementos (menor tamanho de elementos) salvo em circunstâncias específicas de considerações geométricas. O motivo para tal é que a detecção de penetração entre superfícies ocorre quando os nós do corpo de contato interceptam a outra superfície vinculada (alvo) de forma que malhas com baixa densidade de nós ou com geometrias ovais no ponto de contato podem detectar a penetração com atraso significativo do momento de real penetração.

Observa-se que o lado designado como contato no modelo é a superfície anelar do canal dos flanges. Embora o tamanho de elemento nominal dos flanges seja maior que o tamanho nominal no anel de vedação, aqui a escolha de contato alvo é justificada pelo fato de que a malha do flange foi otimizada na vizinhança da interface de contato, de forma que a densidade local de nós é maior no lado do flange.

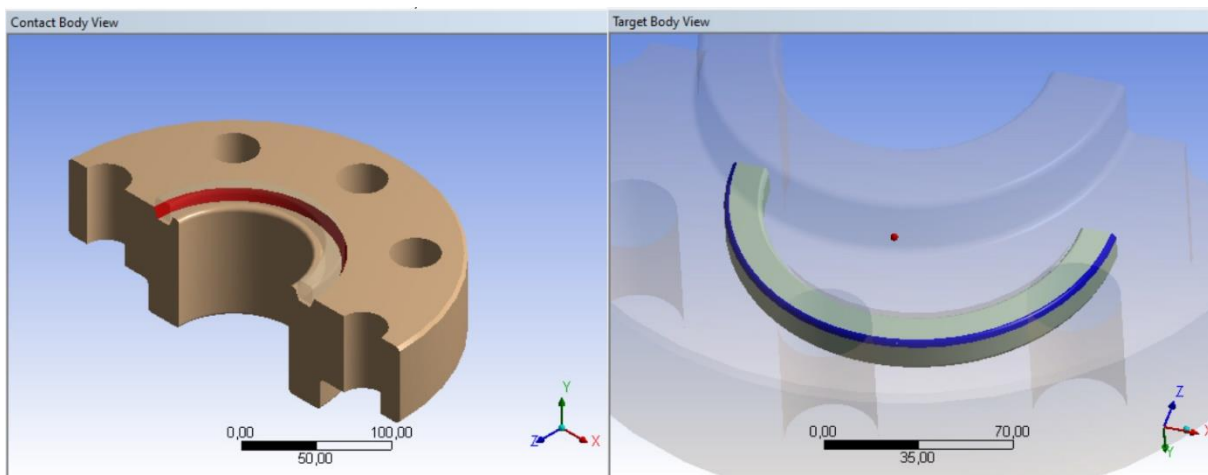


Figura 17: Contatos entre anel e flange superior

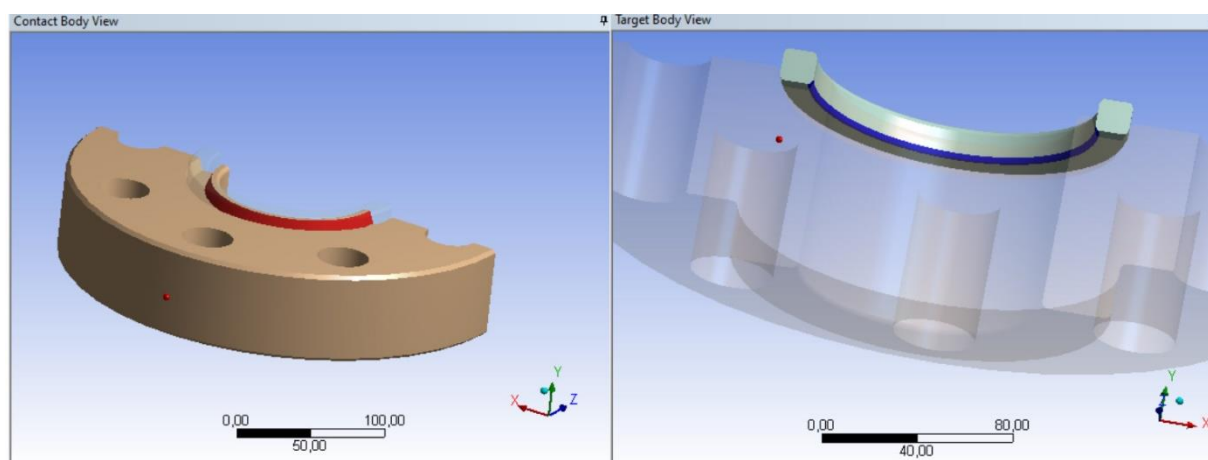


Figura 18: Contatos entre anel e flange inferior

4.1.4-Entrada de propriedades dos materiais

Quanto às propriedades associadas dos materiais empregados, todos os materiais foram modelados com endurecimento bilinear isotrópico. Para o aço inox AISI 304 foi adotado o modelo incluído na biblioteca padrão do Ansys. As propriedades de módulo elástico e módulo tangente necessários a modelagem de plasticidade por

endurecimento isotrópico linear do aço inox AISI 316 foram extraídos da curva tensão deformação da figura 19, utilizando o programa Origin para transcrever os dados da figura para um gráfico de escala com equivalência 1:1 com a imagem de forma a possibilitar a leitura precisa das coordenadas de interesse para determinação do modulo tangente (expresso como a inclinação da curva no regime plástico).

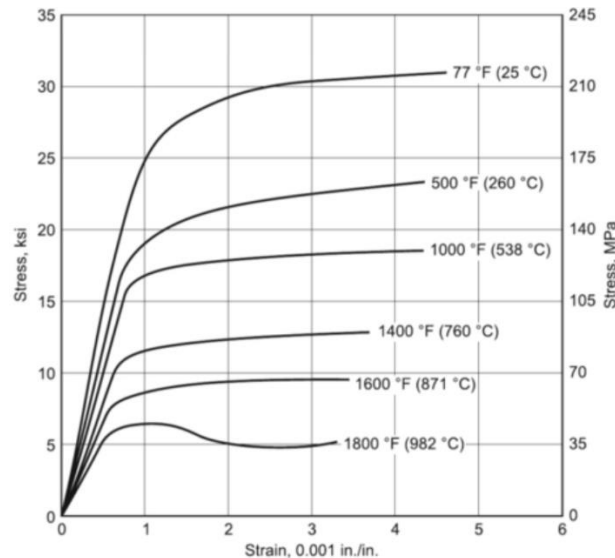


Figura 19: Curva tensão x deformação do aço AISI 316, (T.W. Gibbs, 1961)

Finalmente, para a modelagem dos parâmetros do Nitinol e seu efeito pseudoelástico associado, os dados correspondentes foram extraídos de ensaios empíricos com o Nitinol em estado austenítico, obtendo-se a curva do ciclo pseudoelástico e a curva tensão deformação até ruptura.

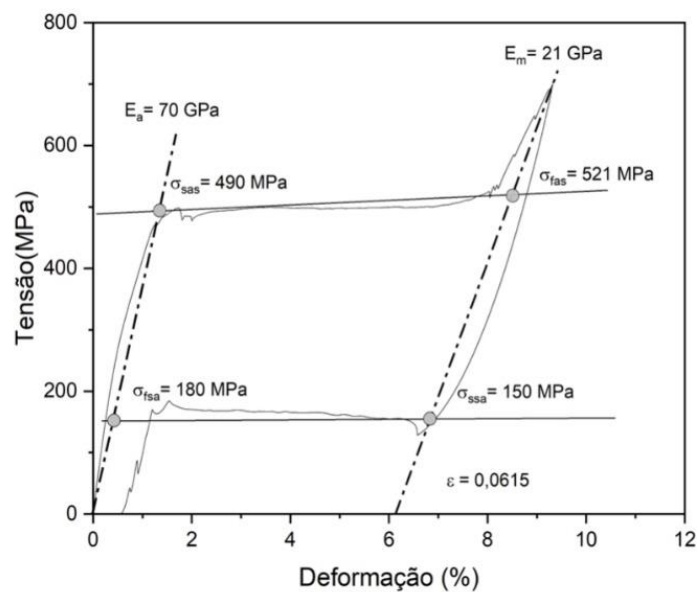


Figura 20: Curva experimental do loop superelástico

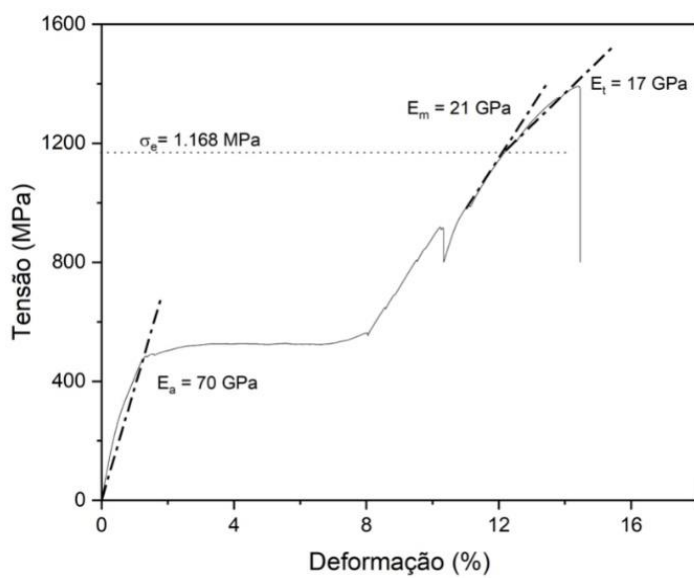


Figura 21: Ensaio de tração experimental até ruptura

Uma curva aproximada do ciclo superelástico foi gerada através da entrada desses dados, a diferença observada entre a curva experimental e teórica foi atribuída a simplificações do modelo bilinear, ao erro por deslizamento durante os ensaios experimentais e ao fato de que a curva produzida pela entrada de dados no Ansys imita um material treinado, isto é, a deformação residual é mínima.

Adicionalmente, a modelagem do material superelástico no ansys exige a designação dos parâmetros ε e α , para os quais foram adotados os valores de 0,07 e 0,0 respectivamente. O parâmetro ε refere-se a deformação residual máxima associada à tensões residuais no material, enquanto o parâmetro α é um coeficiente que escala a diferença entre os comportamentos compressivo e trativo.

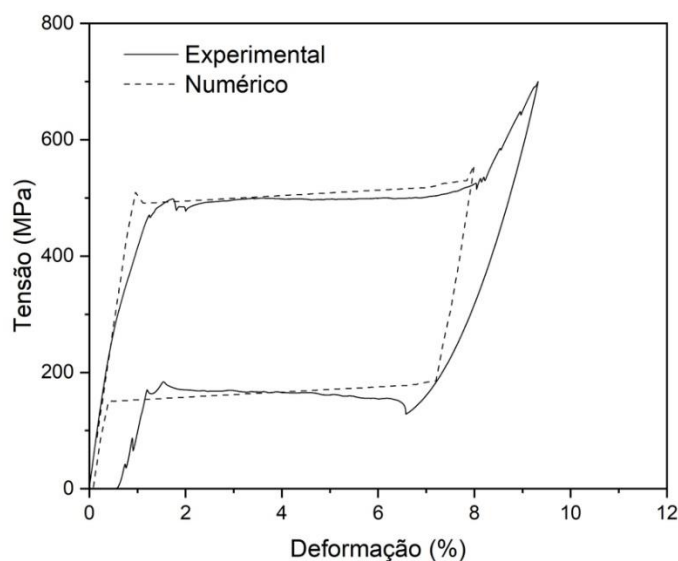


Figura 22: Sobreposição da curva teórica e experimental

Tabela 1 - Dados extraídos da curva experimental

σ_f^{SA}	σ_s^{AS}	σ_f^{AS}	σ_s^{SA}
150 MPa	490 MPa	520 MPa	180 MPa

Tabela 2 - Descrição de dados do material

Parâmetro	Nomenclatura no Ansys	Descrição
σ_s^{AS}	Sigma SAS	Tensão inicial para transformação progredindo para a fase martensítica
σ_f^{AS}	Sigma FAS	Tensão final para transformação para a fase martensítica
σ_s^{SA}	Sigma SSA	Tensão inicial para transformação progredindo para a fase austenítica
σ_f^{SA}	Sigma FSA	Tensão final para transformação para a fase austenítica
ε_l	Epsilon	Deformação residual máxima
α	Alpha	Parâmetro que mensura a diferença da resposta do material em compressão e tração

5-RESULTADOS

Primeiramente, reitera-se que o deslocamento até o ponto de contato entre faces é puramente hipotético. Em casos reais, flanges com juntas de anel metálico são projetadas para apresentar uma pequena distância entre faces mesmo após o término de todos os procedimentos de montagem, todavia a análise do comportamento compressivo em função puramente do deslocamento, provê uma utilidade interessante do ponto de vista de um estudo comparativo qualitativo, no sentido de que um critério

basicamente idêntico é aplicado a ambos os objetos de análise e diferenças de performance são evidenciadas por meio reativo. Do contrário, como materiais de memória de forma ainda não são especificamente adereçados nos procedimentos previstos na literatura normativa e porque seu comportamento de deformação é por natureza não linear devida a capacidade de transição de fase induzida ou assistida por tensão ou mesmo pela variabilidade das propriedades mecânicas também em relação a temperatura (efeito de memória de forma) uma análise a rigor seria melhor servida de procedimentos de carga específicos e distintos segundo as propriedades variáveis do material. Portanto o intuito de tal procedimento é avaliar tendencias associadas ao desempenho de materiais superelástico no contexto de serviços em pressões elevadas já que as propriedades especiais desse tipo de material oferecem o potencial de aprimorar o desempenho de elementos de vedação metálicos pela mitigação de diferentes problemas associados a tais elementos (como será discutido ao longo desta análise)

De fato, ao submeter-se as juntas as mesmas magnitudes de deslocamento ou carga de fechamento ao longo de intervalos discretos, alguns padrões persistentes são evidenciados:

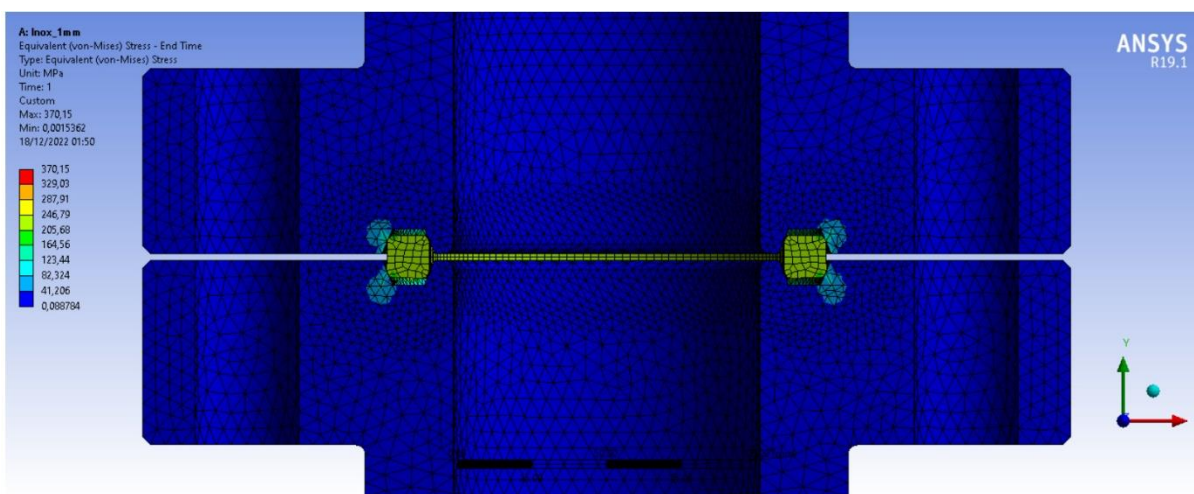


Figura 23: Gradiente de tensões com anel em Inox para carga de 123 kN

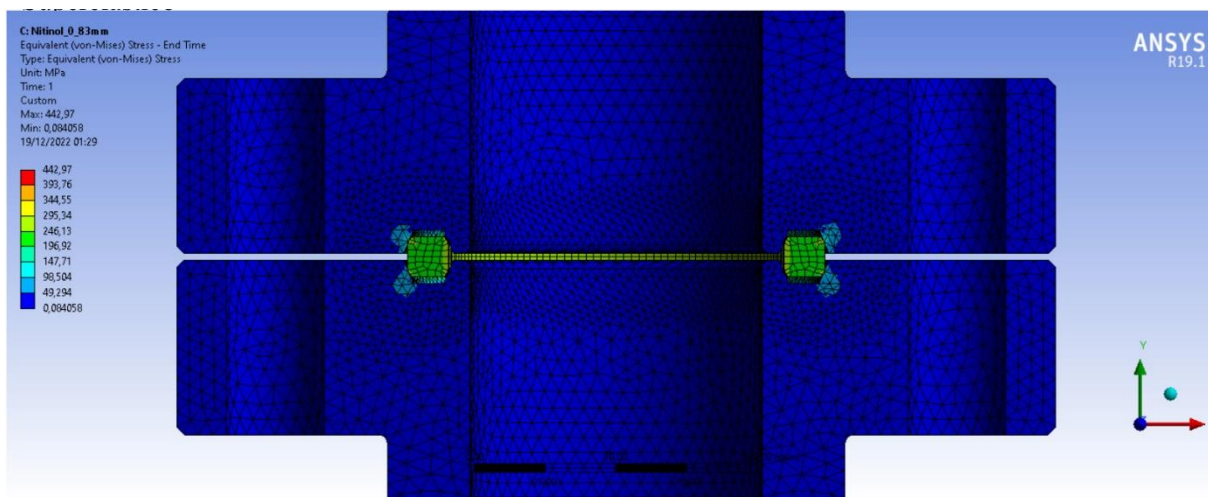


Figura 24: Gradiente de tensões com anel em aço NiTi para carga de 123 kN

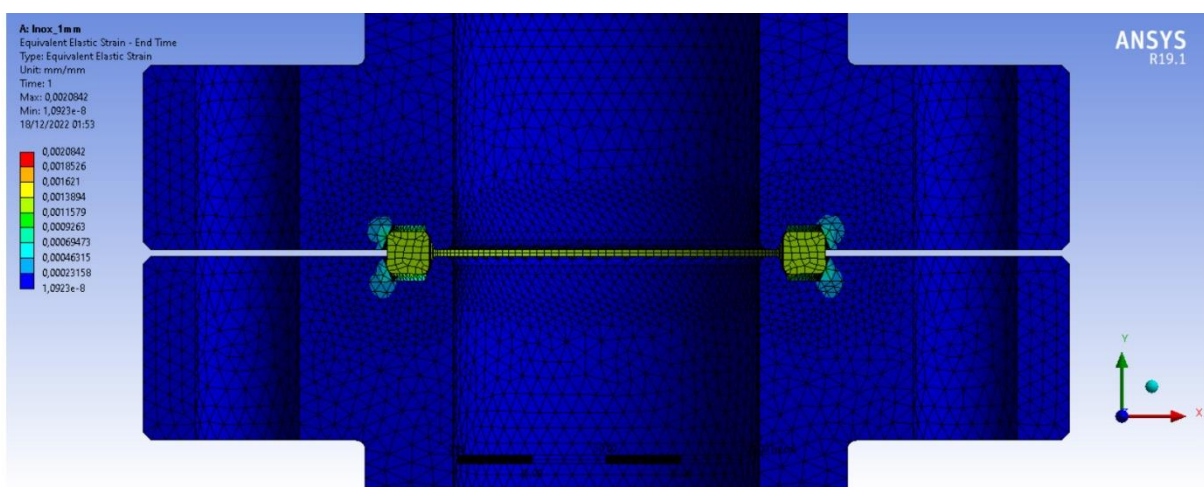


Figura 25: Deformação com anel em IncoX para carga de 123 kN

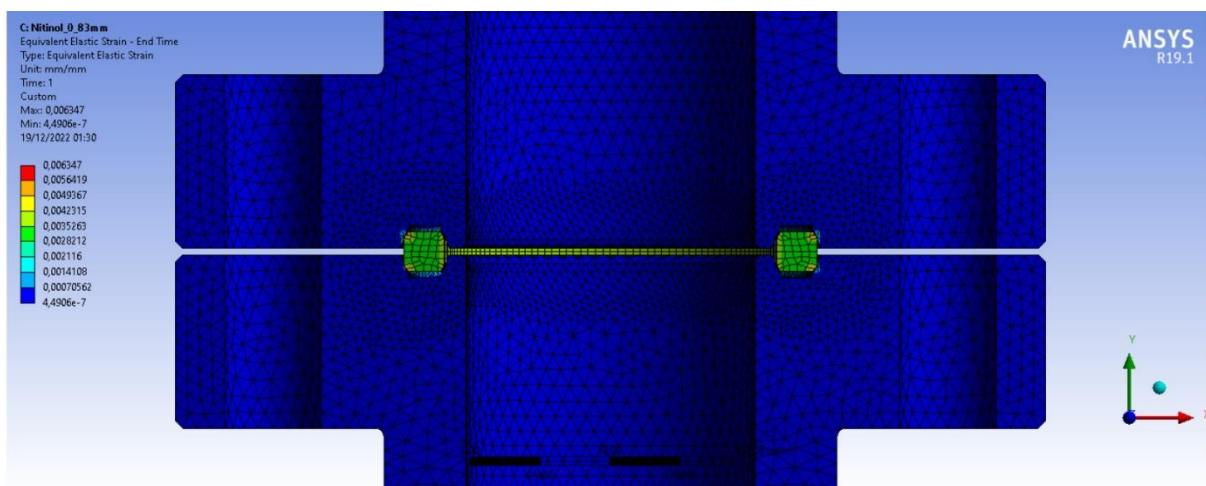


Figura 26: Deformação com anel em NiTi para carga de 123 kN

As figuras 23 a 26, demonstram os gradientes de tensão e deformação para os dois materiais, o valor da carga de fechamento de 123 kN foi obtido pela medição da força de reação resultante em relação ao deslocamento. Naturalmente para uma mesma carga de fechamento os deslocamentos correspondentes são diferentes por conta das diferenças de compressibilidade entre os dois materiais, no entanto, mesmo nesse primeiro momento é possível observar uma diferença clara no grau de deformação associado.

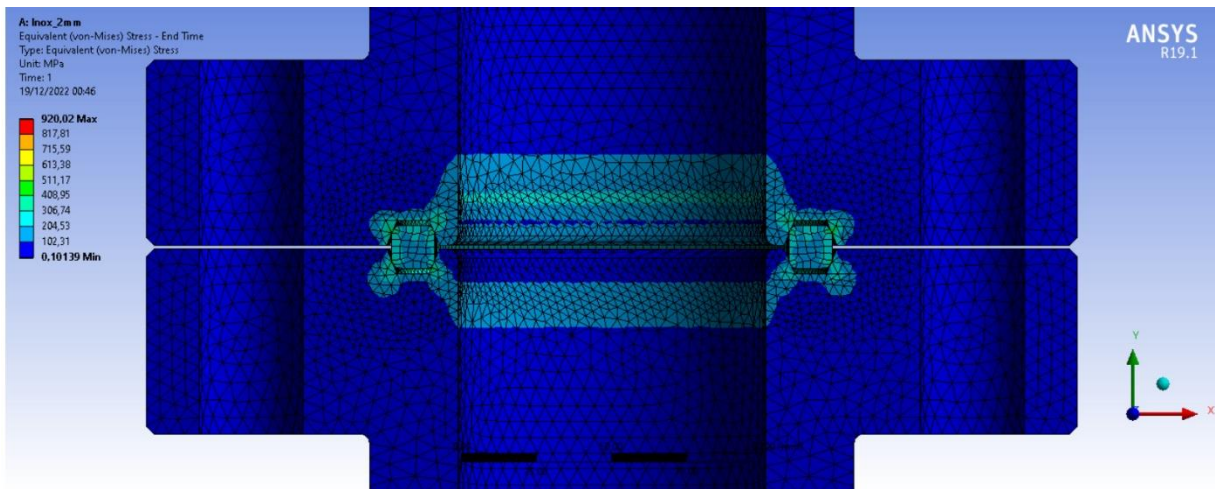


Figura 27: Gradiente de tensões com anel em Inox para carga de 543 kN

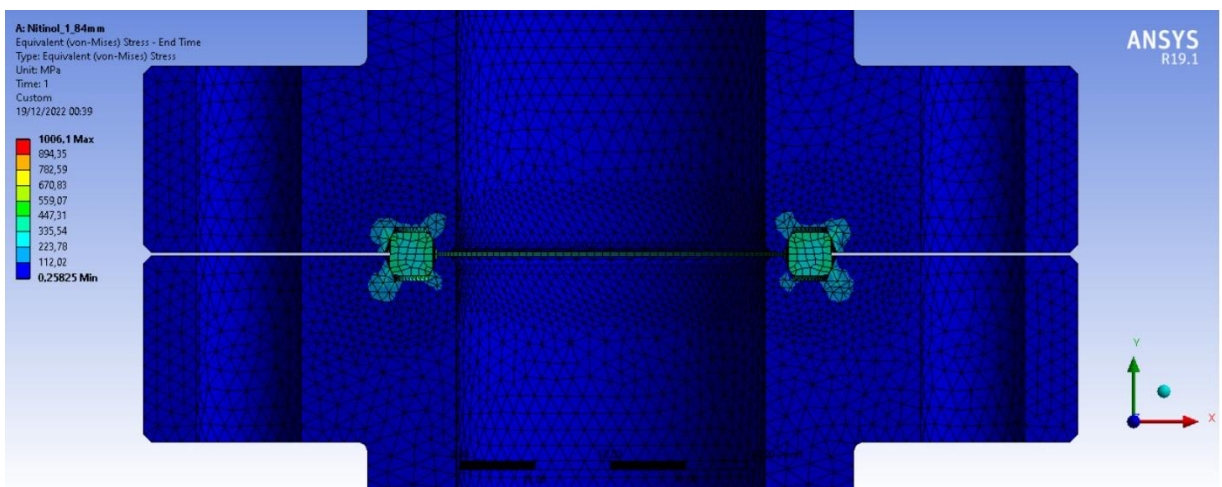


Figura 28: Gradiente de tensões com anel em NiTi para carga de 543 kN

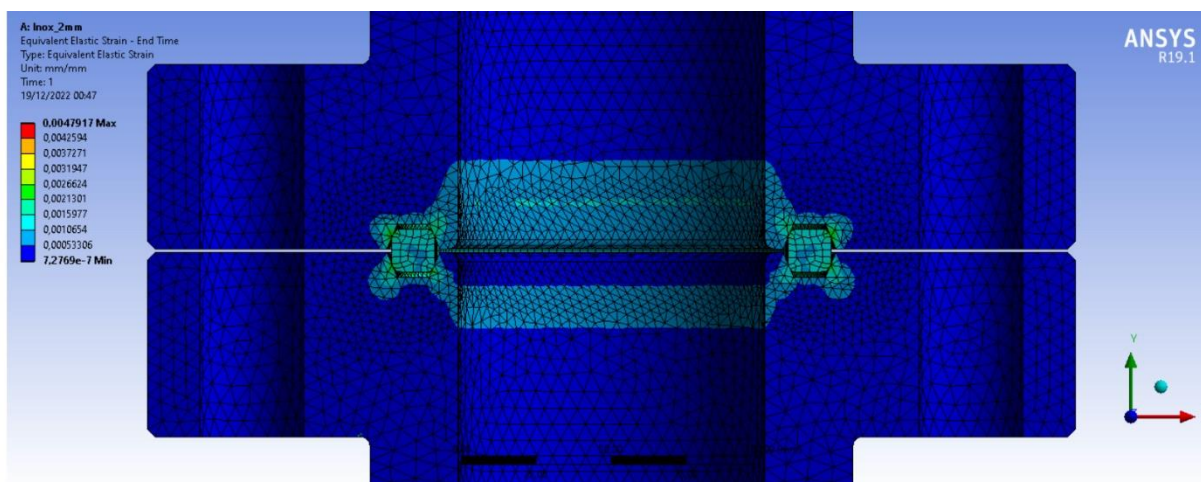


Figura 29: Deformação com anel em Inox para carga de 543 kN

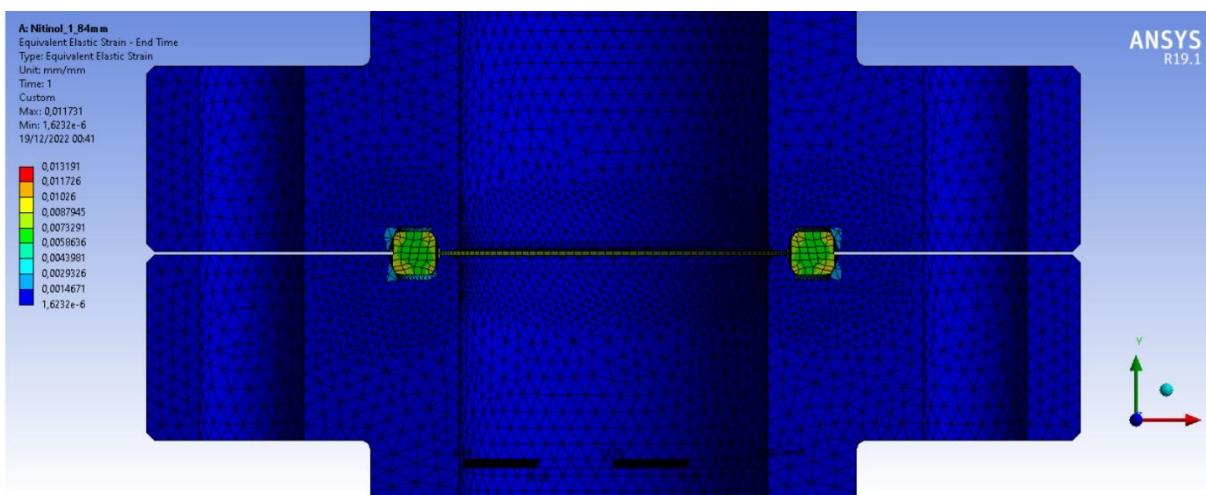


Figura 30: Deformação com anel em NiTi para carga de 543 kN

Figuras de 27 a 30 demonstram os estados de tensão, deformação e deslocamento quando a carga de reação é agora 549 kN. Novamente a mesma tendencia é observada, para uma mesma carga o deslocamento associado para o anel superelástico é menor, adicionalmente, neste ponto não só é evidente a diferença entre o grau de deformação do flange, mas o gradiente de tensões na região de contato também é claramente menos intensivo.

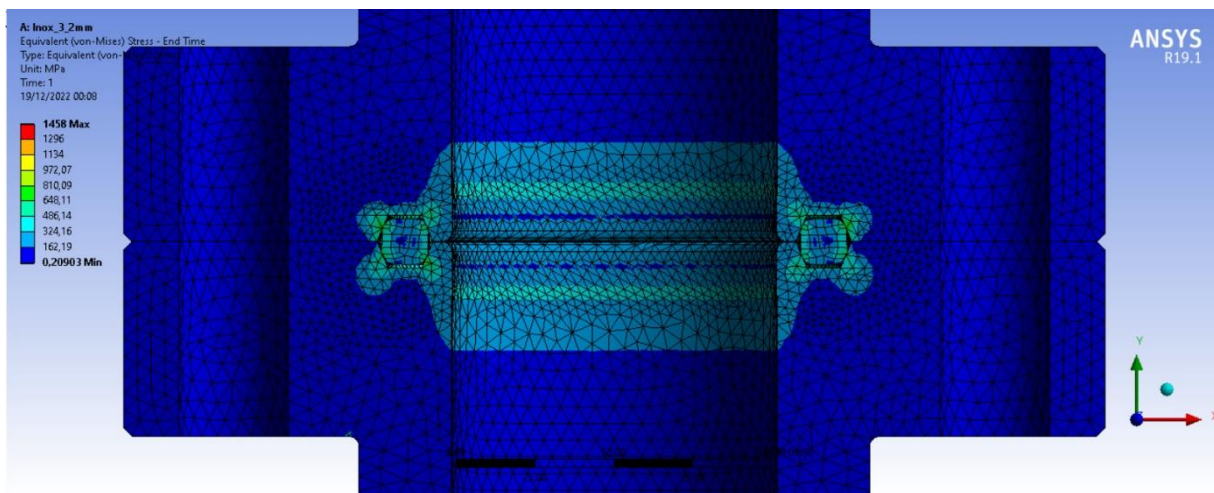


Figura 31: Gradiente de tensões com anel em Inox para carga de 1.023 kN

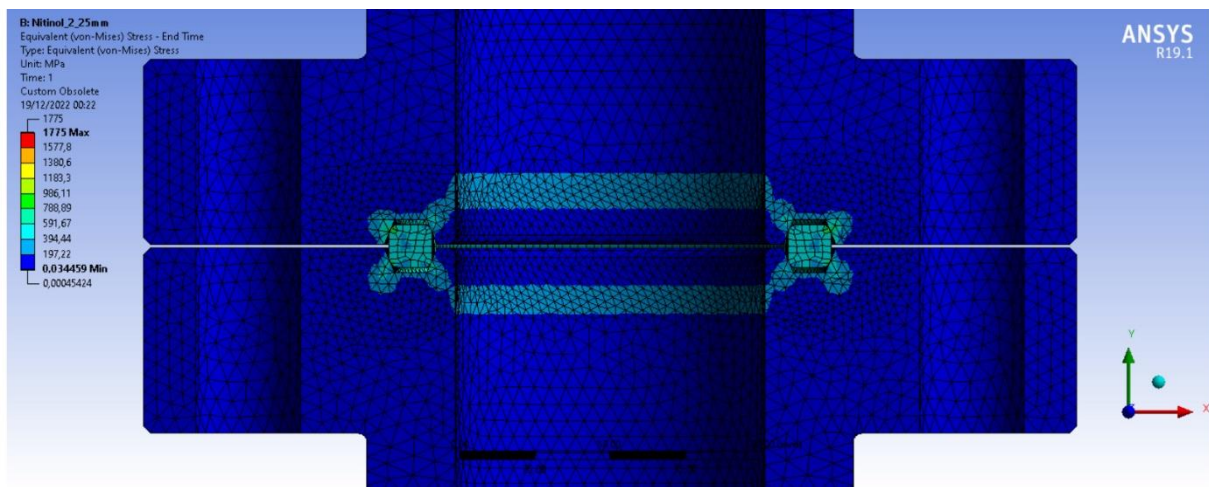


Figura 32: Gradiente de tensões com anel em NiTi para carga de 1.023 kN

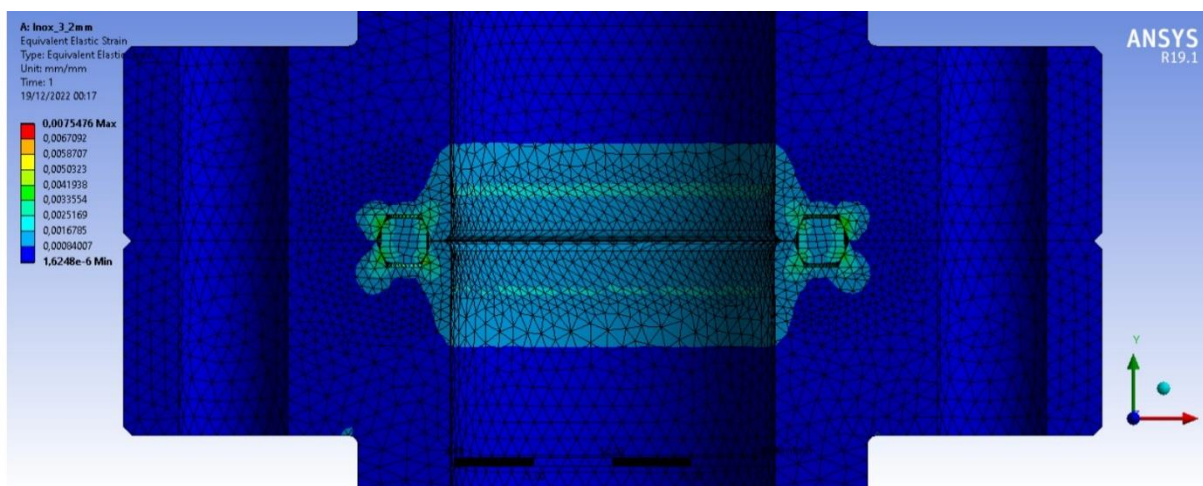


Figura 33: Deformação com anel em inox para carga de 1.023 kN

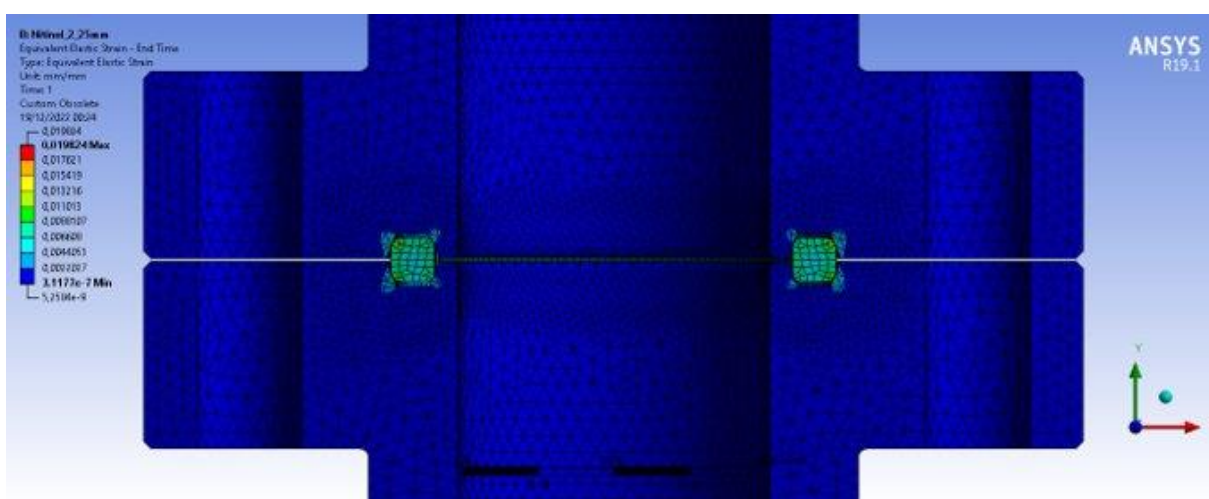


Figura 34: Deformação com anel em NiTi para carga de 1.023 kN

Quando a carga chega a 1023 kN as faces dos flanges se tocam para o conjunto com anel em aço inox, as relações de compressibilidade, deformação e tensionamento observadas anteriormente são conservadas. Intuitivamente se esperaria que o Nitinol apresentasse maior compressibilidade mesmo na fase austenítica, já que a deformação associada na vizinhança da interface de contato (no flange), bem como o gradiente de tensão foram consistentemente menores. A aparente contradição com o comportamento esperado pode ser associada com a dureza mais elevada da fase austenítica e à energia absorvida na transição de fase na indução de martensita demacrada. A distribuição de martensita, após compressão, ao longo de todo o

entorno da região de contato parece corroborar com dita hipótese. Por outro lado, nos pontos de contato do anel com os flanges, as deformações no anel de NiTi são visivelmente maiores mesmo com um deslocamento entre faces menor, indicando melhor conformabilidade com o canal dos flanges. Uma comparação do gradiente de deformação com o gradiente de fração martensítica deixa claro que a maior conformabilidade está associada à transição de fase e à correspondente maior ductibilidade da martensita.

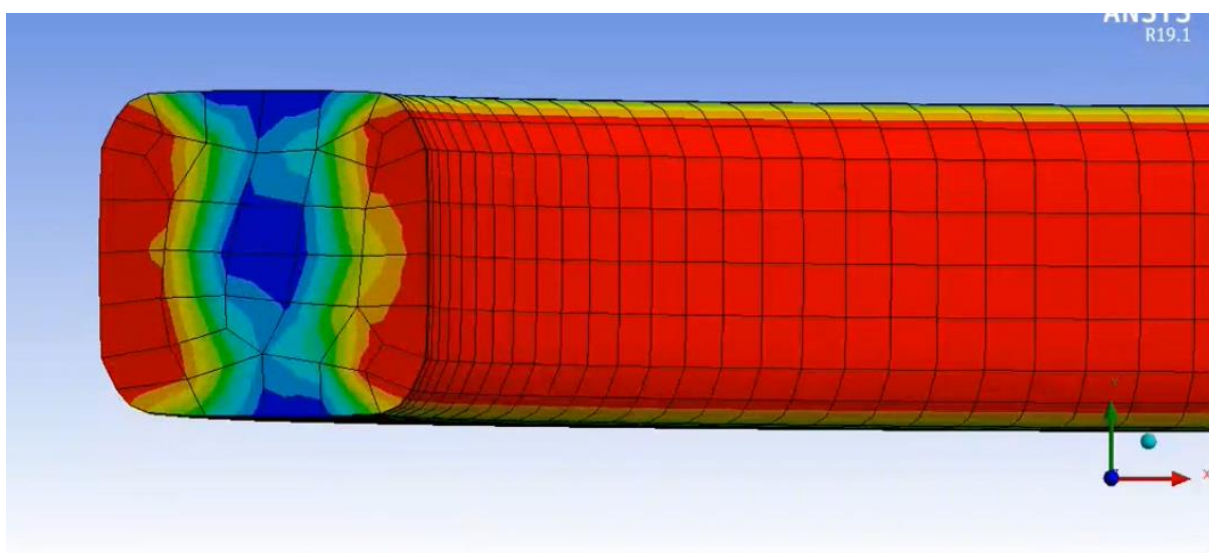


Figura 35: Fração martensítica no anel de NiTi durante fechamento completo

Finalmente, comparando o comportamento das duas juntas em relação as curvas de tensão x tempo, fixando o deslocamento máximo para cada curva, observa-se que o anel em Inox AISI 316 sofre deformação plástica em todos os deslocamentos adotados, tal como esperado esse material deve plastificar para promover o selo. As curvas em NiTi por outro lado não passam pelo limite de plastificação exceto no caso mais hiperbólico, supondo deslocamento máximo (3,2 mm). Adicionalmente as curvas de tensão do Inox AISI 316 parecem sempre apontar para um pico de tensão máxima em torno do início da compressão antes de assentar num nível mais estável, nas

curvas do Nitinol esse pico é muito menos notório ou inteiramente suprimido, novamente apontando para uma maior absorção de energia devido à mudança de fase. Os gráficos abaixo

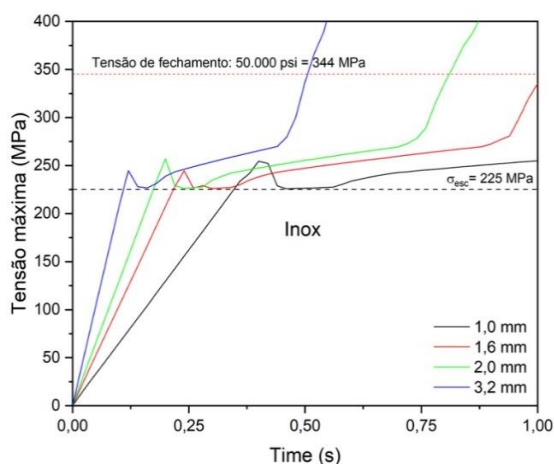


Figura 36: Tensão máxima no anel em inox

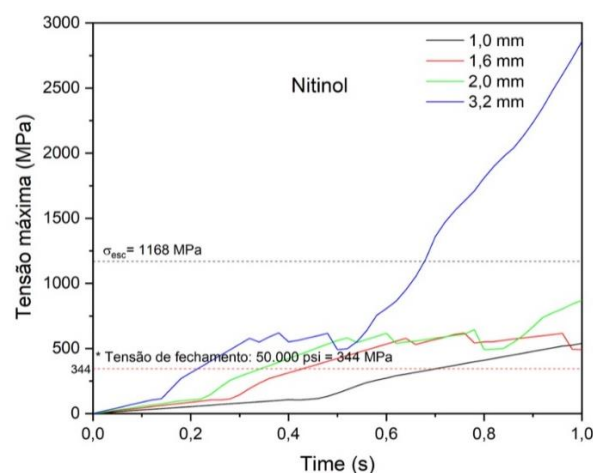


Figura 37: Tensão máxima no anel em NiTi

Em adição aos pontos de interesse mencionados a falta de plastificação do Nitinol somado ao fato de que a tensão de compressão é suficiente para promover a transição de fase significam possíveis oportunidades de resolução dos problemas de vedação relacionados à perda de vedação por conta de ciclos de tensão e/ou temperatura.

Parte significativa da durabilidade de um selo está justamente ligada e este tipo de adversidade. Mesmo quando a junta não necessita trabalhar em temperaturas altas o relaxamento de elementos de junta é um problema recorrente devido possibilidade de fluência. Quando a junta é esperada a trabalhar em altas temperaturas, especialmente quando tais condições de operação implicam em ciclos bruscos, a junta é particularmente propícia a vazamentos por relaxamento devido a maior vulnerabilidade à fluência e à perda de contato por conta de dilatação não uniforme entre os elementos de junta. Assim, a possibilidade de transição de fase quando submetido a um gradiente de temperatura que geraria relaxamento ou mesmo o fato de que uma menor deformação na vizinha da interface de contato significa menor

vulnerabilidade ao relaxamento são considerações relevantes para o argumento a favor da utilização desse tipo de material em elementos de vedação.

Nota-se que mesmo quando altas variações de temperatura não são esperadas ou induzidas, o baixo grau de deformação plástica somado a capacidade inata de alta deformabilidade elástica do Nitinol o tornam mais tolerante aos fenômenos adversos típicos que ocorrem após a montagem da junta. Os resultados do experimento apontam para um grau de recuperação excelente, o gráfico abaixo demonstra que após descarregamento o anel de Nitinol foi capaz de basicamente retornar completamente ao estado original anterior à compressão.

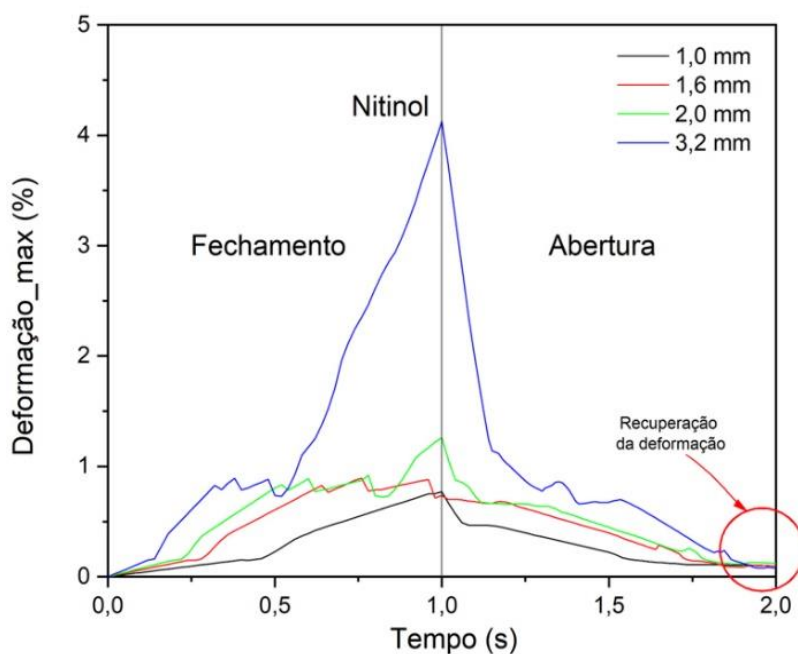


Figura 38: Deformação ao longo da compressão e recuperação após descarga (NiTi)

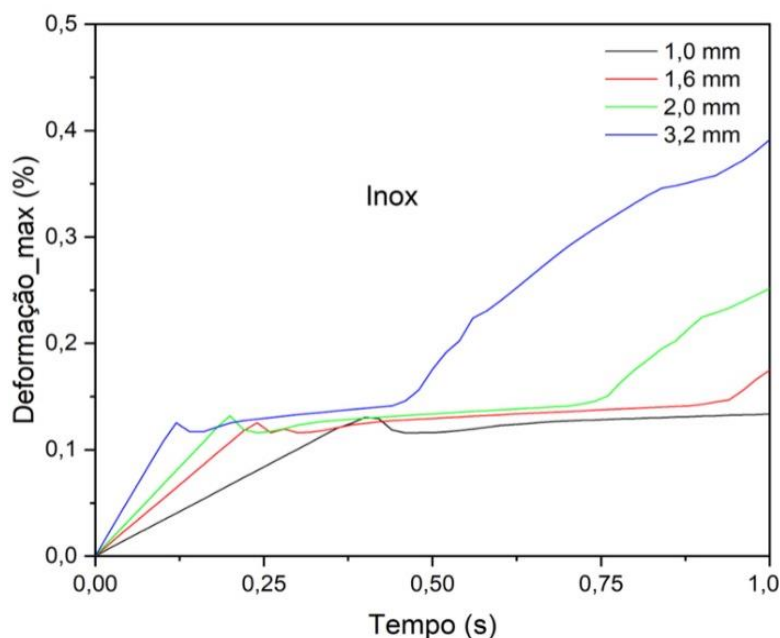


Figura 39: Deformação ao longo da compressão (AISI 316)

Quanto a maior carga de fechamento necessária para o anel de Nitinol, parte do resultado observado poderia ser significativamente mitigado com processamento adequado da liga superelástica. Em particular tratamentos de envelhecimento podem reduzir significativamente a deformação residual e histerese das ligas NiTi que por sua vez estão relacionadas à compressibilidade e recuperação do material, LU, *et al* estudaram a influência do tratamento de envelhecimento na compressibilidade de uma liga Ti-51.1 at.% Ni as curvas comparativas obtidas em seu estudo são exibidas aqui para fins de ilustração.

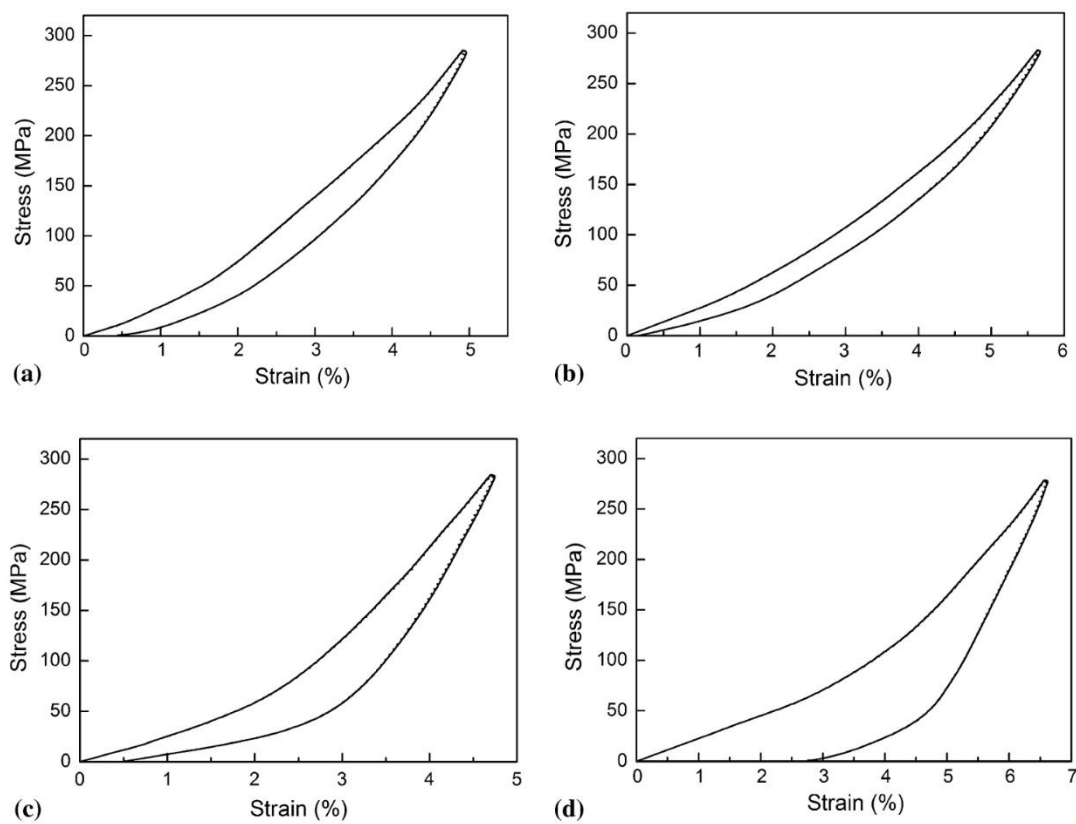


Figura 40: curvas tensão deformação em compressão para diferentes temperaturas de tratamentos de envelhecimento por 2h (a) 200 °C (b) 300 °C (c) 400°C (d) 500°C, (LU, et al, 2017)

6-CONCLUSÃO

A adoção em larga escala de ligas superelásticas é desafiada pela complexidade de trabalhar com tais materiais em produção de alto volume. Simultaneamente, por conta de que elementos de conexões flangeadas demandam um rigor elevado de regulamentação pelo fato de que a falha de tais conjuntos implica risco à segurança tanto na forma de dano físico quanto de contaminação por emissões fugitivas, esperaria-se uma inercia na mudança para anéis de vedação superelásticos mesmo em setores com aplicabilidade vantajosa. Todavia, embora tais considerações representem desafios legítimos, os possíveis benefícios tornam o emprego de ligas superelásticas em elementos de vedação em um prospecto comercialmente viável e

altamente atrativo, os resultados obtidos na análise exposta no presente trabalho corroboram com tal afirmação e promovem o incentivo do desenvolvimento de elementos de vedação utilizando o efeito superelástico exibido pelas ligas NiTi. O experimento consistiu na execução de simulações numéricas comparando o comportamento compressivo dos anéis de vedação em relação ao deslocamento do flange superior até um valor hipotético (3,2 mm) onde a distância entre faces seria nula. Devido a elevada capacidade de deformação recuperável do NiTi, a deformação plástica observada foi mínima, ao mesmo tempo a tensão de compressão desenvolvida em toda a região próxima a interface de contato foi suficiente para induzir a transição da face austenítica para martensita demaçada, tal resultado aponta para uma boa capacidade de aderência à geometria dos canais dos flanges. Mais adiante, devido a menor rigidez do Nitinol, a deformação e o gradiente de tensão na região de contato dos flanges foram claramente menores em relação ao Inox AISI 316 o que infere menor grau de deformação dos flanges e menor grau de relaxamento dos elementos da junta após montagem. Por outro lado, quando comparada a força de reação desenvolvida em consequência do deslocamento entre flanges a análise da progressão compressiva aponta para uma carga de fechamento mais elevada quando o Nitinol é comprimido na fase austenítica.

7-TRABALHOS FUTUROS

O trabalho aqui discutido evidenciou vários aspectos sobre o potencial de ligas de memória de forma em aplicações de vedação, no entanto, a complexidade envolvida numa análise aprofundada sobre o tópico não deve ser menosprezada. O fato de que falha no contexto de elementos de vedação frequentemente pode significar algo muito mais trivial do que o que caracterizaria uma falha estrutural, em aplicações menos estridentes, compele rigor particular na análise de tais sistemas. Nesse sentido, algumas ampliações do estudo poderiam corroborar grandemente com a validação das conclusões aqui expostas:

Inclusão de desalinhamentos no acoplamento dos elementos da conexão: Em adição aos problemas relacionados aos ciclos de trabalho, problemas relacionados a

irregularidades de acoplamento são de grande preocupação devido à dificuldade de evitá-los num cenário não idealizado. A análise do presente trabalho aponta para a utilidade das ligas superelásticas como potencial agente mitigador de tais problemas. A implicação disto é um dos maiores pontos que podem ser extraídos do experimento, neste caso o uso do efeito superelástico não só contribuiria para o alongamento do tempo até a necessidade de intervenção para manutenção, mas também reduziria o impacto de defeitos de alinhamento introduzidos durante procedimentos de manutenção. Portanto, um estudo dedicado com maior detalhamento na modelagem das condições de contorno mais próximo da realidade está entre uma das maiores prioridades de aprofundamento da análise aqui iniciada.

Estudo numérico com foco na análise de vazamento: Visto o objeto de estudo do presente trabalho, uma análise focada especificamente no estado de contato das superfícies de vedação é naturalmente uma prioridade na expansão do experimento aqui tratado. Mais adiante tal expansão do estudo abandonaria a simplificação adotada na omissão dos estojos, já que no contexto específico de vedação esperar-se-ia diferenças significativas numa modelagem mais realista da transmissão de forças, efetivamente gerando resultados mais detalhados da interação entre todos os componentes da conexão.

Implementação do efeito de memória de forma: A análise exposta no presente trabalho foi claramente centrada na utilidade do efeito superelástico, no entanto, ambos os efeitos de memória de forma e superelástico representam grande potencial no aprimoramento de conexões flangeadas. O efeito superelástico permite grande moldabilidade do anel aos canais dos flanges ao mesmo tempo em que a alta capacidade de deformação devido à transição de fase drasticamente diminui a ocorrência de deformação plástica ao ponto em que é possível basicamente recuperar a forma do anel quase que completamente após descarga, por outro lado o efeito de memória de forma pode ser usado para reduzir a carga de fechamento dos flanges se a compressão for realizada em $T < M_f$ em serviços de menor pressão nominal. Em juntas para alta pressão onde espera-se ciclos térmicos bruscos, o efeito de memória de forma pode ser utilizado para manter a tensão de contato na interface entre o anel

e os flanges através da transição para a fase austenítica, já que após compressão em temperatura ambiente, o presente experimento demonstrou que o NiTi na vizinhança da interface de contato estará na fase martensítica.

8-REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANSYS INC., “Element Reference”, release 11, 2007.

BHADESHIA, H.K.D.H. 2020. Crystallography, Martensite transformation. [aula lecionada na university of Cambridge]. Teaching Metallurgy (cam.ac.uk)

BICKFORD, JOHN H. Gaskets and gasketed joints. Middletown, CRC Press, 1997.

CAMARA, P.C., Análise do acoplamento termomecânico em ligas com memória de forma. Tese D. Sc.; Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

DUERIG, T W. et al. Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. Londres, Butterworth-Heinimann, 1990.

ENEMARK, S.; SANTOS, I. F. Rotor–bearing system integrated with shape memory alloy springs for ensuring adaptable dynamics and damping enhancement—Theory and experiment. **Journal of Sound and Vibration**, 2016.

ELAHINIA, M.H. Shape Memory Alloy Actuators: design, fabrication and experimental evaluation.; Toledo, Wiley, 2016.

HARTL, D. J. et al. Use of a Ni60Ti shape memory alloy for active jet engine chevron application: I. Thermomechanical characterization. **Smart Materials and Structures**. Seattle, 2009.

HUMBEECK, V. J. Non-medical applications of shape memory alloys. **Materials Science and Engineering**. Hervelee, 1999.

GUZIK, A.T., BENAFAN, O. Design and Development of CubeSat Solar Array Deployment Mechanisms Using Shape Memory Alloys. **44th Aerospace Mechanisms Symposium**. Cleveland, 2018.

JANI, J.M. et al A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. **Materials and Design**, 2014.

KIM, J.H. et al. Vibration of thermally post-buckled composite plates embedded with shape memory alloy fibers, **Composite Structures**, Volume 63, 2004.

KIM, E. et al. Effects of shape memory alloys on low velocity impact characteristics of composite plate, **Composite Structures**, Volume 93, edição 11, 2011.

KUDVA, J.N. Overview of the DARPA smart wing project. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. Torrance, 2004

LEXCELLENT,C. Shape Memory Alloys Handbook. Hoboken, Wiley, 2013.

LIANG, H. et al. Influence of Structural Parameters of Shape Memory Alloy Corrugated Gaskets on the Contact Pressure of Bolted Flange Joints. **Advances in Materials Science and Engineering**. 2021.

LU, X., LI, G., LIU, L. *et al.* Effect of Aging Treatment on the Compressibility and Recovery of NiTi Shape Memory Alloys as Static Seals. **J. of Materi Eng and Perform**. 2017

MELTON, K.N. General applications of SMA's and smart materials. In: OTSUKA, K.; WAYMAN, C.M. **Shape Memory Materials**. New York, Cambridge, 1999.

ORTÍN, J.; DELAEY, L. Hysteresis in shape-memory alloys. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, 2002.

OTSUKA, K. et al. Shape-memory effect and pseudoelasticity associated with the R-phase transition in Ti-50-5 at.% Ni single crystals, **Philosophical Magazine** , 1988.

OLSON, G.B.; COHEN, M. Theory of martensitic nucleation: a current assessment. **Proceedings of an International Conference on solid-solid phase transformations**. Cambridge, 1981.

SCHWARTZ, M. Encyclopedia of Smart Materials. Nova York, Wiley, 2002.

SONG, G.; KELLY, B.; AGRAWAL, B.N. Active position control of a shape-memory-alloy-wire-actuated composite beam. **Smart Materials Structures**. 2000

SONG, G.; MA, N.; LI, H.N. Applications of shape memory alloys in civil structures. **Engineering Structures**, Houston, 2006.

TATSUOKA, T. et al. Stress Analysis and Sealing Performance of Pipe Flange Connections With NiTi Shape Memory Alloy Gasket. **ASME 2007 Pressure Vessels and Piping Conference**. San Diego, 2004.

TELLES, P.C. Tubulações Industriais: Materiais, Projeto, Montagem. 10^o edição. Rio de Janeiro, LTC, 2001.

VEIGA, J.C. Juntas Industriais. 8^o edição. Rio de Janeiro, Stamppa, 2014.