

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

FELIPE GOUVEIA RODRIGUES

**MECANISMO BIOMIMÉTICO INSPIRADO EM UMA ÁGUA-VIVA E ATUADO POR
UM FIO DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Relatório de Projeto Final
Janeiro de 2023**

**RIO DE JANEIRO
2023**

Felipe Gouveia Rodrigues

**MECANISMO BIOMIMÉTICO INSPIRADO EM UMA ÁGUA-VIVA E ATUADO POR
UM FIO DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito 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: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Coorientador: Rodolpho Barbosa da Hora

RIO DE JANEIRO

2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

R696 Rodrigues, Felipe Gouveia
Mecanismo biomimético inspirado em uma água-viva e atuado
por um fio de liga com memória de forma / Felipe Gouveia
Rodrigues . — 2023.
52f. : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.
Bibliografia : f. 50-52
Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco
Coorientador: Rodolpho Barbosa da Hora

1. Engenharia mecânica. 2. Ligas com memória de forma. 3.
Inovações tecnológica. 4. Natureza. I. Pacheco, Pedro Manuel
Calas Lopes. (Orient.). II. Hora, Rodolpho Barbosa da. (Coorient.).
III. Título.

CDD 621

RESUMO

RODRIGUES, Felipe. **MECANISMO BIOMIMÉTICO INSPIRADO EM UMA ÁGUA-VIVA E ATUADO POR UM FIO DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA**. 2023. 52. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

A biomimética procura analisar estruturas biológicas com o objetivo de estabelecer processos e sistemas que possam ser aplicados em diversas áreas do conhecimento. Através desta abordagem é possível projetar sistemas mecânicos otimizados inspirados na geometria e funcionalidade de seres vivos. A água viva é um animal que possui um sistema de propulsão subaquática bastante eficiente, capaz de se adaptar a ambientes variados e com um sistema de movimento cíclico. Neste trabalho é explorado o uso de um mecanismo de propulsão subaquática utilizando atuadores de liga com memória de forma baseado no movimento de uma água-viva. Os elementos de liga com memória de forma são capazes de desenvolver grandes deslocamentos e retornar ao estado inicial quando expostos a um aumento de temperatura. São geralmente utilizados para projetos de atuadores compactos e que requerem alta densidade de potência. Através da análise de desenvolvimentos analíticos e modelos numéricos baseados no método de elementos finitos, este trabalho investiga a viabilidade de execução e aplicação de um projeto mecânico biomimético de um dispositivo de propulsão subaquática semelhante à uma água viva.

Palavras-chave: Ligas com memória de forma. Atuador. Água-viva. Biomimética.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	6
2.2 BIOMORFISMO NA ENGENHARIA.....	10
3 MODELAGEM DO DISPOSITIVO PROPOSTO	14
3.1 MODELO SIMPLIFICADO	16
3.2 MODELOS ANALÍTICOS.....	18
3.2.1 Fios de Liga com Memória de Forma	20
3.2.2 Lâmina de Aço	22
3.2.3 Integração dos elementos no sistema	28
3.3 MODELOS NUMÉRICOS	32
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	37
4.1 MODELOS ANALÍTICOS.....	37
4.2 MODELOS NUMÉRICOS	40
4.3 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS	46
5 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

Após milhares de anos de evolução, os mecanismos dinâmicos presentes na rotina dos animais foram convergindo, através do processo de seleção natural, para aqueles que melhor se adaptavam ao meio. A área de pesquisa biomimética tem a finalidade de propor melhores soluções para os desafios de uma sociedade desenvolvida, enquanto observa os animais que nos cercam. Dada a diversidade de espécies existentes, as possibilidades de pesquisa neste campo são extensas.

Associada à necessidade de exploração dos vastos oceanos que compõem o nosso planeta, forma-se o ponto de partida deste trabalho. Atualmente, veículos subaquáticos não tripulados (do inglês “*Unmanned Underwater Vehicle*” - UUV) são comumente utilizados para estudos de correntes oceânicas, agentes químicos, migração animal, profundidade e em aplicações militares (Villanueva *et al.*, 2009).

Estes veículos se limitam a aplicações em regiões costeiras por questões de ancoramento. Para aplicações em movimento, é requerida a manutenção e abastecimento constante, encarecendo o projeto (Villanueva *et al.*, 2009).

Este trabalho é focado na investigação de um dispositivo mecânico de atuação, baseado nas características do mecanismo de propulsão de uma água-viva. O dispositivo proposto deve possuir pequenas dimensões, ser compacto e leve, além de apresentar uma movimentação silenciosa. Dessa forma, a utilização de motores com hélice ou bombas de propulsão é indesejada.

Os atuadores de ligas com memória de forma (do inglês “*Shape Memory Alloy*” - SMA) foram escolhidos para compor o sistema de propulsão proposto neste trabalho, pelo fato de oferecerem alta densidade de potência, permitem o desenvolvimento de um sistema leve e compacto. Além disso, possuem atuação silenciosa, característica requerida em sistemas como os utilizados em operações de vigilância. Os fios de SMA são aplicados em diversas áreas da engenharia, e por possuírem grande semelhança com músculos orgânicos, são bastante utilizados na área de pesquisa biomimética.

Em função das não-linearidades presentes associadas ao comportamento das SMAs, o projeto de sistemas com elementos de SMA não é uma tarefa fácil. Modelos analíticos, baseados em mecânica dos sólidos, e numéricos, baseados no método de elementos finitos, são utilizados como ferramentas para avaliar o comportamento do dispositivo proposto e obter configurações e geometrias ótimas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho é separada em dois tópicos de grande importância para o desenvolvimento teórico e matemático das análises realizadas. Primeiramente, são apresentadas as principais características sobre o funcionamento das ligas com memória de forma, para descrever a sua utilização em sistemas de atuação. Em seguida, são apresentadas diferentes aplicações referentes à projetos biomiméticos e outros específicos para o problema proposto neste trabalho.

2.1 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

O comportamento especial das ligas com memória de forma (do inglês *Shape Memory Alloy - SMA*) é baseado na variação da sua microestrutura e possui relação com o estado de tensões atuantes e na sua temperatura. As fases presentes em um material composto por ligas com memória de forma e o seu comportamento termomecânico são representados no diagrama Tensão x Deformação x Temperatura, como mostrado na Figura 1.

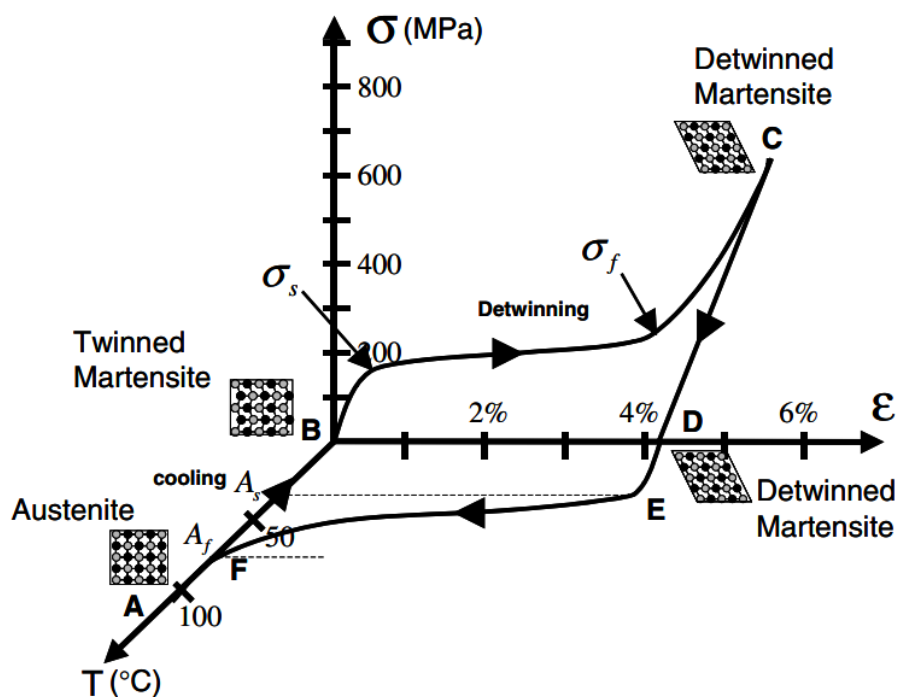


Figura 1 – Diagrama Tensão x Deformação x Temperatura de uma liga com memória de forma (Lagoudas, 2008).

Na Figura 1, é possível observar a transformação da fase austenita (*A*) para a fase martensita maclada (*B*) conforme a temperatura diminui. Após o resfriamento, a transformação entre as fases martensita maclada (*B*) e martensita demaclada (*C*) é ocasionada pela tensão atuante no material. Por fim, o material retorna à sua fase inicial austenítica (*A*) ao ser aquecido por alguma fonte térmica, reiniciando o ciclo. Através desse comportamento é possível usar este material como atuadores, onde a sua forma pode ser alterada por carregamentos mecânicos e recuperada através de um carregamento térmico de aquecimento (Lagoudas, 2008).

Entre as várias ligas com memória de forma, destacam-se as ligas de níquel e titânio. Estas ligas apresentam capacidade de deformação de transformação de fase que chegam a atingir 6%-10% (Tobushi & Tanaka, 1991). Contudo, por este comportamento ser dependente da temperatura, o uso de elementos de SMA como atuadores acaba apresentando limitações associadas ao meio em que estão alocados. Normalmente o processo de atuação envolve o uso do efeito joule para promover o aquecimento do elemento de SMA através da aplicação de uma corrente elétrica. A velocidade de atuação depende da magnitude de corrente aplicada ao fio de SMA, enquanto a velocidade de volta ao seu estado inicial depende da taxa em que o calor é dissipado pelo elemento de SMA.

Fios de SMA são comumente utilizados como atuadores. Para o caso do projeto de um atuador, este comportamento é explorado submetendo o fio de SMA a um carregamento mecânico que promova uma deformação inicial gerada por transformação de fase e, em seguida, fixando-o em uma região onde deseja-se promover deslocamentos e/ou força. Com isso, é possível promover um deslocamento no material onde o fio de liga com memória de forma foi fixo através de um aquecimento. Na Figura 2, é apresentado o princípio de funcionamento de um atuador utilizando um elemento de SMA acoplado a uma mola elástica. A etapa inicial mostra que existe uma distância entre as extremidades do atuador de SMA e a mola elástica. Na etapa de pré-carga, o atuador de SMA é deformado e fixo à mola elástica, o que promove um deslocamento ΔL . Na etapa de aquecimento, o atuador de SMA é aquecido e tensiona a mola posicionada na parte inferior do mecanismo. Por fim, na etapa de resfriamento, o atuador de SMA não está mais aquecido e retorna para o início do ciclo do atuador.

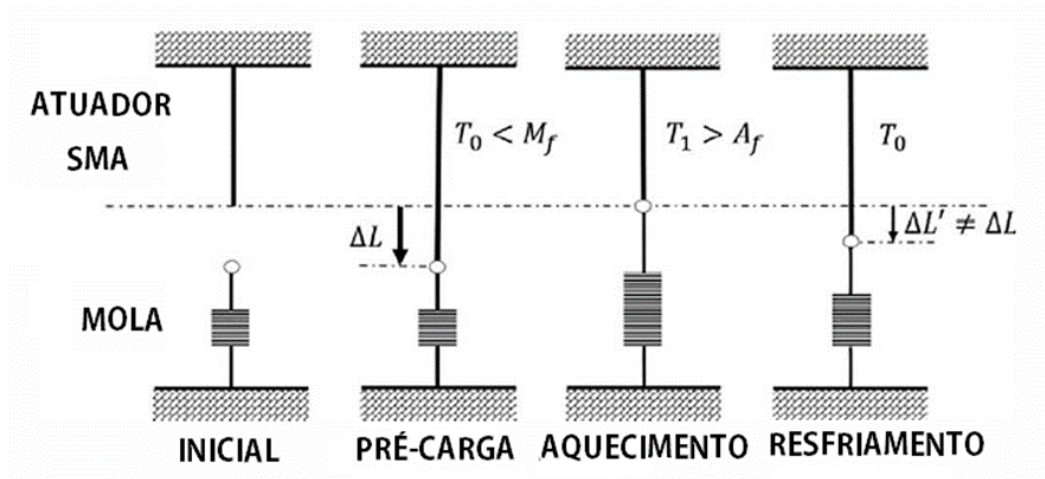


Figura 2 – Princípio de funcionamento dos SMAs em atuadores mecânicos (Simiriotis *et al.*, 2021).

Para casos em que o fio de memória de forma se mantém continuamente tensionado, são caracterizados como “*Extrinsic Two-Way*”. Estes sistemas são denominados como dispositivo assistido por tensão e são referência para o caso estudado neste trabalho. O gráfico analisado na Figura 1 apresenta uma transformação de fase para austenita em um estado livre de tensão. A Figura 3 apresenta um gráfico representativo do comportamento deste material em casos em que se mantém continuamente tensionados.

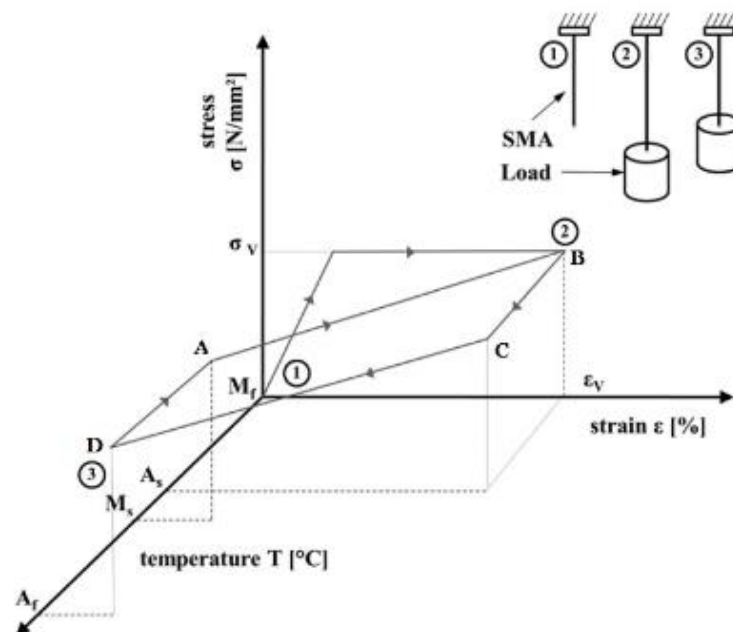


Figura 3 - Características do efeito de memória de forma “*Extrinsic Two-way*” (Czechowicz & Langbein, 2015).

Há relação de interdependência entre valores de tensão de transformação requerida e temperatura. A Figura 4 apresenta um gráfico informativo sobre esta relação.

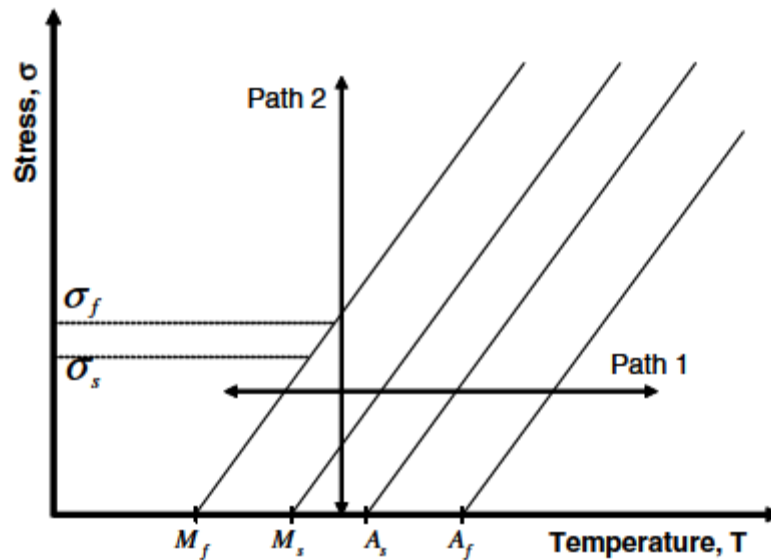


Figura 4 – Relação de interdependência entre tensões de transformação e temperatura.

Ao analisar a cronologia de desenvolvimento dos atuadores de ligas com memória de forma, percebe-se que os primeiros casos ganharam notoriedade em torno de 1970, onde fios de níquel e titânio começaram a ser utilizados na tentativa de aproveitar fontes de rejeito de calor (Johnson, 1998). Os projetos conhecidos como motores térmicos (*heat engines*) eram capazes de transformar energia térmica em mecânica através da utilização de molas com ligas com memória de forma. Nos dias atuais, os atuadores com memória de forma estão presentes nos mais variados setores, com aplicações de sucesso em missões espaciais, produções de cateteres na medicina, válvulas automotivas, discos rígidos de computador, válvulas ante escaldantes em chuveiros aquecidos e dispositivos auxiliares para deficientes visuais (Johnson, 1998).

Quando a análise do estado da arte é voltada para as dimensões do projeto, observa-se que existem diversas aplicações microscópicas, as quais possuem uma boa resistência à fadiga e uma facilidade de oscilar entre níveis de temperatura. Nas aplicações microscópicas, dispositivos existentes já demonstraram vida útil de alguns milhões de ciclos (Johnson, 1998).

2.2 BIOMORFISMO NA ENGENHARIA

É vasta a utilização dos fios de SMA em projetos de engenharia que contemplam a área de pesquisa biomimética. Como exemplo de projeto de mecanismo com funcionamento mais simples, a Figura 5 apresenta um desenho esquemático de um dispositivo atuado por um elemento de SMA que procura copiar o mecanismo de deslocamento de uma lagarta (Kim *et al.*, 2006). Nesse caso, por possuir um sistema de fixação com o solo para direcionar o movimento da lagarta, o ciclo é realizado por movimentos de compressão e decompressão do material onde o fio de SMA está alocado.

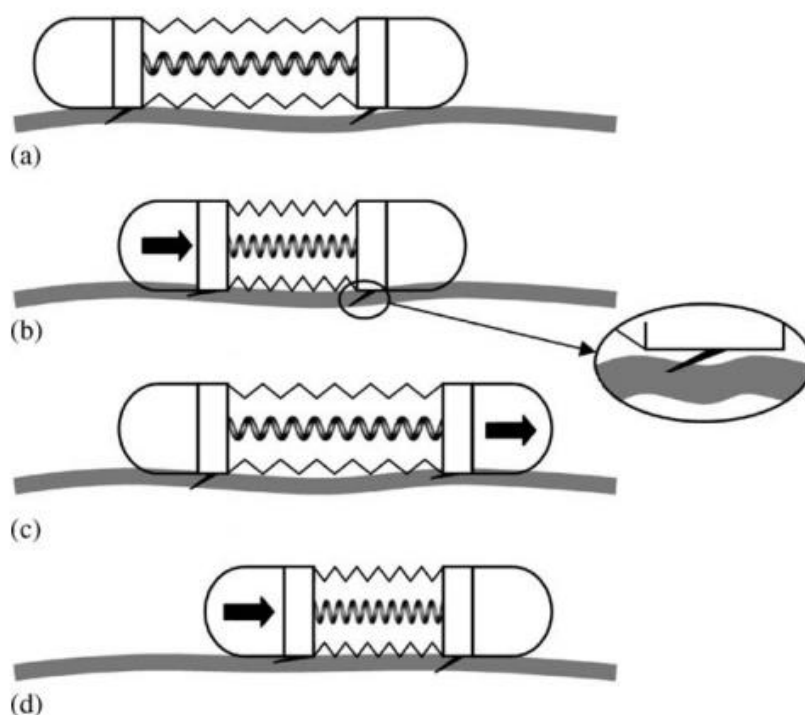


Figura 5 – Princípio de locomoção de uma lagarta utilizando atuadores com SMA (Kim *et al.*, 2006).

Em relação ao homem, muitos projetos de garra mecânica idealizam o mecanismo de funcionamento de uma mão humana, assim como mostra a Figura 6 (Bundhoo *et al.*, 2008). Diferentemente do modelo da lagarta, este caso é atuado por movimentos de rotação dos elementos rígidos conectados por pinos que são acionados por fios de SMA que atuam como tendões. Assim como nos dedos humanos, existem três pontos de rotação que proporcionam a flexão do dedo.

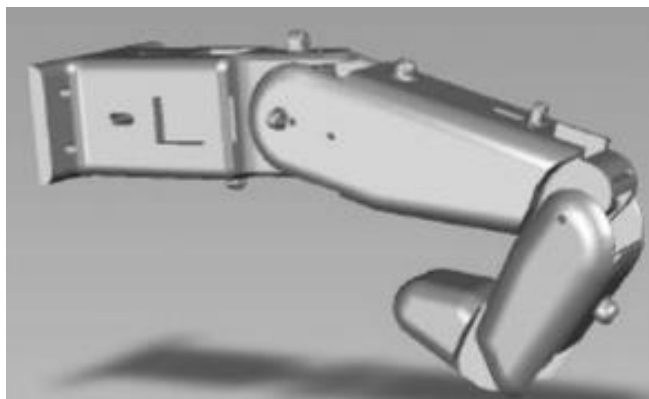


Figura 6 – Protótipo de uma garra mecânica projetada seguindo a Biomimética de um dedo humano (Bundhoo *et al.*, 2008).

Assim como é instintivo para diversos animais com capacidade de voar, mudar a forma de suas asas em tempo real permite melhor adaptação para determinadas manobras de movimento que estão executando. Fazendo o entendimento do mecanismo do processo evolutivo, a indústria aeronáutica possui diversas pesquisas neste campo. Como exemplo, tem-se casos em que os fios de SMA atuam como tendões ao longo de uma asa, causando deformações de curvatura na sua geometria e modificando aspectos aerodinâmicos, conforme apresentado na Figura 7 (Simiriotis *et al.*, 2021).

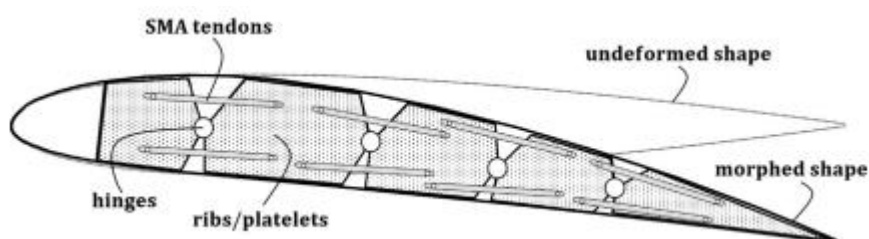


Figura 7 – Conceito de funcionamento de uma asa com geometria modificável (Simiriotis *et al.*, 2021).

As SMAs também têm sido utilizadas na atuação de sistemas de propulsão subaquática. Villanueva *et al.* (2009) desenvolveram um sistema de propulsão baseado no conceito de funcionamento do sistema de deslocamento de uma água-viva. Na Figura 8, é possível observar que, com a contração do sino, todo o fluido alocado em seu interior é deslocado para a direção indicada pela seta, gerando impulso.

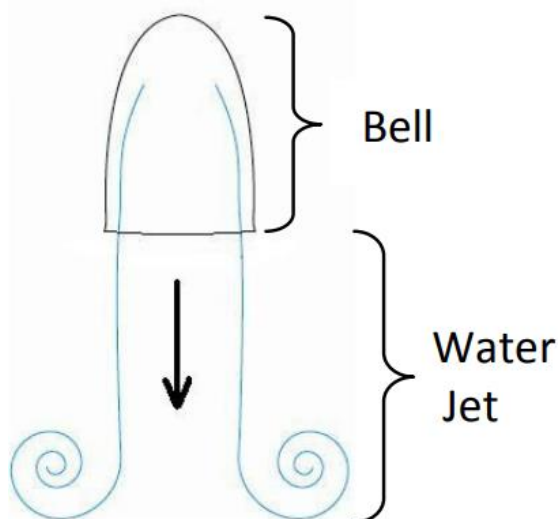


Figura 8 – Método de propulsão de uma água-viva (Villanueva *et al.*, 2009).

Atualmente existem duas categorias que distinguem os tipos de água-viva, denominadas "*Prolate*" e "*Oblate*" (Villanueva *et al.*, 2009). Como semelhança, possuem a característica de conseguirem conservar flutuabilidade neutra. Mas uma das características de maior diferenciação entre estas espécies é o meio de propulsão que possuem. No caso da medusa "*Prolate*", a propulsão é a jato e geralmente possuem menores dimensões. Também nadam mais rápido e tem uma frequência de ciclo mais alta (Villanueva *et al.*, 2009). Além disso, produzem uma maior quantidade de impulso por tamanho de sino. Um exemplo desta espécie pode ser visto na Figura 9.

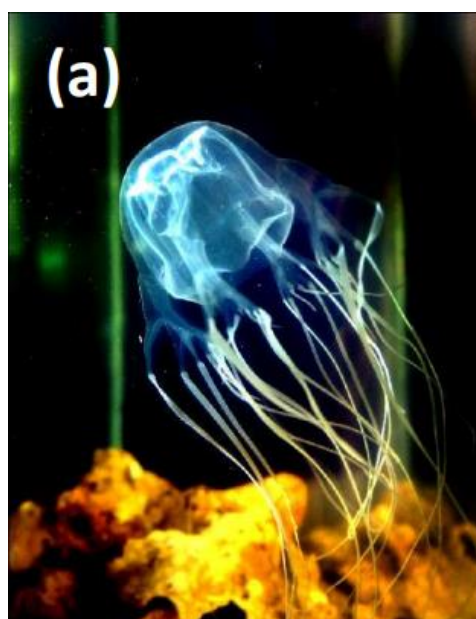


Figura 9 – Exemplo da espécie Medusa "*Prolate*" (Villanueva *et al.*, 2009).

No caso da medusa “*Oblate*”, a propulsão é por remo (Villanueva *et al.*, 2009). Esta espécie apresenta maiores eficiências em termos energéticos, permitindo atingir diâmetros muito maiores que a medusa “*Prolate*”. A Figura 10 exhibe um exemplo desta espécie com o seu sino aberto, onde um homem adulto ao seu lado serve de referência para as dimensões desta água-viva.



Figura 10 – Exemplo da espécie Medusa “*Oblate*” (Villanueva *et al.*, 2009).

A realização de um projeto mecânico seguindo esta linha de pesquisa requer que sejam levantadas as principais características destas duas espécies, de modo a selecionar o tipo mais adequado. A alta eficiência propulsiva, observada no tipo “*Oblate*”, permite viagens mais longas em casos de energia limitada. As altas velocidades, observadas no tipo “*Prolate*”, são úteis para alcançar algum ponto de investigação mais rapidamente e altas acelerações para rápidas mudanças de trajetória.

3 MODELAGEM DO DISPOSITIVO PROPOSTO

A execução do projeto biomimético proposto requer uma observação cuidadosa do funcionamento dos músculos envolvidos no processo de atuação para o movimento de um animal. Desta maneira, a análise da geometria destes seres vivos e dos modelos propostos através dos artigos científicos analisados na pesquisa bibliográfica forneceu os subsídios necessários para definir as abordagens iniciais a serem adotadas neste trabalho. Como base preliminar para idealização de um modelo analítico, a Figura 11 apresenta um dos protótipos estudados na revisão bibliográfica deste trabalho.



Figura 11 – Protótipo estudado durante revisão bibliográfica (Villanueva *et al.*, 2011).

A parte externa deste protótipo estudado é composta por espuma de poliestireno. Este material foi adicionado ao final da montagem, com a intenção de garantir flutuabilidade neutra à água viva.

Os componentes internos do protótipo visto na Figura 11 são apresentados na Figura 12, onde a geometria possibilita a atuação de fios de SMA de forma individual em cada um dos segmentos que a compõe.

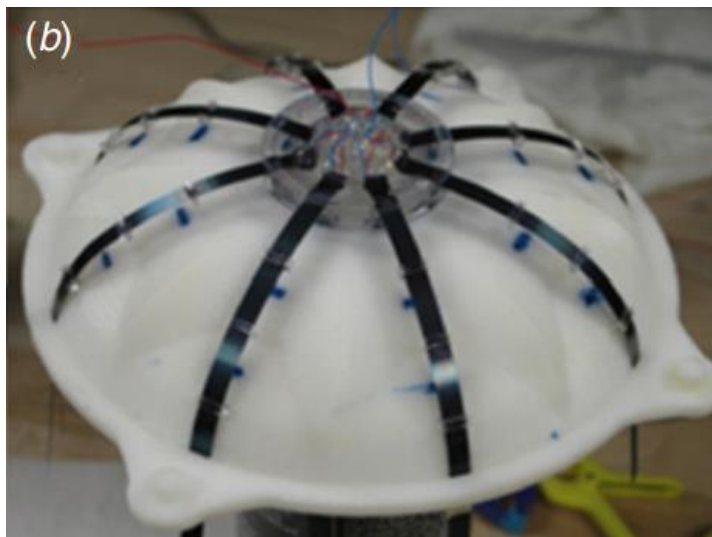


Figura 12 – Estrutura interna do protótipo estudado (Villanueva *et al.*, 2011).

Na Figura 12, são vistas as lâminas de aço flexíveis, fixadas na parte superior com a utilização de resina acrílica.

A seguir serão expostos os modelos analítico propostos para o desenvolvimento deste trabalho. No tópico 3.1, é exposto o modelo simplificado utilizado para interpretação do sistema estudado. No tópico 3.2, é encontrado o valor de rigidez da lâmina de aço pela metodologia da viga reta. Em seguida, no tópico 3.3, é realizada a aplicação da metodologia da viga curva, com análises mais precisas do valor de rigidez da lâmina de aço.

3.1 MODELO SIMPLIFICADO

Para simplificação dos cálculos analíticos que serão desenvolvidos, é realizada a análise de uma geometria equivalente a um dos segmentos componentes da estrutura vista na Figura 12. O modelo simplificado considera a geometria de um segmento do dispositivo como sendo composto por uma lâmina com a forma de um semicírculo conectada em suas extremidades a um fio de SMA.

O funcionamento cíclico do sistema proposto é baseado no processo descrito na Figura 2. A Figura 13 apresenta um desenho esquemático do processo de montagem do atuador de SMA. O fio de SMA, de comprimento menor que a distância entre as extremidades de uma lâmina curvada, é esticado (linha azul) e fixado às extremidades da lâmina curvada, que desempenha a função de uma mola elástica (linha preta) atuando para produzir a reorientação da martensita de modo a ter a presença de martensita não maclada.

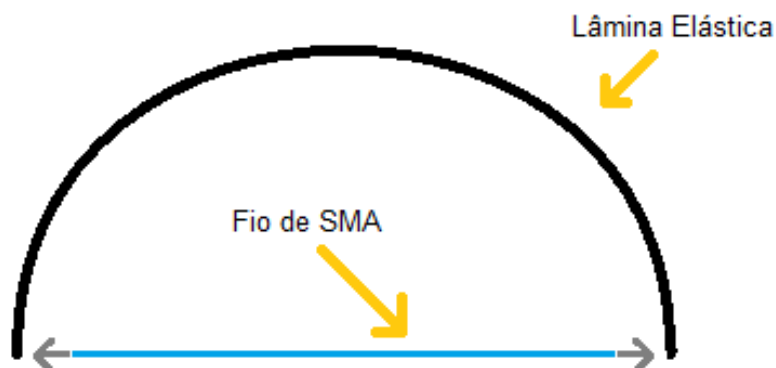


Figura 13 – Processo de montagem do fio de SMA e a lâmina.

Em uma configuração após a montagem, a Figura 14 apresenta os estados não atuado (A) e atuado (B) do modelo estudado. Nesta figura, a lâmina elástica é indicada pela linha preta, enquanto o fio de SMA que será utilizado para atuar e fletir esta lâmina é representado pela cor azul quando não atuado e pela cor vermelha quando atuado. Este dispositivo é reconhecido como um dispositivo assistido por tensão.

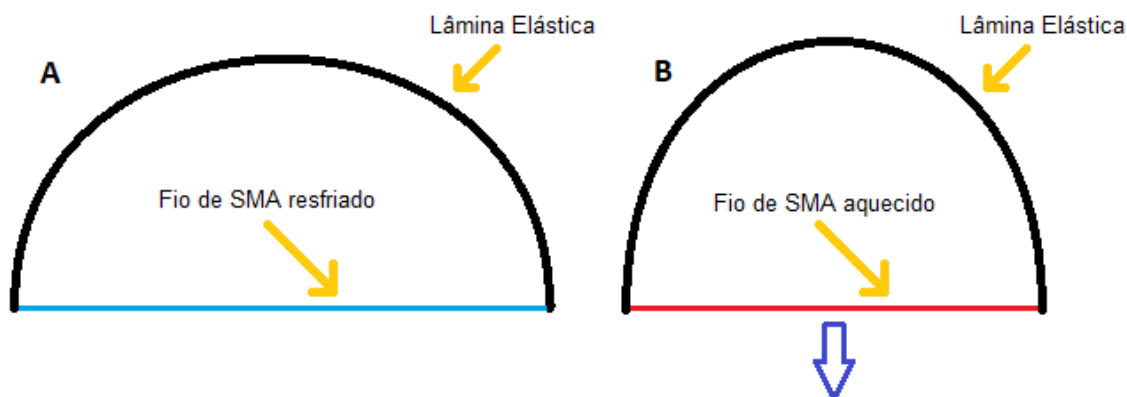


Figura 14 – Modelo utilizado para desenvolvimento dos cálculos analíticos.

O sistema em repouso (Figura 14 A) está em um estado com a presença de martensita não maclada (sob tensão), que é induzida pela aplicação do carregamento mecânico proveniente do processo de montagem. A atuação se dá através de duas etapas:

- 1) **Aquecimento:** O fio de SMA, em um estado com martensita não maclada (sob tensão), é aquecido por efeito Joule através da aplicação de uma corrente elétrica. O fio de SMA experimenta uma transformação de fase, passando para um estado com austenita e tendo o seu comprimento reduzido, o que causa flexão na lâmina (Figura 14 B). O fluido presente na parte interior do sistema é impulsionado na direção da seta azul (Figura 14 B) e o sistema é impulsionado na direção oposta;
- 2) **Resfriamento:** O fornecimento de energia elétrica é interrompido e, por dissipação, o fio resfria sob o tensionamento da lâmina promovendo uma transformação de fase para martensita não maclada (sob tensão), retornando ao estado de repouso (Figura 14 A).

Em seguida, um novo ciclo é aplicado, proporcionando o movimento do dispositivo.

3.2 MODELOS ANALÍTICOS

Fazendo uso do modelo simplificado definido na seção anterior, este tópico visa determinar a abordagem analítica para determinação dos valores referentes às variáveis de tensão e deformação atuante entre etapas de ciclo. Não é viável a utilização de lâminas com rigidez exageradamente elevadas para determinados fios de SMA; pois isto pode ocorrer no impedimento do fio conseguir reduzir seu comprimento. Da mesma forma, se a lâmina não possuir rigidez suficiente para atingir a tensão de transformação de fase para martensita demaçada do fio de SMA, o fio nunca será esticado novamente. As dimensões entre esses componentes são interdependentes e, por este fato, predefine-se os fios de SMA como sendo os disponibilizados no Laboratório de Sistemas e Estruturas Inteligentes (LASEI) do CEFET/RJ para parâmetros de análise.

Na Figura 14 B é apresentada a deformação sofrida pelo sistema após atuação do fio de SMA. É necessário levar em consideração a rigidez de ambos os elementos para encontrar deformação atuante no sistema. A Figura 15 apresenta o modelo desenhado para determinação das deformações sofridas pelo fio de SMA e pela lâmina de aço.

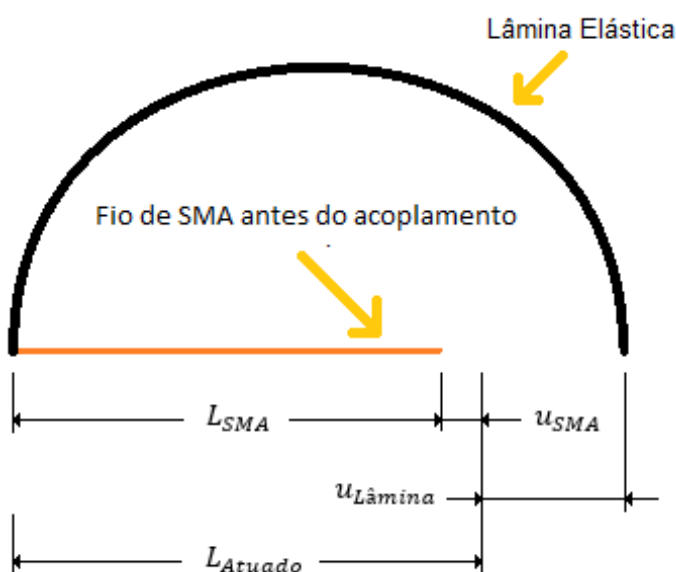


Figura 15 – Modelo desenhado para determinação das deformações sofridas no sistema.

Na Figura 15, os parâmetros identificados são definidos por:

L_{SMA} é o comprimento apresentado pelo fio de SMA sem acoplamento;

u_{SMA} é a deformação sofrida pelo fio de SMA atuado por consequência da resistência da lâmina de aço;

$u_{Lâmina}$ é a deformação sofrida pela extremidade da lâmina de aço após atuação do fio de SMA;

L_{Atuado} é o comprimento do fio de SMA quando fixo na extremidade da lâmina de aço e atuado, assim como na Figura 14 B. Esta dimensão também pode ser definida por

$$L_{Atuado} = L_{SMA} + u_{SMA}.$$

Para simplificação da análise, a Figura 15 é elaborada em um sistema de molas em série. Estando os parâmetros de rigidez e força definidos, é possível encontrar o deslocamento sofrido através da análise da Figura 16.

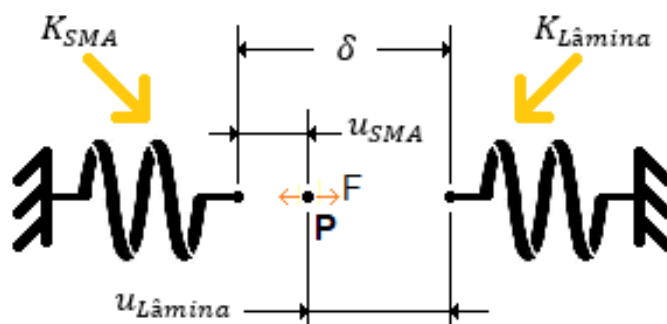


Figura 16 – Sistema estudado através de análise por molas em série.

Na Figura 16, os parâmetros identificados são definidos por:

K_{SMA} é a rigidez do fio de SMA atuado;

$K_{Lâmina}$ é a rigidez equivalente da lâmina de aço;

u_{SMA} é a deformação sofrida pelo fio de SMA ao ser conectado à lâmina;

$u_{Lâmina}$ é a deformação sofrida pela extremidade da lâmina de aço após ser conectada ao fio de SMA;

P é o ponto de equilíbrio do sistema após a conexão dos 2 elementos;

δ é a soma das deformações sofridas pelo fio de SMA e pela lâmina de aço, e representa a folga inicial entre a lâmina de aço e o fio de SMA.

Pela Figura 16, a seguinte igualdade é estabelecida:

$$\delta = u_{SMA} + u_{L\grave{a}mina} \quad (1)$$

São necessários os valores de rigidez do fio de SMA e da lâmina de aço para que o modelo possa ser utilizado.

3.2.1 Fios de Liga com Memória de Forma

O Laboratório de Sistemas e Estruturas Inteligentes (LASEI) do CEFET/RJ possui à disposição alguns fios de liga com memória de forma para utilização em pesquisas orientadas. Verificou-se a possibilidade de utilização de quatro fios de liga com memória de forma com diferentes diâmetros. Os fios possuem diâmetros de 0,1016 mm (0,004”), 0,2032 mm (0,008”), 0,3810 mm (0,015”) e 0,5080 mm (0,020”). Neste trabalho são considerados fios de 0,3810 mm e 0,5080 mm; ambos com 100 mm de comprimento. Embora estes fios sejam capazes de atingir deformações recuperáveis de até 8%, nas análises desenvolvidas considera-se que o fio sofrerá uma deformação inicial de 4% para reduzir danos por fadiga (Dornelas *et al.*, 2021).

As propriedades mecânicas associadas aos fios mencionados foram obtidas através do datasheet do fornecedor (MuscleWires.com, 2023), que informa um módulo de elasticidade de 75 GPa para a fase austenita e de 28 GPa para a fase martensita. Além disso, a tensão crítica de início de transformação de fase é de 200 MPa, enquanto a tensão para máximo deslocamento para o fio estudado (8%) é de 360 MPa. Este trabalho considera uma deformação inicial para o fio equivalente a 50% a deformação máxima permitida.

Diferentes modelos foram propostos para representar o comportamento de uma liga com memória de forma. O modelo proposto por Brinson (Brinson, 1993) foi o escolhido para o desenvolvimento deste trabalho, sendo adequado para análises unidimensionais. Originalmente, este modelo é definido em termos de taxas de tensão, de deformação e de transformação de fase. O modelo prevê uma contribuição da dilatação térmica causada pela variação de temperatura, mas que possui efeito

desprezível para a análise em questão. Para um elemento de liga com memória de forma, a tensão (σ) é função da deformação (ε) e da fase em que a microestrutura se encontra. O modelo utiliza os seguintes parâmetros: α representa o valor de deformação máxima da liga utilizada e β representa o percentual volumétrico de martensita não maclada presente na peça. Após um processo de integração no tempo, a equação constitutiva pode ser escrita como:

$$\sigma = E(\varepsilon - \alpha \beta) \quad (2)$$

onde a deformação total (ε) pode ser escrita como a razão entre o deslocamento da extremidade (u) e o comprimento inicial do fio de SMA (L_{SMA}), acrescidos do deslocamento específico sofrido durante a etapa de esticamento e fixação deste fio.

$$\varepsilon = \frac{u}{L_{SMA}} + \varepsilon_0 \quad (3)$$

Para um elemento de barra ou fio, a força pode ser obtida multiplicando-se a tensão pela área da seção transversal ($F = \sigma A$). Assim, a união da Equação (3) com a Equação (2) pode ser escrita da seguinte forma:

$$F = EA \left(\frac{u_{SMA}}{L_{SMA}} + \varepsilon_0 - \alpha \beta \right) \quad (4)$$

Além disso, o módulo de elasticidade de uma liga com memória de forma também é dependente da fase em que sua microestrutura se encontra. O material quando aquecido apresenta sua microestrutura na fase austenita, com uma rigidez mais elevada associada ao maior valor do módulo de elasticidade da austenita. Quando resfriado, torna-se mais suscetível à deformação, possuindo uma menor rigidez, associado ao menor valor do módulo de elasticidade da martensita. Embora seja possível alterar os valores de módulo de elasticidade das fases e as temperaturas em que ocorrem as transformações através da composição da liga, o módulo de

elasticidade da fase austenita é sempre maior quando comparado com a fase martensita do mesmo material. O modelo proposto por Brinson (Paiva & Savi, 1999) propõe a utilização da regra das misturas para representar o módulo de elasticidade de uma liga com memória de forma, onde os módulos de elasticidade para austenita e martensita estão indicados na equação, respectivamente, através dos subscritos A e M .

$$E = E_A + \beta(E_M - E_A) \quad (5)$$

Isolando o deslocamento da extremidade do fio de SMA (u_{SMA}) na Equação (4) obtém-se:

$$u_{SMA} = L_{SMA} \times \left[\frac{F_{SMA}}{E_{SMA} \times A_{SMA}} + \alpha \beta \right] \quad (6)$$

3.2.2 Lâmina de Aço

Estando definidas as dimensões dos fios de SMA que serão analisados, é preciso dimensionar a lâmina de forma que proponha um funcionamento ideal entre as etapas de ciclo do sistema. Tendo como base o estudo desenvolvido por Villanueva et al. (2011), considera-se uma lâmina de aço com largura de seção de 6 milímetros e um módulo de elasticidade de 200 GPa. Nas análises desenvolvidas considera-se um fio de SMA com 100 mm de comprimento e uma lâmina disposta em uma geometria de semicírculo, com raio de curvatura de 52 milímetros e ângulo de 180°. Para esta configuração, observa-se uma folga inicial de 4 mm (δ). O valor da espessura será considerado uma variável utilizada para adequação às condições de contorno e os outros parâmetros que se mantêm fixos.

Como escolha de metodologia para a determinação da rigidez da viga curva com uma carga aplicada na extremidade, optou-se pelo método de energia (Hibbeler, 2010), onde a energia de deformação linear elástica (U) é consequência da ação dos esforços internos de momento fletor, cortante e normal:

$$U = U^M + U^V + U^N \quad (7)$$

Pelo fato de a espessura da lâmina ser pequena em comparação ao comprimento, parte-se da hipótese que a energia de deformação causada pelo momento fletor possui valor muito maior em comparação aos esforços cisalhantes. Logo, por consequência desta definição, pode-se concluir que a energia de deformação do sistema é igual a energia de deformação causada por momento fletor e esforço normal.

$$U = U^M + U^N \quad (8)$$

A determinação da energia de deformação elástica em um sistema pode ser feito através da integral da energia de deformação por unidade de volume (u):

$$U = \int u \, dv \quad (9)$$

onde a energia de deformação elástica por unidade de volume, para o caso uniaxial, pode ser definida em termos de tensão e deformação por:

$$u = \frac{1}{2} \sigma \epsilon \quad (10)$$

logo, ao substituir a equação (10) na equação (9), obtém-se:

$$U = \int \frac{1}{2} \sigma \epsilon \, dv \quad (11)$$

e como considera-se o comportamento linear-elástico da lâmina, a lei de Hooke pode ser aplicada:

$$\sigma = \epsilon E \quad (12)$$

Por fim, ao aplicar a Equação (12) na Equação (11), encontra-se a equação integral para determinação da energia de deformação dependente das tensões causadas pelos esforços atuantes.

$$U = \int \frac{\sigma^2}{2 E} dv = \int_0^L \int_A \frac{\sigma^2}{2 E} dA dx \quad (13)$$

O valor da tensão normal promovida pelo momento fletor (M) pode ser obtido através da equação utilizada para vigas, visto que a lâmina sofre flexão quando acionada pelo fio e possui espessura muito pequena em relação ao raio de curvatura:

$$\sigma_x = \frac{-M y}{I_z} \quad (14)$$

Substituindo a Equação (14) na Equação (13):

$$U^M = \int_0^L \int_A \frac{1}{2 E} \times \left[\frac{-M y}{I_z} \right]^2 dA dx \quad (15)$$

$$U^M = \int_0^{\theta_f} \frac{M^2 y^2}{2 E I_z^2} A R d\theta \quad (16)$$

$$U^M = \frac{R}{2 E I_z} \int_0^{\theta_f} M^2 d\theta \quad (17)$$

Para o caso dos esforços normais, a tensão normal atuante é constante na seção transversal e possui um valor igual à razão entre a força e a área de seção. Dessa forma, a energia de deformação é definida por:

$$U^N = \int_0^L \int_A \frac{F_N^2}{2 E A^2} dA dx \quad (18)$$

$$U^N = \int_0^{\theta_f} \frac{F_N^2}{2 E A} R d\theta \quad (19)$$

$$U^N = \frac{R}{2 E A} \int_0^{\theta_f} F_N^2 d\theta \quad (20)$$

Para determinar os valores dos esforços internos na viga curva, utiliza-se uma análise geométrica do sistema. A Figura 17 apresenta o esboço da geometria do sistema, onde O' representa o centro de curvatura com ângulo θ_F , e α é o ângulo que este centro de curvatura faz com o fio de SMA.

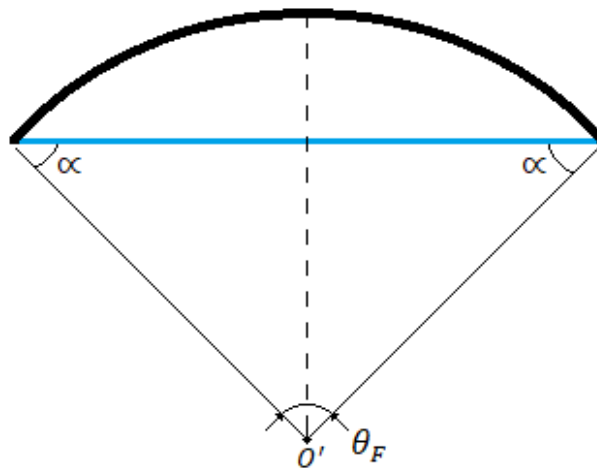


Figura 17 – Análise do sistema pela abordagem da viga curva.

Através de um corte pela linha tracejada, é possível identificar os esforços internos atuantes na estrutura. Na Figura 18 é apresentado este corte, onde:

R é o raio de circunferência do centroide da lâmina;

θ é metade do ângulo θ_F ;

P é a força exercida na lâmina pelo fio de SMA;

M é o esforço interno de momento fletor;
 N é o esforço interno de força normal;
 V é o esforço interno de força cortante.

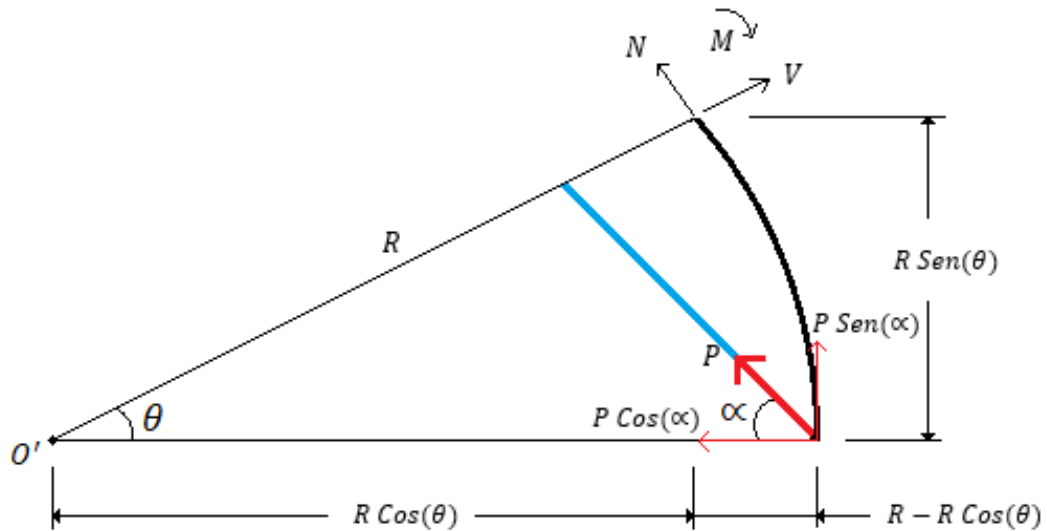


Figura 18 – Esforços atuantes no sistema.

Pela determinação do equilíbrio estático do sistema através da análise da Figura 18, tem-se:

$$\sum M = 0 \therefore M = PR[\text{Cos}(\alpha) \times \text{Sen}(\theta) - \text{Sen}(\alpha) \times (1 - \text{Cos}(\theta))] \quad (21)$$

$$\sum F_N = 0$$

$$F^N = P[\text{Cos}(\alpha) \times \text{Cos}(\pi/2 - \theta) + \text{Sen}(\alpha) \times \text{Sen}(\pi/2 - \theta)] \quad (22)$$

Ao aplicar a Equação (21) na Equação (17) e a Equação (22) na Equação (20), obtém-se:

$$U^M = \frac{P^2 R^3}{2 E I_z} \int_0^{\theta_f} [\text{Cos}(\alpha) \times \text{Sen}(\theta) - \text{Sen}(\alpha) \times (1 - \text{Cos}(\theta))]^2 d\theta \quad (23)$$

$$U^N = \frac{P^2 R}{2 EA} \int_0^{\theta_f} [\text{Cos}(\alpha) \times \text{Cos}(\pi/2 - \theta) + \text{Sen}(\alpha) \times \text{Sen}(\pi/2 - \theta)]^2 d\theta \quad (24)$$

O deslocamento da extremidade onde a carga está aplicada pode ser obtido ao aplicar o Teorema de Castigliano (Hibbeler, 2010):

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} \quad (25)$$

A aplicação deste teorema nas Equações (23) e (24) causa os seguintes resultados:

$$\delta^M = \frac{P R^3}{E I_z} \int_0^{\theta_f} [\text{Cos}(\alpha) \times \text{Sen}(\theta) - \text{Sen}(\alpha) \times (1 - \text{Cos}(\theta))]^2 d\theta \quad (26)$$

$$\delta^N = \frac{P R}{E A} \int_0^{\theta_f} [\text{Cos}(\alpha) \times \text{Cos}(\pi/2 - \theta) + \text{Sen}(\alpha) \times \text{Sen}(\pi/2 - \theta)]^2 d\theta \quad (27)$$

Por se tratar de um arco semicircular, os valores de alfa aplicados nas equações encontradas são nulos ($\alpha = 0$). Assim, as Equações (26) e (27) resultam em:

$$\delta^M = \frac{P R^3}{E I_z} \int_0^{\theta_f} [\text{Sen}(\theta)]^2 d\theta \quad (28)$$

$$\delta^N = \frac{P R}{E A} \int_0^{\theta_f} [\text{Cos}(\pi/2 - \theta)]^2 d\theta \quad (29)$$

E ao resolver as integrais nos limites definidos, obtém-se:

$$\delta^M = \frac{P R^3 \pi}{E I_z 2} \quad (30)$$

$$\delta^N = \frac{P R \pi}{E A 2} \quad (31)$$

A deformação horizontal sofrida pela lâmina definida pode ser obtida pela soma destas duas componentes de deslocamento:

$$\delta_{total} = \delta^M + \delta^N = \frac{P R^3 \pi}{E I_z 2} + \frac{P R \pi}{E A 2} \quad (32)$$

Pode-se definir a rigidez da viga curva como sendo a razão entre a força e o deslocamento do ponto de aplicação da carga:

$$K_{Lâmina} = \frac{P}{\delta_{total}} = \frac{1}{\frac{R^3 \pi}{E I_z 2} + \frac{R \pi}{E A 2}} \quad (33)$$

Para análise no modelo de molas com rigidez equivalente definido, o deslocamento da lâmina é encontrado diretamente como dependente da rigidez e da força atuante na lâmina:

$$u_{Lâmina} = \frac{F_{Lâmina}}{K_{Lâmina}} \quad (34)$$

3.2.3 Integração dos elementos no sistema

Após determinação das equações de deslocamento da lâmina de aço e do fio de SMA, esta seção fará a aplicação das Equações (6) e (34) na Equação (1). Por equilíbrio de forças no sistema e pela terceira lei de Newton, a força atuante no fio é a mesma que a atuante na lâmina de aço.

$$\delta = L_{SMA} \times \left[\frac{F}{E_{SMA} \times A_{SMA}} + \alpha \beta \right] + \frac{F}{K_{Lâmina}} \quad (35)$$

$$\delta = F \times \left[\frac{L_{SMA}}{E_{SMA} \times A_{SMA}} + \frac{1}{K_{Lâmina}} \right] + L_{SMA} \alpha \beta \quad (36)$$

Desta forma, é possível isolar a variável representante da força para definir seu valor.

$$F = \frac{\delta - L_{SMA} \alpha \beta}{\frac{L_{SMA}}{E_{SMA} \times A_{SMA}} + \frac{1}{K_{Lâmina}}} \quad (37)$$

Uma condição necessária estabelecida para o modelo de análise é o requerimento de que a força seja suficiente para promover a reorientação de martensita maclada para martensita demaclada no fio de SMA. Esta abordagem permite estabelecer valores de diâmetros adequados para o fio de SMA analisado:

$$F > \sigma_{cr}^s \times A_{SMA} \quad (38)$$

onde (σ_{cr}^s) representa a tensão crítica para a transformação da martensita maclada em não maclada, através de um carregamento mecânico.

A espessura máxima da lâmina pode ser definida de maneira semelhante. A lâmina não pode ter rigidez tão grande que cause uma força maior que a tensão crítica final de transformação.

$$F < \sigma_{cr}^f A_{SMA} \quad (39)$$

Pelo fato deste trabalho estar analisando a adequação de valores de espessura de lâmina para as condições de contorno definidas, é preciso definir também o valor de beta atuante no fio entre as etapas de ciclo. É suposto uma fração

volumétrica de fase de $\beta = 0,3$ para a etapa de repouso e $\beta = 0$ para a etapa de aquecimento.

Desta forma, considerou-se valores de tensão requerida para iniciar o processo de transformação de fase de 200 MPa. A tensão final de transformação que é requerida para transformar o fio de SMA para martensita demaada completamente é 360 MPa. Sendo feita a consideração de uma curva linear entre as duas tensões limite antes mencionadas, tem-se que a tensão de transformação para $\beta = 0,3$ é $\sigma = 248$ MPa.

Para encontrar a variação de deformação sofrida pela extremidade da lâmina entre as fases de aquecimento e repouso do ciclo deve-se calcular a diferença de $u_{Lâmina}$ entre essas fases, visto que esta variável representa o deslocamento sofrido pela extremidade da lâmina em relação à posição antes do acoplamento com o fio. Os valores de força são dependentes da fração volumétrica de fase presente em cada etapa; $\beta = 0,3$ para quando fio está em repouso e $\beta = 0$ para quando o fio está aquecido.

$$\Delta u_{Lâmina} = \frac{\Delta F}{K_{Lâmina}} \quad (40)$$

$$\Delta u_{Lâmina} = u_{Lâmina \text{ aquecida}} - u_{Lâmina \text{ repouso}} \quad (41)$$

Também foi analisada a variação de tensão entre fases, seguindo a mesma abordagem feita para o deslocamento:

$$\Delta \sigma_{SMA} = \frac{\Delta F}{A_{SMA}} \quad (42)$$

Após determinação da espessura de lâmina necessária para atingir a tensão associada à fração volumétrica de fase de 0,3 ($\sigma = 248$ MPa), analisou-se mais 10 lâminas com maiores espessuras em intervalos de 1 mm.

3.3 MODELOS NUMÉRICOS

Esta seção apresentará os modelos numéricos estudados com uso do software Ansys.

As condições de contorno aplicadas no modelo consistem em um suporte fixo aplicado na extremidade direita da lâmina, enquanto se prescreve um deslocamento de 4 milímetros na direção horizontal da extremidade esquerda. Estas condições de contorno estão explicitadas na Figura 19.

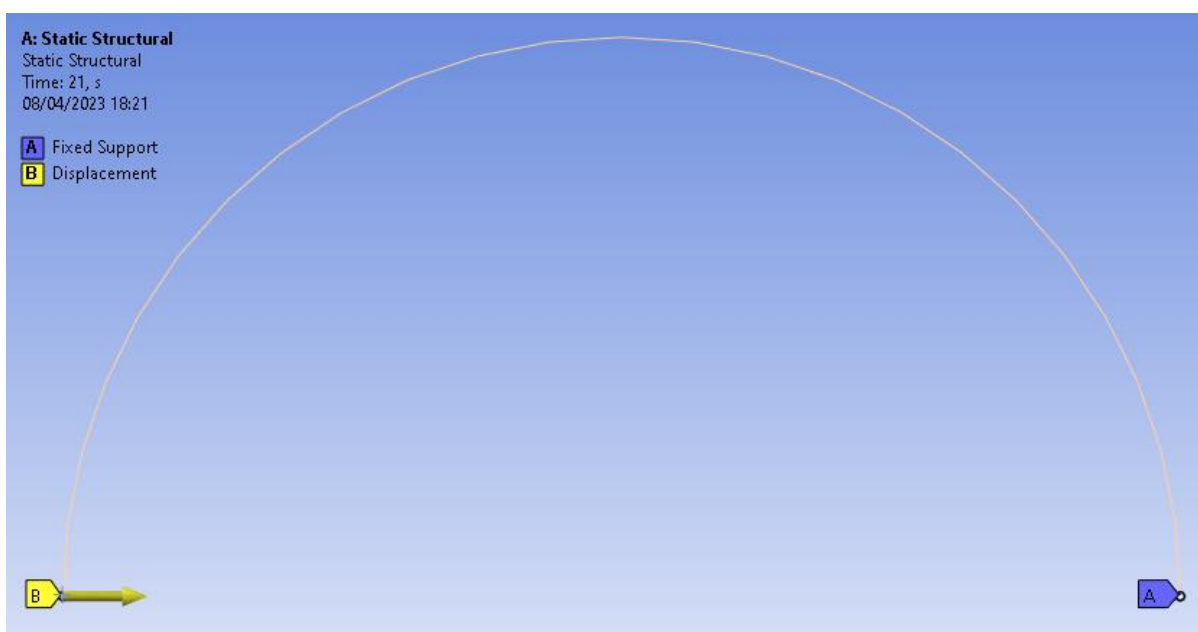


Figura 19 – Condições de contorno aplicadas no modelo numérico de resistência da lâmina.

A aplicação de um deslocamento na extremidade esquerda permitiu encontrar a força necessária para tal movimento. Para determinação da malha utilizada no modelo, é feita uma análise de convergência dos valores de força encontrados conforme aumenta-se o número de divisões de malha. Esta análise foi feita com a utilização dos valores de seção de lâmina utilizados por Villanueva et al. (2011). O artigo em questão fez uso de uma lâmina curvada em 180° com raio de curvatura de 52 milímetros, 6 milímetros de largura e 0,05 milímetros de espessura.

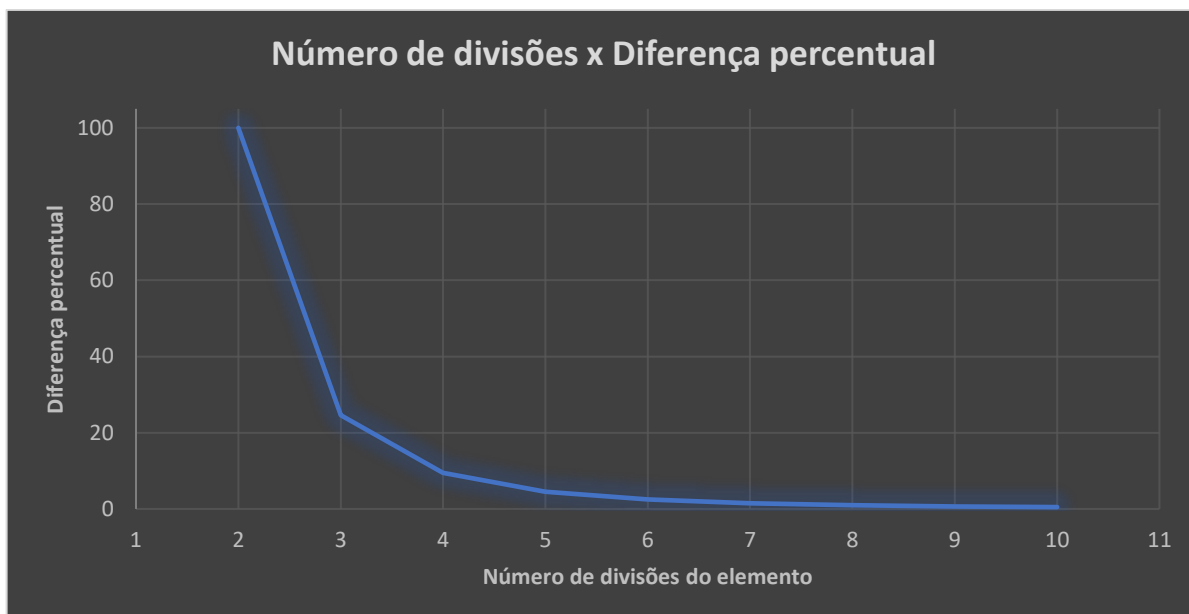


Figura 20 – Gráfico de análise de convergência por variação da quantidade de divisões do elemento.

Como segunda verificação, é feita outra análise do modelo da lâmina de aço. Desta vez, é ativada a opção de grandes deslocamentos (*Large Deflection*). A ativação deste recurso significa que agora o software irá considerar grandes deslocamentos e efeitos não lineares na análise. Este recurso é geralmente utilizado na análise de elementos que sofrerão deslocamentos significativos em relação às dimensões iniciais, impactando na distribuição de tensões na estrutura.

Simulações foram desenvolvidas considerando o modelo numérico completo do sistema (lâmina curva conectada ao fio de SMA), com diferentes valores de espessura de lâmina. O valor de largura de seção da lâmina é mantido fixo em 6 mm, sendo um semicírculo curvado em 180 graus com raio de curvatura de 52 mm. Os fios de SMA analisados serão os mesmos estudados analiticamente. Para análise dos parâmetros de interesse durante as etapas de ciclo de atuação, foi aplicada uma malha dividida em trinta vezes, como é visto na Figura 21.

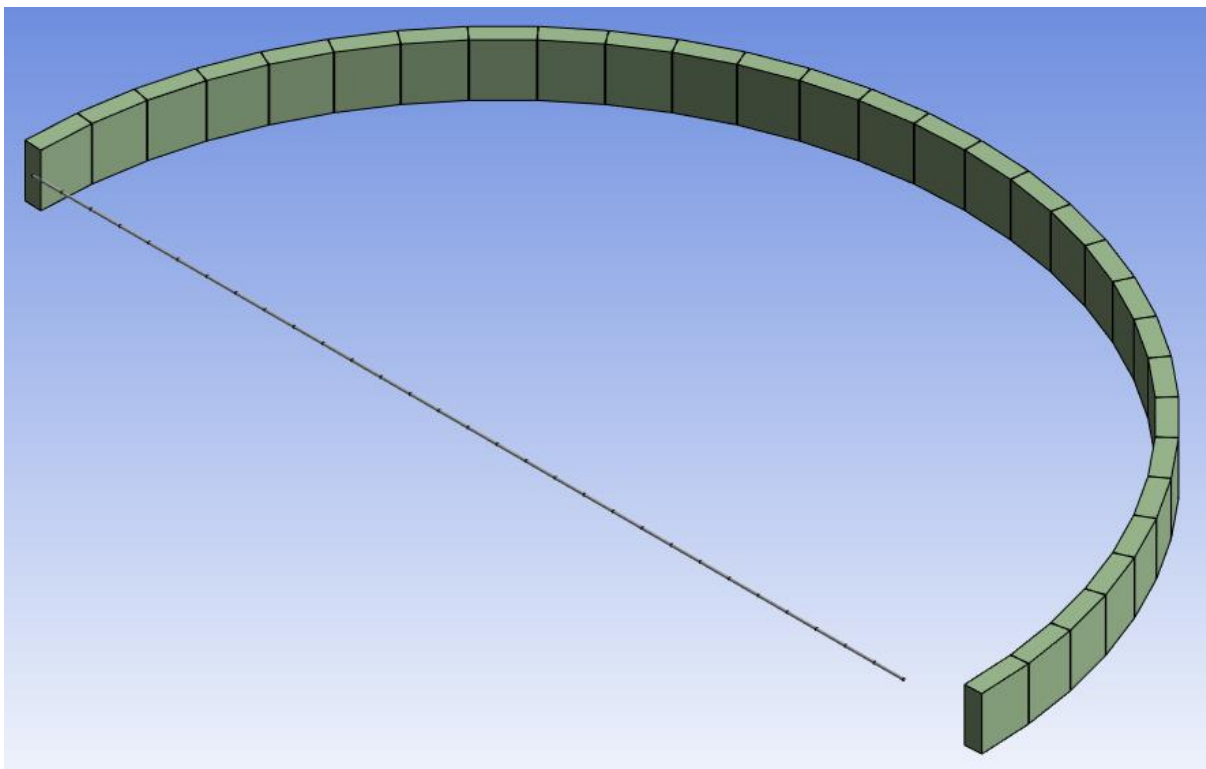


Figura 21 – Malha aplicada no modelo de elementos finitos.

A modelagem destes componentes no software foi feita de maneira que as extremidades da lâmina de aço e do fio de SMA estivessem unidas através do recurso de unir regiões de contato (*Share Topology*). Esta união é aplicada no canto esquerdo dos elementos da Figura 22 (Ponto D).

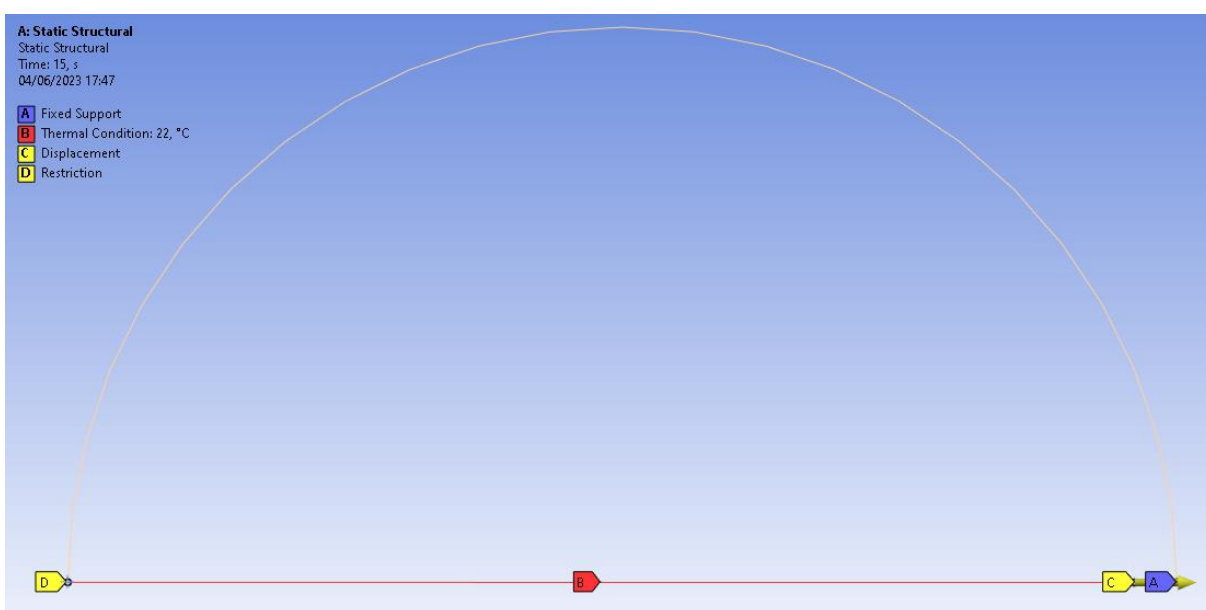


Figura 22 – Ações e condições de contorno previstas no modelo estudado.

As prescrições feitas no modelo são representadas pelas letras A, B, C e D.

A: Suporte fixo localizado na extremidade direita da lâmina de aço;

B: Condição térmica do fio de SMA, variando entre temperatura ambiente (22 °C) e temperatura máxima;

C: Deslocamento horizontal aplicado na extremidade direita do fio de SMA, para simular a fase de acoplamento do fio na lâmina;

D: Restrição de deslocamento nas direções normais à direção horizontal para a extremidade esquerda da lâmina, permitindo movimentos apenas no sentido horizontal do fio.

As prescrições de temperatura no fio de SMA foram feitas com abordagens de temperatura máxima diferentes. Inicialmente, o fio é aquecido com temperatura máxima de 120° C. Posteriormente, para verificar como o sistema se comportaria em razão da mudança de temperatura máxima de aquecimento, analisou-se o aquecimento do fio até 200° C. A Figura 23 apresenta o gráfico de prescrição de temperatura para o caso de aquecimento até 120° C.

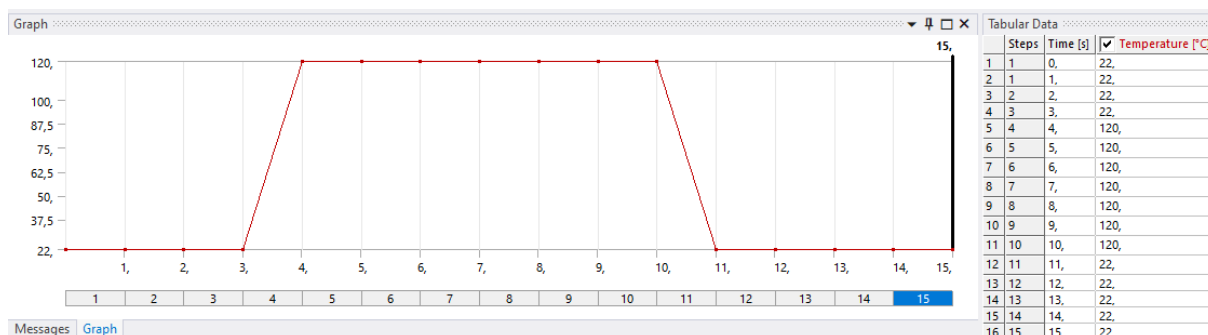


Figura 23 – Gráfico de prescrição de temperatura para o caso de aquecimento até 120° C.

Assim como feito analiticamente, é analisado o deslocamento sofrido entre as fases de acionamento e repouso do ciclo. O ponto de verificação deste parâmetro é identificado na Figura 24 como sendo a extremidade esquerda do fio.



Figura 24 – Ponto de verificação do deslocamento sofrido pela lâmina e o fio de SMA.

Além do deslocamento, são analisadas as tensões atuantes no fio e os valores de beta β presentes ao longo do ciclo de atuação. A Figura 25 apresenta os elementos onde estes valores são avaliados.

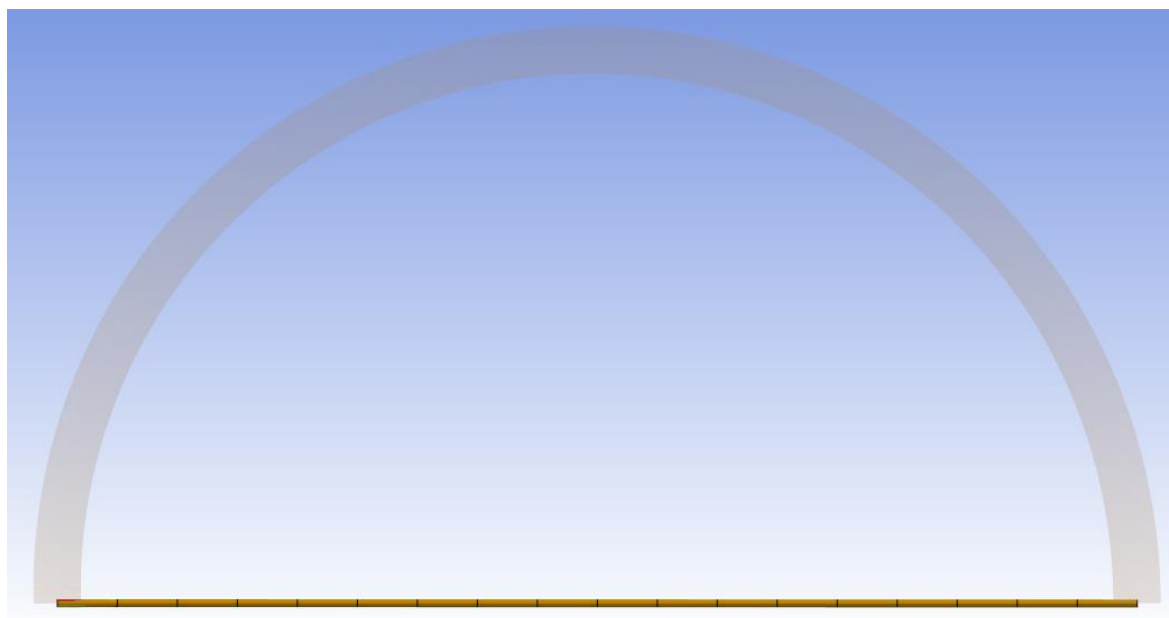


Figura 25 – Elemento de verificação de valores de beta e tensões atuantes no fio de SMA.

As primeiras análises foram feitas com a prescrição de temperatura máxima sendo 120 °C e deformação inicial de 4% para acoplamento do fio nas extremidades da lâmina de aço. Todos os resultados obtidos numericamente foram selecionados como sendo o valor médio apresentado pelo Ansys.

Além da avaliação feita considerando uma deformação inicial de 4% o comprimento do fio, fez-se também um estudo considerando uma deformação inicial de 8% para o fio de 0,3810 mm. Esta abordagem teve o propósito de verificar se o deslocamento sofrido entre etapas faria o sistema se comportar de maneira diferente.

Por fim, avaliou-se a mudança do parâmetro de temperatura de aquecimento máxima para o fio de 0,3810. Considerou-se que a temperatura do fio oscila entre 22°C e 200 °C.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos por modelos analíticos e numéricos feita é apresentada nas próximas seções.

4.1 MODELOS ANALÍTICOS

Os resultados obtidos por modelagem analítica para o sistema como um todo foram feitos tendo como opção de análise os fios de 0,2032 mm e 0,3810 mm. Os valores máximos e mínimos de espessura de lâmina para cada um dos diâmetros de fios de SMA estão dispostos na Tabela 1. O intervalo de espessuras foi definido com base nas condições de contorno do sistema.

Tabela 1 – Intervalo de espessuras de lâmina possíveis para cada fio de SMA associado.

Fio de SMA	Espessura mínima	Espessura máxima
0,3810 mm	3,8 mm	4,8 mm
0,5080 mm	4,6 mm	5,6 mm

A Tabela 2 apresenta os resultados analíticos obtidos pela análise do fio de SMA de 0,3810 milímetros. Foram analisadas as deformação e tensões atuantes no fio durante as etapas de aquecimento e repouso. Os cálculos foram realizados com base nas Equações (41) e (42). Os valores de variação de beta são fixos em 0,3.

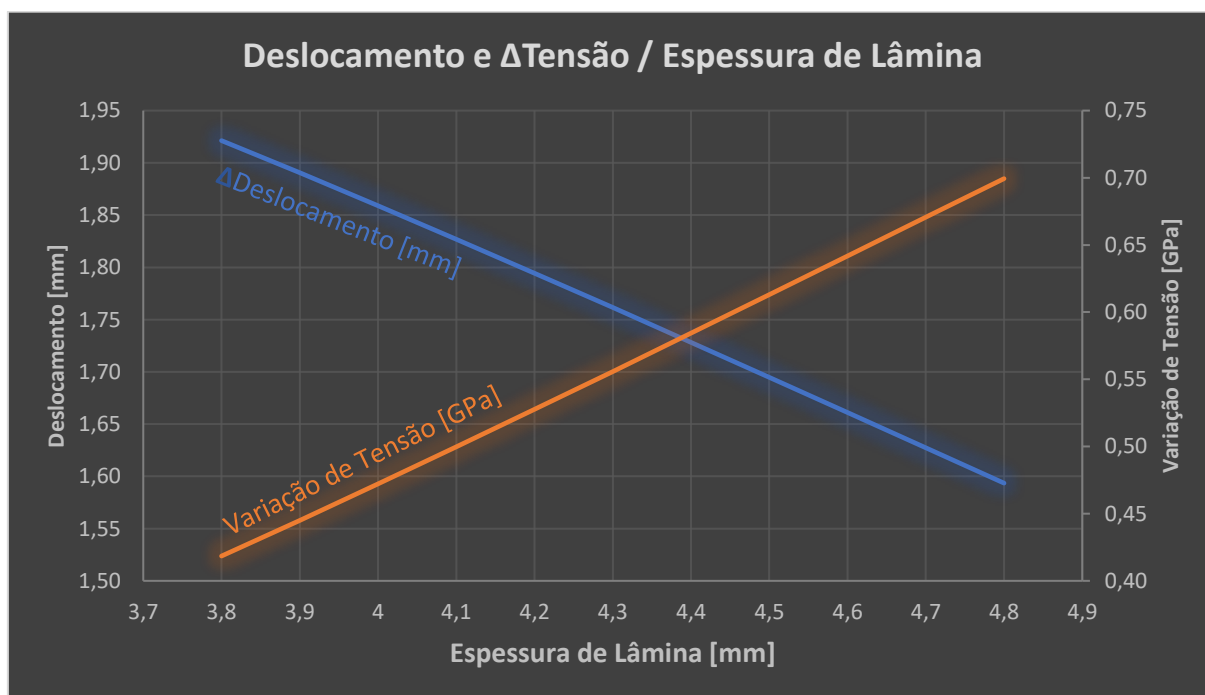
Pelo fato de serem pré-definidos os valores de beta durante as etapas de ciclo do sistema, o deslocamento é inteiramente dependente apenas da tensão atuante no fio de SMA. Nota-se pela coluna “Tensão (Atuado)” um aumento significativo causado pelo aumento do valor de espessura de lâmina. O aumento da rigidez da lâmina de aço impede o fio de SMA transformar de fase para austenita da mesma maneira que conseguiria para lâminas de menores espessuras. Para a coluna “Tensão (Repouso)” os valores aumentam, mas não tanto quanto para a coluna “Tensão (Atuado)”.

Verifica-se que após ser atingida a tensão requerida para transformação de fase, os valores de deslocamento decrescem por consequência da variação de tensão.

Tabela 2 – Dados analíticos referentes às diferentes espessuras para o fio de 0,3810 mm.

Espessura	ΔBeta	Tensão (Atuado)	Tensão (Repouso)	$\Delta\text{Tensão}$	$\Delta\text{Deslocamento}$
3,8 mm	0,30	675 MPa	257 MPa	418 MPa	1,92 mm
3,9 mm	0,30	717 MPa	272 MPa	445 MPa	1,89 mm
4,0 mm	0,30	759 MPa	287 MPa	472 MPa	1,86 mm
4,1 mm	0,30	802 MPa	302 MPa	500 MPa	1,83 mm
4,2 mm	0,30	845 MPa	317 MPa	528 MPa	1,79 mm
4,3 mm	0,30	888 MPa	333 MPa	556 MPa	1,76 mm
4,4 mm	0,30	932 MPa	348 MPa	584 MPa	1,73 mm
4,5 mm	0,30	976 MPa	363 MPa	613 MPa	1,69 mm
4,6 mm	0,30	1.020 MPa	378 MPa	642 MPa	1,66 mm
4,7 mm	0,30	1.064 MPa	393 MPa	671 MPa	1,63 mm
4,8 mm	0,30	1.107 MPa	408 MPa	699 MPa	1,59 mm

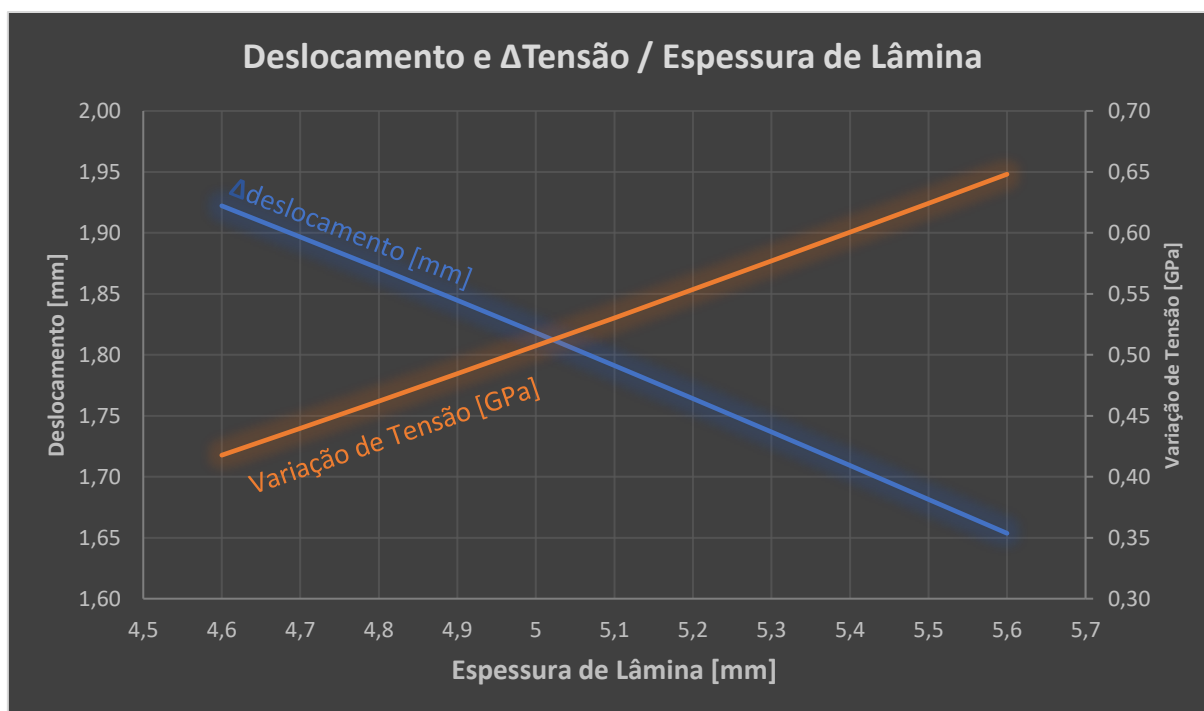
O gráfico apresentado na Figura 26 evidencia a correlação inversamente proporcional entre o deslocamento sofrido e a variação de tensão entre as fases de ciclo.

**Figura 26** – Gráfico de deslocamento e variação de tensão por espessura de lâmina analítico para o fio de 0,3810 mm.

Para o fio de 0,5080 milímetros, a Tabela 3 apresenta os resultados obtidos analiticamente. Os dados da Tabela 3 são exibidos graficamente na Figura 27.

Tabela 3 – Dados analíticos referentes às diferentes espessuras para o fio de 0,5080 mm.

Espessura	ΔBeta	Tensão (Atuado)	Tensão (Repouso)	$\Delta\text{Tensão}$	$\Delta\text{Deslocamento}$
4,6 mm	0,30	674 MPa	256 MPa	418 MPa	1,92 mm
4,7 mm	0,30	708 MPa	269 MPa	440 MPa	1,90 mm
4,8 mm	0,30	743 MPa	281 MPa	462 MPa	1,87 mm
4,9 mm	0,30	778 MPa	294 MPa	484 MPa	1,84 mm
5,0 mm	0,30	813 MPa	306 MPa	507 MPa	1,82 mm
5,1 mm	0,30	849 MPa	319 MPa	530 MPa	1,79 mm
5,2 mm	0,30	885 MPa	331 MPa	554 MPa	1,76 mm
5,3 mm	0,30	921 MPa	344 MPa	577 MPa	1,74 mm
5,4 mm	0,30	957 MPa	357 MPa	601 MPa	1,71 mm
5,5 mm	0,30	993 MPa	369 MPa	624 MPa	1,68 mm
5,6 mm	0,30	1.030 MPa	382 MPa	648 MPa	1,65 mm

**Figura 27** – Gráfico de deslocamento e variação de tensão por espessura de lâmina analítico para o fio de 0,5080 mm.

Para os dois fios analisados, o comportamento de relação entre o deslocamento sofrido e a variação de tensão é de grande semelhança. Tanto a relação inversamente proporcional, quanto a inclinação de curva e os valores obtidos são bastante parecidos.

Os valores de beta para as etapas de ciclo atuado e em repouso são pré-definidos pela análise feita analiticamente. Pelo fato de as variações de beta entre etapas de ciclo serem contínuas, o deslocamento é apenas dependente da variação de tensão atuante no fio. Para os casos estudados analiticamente a deformação é máxima para a lâmina de menor espessura e tem valor aproximado de 1,92 mm para ambos os casos.

4.2 MODELOS NUMÉRICOS

Em abordagem numérica para análise do sistema, foram investigadas as consequências pela variação da espessura da lâmina. Diversas simulações foram realizadas para elaborar a Tabela 4. A tabela apresenta resultados obtidos pelas prescrições de deslocamento inicial de 4 mm e temperatura variando ao longo do tempo, sendo máxima de 120° C e mínima de 22° C. Os fios analisados numericamente foram novamente os de 0,3810 mm e 0,5080 mm.

Tabela 4 – Dados numéricos referentes às diferentes espessuras para o fio de 0,3810 mm.

Espessura	Beta (Repouso)	Beta (Atuado)	Δ Beta	Tensão (Repouso)	Tensão (Atuado)	Δ Tensão	Δ Deslocamento
1,8 mm	0,10255	0,00001	0,10254	265 MPa	317 MPa	52 MPa	0,63 mm
1,9 mm	0,15394	0,00003	0,15391	275 MPa	367 MPa	92 MPa	0,93 mm
2,0 mm	0,19760	0,00009	0,19751	284 MPa	419 MPa	136 MPa	1,18 mm
2,1 mm	0,23472	0,00018	0,23454	291 MPa	476 MPa	185 MPa	1,37 mm
2,2 mm	0,26634	0,00034	0,26600	297 MPa	535 MPa	237 MPa	1,52 mm
2,3 mm	0,29335	0,00076	0,29259	302 MPa	596 MPa	294 MPa	1,64 mm
2,4 mm	0,31649	0,05018	0,26631	307 MPa	605 MPa	298 MPa	1,44 mm
2,5 mm	0,33640	0,09171	0,24469	311 MPa	614 MPa	303 MPa	1,28 mm
2,6 mm	0,35359	0,12764	0,22595	314 MPa	620 MPa	306 MPa	1,14 mm

Com os dados numéricos, foi elaborada a visualização gráfica dos valores de deslocamento, variação de beta e variação de tensão atuantes no fio por espessura de lâmina. A Figura 28 apresenta o gráfico para visualização destes parâmetros, para o fio de 0,3810 milímetros.

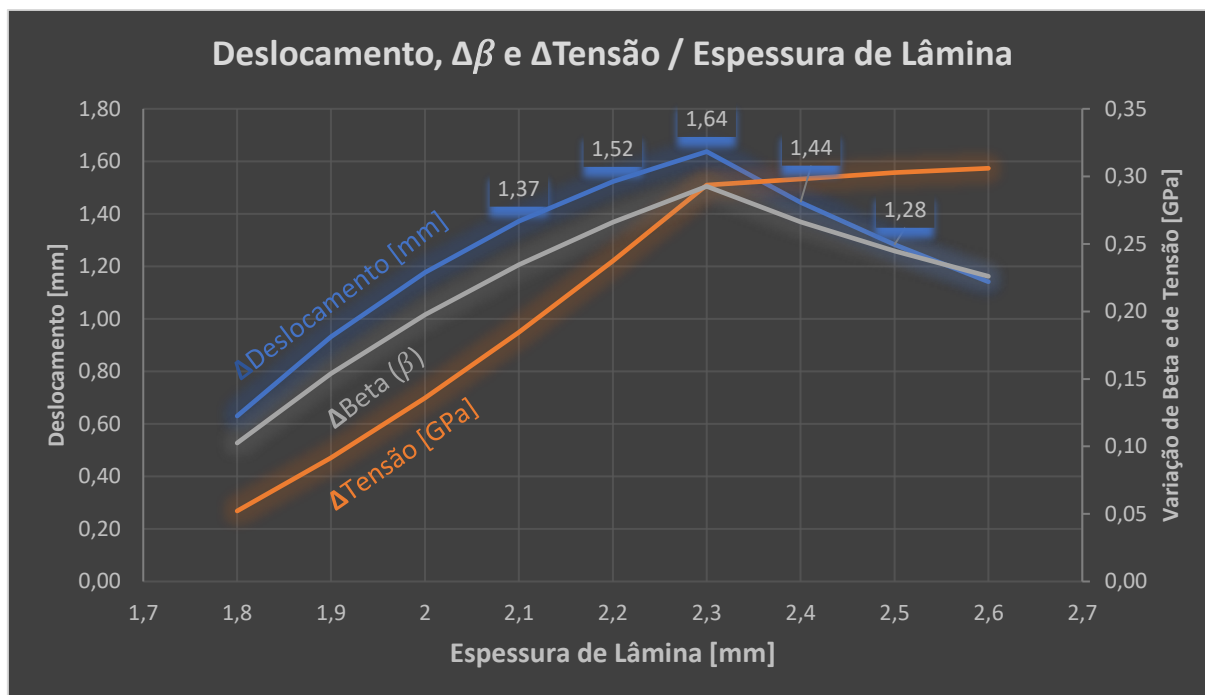


Figura 28 – Gráfico de deslocamento, variação de beta e variação de tensão por espessura de lâmina numérico para o fio de 0,3810 mm.

A diferença da variação de beta entre as medições feitas para as lâminas de 2,4 mm e 2,2 mm é de apenas 0,00031. O deslocamento medido para a lâmina de 2,4 mm de espessura apresenta valor inferior por consequência do aumento da variação de tensão. Este fato confirma a relação inversamente proporcional vista no estudo analítico.

O impacto de beta pode ser mensurado ao analisar a inclinação inicial das curvas do gráfico. Mesmo havendo aumento na variação de tensão, o deslocamento aumenta consideravelmente por consequência do aumento de variação de beta. A parte decrescente da curva de deslocamento confirma esta hipótese, ao apresentar decaimento considerável mesmo com uma variação de tensão estável; o deslocamento nesta etapa diminui por consequência da redução da variação de beta.

Para o fio de 0,5080 milímetros, os dados elaborados estão apresentados na Tabela 5 e visualizados graficamente na Figura 29. Os dados apresentados na Tabela 5 foram obtidos pelas mesmas prescrições feitas para os dados da Tabela 4. Tem-se um deslocamento inicial de 4 mm e variação de temperatura entre etapas de 22° C e 120° C.

Tabela 5 – Dados numéricos referentes às diferentes espessuras para o fio de 0,5080 mm.

Espessura	Beta (Repouso)	Beta (Atuado)	ΔBeta	Tensão (Repouso)	Tensão (Atuado)	$\Delta\text{Tensão}$	$\Delta\text{Deslocamento}$
2,5 mm	0,03214	0,00001	0,03212	251 MPa	265 MPa	14 MPa	0,20 mm
2,6 mm	0,07465	0,00003	0,07462	259 MPa	295 MPa	36 MPa	0,46 mm
2,7 mm	0,11285	0,00005	0,11280	267 MPa	327 MPa	60 MPa	0,69 mm
2,8 mm	0,14728	0,00010	0,14718	274 MPa	360 MPa	86 MPa	0,89 mm
2,9 mm	0,17810	0,00015	0,17795	280 MPa	395 MPa	115 MPa	1,07 mm
3,0 mm	0,20576	0,00026	0,20550	285 MPa	431 MPa	146 MPa	1,22 mm
3,1 mm	0,23057	0,00037	0,23020	290 MPa	469 MPa	178 MPa	1,35 mm
3,2 mm	0,25281	0,00056	0,25225	294 MPa	508 MPa	213 MPa	1,46 mm
3,3 mm	0,27278	0,00078	0,27200	298 MPa	548 MPa	250 MPa	1,55 mm
3,4 mm	0,29074	0,00115	0,28959	302 MPa	589 MPa	287 MPa	1,62 mm
3,5 mm	0,30696	0,00423	0,30273	305 MPa	629 MPa	324 MPa	1,67 mm
3,6 mm	0,32158	0,06045	0,26113	308 MPa	608 MPa	300 MPa	1,41 mm
3,7 mm	0,33480	0,08827	0,24653	311 MPa	613 MPa	302 MPa	1,30 mm
3,8 mm	0,34677	0,11330	0,23347	313 MPa	618 MPa	305 MPa	1,20 mm
3,9 mm	0,35764	0,13601	0,22163	315 MPa	622 MPa	307 MPa	1,11 mm
4,0 mm	0,36751	0,15632	0,21119	317 MPa	626 MPa	309 MPa	1,03 mm
4,1 mm	0,37651	0,17469	0,20182	319 MPa	629 MPa	311 MPa	0,96 mm
4,2 mm	0,38471	0,19140	0,19331	320 MPa	633 MPa	312 MPa	0,89 mm
4,3 mm	0,39221	0,20660	0,18561	322 MPa	636 MPa	314 MPa	0,83 mm

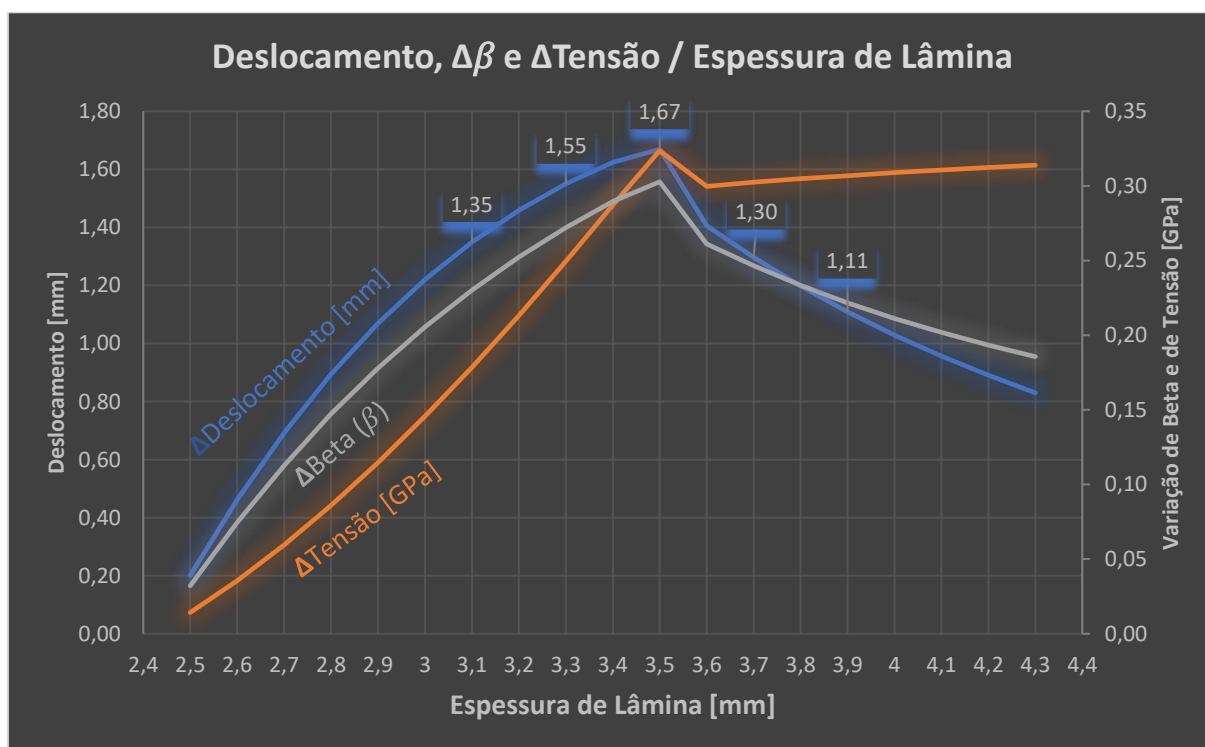


Figura 29 – Gráfico de deslocamento, variação de beta e variação de tensão por espessura de lâmina numérico para o fio de 0,5080 mm.

O aumento do valor de espessura de lâmina utilizada no sistema impacta no aumento dos valores de beta e tensão em ambas as fases do ciclo de atuação. As diferentes variações de beta são justificadas por inicialmente ter-se aumento mais significativo para a etapa de repouso do fio, ocorrendo em um aumento da variação de beta. Porém, há um momento em que beta apresenta maior aumento na etapa de atuação do fio, causando um decréscimo na variação de beta.

Nota-se pelos gráficos elaborados que maiores variações de beta têm como consequência maiores deslocamentos sofridos pelo sistema entre etapas de ciclo.

Em busca do aumento do valor de deslocamento sofrido pelo sistema entre as etapas do ciclo, é reconsiderada a deformação inicial sofrida pelo fio de SMA para acoplamento na lâmina de aço. A análise do fio com diâmetro de 0,3810 milímetros foi refeita com a consideração de que agora é deformado a quantidade máxima prevista pelo fabricante. Pelo datasheet do fornecedor, tem-se uma deformação máxima de 8%, equivalente em 8 milímetros para o fio. Desta vez, analisou-se o intervalo de espessuras entre 1,4 e 2,7 milímetros. Os dados obtidos estão disponibilizados na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados numéricos referentes às diferentes espessuras para o fio de 0,3810 mm deformado inicialmente em 8 milímetros.

Espessura	Beta (Repouso)	Beta (Atuado)	Δ Beta	Tensão (Repouso)	Tensão (Atuado)	Δ Tensão	Δ Deslocamento
1,4 mm	0,06541	0,00020	0,06521	257 MPa	272 MPa	15 MPa	0,43 mm
1,5 mm	0,19175	0,00033	0,19142	283 MPa	331 MPa	48 MPa	1,26 mm
1,6 mm	0,30253	0,00048	0,30205	304 MPa	396 MPa	92 MPa	1,98 mm
1,7 mm	0,39733	0,00079	0,39654	323 MPa	469 MPa	146 MPa	2,59 mm
1,8 mm	0,47754	0,00109	0,47645	339 MPa	550 MPa	211 MPa	3,09 mm
1,9 mm	0,54495	0,00188	0,54307	352 MPa	637 MPa	285 MPa	3,50 mm
2,0 mm	0,60147	0,17701	0,42446	363 MPa	630 MPa	267 MPa	2,70 mm

A Figura 30 apresenta os dados da Tabela 6 graficamente.

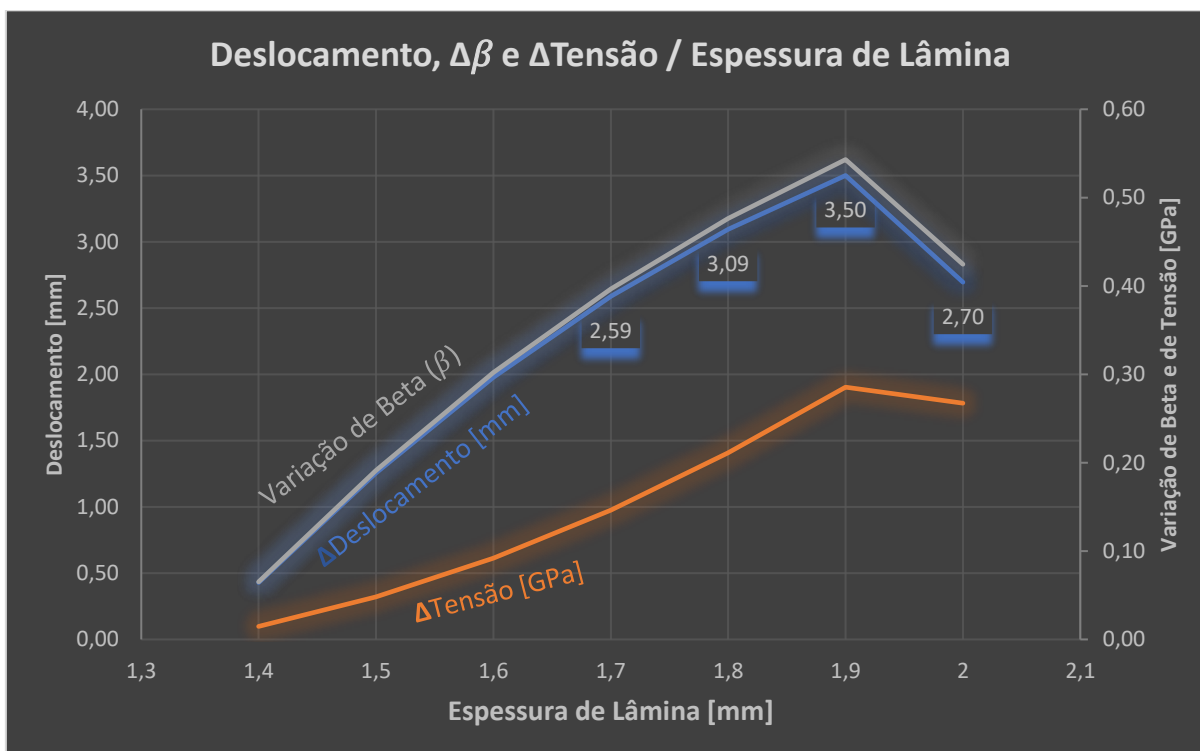


Figura 30 – Gráfico de deslocamento, variação de beta e variação de tensão por espessura de lâmina numérico para o fio de 0,3810 mm deformado inicialmente em 8 milímetros.

Esta análise propõe um aumento considerável para a deformação máxima obtida no sistema. Atingindo valor máximo de deslocamento de 3,5 milímetros, a variação de beta neste ponto é de 0,54. A recomendação do fabricante para variação máxima é entre o intervalo de 3% a 5%. Para atender esta condição, pode-se utilizar valores de espessura alternativos ou reduzir a deformação inicial.

Como última abordagem, a análise do fio de 0,3810 mm foi refeita para variação de temperatura entre 22°C e 200°C. O objetivo do estudo é verificar os efeitos de aumentar a temperatura máxima do ciclo de carregamento. A Tabela 7 apresenta os dados obtidos.

Tabela 7 – Dados numéricos referentes às diferentes espessuras para o fio de 0,3810 mm com tempera máxima de 200°C.

Espessura	Beta (Repouso)	Beta (Atuado)	Δ Beta	Tensão (Repouso)	Tensão (Atuado)	Δ Tensão	Δ Deslocamento
1,8 mm	0,10255	0,00000	0,10255	265 MPa	318 MPa	53 MPa	0,63 mm
1,9 mm	0,15395	0,00000	0,15395	275 MPa	367 MPa	92 MPa	0,93 mm
2,0 mm	0,19761	0,00000	0,19761	284 MPa	420 MPa	136 MPa	1,18 mm
2,1 mm	0,23478	0,00000	0,23478	291 MPa	476 MPa	185 MPa	1,37 mm
2,2 mm	0,26635	0,00000	0,26635	297 MPa	535 MPa	238 MPa	1,52 mm
2,3 mm	0,29335	0,00000	0,29335	302 MPa	597 MPa	295 MPa	1,64 mm
2,4 mm	0,31649	0,00000	0,31649	307 MPa	661 MPa	354 MPa	1,73 mm
2,5 mm	0,3364	0,00000	0,33640	311 MPa	728 MPa	417 MPa	1,79 mm
2,6 mm	0,35359	0,00000	0,35359	314 MPa	795 MPa	481 MPa	1,82 mm

Os dados da Tabela 7 são apresentados graficamente na Figura 31.

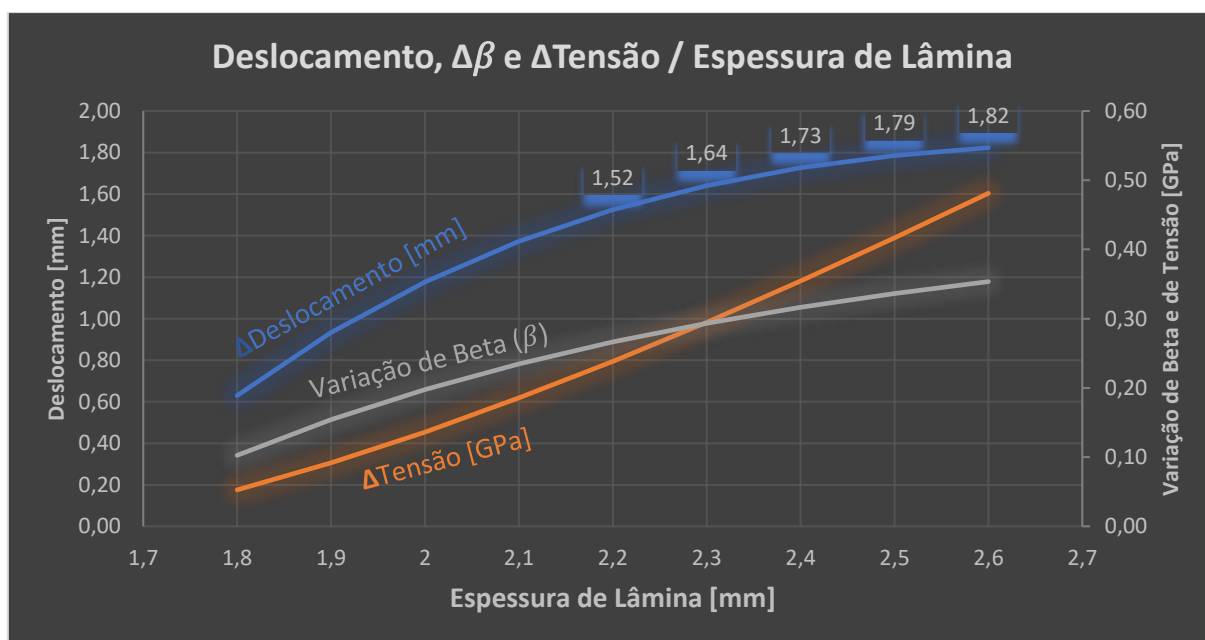


Figura 31 – Gráfico de deslocamento, variação de beta e variação de tensão por espessura de lâmina numérico para o fio de 0,3810 mm com máxima temperatura de 200°C.

Os valores obtidos pela análise com maior temperatura de aquecimento do fio tendem para valores quase nulos de beta para quando o fio está em etapa de atuação, enquanto os valores durante a etapa de repouso são iguais ao obtidos pela análise de aquecimento até 120°C. Por consequência, a variação de beta não apresenta uma curva de decréscimo. O deslocamento é aumentado até o máximo possível; tanto quanto o fio agüente ser tensionado.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS

Esta seção é dedicada à comparação dos resultados obtidos pelas abordagens analítica e numérica feitas. Para o modelo numérico, os resultados são representativos da análise feita com prescrições de folga inicial de 4 milímetros e aquecimento máximo de 120° C. Para a abordagem analítica, os resultados são referentes à consideração de folga inicial de 4 milímetros, beta em etapa de atuação do fio igual a 0 e beta em etapa de repouso do fio igual a 0,3. A Figura 32 apresenta o gráfico obtido com os resultados analíticos e numéricos obtidos em análise voltada ao fio de 0,3810 mm de diâmetro.

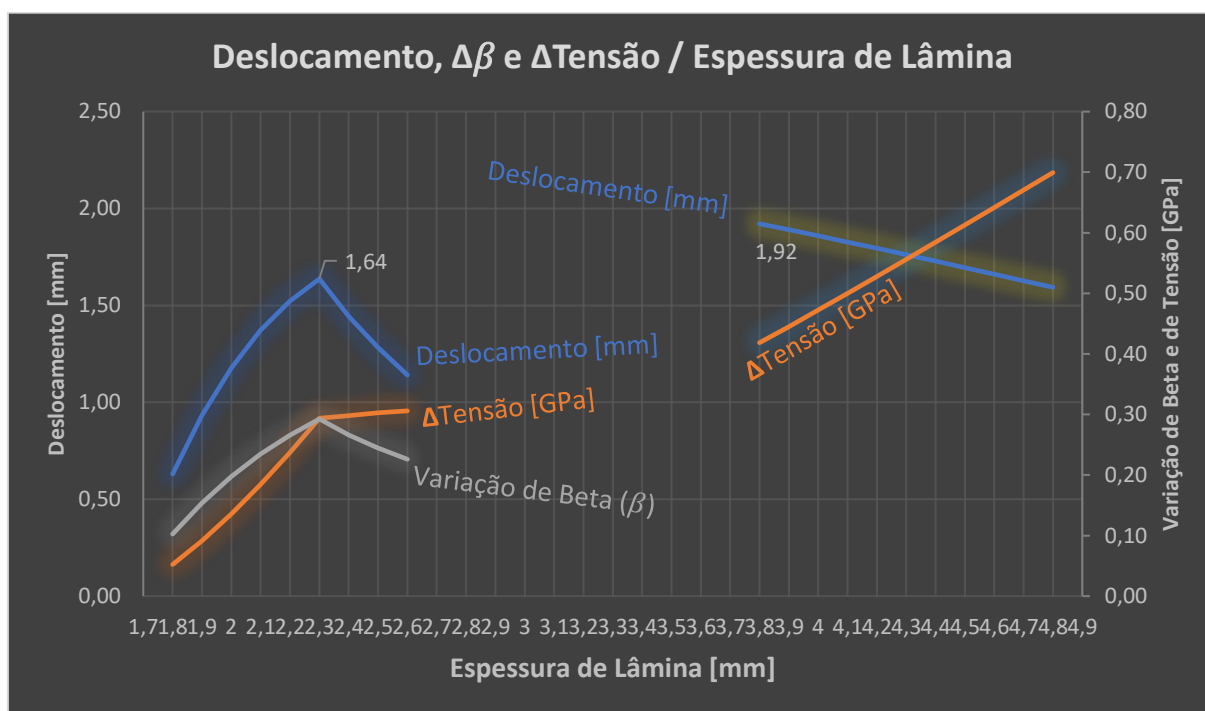


Figura 32 – Gráfico de deslocamento, variação de beta e variação de tensão por espessura de lâmina numérico e analítico para o fio de 0,3810 mm.

A mesma análise gráfica foi feita para entendimento dos dados obtidos analiticamente e numericamente para o fio de 0,5080 milímetros. As prescrições são iguais às estabelecidas para o gráfico anterior. Para o modelo numérico, os resultados são representativos da análise feita com prescrições de folga inicial de 4 milímetros e aquecimento máximo de 120° C. Para a abordagem analítica, os resultados são referentes à consideração de folga inicial de 4 milímetros, beta em etapa de atuação do fio igual a 0 e beta em etapa de repouso do fio igual a 0,3.

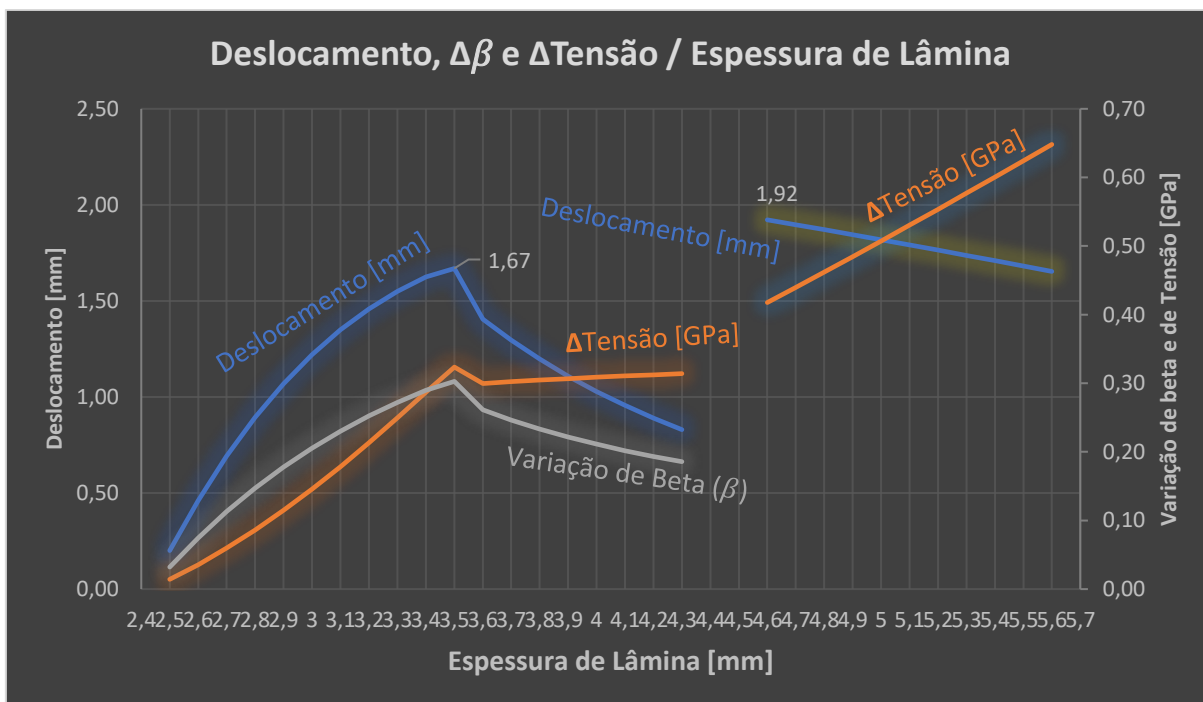


Figura 33 – Gráfico de deslocamento, variação de beta e variação de tensão por espessura de lâmina numérico e analítico para o fio de 0,5080 mm.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta um estudo do comportamento de um mecanismo biomimético baseado em uma água-viva atuado por um fio de liga com memória de forma. Duas abordagens foram adotadas para avaliar o comportamento do sistema: um modelo analítico e um modelo numérico baseado no método de elementos finitos. O modelo analítico considera uma geometria simplificada através da representação do sistema através de duas molas em série e considera valores constantes prescritos para a fração volumétrica de fase, não sendo capaz de representar o processo de transformação de fase. Já o modelo numérico, considera uma geometria mais próxima à real e é capaz de representar o processo de transformação de fase, promovido pelos carregamentos mecânico e térmico.

Os valores da fração volumétrica de fase (β) são consequência do estado de tensões e da temperatura em que o fio se encontra. O aumento da espessura da lâmina promove um aumento da rigidez e, como consequência, um aumento da força de restituição. Para a análise feita para o fio de 0,3810 mm com deformação inicial de 4 milímetros, a temperatura de 120° C não é suficiente para promover a transformação de fase em lâminas com espessura maior que 2,3 mm, como visto na Figura 28. Esta tendência é vista em todos os gráficos elaborados, exceto para a análise feita onde o fio é aquecido até 200° C. Quando o fio é aquecido a uma temperatura de 200° C, a transformação de fase é mantida e o deslocamento continua a ser aumentado.

Devido ao fato de que no modelo analítico os valores da fração volumétrica de fase são prescritos, este modelo, apesar de simples, pode levar a resultados imprecisos para a análise do deslocamento. A diferença percentual encontrada entre os modelos tendo como análise o valor de deslocamento máximo é de 17%.

O aumento da folga entre o fio e a lâmina leva a um aumento de deformação inicial do fio durante o acoplamento com a lâmina. Isso promove um aumento de reorientação de martensita maclada para não maclada, o que resulta em um aumento na amplitude de deslocamento do sistema. Essa opção pode resultar em problemas relacionados com fadiga, já que atuadores com elementos de SMA podem ter a sua

vida em fadiga reduzida quando operam em amplitudes elevadas de transformação de fase.

O aumento da temperatura de atuação do fio também resulta em um aumento do deslocamento do sistema. No entanto, é importante considerar que temperaturas muito elevadas resultam em um gasto maior de energia e podem afetar a integridade do fio de SMA. Embora não haja uma curva de decréscimo para o deslocamento nas simulações realizadas no Ansys com temperatura máxima de 200°C, o risco de falha por escoamento no fio de SMA aumenta à medida que a espessura da lâmina é aumentada.

Sugere-se para trabalhos futuros, desenvolver estudos com modelos mais complexos para avaliar algumas questões que não foram cobertas neste trabalho, como se o aumento do deslocamento é a melhor abordagem para o projeto ideal. Embora maiores valores de volume deslocado por ciclo sejam obtidos e, conseqüentemente, maior empuxo por ciclo, o tempo de ciclo pode ser tão longo que inviabilize a aplicação. Também, é importante que os modelos propostos sejam verificados e calibrados com o auxílio de procedimentos experimentais envolvendo a construção de protótipos.

REFERÊNCIAS

- Ansyes, 2022, **Ansyes Academic**. Disponível em: www.ansyes.com/academic. Acesso em: 10/06/2023.
- Bundhoo, V. et al, 2008, **A shape memory alloy-based tendon-driven actuation system for biomimetic artificial fingers, part I: design and evaluation**, University of Victoria, British Columbia, Canada.
- Hibbeler, R.C., 2010, **Resistência dos Materiais**, sétima edição, Pearson Education do Brasil, São Paulo, Brasil.
- Paiva, A. & SAVI, M. A., 1999, **SOBRE OS MODELOS CONSTITUTIVOS COM CINÉTICA DE TRANSFORMAÇÃO ASSUMIDA PARA LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA**, COBEM 99 - XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, São Paulo, Brasil.
- Tobushi, H. & Tanaka, K., 1991, **Deformation of a Shape Memory Alloy Helical Spring: Analysis Based on Stress-Strain-Temperature Relation**, JSME International Journal, Series I, v. 34, n.1.
- Wang, W. et al, 2021, **Controlling bending deformation of a shape memory alloy-based soft planar gripper to grip deformable objects**, International Journal of Mechanical Sciences.
- Paiva, T., 2017, **ANÁLISE NUMÉRICA DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE ATUADORES COM MEMÓRIA DE FORMA**, Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, CEFET/RJ.
- Johnson, A. D., 1998, **STATE-OF-THE-ART OF SHAPE MEMORY ACTUATORS**, TiNi Alloy Company, CA, USA.
- KIM, B. et al. **An earthworm-like micro robot using shape memory alloy actuator**. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 125, n. 2, p. 429–437, jan. 2006.
- DE MESQUITA, G. F. **Modelagem de um Dispositivo Bio-Inspirado Atuado por Elementos com Memória de Forma**. [s.d.].

HARTL, D. J.; LAGOUDAS, D. C. **Aerospace applications of shape memory alloys. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering**, v. 221, n. 4, p. 535–552, 1 abr. 2007.

SIMIRIOTIS, N. et al. **Shape control and design of aeronautical configurations using shape memory alloy actuators**. *Computers & Structures*, v. 244, p. 106434, fev. 2021.

VILLANUEVA, A. A. et al. **A bio-inspired shape memory alloy composite (BISMAC) actuator**. *Smart Materials and Structures*, v. 19, n. 2, p. 025013, 1 fev. 2010.

VILLANUEVA, A.; SMITH, C.; PRIYA, S. **A biomimetic robotic jellyfish (Robojelly) actuated by shape memory alloy composite actuators**. *Bioinspiration & Biomimetics*, v. 6, n. 3, p. 036004, 1 set. 2011.

VILLANUEVA, A. et al. **Jellyfish inspired underwater unmanned vehicle**. (Y. Bar-Cohen, T. Wallmersperger, Eds.). Em: SPIE SMART STRUCTURES AND MATERIALS + NONDESTRUCTIVE EVALUATION AND HEALTH MONITORING. San Diego, California, USA: 26 mar. 2009.

LAGOUDAS, D; KUMAR, P. **Shape Memory Alloys**. Boston, MA: Springer US, 2008. v. 1.

Brinson, L.C., 1993, **One Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation with Non Constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable**, *J. Intelligent Materials System and Structures*, n.4, pp. 229-242.

Brinson, L.C. & Huang, M.S., 1995, **Simplifications and Comparisons of Shape Memory Alloy Constitutive Models**, *J. of Intelligent Materials Systems and Structures*, v.7, pp. 108-114.

Czechowicz, A., & Langbein, S. (Eds.). (2015). **Shape Memory Alloy Valves**. doi:10.1007/978-3-319-19081-5

DORNELAS, V. M. et al. **Fatigue on shape memory alloys: Experimental observations and constitutive modeling**. *International Journal of Solids and Structures*, v. 213, p. 1–24, mar. 2021.

Lagoudas, D.C., **Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications**, Springer, 2008.