

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

GUSTAVO XAVIER DE MENDONÇA

**Modelagem de um Perfil de uma Asa Variável Atuado através de Elementos
com Memória de Forma utilizando o Método de Elementos Finitos**

PROJETO FINAL

**RIO DE JANEIRO
2022**

GUSTAVO XAVIER DE MENDONÇA

**Modelagem de um Perfil de uma Asa Variável Atuado através de Elementos
com Memória de Forma utilizando o Método de Elementos Finitos**

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

Orientador: Prof. Dr. Pedro Manuel Calas
Lopes Pacheco

**RIO DE JANEIRO
2022**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M539 Mendonça, Gustavo Xavier de
Modelagem de um perfil de uma asa variável atuado através de elementos com memória de forma utilizando o método de elementos finitos / Gustavo Xavier de Mendonça. — 2022.
75f. : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2022.

Bibliografia : f. 74-75

Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

1. Engenharia mecânica. 2. Ligas com memória de forma. 3. Análise numérica. 4. Método de Elementos Finitos. I. Pacheco, Pedro Manuel Calas Lopes (Orient.). II. Título.

CDD 621

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo verificar a aplicação de fios de ligas com memória de forma (SMA – *Shape Memory Alloys*) no perfil de uma asa de um veículo aéreo não tripulado (VANT) para alterar as suas características aerodinâmicas. O estudo parte de um modelo analítico simplificado para o cálculo da linha elástica de uma viga reta e determinação das forças atuantes e posterior aplicação das forças através de modelos numéricos de elementos finitos para uma viga reta e um perfil com curvatura. As alterações na geometria foram comparadas para determinar as alterações do comportamento aerodinâmico do perfil através dos coeficientes de sustentação, arrasto e na curva de eficiência de cada uma das geometrias. Os resultados indicam que a metodologia proposta pode ser utilizada para avaliar configurações ótimas de asas de perfil variado.

Palavras-chave: Ligas com Memória de Forma; Perfil de Asa; Modelo Analítico; Modelo Numérico; Método de Elementos Finitos.

ABSTRACT

This work aims to verify the application of wires of shape memory alloys (SMA) in the profile of an unmanned aerial vehicle (UAV) wing to change its aerodynamic characteristics. The study starts from a simplified analytical model for the calculation of a straight beam elastic curve and determination of the acting forces and subsequent application of the forces in numerical models of finite elements for a straight beam and a curved camber. The changes in the geometry were compared to determine the changes in the aerodynamic behavior of the profile through the lift and drag coefficients and in the efficiency curve of each of the geometries. The results indicate that the proposed methodology can be used to evaluate optimal configurations of wings of varied profile.

Keywords: Shape Memory Alloys; Wing camber; Analytical model; Numerical Model; Finite Element Method.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
2. CONCEITOS INICIAIS	21
2.1. LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	21
2.1.1. Liga de níquel-titânio (NiTi)	22
2.1.2. Pseudoelasticidade.....	23
2.2. ATUADORES.....	24
2.2.1. Atuadores piezoelétricos.....	25
2.2.2. Atuadores de ligas com memória de forma	26
2.3. AERODINÂMICA	27
2.3.1. Coeficiente de sustentação (C_l)	28
2.3.2. Coeficiente de arrasto (C_d).....	29
2.3.3. Coeficiente de momento (C_m) e centro aerodinâmico (X_{ac}).....	29
2.3.4. Eficiência aerodinâmica	29
3. DISPOSITIVOS BIOINSPIRADOS COM ATUAÇÃO ATRAVÉS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	31
3.1. ASA INTELIGENTE.....	31
3.2. MOVIMENTAÇÃO BIOINSPIRADA EM UMA LAGARTA	32
3.3. DISPOSITIVO ORIGÂMICO.....	33
4. PERFIL DA ASA COM ATUAÇÃO ATRAVÉS DE FIOS COM SMA	35
4.1. VANT.....	35
4.2. GEOMETRIA.....	35
4.3. MATERIAL DO PERFIL	37
5. MODELO ANALÍTICO	38
5.1. MODELO IDEALIZADO	38
5.2. MODELO SIMPLIFICADO	38
5.2.1. Determinação do deslocamento na viga.....	39
5.2.2. Determinação do deslocamento no fio	41
5.2.3. Estudo das tensões para a instalação dos cabos.....	44
5.2.4. Equacionamento para os 3 fios atuados.....	45
5.3. APERFEIÇOAMENTO DO MODELO ANALÍTICO	46
5.3.1. Modelo de Brinson.....	47
5.4. ETAPAS DO MODELO	48
5.4.1. Primeira etapa:	48
5.4.2. Segunda etapa	54
5.4.3. Terceira etapa.....	55
5.5. TENSÕES NO FIO COM MEMÓRIA DE FORMA.....	56
6. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS CONSIDERANDO UMA VIGA CURVA	58
6.1. CARREGAMENTO E CONDIÇÕES DE CONTORNO	58

6.2. MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.....	59
6.3. TENSÕES NO PERFIL	61
6.4. COMPARAÇÃO ENTRE AS TENSÕES OBTIDAS COM OS MODELOS .	63
6.5. CONFIGURAÇÃO DEFORMADA DO PERFIL	65
7. ANÁLISE AERODINÂMICA DAS CONFIGURAÇÕES DE PERFIS ATUADOS.....	66
8. CONCLUSÃO	72
8.1. TRABALHOS FUTUROS	73
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- VANT arara, projeto brasileiro (www.defesanet.com.br)	20
Figura 2- Curva tridimensional tensão-deformação-temperatura (Lagoudas, 2008) .	22
Figura 3 - Transformação de fase induzida por temperatura de uma SMA (Lagoudas,2008)	23
Figura 4- curva tensão-deformação Pseudoelástica (Lagoudas,2008)	24
Figura 5- Direções dos eixos para materiais piezoelétricos (Tebaldi,2006)	25
Figura 6- Representação de um atuador com liga de memória de forma (Paiva,2004)	26
Figura 7- Atuador SMA típico (Nespoli <i>et al.</i> ,2010)	27
Figura 8- Nomenclatura de um perfil (Rodrigues, 2010).....	28
Figura 9- Definição do ângulo de ataque do perfil (Miranda,2014).....	28
Figura 10- Geometria para o cálculo do centro aerodinâmico em ensaio em túnel de vento (Barlow <i>et al.</i> ,1999)	29
Figura 11- Curvas de sustentação e arrasto para o perfil Eppler 423 (Miranda,2014)	30
Figura 12- Curva de eficiência aerodinâmica perfil Eppler 423 (Miranda,2014)	30
Figura 13- Arqueamento ajustável de um perfil acionado através de fios de liga com memória de forma do tipo SMAAC (Shape Memory Alloy Adjustable Chamber) (Beauchamps <i>et al.</i> , 1992).	31
Figura 14- Funcionamento de um mecanismo bioinspirado no movimento de uma lagarta (Wang <i>et al.</i> , 2014).....	32
Figura 15- Estrutura de origami para fachada de prédio (Fachada Variable,2018) ...	33
Figura 16- Representação do atuador para fachada de prédio (Fachada Variable,2018)	34
Figura 17- Vista isométrica da seção da asa idealizada.....	36
Figura 18- Fios instalados no perfil idealizado para a asa.....	36
Figura 19- Modelo perfil atuado por fios SMA	38
Figura 20- Modelo simplificado do perfil com 3 fios tracionados	39
Figura 21- Posicionamento das forças aplicadas na viga.....	40
Figura 22- Deslocamento gerado devido a aplicação de uma força concentrada em uma viga biapoiada (Hibbeler, 2012).....	40
Figura 23- Deslocamento no fio.....	42
Figura 24- Desenho esquemático da curva tensão-deformação do fio de SMA e as etapas de instalação e atuação.....	43
Figura 25- Curva tensão deformação (%) - tensão média (MPa)	49
Figura 26- Triângulos curva tensão deformação	49
Figura 27- Deslocamento na estrutura com uma força atuando. Modelo numérico baseado no método de elementos finitos.....	52
Figura 28- Deslocamento na estrutura com duas forças atuando. Modelo numérico baseado no método de elementos finitos.....	53
Figura 29- deslocamento segunda etapa em L/4. Modelo de Elementos Finitos.	55

Figura 30 – Modelo sólido do perfil com curvatura desenvolvido no pacote computacional Ansys (Ansys, 2022)	58
Figura 31 -Condições de contorno do modelo de perfil com curvatura.	59
<i>Figura 32</i> -Malha utilizada. Perfil com curvatura.	60
Figura 33 -Distribuição da tensão equivalente de <i>von Mises</i> . Caso crítico de atuação das forças para o perfil com curvatura.	62
Figura 34 - Tensão máxima (modelo preliminar)	63
Figura 35 - Tensão máxima (modelo aperfeiçoado)	64
Figura 36 -Condições de contorno alteradas para o modelo de elementos finitos para viga reta aperfeiçoado	64
Figura 37 - Comparação da configuração geométrica do perfil não atuado com perfil atuado por duas forças aplicadas em $x = L/2$ e $x = 3L/4$	65
Figura 38 - Modelos de perfis construído no pacote computacional XFLR5 (XFLR5, 2022)	66
Figura 39 - Modelo dividido em 13 pontos.....	67
Figura 40 - C_l x α para a configuração com uma força atuada para diferentes números de Reynolds	68
Figura 41 - Curvas de eficiência para as 4 configurações geométricas do perfil.....	69
Figura 42 -Curvas C_l x α para as 4 configurações geométricas do perfil.	70
Figura 43 -coeficiente de arrasto x α	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades da liga de Nitinol (Paiva, 2006)	22
Tabela 2- Tabela comparativa dos atuadores convencionais (Mavroidis,2002).....	24
Tabela 3- Propriedades Al 2024 (dados do fabricante METALTHAGA)	37
Tabela 4- Propriedades da liga de Nitinol (Paiva, 2006)	37
Tabela 5- Deslocamentos encontrados para as 3 configurações de forças.....	53
Tabela 6- Valores de deslocamento para cada etapa. Modelo de Elementos Finitos.	56
Tabela 7- Tensão máxima no fio em cada etapa	57
Tabela 8- Variação da tensão com o refino da malha.....	60

1. INTRODUÇÃO

Um voo de uma aeronave apresenta diversas etapas como: decolagem, subida, cruzeiro, descida e pouso. Tradicionalmente apenas um perfil fixo de asa é utilizado nas aeronaves para realizar todas as situações de voo. No entanto, cada condição de voo requer um perfil diferente para que a aeronave possa desempenhar um comportamento otimizado (Barbarino *et al.*, 2014).

Algumas superfícies móveis como flaps e ailerons, são utilizados para modificar as características do perfil, mas possuem uma atuação limitada.

Observando a natureza, onde pássaros mudam o perfil das asas durante o voo, estruturas bioinspiradas oferecem soluções interessantes para permitir um desempenho mais próximo do comportamento ideal de voo (Barbarino *et al.*, 2014)

Neste trabalho, fios de ligas com memória de forma (SMAs – Shape Memory Alloys) são utilizados como atuadores para modificar o perfil da asa de um veículo aéreo não tripulado (VANT). O material escolhido para aplicação é o NiTiNol, um material com memória de forma que tem como característica a capacidade de desenvolver grandes deslocamentos e forças quando submetidos a carregamentos termomecânicos. Este material, após ser deformado, é capaz de recuperar a sua forma original ao ser aquecido e, dessa forma pode ser utilizado em atuadores compactos que utilizam o efeito joule para sua atuação. A Figura 1 apresenta um VANT utilizado pela Polícia Federal do Brasil.



Figura 1- VANT arara, projeto brasileiro (www.defesanet.com.br)

Este trabalho é dividido em 8 capítulos. No capítulo 2 são apresentados os conceitos iniciais utilizados no desenvolvimento do trabalho, associados ao desempenho do perfil de uma asa e ao comportamento das ligas com memória de forma, o capítulo 3 mostra uma pesquisa bibliográfica para aprofundamento do conceito e das aplicações dos materiais com memória de forma. No capítulo 4 é apresentada a geometria do perfil analisado e os modelos desenvolvidos para avaliar o comportamento do perfil de asa proposto atuado por fios de ligas com memória de forma. O capítulo 5 inicia com uma primeira etapa considera-se um modelo analítico preliminar simplificado baseado na linha elástica de uma viga reta para estimar o valor das forças desenvolvidas nos pontos da viga atuada por fios com memória de forma. Esses valores são, então, utilizados no capítulo 6 em um modelo de elementos finitos que considera a curvatura do perfil para determinar as diferentes configurações geométricas promovidas pela atuação dos fios de SMA. Finalmente, no capítulo 7, um pacote computacional para análise aerodinâmica de perfis de asas é utilizado para verificar se as diferentes configurações geométricas do perfil resultam em alterações adequadas nos coeficientes aerodinâmicos capazes de tornar as etapas do voo mais eficientes e no capítulo 8 as conclusões do trabalho são descritas.

2. CONCEITOS INICIAIS

Este capítulo apresenta alguns conceitos iniciais sobre o tema do trabalho e das suas aplicações

2.1. LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

As Ligas com Memória de Forma (LMF) ou *Shape Memory Alloys* (SMA) são materiais metálicos capazes de recuperar sua forma inicial quando submetidas a carregamentos termomecânicos através da transformação de fase martensítica. Algumas ligas normalmente utilizadas em aplicações são as ligas de base de cobre como CuZnAl e CuAlNi e as ligas de níquel-titânio (NiTi).

A Figura 2 mostra o efeito de memória de forma característico de uma SMA. No ponto B o material encontra-se na fase martensítica maclada. O processo que se desenvolve do ponto B para o ponto C, ocorre quando o material é submetido a um carregamento mecânico. Durante o processo ocorre a reorientação da martensita maclada, formando-se a martensita não-maclada. Após o descarregamento, com o aumento de temperatura observa-se a recuperação da deformação residual, com a transformação de fase de martensita não-maclada para austenita. Este efeito é conhecido como efeito *One-Way* (Lagoudas, 2008).

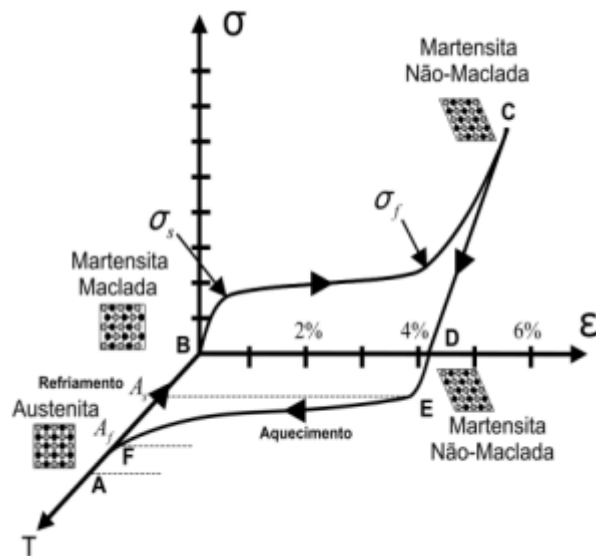


Figura 2-Curva tridimensional tensão-deformação-temperatura (Lagoudas, 2008)

2.1.1. Liga de Níquel-Titânio (NiTi)

Existem outras ligas que apresentam o mesmo efeito de memória de forma, tais como: CuAlNi e CuZnAl, porém a liga de Níquel-Titânio (nitinol) apresenta a maior recuperação residual podendo chegar até 8% além dos efeitos de pseudoelasticidade, possui biocompatibilidade e alta resistência à corrosão associados a mudança de fase cristalina. Por conta disso, essas ligas possuem uma grande quantidade de aplicações em diversas áreas, como: automobilística, robótica, aeroespacial e médica. Estas ligas têm sido bastante utilizadas em mecanismos de atuação por conta de sua capacidade de gerar grandes forças e deslocamentos. A Tabela 1 apresenta características típicas de uma liga NiTi.

Tabela 1-Propriedades da liga de Nitinol (Paiva, 2004)

Propriedades do material	Temperatura de transformação	
$E_M = 26,3 \text{ GPa}$	$M_s = 291,0 \text{ K}$	$M_f = 282,0 \text{ K}$
$E_A = 67 \text{ GPa}$	$A_s = 307,5 \text{ K}$	$A_f = 322,0 \text{ K}$

Na Tabela 1, E_M é o módulo de elasticidade da martensita, E_A é o módulo de elasticidade da austenita, o índice s indica a temperatura de início das transformações de fase e f a temperatura final de transformação das fases martensítica e austenítica. A Figura 3 ilustra o processo de transformação de fase e as temperaturas de transformação.

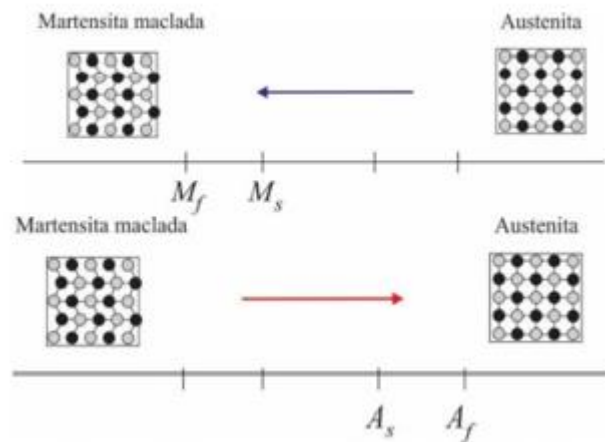


Figura 3 -Transformação de fase induzida por temperatura de uma SMA (Lagoudas,2008)

2.1.2. Pseudoelasticidade

A pseudoelasticidade é ativada por um carregamento mecânico que ocorre ao se aplicar uma tensão induzindo assim a transformação de fase austenítica para martensita não-maclada. (Lagoudas,2008)

Seu efeito não se dá através da mudança de temperatura e ocorre acima da temperatura crítica A_f onde a austenita se encontra estável e livre de tensão.

A Figura 4 descreve o ciclo do carregamento pseudoelástico, tendo seu início no ponto A, onde o material se encontra na fase austenítica. Aplicando um carregamento mecânico, tem início (a partir do ponto B) o processo de transformação da austenita em martensita até completar a transformação no ponto C. Aumentando ainda mais a tensão chega-se ao ponto D com uma deformação elástica. Removendo o carregamento, a martensita não-maclada inicia sua transformação de volta para

austenita (ponto E) e termina sua transformação no ponto F. Neste caso todas as transformações são ativadas apenas pela variação de tensão

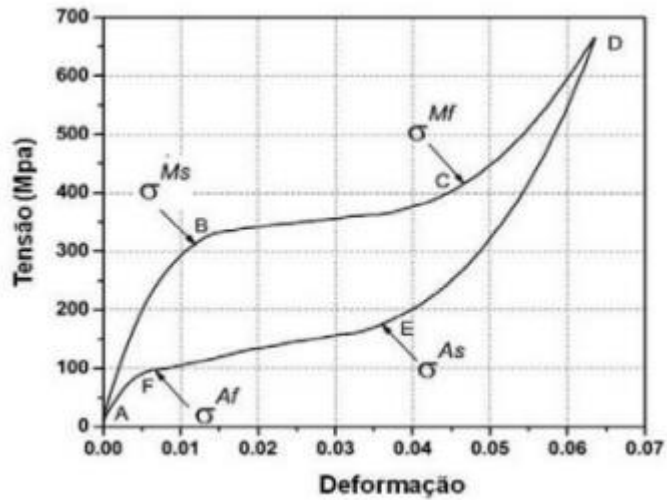


Figura 4-curva tensão-deformação Pseudoelástica (Lagoudas,2008)

2.2. ATUADORES

Os atuadores convencionais mais utilizados são os pneumáticos, hidráulicos e elétricos, sendo que cada um apresenta vantagens e desvantagens, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 2-Tabela comparativa dos atuadores convencionais (Mavroidis,2002)

Fator	Elétrico	Hidráulico	Pneumático
Sistema Básico	Força Amplificadora, Motores DC e AC	Bomba, Regulador, Filtros, Motores, Atuadores	Compressor, Controlador de Pressão, Válvula, Atuador
Trabalho principal	Eletricidade	Óleo de alta qualidade com base de aditivos, Soluções a base de água, Líquidos Sintéticos	Ar, Nitrogênio, Produtos de Combustão
Eficiência	Acima de 90% para grandes sistemas	Em torno de 60%	Em torno de 30%
Suscetibilidade de Contaminação	Baixa Baixo ruído	Alta Requer boa manutenção dos filtros. Procedimentos de limpeza.	Médio Menos problemático que o óleo Problemas de corrosão.
Razão Peso e Força	Fraco	Excelente	Bom

Com o desenvolvimento dos materiais inteligentes, estes materiais cada vez vem sendo mais utilizados em atuadores, sendo que os atuadores utilizando elementos piezoelétricos e de ligas com memória de forma cada vez mais se mostram uma alternativa aos atuadores tradicionais.

2.2.1. Atuadores Piezoelétricos

Nos materiais piezoelétricos, quando é aplicada uma diferença de potencial no material observa-se uma variação nas suas dimensões físicas. O efeito contrário também ocorre: quando existe uma variação nas dimensões, uma diferença de potencial é induzida. O material piezoelétrico transforma energia mecânica em elétrica e vice-versa. A Figura 5 ilustra o efeito piezoelétrico (Tebaldi,2006)

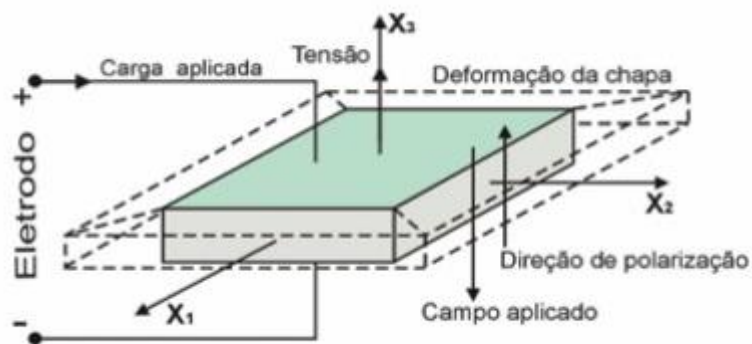


Figura 5-Direções dos eixos para materiais piezoelétricos (Tebaldi,2006)

Esse tipo de material é classificado como um dielétrico que apresenta grandes deformações devido a um campo elétrico aplicado sobre ele, sendo assim polarizado e produzindo tensões mecânicas. Para a construção de atuadores, o efeito piezoelétrico inverso é utilizado dispendo elementos piezoelétricos, em geral placas finas de 0,1 a 0,2 mm de espessura, colados rigidamente em estruturas elásticas. Assim, ao ser acionado eletricamente através de uma diferença de potencial, desenvolvem-se deformações mecânicas. (Tebaldi,2006)

2.2.2. Atuadores de ligas com memória de forma

O uso de elementos de ligas com memória de forma permite a construção de atuadores de peso e dimensões reduzidas e com mecanismos de atuação simples, em comparação aos convencionais. Essas características são possíveis devido a suas propriedades de recuperar a forma inicial através de um processo térmico de aquecimento e resfriamento que resulta em uma relação força peso bastante elevada (Mavroidis, 2002).

A Figura 6 mostra um sistema de atuação que possui um pistão e duas molas: uma convencional e outra SMA. Quando o sistema é aquecido a mola com memória de forma comprime a mola convencional empurrando assim o pistão e quando é resfriada a mola convencional comprime a mola com memória de forma (La Cava, 1999; Hodgson e Brown, 2000).

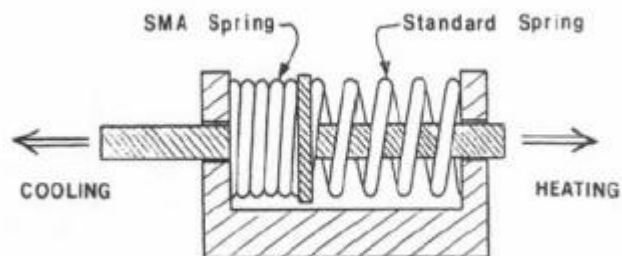


Figura 6-Representação de um atuador com liga de memória de forma (Paiva,2004)

Esse atuador tem seu funcionamento da seguinte forma:

Um pré-carregamento mecânico na mola de SMA em sua fase martensítica promove uma reorientação de fase induzida por tensão e, após a descarga mecânica, passa a apresentar uma deformação residual associada à formação de martensita não-maclada. Posteriormente o conjunto é aquecido até uma temperatura acima da temperatura final de transformação de austenita, alterando a estrutura para fase

austenítica, diminuindo assim o seu comprimento através da recuperação da deformação residual, criando assim uma deformação na mola de aço.

Durante a fase de resfriamento da mola de SMA, devido à presença da força aplicada pela mola de aço, o elemento SMA retorna à fase martensítica induzida por tensão, apresentando novamente uma deformação residual.



Figura 7-Atuador SMA típico (Nespoli *et al.*,2010)

2.3. AERODINÂMICA

O desempenho de uma aeronave depende da sua aerodinâmica, a qual é função de diversos fatores como o perfil da asa. Para um melhor entendimento do trabalho desenvolvido, são apresentadas algumas definições e conceitos importantes para a escolha das características de um perfil ótimo para cada uma das fases do voo. A Figura 8 apresenta os principais parâmetros e características de um perfil de asa.

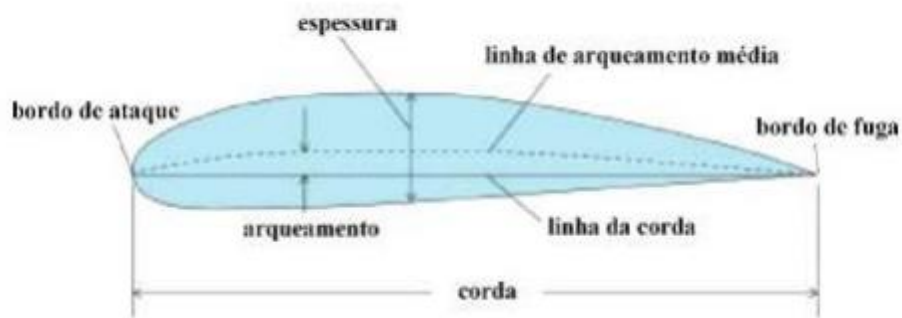


Figura 8-Nomenclatura de um perfil (Rodrigues, 2010)

A escolha de um perfil aerodinâmico depende de uma série de fatores que influenciam no desempenho da aeronave, algumas dessas características são: o coeficiente de sustentação, o coeficiente de arrasto, o coeficiente de momento, a posição do centro aerodinâmico e a eficiência aerodinâmica. (Rodrigues,2014)

2.3.1. Coeficiente de sustentação (C_l)

Representa a eficiência do perfil em gerar sustentação de uma aeronave. Quanto maior o seu valor, maior é a eficiência em gerar sustentação. O coeficiente de sustentação é função da geometria do perfil, do número de Reynolds e do ângulo de ataque. (Rodrigues,2014)

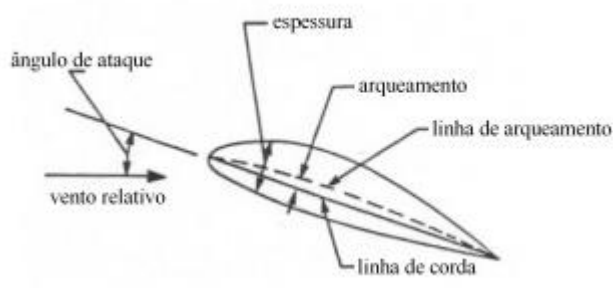


Figura 9-Definição do ângulo de ataque do perfil (Miranda,2014).

2.3.2. Coeficiente de arrasto (C_d)

Representa a capacidade do perfil em gerar arrasto. Diferente da sustentação o coeficiente de arrasto precisa ser baixo, aliado a um alto valor do coeficiente de sustentação para ser aerodinamicamente eficiente. Para um determinado perfil o coeficiente de arrasto também é função no número de Reynolds e do ângulo de ataque. (Rodrigues,2014)

2.3.3. Coeficiente de momento (C_m) e centro aerodinâmico (X_{ac})

O coeficiente de momento é utilizado para a determinação do centro aerodinâmico, pois o centro aerodinâmico é o ponto em torno do qual o coeficiente de momento é constante. (Rodrigues,2014)

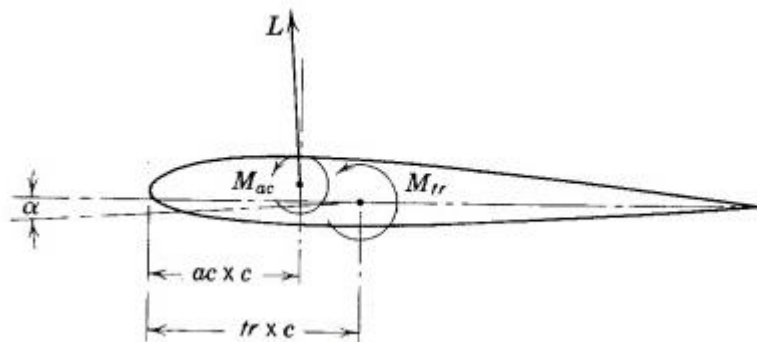


Figura 10-Geometria para o cálculo do centro aerodinâmico em ensaio em túnel de vento (Barlow *et al.*,1999)

2.3.4. Eficiência aerodinâmica

Eficiência aerodinâmica é definida pela razão C_l/C_d . É um parâmetro utilizado para auxiliar na escolha do ângulo de ataque. Assim, para um determinado perfil, a curva de eficiência indica qual o ponto com melhor relação C_l/C_d , ou seja, o ângulo de ataque que tem a maior relação entre sustentação e arrasto.

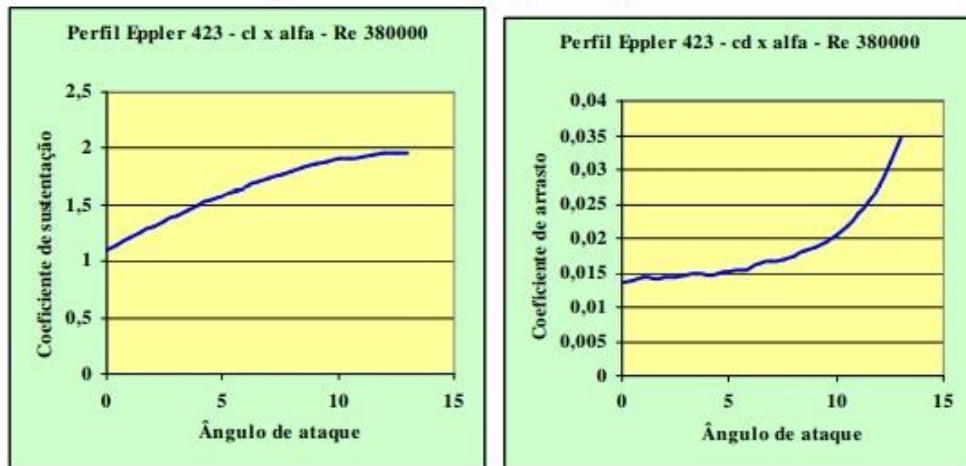


Figura 11-Curvas de sustentação e arrasto para o perfil Eppler 423 (Miranda,2014)

Os dados das curvas da Figura 11 podem ser utilizados para gerar a razão C_l/C_d e encontrar o ponto onde essa razão é mais máxima. O gráfico de eficiência aerodinâmica indica esse ponto, como mostrado na Figura 12.

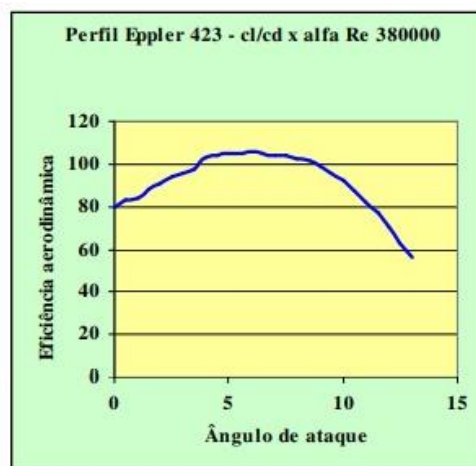


Figura 12-Curva de eficiência aerodinâmica perfil Eppler 423 (Miranda,2014)

3. DISPOSITIVOS BIOINSPIRADOS COM ATUAÇÃO ATRAVÉS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Este capítulo apresenta alguns dispositivos bioinspirados que utilizam elementos de SMA para a atuação em diversas aplicações.

3.1. ASA INTELIGENTE

Existem diversos dispositivos atuados por elementos de SMA desenvolvidos para permitir que o perfil de uma asa se adapte a situações de voo, de modo a aumentar a sua eficiência, como os propostos por Humbeeck (1999) e Beauchamps *et al.* (1992). A Figura 13 apresenta um dispositivo proposto por Beauchamps.

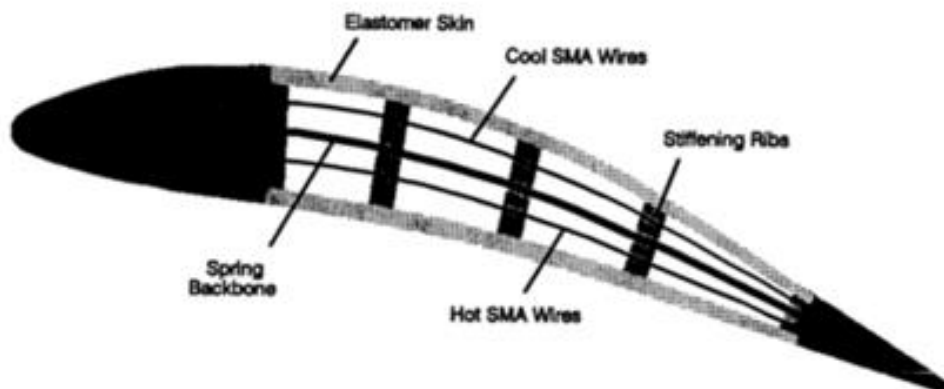


Figura 13-Arqueamento ajustável de um perfil acionado através de fios de liga com memória de forma do tipo SMAAC (Shape Memory Alloy Adjustable Chamber) (Beauchamps *et al.*, 1992).

A superfície SMAAC (*Shape Memory Alloy Adjustable Chamber*) proporciona um arqueamento ajustável com a atuação de ligas com memória de forma através de fios SMA que se contraem. Através da atuação é possível alterar a inclinação de uma coluna flexível com estrutura externa feita de um elastômetro

maleável, além de deixar um rastro menos turbulento quando comparado a asas comuns. (Humbreeck,1999).

Fios de SMA martensíticos são montados na estrutura com uma pré-deformação produzida por um carregamento mecânico, o qual promove a reorientação de martensita maclada para não-maclada. Através do aquecimento dos fios, que pode ser produzido pela passagem de uma corrente elétrica (efeito joule), ocorre a transformação de fase de martensita não-maclada para austenita, resultando na recuperação da deformação do fio. Esta ação promove uma força nos pontos de conexão, alterando a forma do perfil.

3.2. MOVIMENTAÇÃO BIOINSPIRADA EM UMA LAGARTA

É muito comum no estudo de materiais inteligentes a inspiração para o movimento na natureza. Wang *et al.* (2014) se inspiraram no movimento de uma lagarta para desenvolver um dispositivo que gera movimento através da mudança de comprimento de fios de SMA.

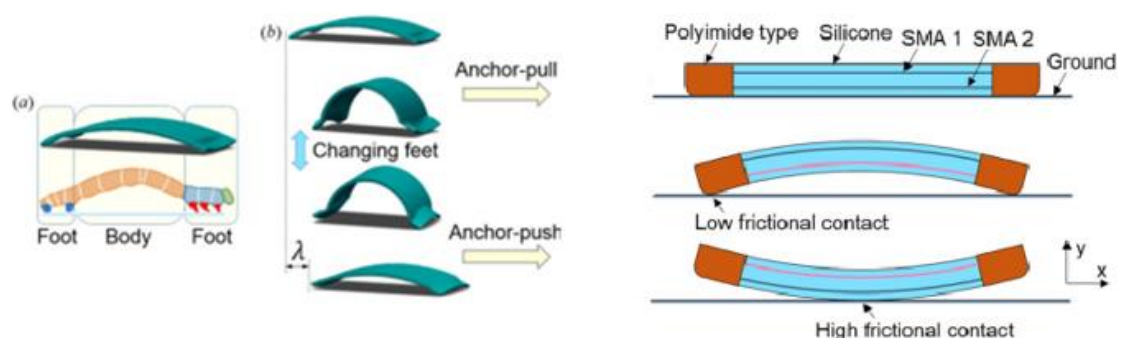


Figura 14-Funcionamento de um mecanismo bioinspirado no movimento de uma lagarta (Wang *et al.*, 2014)

A estrutura do dispositivo é dividida em 3 partes. A parte central é constituída por dois fios SMA, que através da sua alteração do seu comprimento e do atrito nas extremidades simulam o movimento da lagarta, gerando o movimento do dispositivo na horizontal. Inicialmente, os 2 fios de SMA, martensíticos na temperatura

ambiente, são montados pré-deformados em uma matriz de silicone com uma deformação residual promovida pela reorientação de martensita maclada para não-maclada. Quando um dos fios é aquecido, ocorre a transformação de fase para austenita, que é acompanhada pela recuperação da deformação residual, promovendo a flexão do dispositivo.

3.3. DISPOSITIVO ORIGÂMICO

Este trabalho se dispôs a desenvolver uma estrutura para aproveitar da melhor maneira a luz natural de maneira rápida em uma fachada de um prédio. A estrutura é adaptável de modo a permitir a sua configuração em 3 situações: fechado, semiaberto e uma combinação intermediária, conforme mostrado na Figura 15.



Figura 15-Estrutura de origami para fachada de prédio (Fachada Variable,2018)

O sistema é atuado através de molas helicoidais de SMA martensíticas à temperatura ambiente, capazes de desenvolver grandes deslocamentos, em conjunto com molas de aço conectadas em série e paralelo, conforme mostrado na Figura 16.

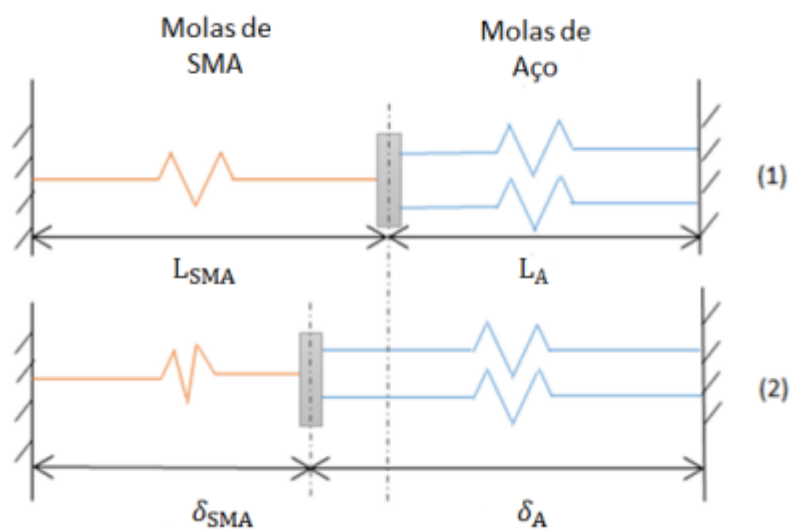


Figura 16-Representação do atuador para fachada de prédio (Fachada Variable,2018)

A configuração (1) mostrada na Figura 16 representa as molas em seu estado inicial à temperatura ambiente, onde a mola de aço aplica uma pretensão na mola de SMA, produzindo a reorientação da fase de martensita maclada para não-maclada. A configuração (2) mostra o sistema com a mola com memória de forma no estado atuado através do seu aquecimento, o que promove a recuperação da deformação associada à transformação de fase de martensita não-maclada para austenita.

4. PERFIL DA ASA COM ATUAÇÃO ATRAVÉS DE FIOS COM SMA

4.1. VANT

O desenvolvimento dos veículos aéreos não tripulados (VANTs) surgiu como uma importante opção na agricultura de precisão. Sua aplicação na área agrícola e em missões de reconhecimento vem sendo favorecida e facilitada pelo atual estágio de desenvolvimento tecnológico, principalmente pela redução do custo e do tamanho dos equipamentos e pela necessidade de otimização da produção.

O termo “Veículo Aéreo Não Tripulado” é mundialmente reconhecido e inclui uma grande gama de aeronaves que são autônomas, semiautônomas ou remotamente operadas. (Andrade,2013).

Este projeto considera a aplicação da asa com atuação a um Vant Arara, modelo identificado na figura 2, fabricado pela AGX tecnologia Ltda (Embrapa,2022).

4.2. GEOMETRIA

O VANT Arara possui uma asa de comprimento total de 3,2 m. O perfil idealizado para o estudo tem formato de elipse (como o perfil do modelo estudado não pode ser determinado, e para fins de determinar um modelo) são consideradas seções de 100 mm para determinação dos modelos e aplicação de forças ao longo da asa. O perfil idealizado possui com comprimento de corda de 250 mm e 104 mm de espessura do perfil e 10 mm de espessura da estrutura (placa) escolhido de forma arbitrária, conforme mostrado na Figura 17.

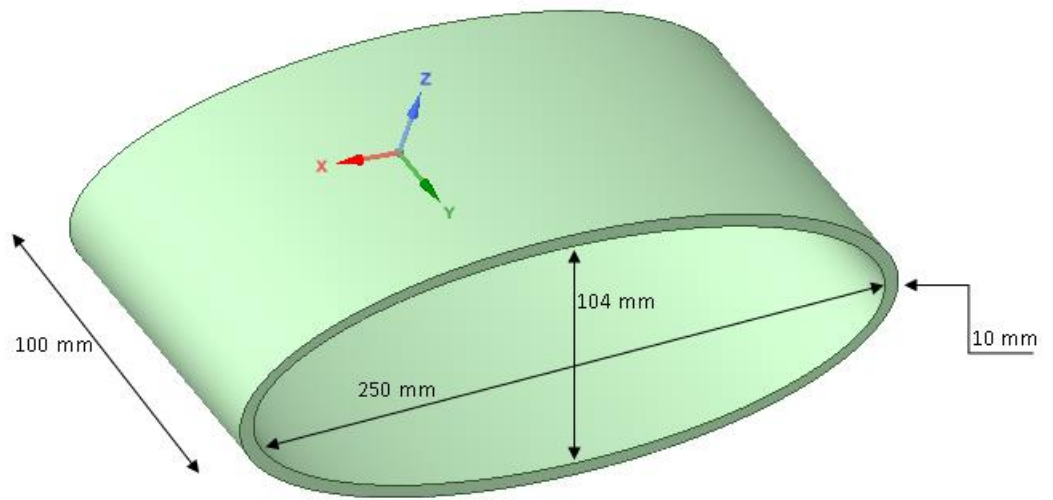


Figura 17-Vista isométrica da seção da asa idealizada.

Como o perfil é simétrico será feito um estudo levando em conta apenas a parte superior do perfil, a qual apresenta o mesmo comportamento da parte inferior.

Três fios com memória de forma usados como atuadores, sendo um instalado no ponto central e outros dois instalados a 62,5 mm do ponto central, conforme ilustrado na Figura 18.

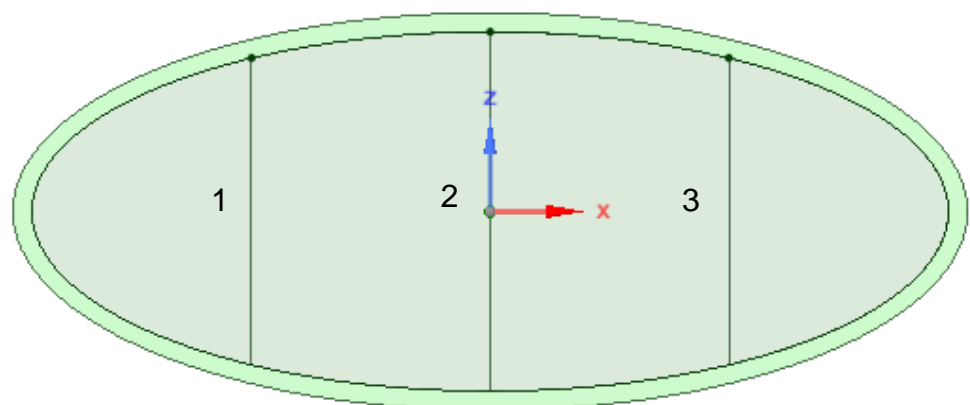


Figura 18-Fios instalados no perfil idealizado para a asa.

A atuação dos fios, individualmente ou em conjunto, permite modificar a geometria, gerando 3 configurações diferentes de asa a serem analisadas (acionamento das posições: 1; 1 e 2; 1, 2 e 3).

4.3. MATERIAL DO PERFIL

O material escolhido para a asa é a liga de alumínio 2024, um dos materiais mais utilizados no ramo aeronáutico, para a estimativa do diâmetro do fio de nitinol que será aplicado no caso. A Tabela 3 apresenta as principais propriedades da liga de alumínio 2024.

Tabela 3-Propriedades Al 2024 (dados do fabricante METALTHAGA)

Propriedades físicas Al 2024		
Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (MPa)	limite de escoamento (MPa)
2,78	74.000	476

Os fios de com memória de forma escolhidos são da liga de Nitinol cujas propriedades podem ser observadas na tabela 4.

Tabela 4-Propriedades da liga de Nitinol (Paiva, 2004)

Propriedades do material	Temperatura de transformação	
$E_M = 26,3 \text{ GPa}$	$M_s = 291,0 \text{ K}$	$M_f = 282,0 \text{ K}$
$E_A = 67 \text{ GPa}$	$A_s = 307,5 \text{ K}$	$A_f = 322,0 \text{ K}$

5. MODELO ANALÍTICO

Para auxiliar no dimensionamento do dispositivo, inicialmente apresenta-se um modelo analítico simplificado baseado em duas vigas retas acopladas a fios de SMA. O modelo proposto tem como objetivo simular o perfil da asa sendo tracionada por fios de ligas com memória de forma.

5.1. MODELO IDEALIZADO

O modelo proposto é composto por duas vigas conectadas através de rótulas nas extremidades e tracionadas por fios com memória de forma com o objetivo de ao serem tracionados modificar o perfil da asa para alterar a condição de voo, conforme mostrado no desenho esquemático da Figura 19.

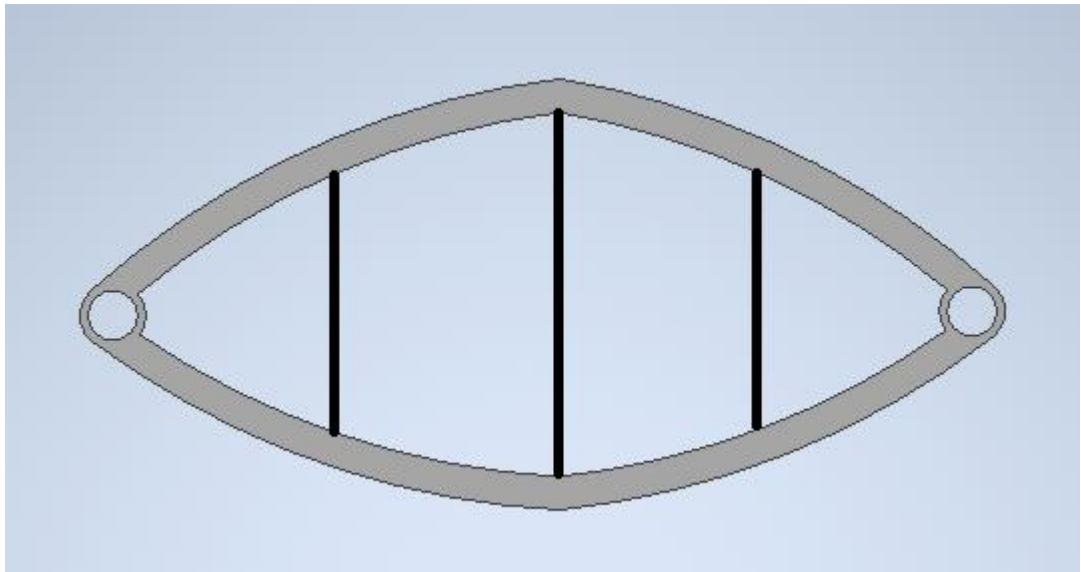


Figura 19- Modelo perfil atuado por fios SMA

5.2. MODELO SIMPLIFICADO

Para uma análise inicial escolheu-se um modelo simplificado para representar a situação composto por 2 vigas retas conectadas por 3 fios SMA

utilizados para carregar a estrutura e deformar o perfil. Em função do esquema de atuação dos fios é possível obter diversas configurações geométricas. O modelo simplificado é baseado em mecânica dos sólidos e usa o conceito de linha elástica de uma viga (Hibbeler,2010). Através deste modelo é possível avaliar os deslocamentos obtido no perfil em função das forças exercidas pelos fios de SMA. Devido à simetria do perfil, estuda-se apenas uma viga tracionada e a metade de cada um dos 3 fios, sendo adotada uma condição de contorno de simetria na metade de cada fio, conforme mostrado na Figura 20.

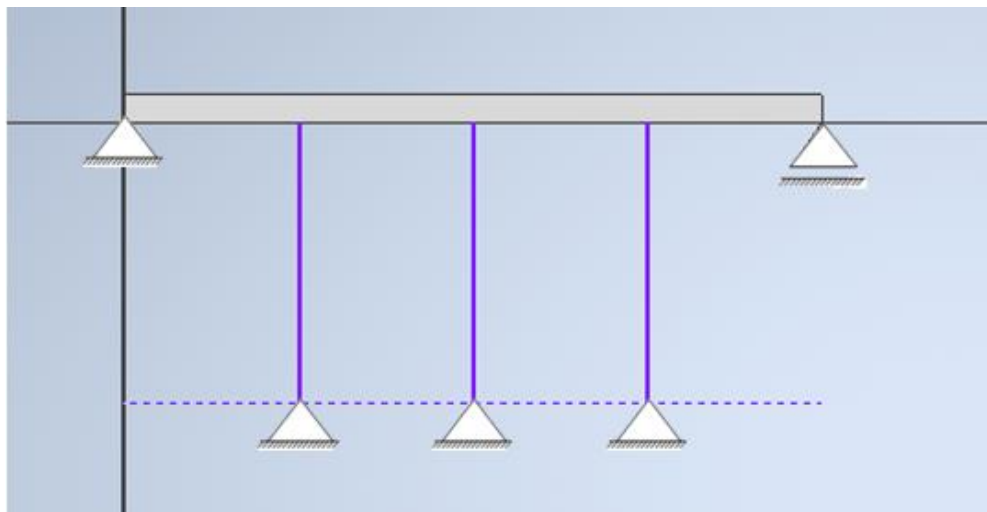


Figura 20- Modelo simplificado do perfil com 3 fios tracionados

5.2.1. Determinação do deslocamento na viga

Para o estudo considera-se o perfil da asa formado por uma seção retangular de base 100 mm por 10 mm de espessura com 250 mm de comprimento e a asa será dividida em seções de 100 mm.

A Figura 21 apresenta a viga submetida às forças produzidas pelos 3 fios de SMA: F1, F2, F3.

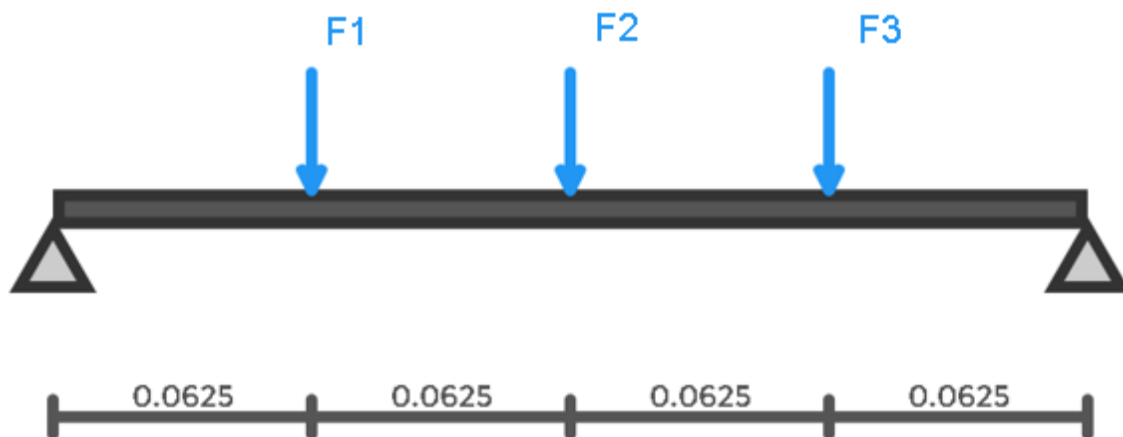


Figura 21- Posicionamento das forças aplicadas na viga

A partir da linha elástica é possível determinar o deslocamento que ocorrerá ao longo da viga em função das forças aplicadas. Essas informações são necessárias para avaliar as tensões nos fios SMA e auxiliar na estimativa do diâmetro dos fios de SMA que serão utilizados para acionar a viga.

Inicialmente é calculado o momento em cada uma das quatro seções que compõem a viga

A influência de cada força na deformação da viga pode ser obtida através da equação da Linha Elástica da viga, a qual é dada pela equação apresentada na Figura 22.



Figura 22- Deslocamento gerado devido a aplicação de uma força concentrada em uma viga biapoiada (Hibbeler, 2012)

Para avaliar o efeito das 3 forças combinadas, o princípio da superposição pode ser utilizado, considerando que as deflexões da viga são pequenas (declividade

máxima inferior a 5°). Assim, aplicando o princípio da superposição, obtém-se a equação geral para o deslocamento ao longo da viga:

$$\begin{aligned}
 y(x) = & \frac{-F_1}{8.E.I_z} \cdot \left[\frac{4}{3} \cdot \langle x - a \rangle^3 - x^3 + 7.a^2 \cdot x \right] \\
 & - \frac{F_2}{12.E.I_z} \cdot [2 \cdot \langle x - 2.a \rangle^3 - x^3 + 12.a^2 \cdot x] \\
 & - \frac{F_3}{24.E.I_z} \cdot [4 \cdot \langle x - 3.a \rangle^3 - x^3 + 15.a^2 \cdot x]
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

O deslocamento nos pontos onde as forças são aplicadas ($x = a$, $x = 2.a$ e $x = 3.a$) é dado pelas equações:

$$y(a) = \frac{-a^3}{4.E.I} \cdot (3.F_1 + \frac{11}{3}.F_2 + \frac{7}{3}.F_3)
 \tag{2}$$

$$y(2.a) = \frac{-a^3}{3.E.I} \cdot (\frac{11}{4}.F_1 + 4.F_2 + \frac{11}{4}.F_3)
 \tag{3}$$

$$y(3.a) = \frac{-a^3}{4.E.I} \cdot (\frac{7}{3}.F_1 + \frac{11}{3}.F_2 + 3.F_3)
 \tag{4}$$

5.2.2. Determinação do deslocamento no fio

Para avaliar as forças que se desenvolvem nos fios, considera-se o modelo simplificado mostrado na Figura 23. Para simular a instalação dos fios em uma condição pré-deformada seguida de uma etapa de recuperação promovida pelo

aquecimento (atuação dos fios) considera-se a aplicação de um deslocamento equivalente, u , nos fios.

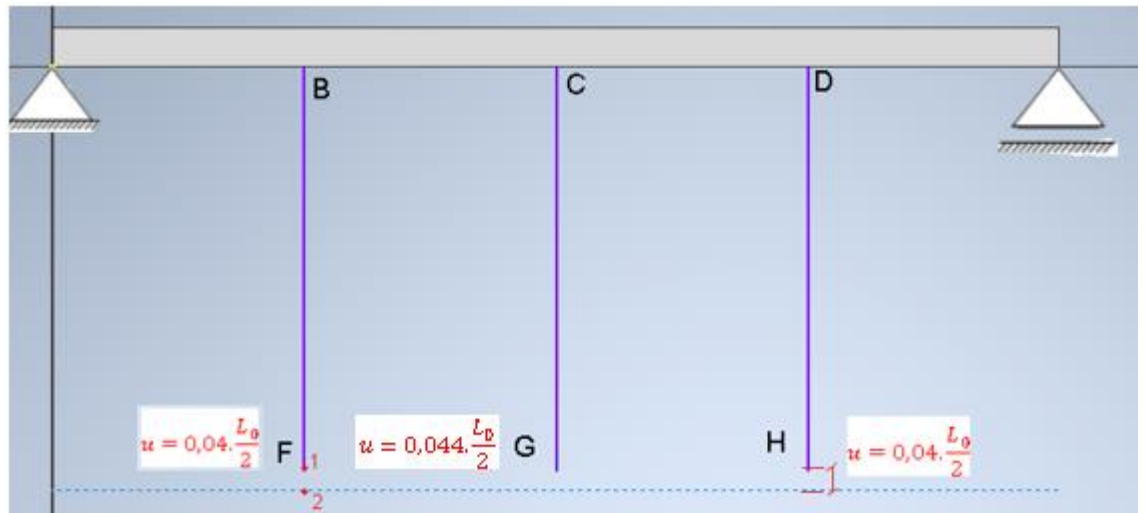


Figura 23-Deslocamento no fio

Apesar deste material ter a capacidade de desenvolver uma deformação recuperável de até 8%, será adotado um valor equivalente à metade deste valor para reduzir efeitos de fadiga do fio. Portanto, o deslocamento imposto neste modelo é associado a uma deformação de 4% ($u = 0,04 L_0/2$), simulando a deformação esperada para este material (Nitinol) promovida pela reorientação de martensita induzida por tensão para a instalação. Ao se aquecer o fio, promove-se a atuação dos elementos com memória de forma, ocorrendo a recuperação de uma deformação de 4% no fio.

Como no ponto central o deslocamento ainda é influenciado pelas forças nos pontos F e H, com a imposição do deslocamento de 4% nestes pontos, o ponto central sofre uma deformação, devido a sua continuidade, superior a 4% no ponto central. Portanto, supõe-se um deslocamento 10% maior neste ponto, igual a 4,4%. Dessa forma, as deformações impostas podem ser escritas como:

$$u_F = u_B + u_{FB} \quad (5)$$

$$u_G = u_C + u_{GC} \quad (6)$$

$$u_H = u_D + u_{HD} \quad (7)$$

onde u_{FB} , u_{GC} e u_{HD} são dados pela equação (Hibbeler, 2012):

$$u = \frac{F \cdot L}{E \cdot A} \quad (8)$$

Para a deformação de 4%, estima-se uma tensão estabelecida de 400 MPa no fio. A Figura 24 mostra um desenho esquemático da curva tensão-deformação de um fio de SMA e as etapas de instalação e atuação.

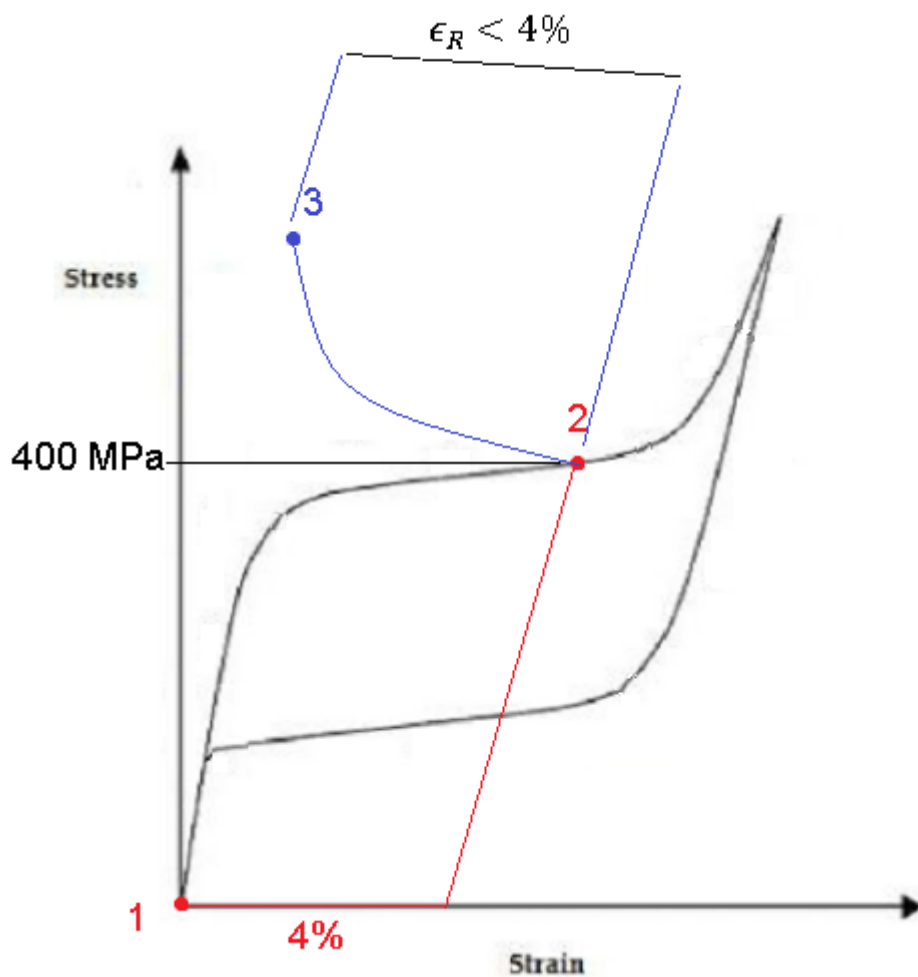


Figura 24- Desenho esquemático da curva tensão-deformação do fio de SMA e as etapas de instalação e atuação

Na Figura 24, o ponto 1 representa a condição inicial, onde o fio se encontra livre de tensão. O ponto 2 representa a condição de instalação dos fios com 4% de deformação e o ponto 3 representa a condição após o aquecimento, onde se observa

uma recuperação quase total da deformação de 4% (o valor é um pouco inferior pela tensão existente no fio após a instalação promovida pela reação da viga).

É importante destacar que neste modelo simplificado, considera-se um comportamento linear-elástico em todas as etapas. Dessa forma, o modelo simplificado prevê tensões bem superiores aos que ocorrem quando existe a presença de deformações recuperáveis induzidas por transformação de fase.

5.2.3. Estudo das tensões para a instalação dos cabos

Substituindo-se os valores nas Eqs. (5-7) e usando as Eqs. (2-3) para representar o deslocamento da viga nos pontos de conexão com os fios e a Eq. (8) para representar a extensão dos fios, obtém-se o seguinte conjunto de equações:

$$-0,04 \cdot \frac{L_0}{2} = \frac{-F_1 \cdot L_0}{E_{Fio}^{MART} \cdot A} - \frac{a^3}{4 \cdot E \cdot I} \cdot \left(3 \cdot F_1 + \frac{11}{3} \cdot F_2 + \frac{7}{3} \cdot F_3 \right) \quad (9)$$

$$-0,044 \cdot \frac{L_0}{2} = \frac{-F_2 \cdot L_0}{E_{Fio}^{MART} \cdot A} - \frac{a^3}{4 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{11}{4} \cdot F_1 + 4 \cdot F_2 + \frac{11}{4} \cdot F_3 \right) \quad (10)$$

$$-0,04 \cdot \frac{L_0}{2} = \frac{-F_3 \cdot L_0}{E_{Fio}^{MART} \cdot A} - \frac{a^3}{4 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{7}{3} \cdot F_1 + \frac{11}{3} \cdot F_2 + 3 \cdot F_3 \right) \quad (11)$$

Considerando a deformação no ponto central 10% maior no ponto central (4,4%) por estar no ponto de deslocamento máximo onde a aplicação das forças 1 e 3 impõe ao ponto central um deslocamento maior devido a continuidade da viga.

Considerando os seguintes valores para os parâmetros da equação:

$$L_0 = 0,104 \text{ m} ; a = 0,0625 \text{ m} ; E = 74 \text{ GPa} ; I = 8,34 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4 ;$$

$$E_M = 26,3 \text{ GPa} ; E_A = 67 \text{ GPa}$$

obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{9279}{3125 \cdot 10^7} \cdot F_1 + \frac{11341}{3125 \cdot 10^7} \cdot F_2 + \frac{7217}{3125 \cdot 10^7} \cdot F_3 \\ = \frac{498251}{10^9} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{9279}{3125 \cdot 10^7} \cdot F_1 + \frac{11341}{3125 \cdot 10^7} \cdot F_2 + \frac{7217}{3125 \cdot 10^7} \cdot F_3 \\ = \frac{498251}{10^9} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{7217}{3125 \cdot 10^7} \cdot F_1 + \frac{11341}{3125 \cdot 10^7} \cdot F_2 + \frac{9279}{3125 \cdot 10^7} \cdot F_3 \\ = \frac{498251}{10^9} \end{aligned} \quad (14)$$

Resolvendo o sistema de 3 equações e 3 incógnitas, obtém-se os seguintes resultados:

$$F_1 = 516,40 \text{ N} \quad (15)$$

$$F_1 = 621,80 \text{ N} \quad (16)$$

$$F_1 = 516,40 \text{ N} \quad (17)$$

Sendo a tensão máxima neste caso:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{621,80}{\pi \cdot 10^{-6}} = 198 \text{ MPa} \quad (18)$$

5.2.4. Equacionamento para os 3 fios atuados

Para a condição com os 3 fios atuados, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$-0,04 \cdot \frac{L_0}{2} = \frac{-F_1 \cdot L_0}{E_{Fio}^{AUST} \cdot A} - \frac{a^3}{4 \cdot E \cdot I} \cdot \left(3 \cdot F_1 + \frac{11}{3} \cdot F_2 + \frac{7}{3} \cdot F_3 \right) \quad (18)$$

$$-0,044 \cdot \frac{L_0}{2} = \frac{-F_2 \cdot L_0}{E_{Fio}^{AUST} \cdot A} - \frac{a^3}{3 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{11}{4} \cdot F_1 + 4 \cdot F_2 + \frac{11}{4} \cdot F_3 \right) \quad (19)$$

$$-0,04 \cdot \frac{L_0}{2} = \frac{-F_3 \cdot L_0}{E_{Fio}^{AUST} \cdot A} - \frac{a^3}{4 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{7}{3} \cdot F_1 + \frac{11}{3} \cdot F_2 + 3 \cdot F_3 \right) \quad (20)$$

Substituindo as constantes chegamos no Sistema de equações:

$$462,310^{-9} \cdot F_1 + 26,1 \cdot 10^{-9} \cdot F_2 + 16,6 \cdot 10^{-9} \cdot F_3 = 2,08 \cdot 10^{-3} \quad (19)$$

$$26,12 \cdot 10^{-9} \cdot F_1 + 479 \cdot 10^{-9} \cdot F_2 + 26,12 \cdot 10^{-9} \cdot F_3 = 2,28 \cdot 10^{-3} \quad (20)$$

$$16,6 \cdot 10^{-9} \cdot F_1 + 26,1 \cdot 10^{-9} \cdot F_2 + 462,3 \cdot 10^{-9} \cdot F_3 = 2,08 \cdot 10^{-3} \quad (21)$$

Finalmente, obtém-se os seguintes resultados:

$$F_1 = 41.067,7 \text{ N} \quad (22)$$

$$F_2 = 43.286,4 \text{ N} \quad (23)$$

$$F_3 = 41067,7 \text{ N} \quad (24)$$

Que implica em uma tensão máxima de:

$$\sigma = \frac{F}{A} = 13,78 \text{ GPa} \quad (24)$$

Trata-se de uma tensão muito elevada que não irá ocorrer na prática. O valor elevado é função de ter sido utilizado um modelo simplificado linear-elástico que não considera a redução da tensão promovida pela reorientação e transformação de fase.

5.3. APERFEIÇOAMENTO DO MODELO ANALÍTICO

O modelo anterior para a determinação do deslocamento através da força possui limitações e desconsidera a transformação de fase, levando em conta apenas a fase elástica da austenita, resultando em valores muito mais elevados para a força nos fios por não considerar a mudança de fase.

Para poder representar os efeitos da mudança de fase no cálculo das tensões presentes nos fios de SMA, considerou-se o modelo constitutivo proposto por Brinson (Savi e Paiva, 1999).

5.3.1. Modelo de Brinson

O modelo de Brinson foi criado tomando como base a lei constitutiva de Tanaka (Savi e Paiva, 1999) em conjunto com as equações de Liang e Rogers (Savi e Paiva, 1999) para descrever a evolução martensítica, com modificações que permitiram considerar as fases de martensita maclada e martensita não-maclada (Savi e Paiva, 1999).

$$\sigma = E. (\epsilon - \epsilon^{TF}) \quad (25)$$

$$\epsilon^{TF} = \alpha. \beta \quad (26)$$

$$F = \sigma. A = [E. (\epsilon - \alpha. \beta)]. A \quad (27)$$

onde ϵ é a deformação total e ϵ^{TF} é a deformação por transformação de fase, em que α é um parâmetro do material (0,08) e β é a fração volumétrica de fase. Quando o material se apresenta na forma martensítica, β assume o valor igual a 1 (100%) para uma deformação induzida por tensão de 8%. Com esse valor é possível determinar o valor de α como mostrado abaixo.

$$00\% \text{ } M+ \rightarrow \beta = 1 \text{ e } \epsilon^{TF} = 8\% \quad (28)$$

$$0,08 = \alpha. 1 \quad (29)$$

$$\alpha = 0,08 \quad (30)$$

o que resulta em uma equação constitutiva para a força, considerando a mudança de fase que será aplicada nas etapas a seguir.

$$F = E.A.(\epsilon - 0,08.\beta) \quad (31)$$

O carregamento dos fios será feito em 3 etapas: 1) instalação dos fios; 2) aquecimento; e 3) resfriamento.

5.4. ETAPAS DO MODELO

O modelo proposto considera 3 etapas para representar: 1) a montagem dos fios de SMA no perfil; 2) a atuação dos fios de SMA; e 3) a retirada da atuação dos fios de SMA.

5.4.1. Primeira Etapa – Montagem dos Fios de SMA no Perfil

Nesta etapa é realizada uma pré-carga para induzir a reorientação de martensita maclada para martensita não-maclada utilizando uma tensão média para uma deformação de 4%.

Para determinar a tensão média (com 4% de deformação) é necessário aproximar a curva tensão deformação em duas etapas para encontrar o valor da tensão para uma deformação de 4% (tensão média).

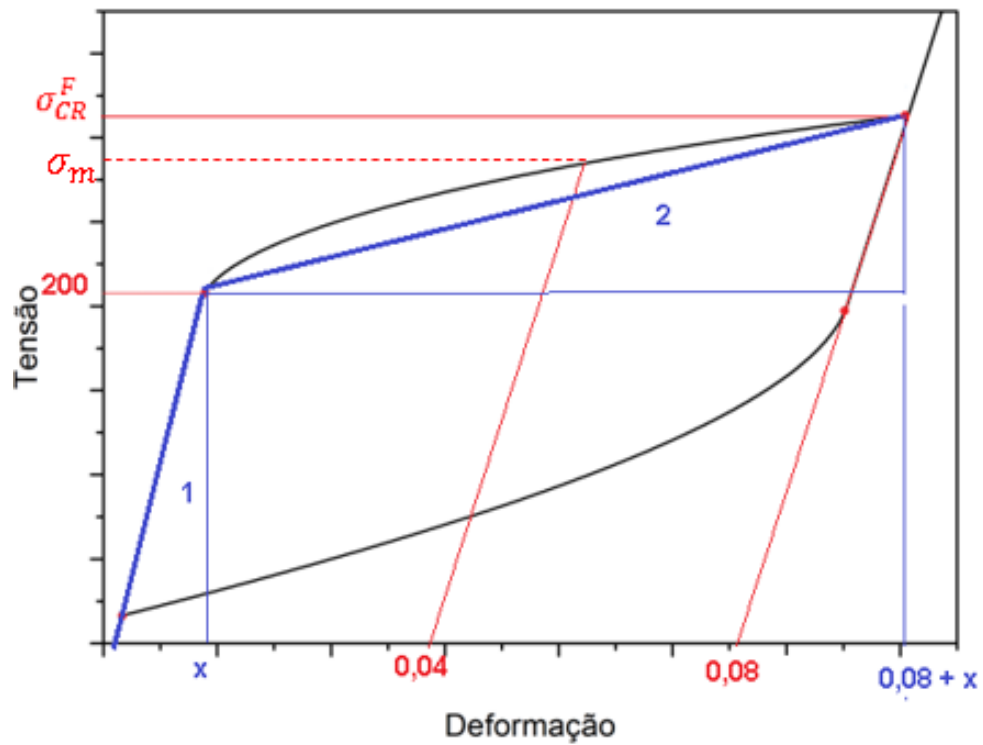


Figura 25- Curva tensão deformação (%) - tensão média (MPa)

A Figura 26 apresenta os triângulos 1 e 2 formados na Figura 25, os quais representam a inclinação da curva tensão-deformação nas duas regiões. Através dos dois triângulos é possível determinar o valor da tensão crítica final para então determinar seu valor médio.

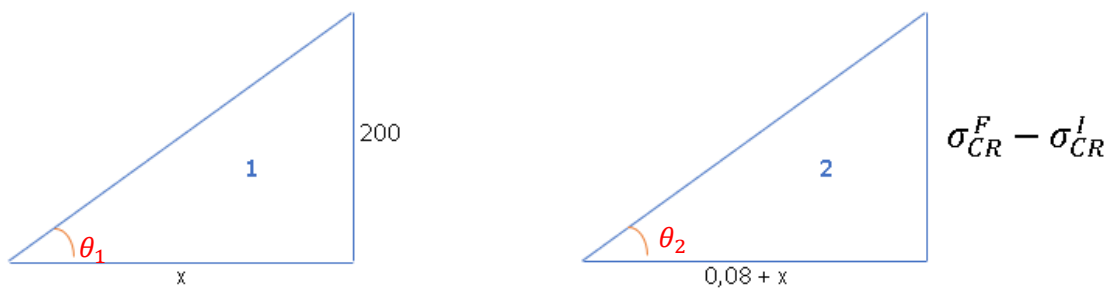


Figura 26- Triângulos curva tensão deformação

Conhecendo os valores de tangente para alfa e beta é possível determinar o valor de X e posteriormente da tensão crítica final.

$$\text{tg}(\theta_1) = 28 \text{ GPa}$$

$$28 \cdot 10^3 = \frac{200}{x} \quad (3225)$$

$$x = 0,0071 \quad (33)$$

$$\text{tg}(\theta_2) = 2 \text{ GPa} \quad (34)$$

$$2 \cdot 10^3 = \frac{\sigma_{CR}^F - 200}{0,08 + x} \quad (35)$$

$$\sigma_{CR}^F = 374 \text{ Mpa} \quad (36)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{CR}^F + \sigma_{CR}^I}{2} \quad (37)$$

$$\sigma_m = 287 \text{ MPa} \quad (38)$$

Com o valor da tensão média e sabendo o diâmetro do fio de 2 mm é possível determinar a força atuando na primeira etapa através da equação:

$$F = \sigma_m \cdot A \quad (39)$$

$$F = 287 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \quad (40)$$

$$F = 9,01 \cdot 10^2 \text{ N} \quad (41)$$

A primeira etapa considera uma deformação por transformação de fase de 4%, implicando em um valor de β igual a 0,5, resultando em $\alpha \cdot \beta = 0,04$. Assim, o valor da força pode ser dado pela equação (41).

Além do valor da força gerada na primeira etapa é possível determinar o deslocamento que será fixado, pois a deformação total é a deformação elástica somada a deformação de transformação de fase.

$$\epsilon^{total} = \epsilon^{elástica} + \epsilon^{TF} \quad (42)$$

$$\frac{u_{FB}}{L_0/2} = \frac{\sigma_m}{E_m} + 0,04 \quad (43)$$

$$u_{FB} = \frac{\sigma_m \cdot L_0}{E_m} \cdot \frac{1}{2} + 0,04 \cdot \frac{L_0}{2} \quad (44)$$

$$u_F = u_{FB} + u_B \quad (45)$$

onde u_{FB} é referente ao alongamento do fio de SMA. Uma vez que u_B é a deformação da viga segundo a linha elástica, u_F representa o valor fixado no fio na primeira etapa.

$$u_{FB} = \frac{287 \cdot 10^6}{28 \cdot 10^9} \cdot 0,052 + 0,04 \cdot 0,052 \quad (46)$$

$$u_{FB} = 2,61 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (47)$$

Para determinar u_B a equação da linha elástica (1) é utilizada considerando a coordenada $x = L/4$.

$$\left(\frac{L}{4}\right) = \frac{-F1 \cdot 3L}{6 \cdot 4 \cdot LE \cdot I} \cdot ((-L^3) + (16L^2 - 9L^2) \cdot L) \quad (48)$$

$$y\left(\frac{L}{4}\right) = \frac{-F1}{8 \cdot E \cdot I} \cdot 6 \cdot L^3 \quad (49)$$

$$u_B = y\left(\frac{L}{4}\right) = 2,68 \cdot 10^{-4} \text{ m} \quad (50)$$

Logo, o valor de u_F fixado na primeira etapa é de:

$$u_F = 2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (51)$$

Para verificar o modelo, desenvolveu-se uma análise baseada no método de elementos finitos utilizando o pacote comercial Ansys/Workbench (Ansys, 2022) na sua versão Acadêmica de Estudante. A Figura 27 destaca o valor obtido para o deslocamento em $x = L/4$ para uma força atuante no mesmo ponto.

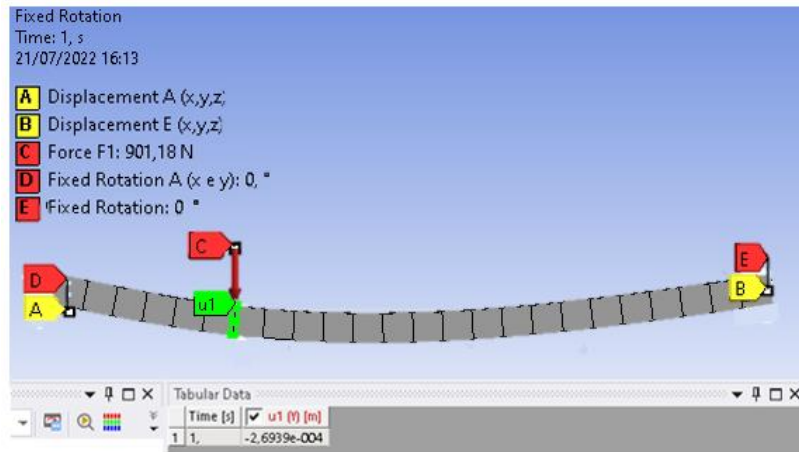


Figura 27-Deslocamento na estrutura com uma força atuando. Modelo numérico baseado no método de elementos finitos.

O deslocamento observado na Figura 27 tem o valor:

$$u_1 = 2,694 \cdot 10^{-4} \text{ m (modelo de elementos finitos)} \quad (52)$$

Comparando com o esperado pelo modelo analítico:

$$u_B = 2,687 \cdot 10^{-4} \text{ m (modelo analítico)} \quad (53)$$

Uma diferença de aproximadamente 0,2% foi encontrada, um valor aceitável. Em seguida, a partir desse modelo numérico calculam-se os deslocamentos considerando-se as configurações com a aplicação de duas forças (em $x = L/4$ e $L/2$) e de 3 forças (em $x = L/4$, $L/2$ e $3L/4$).

A Figura 28 apresenta o valor do deslocamento em $x = L/4$ para a situação com duas forças atuantes na viga ($x = L/4$ e $L/2$). O valor encontrado em $x = L/4$ é maior do que o dobro do deslocamento obtido para a situação com apenas uma força atuando (Figura 27) para as mesmas condições de contorno.

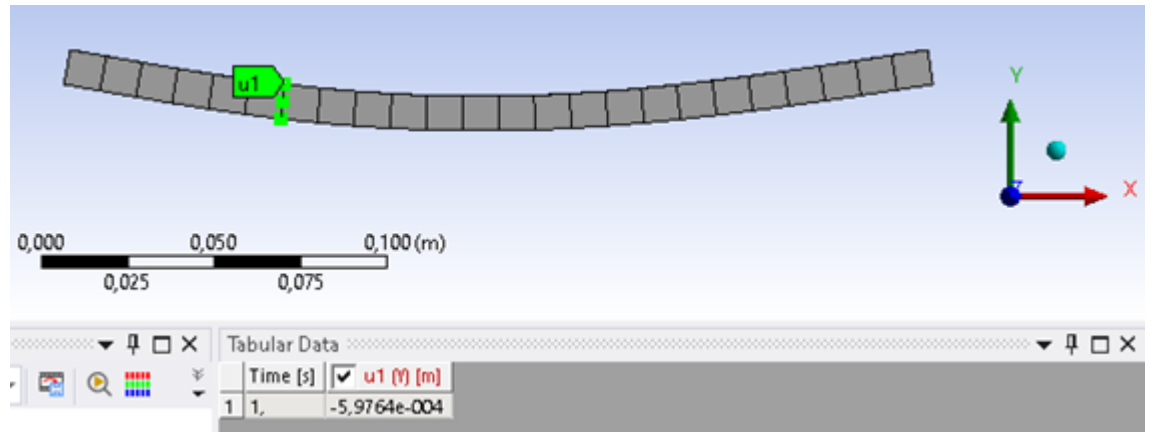


Figura 28-Deslocamento na estrutura com duas forças atuando. Modelo numérico baseado no método de elementos finitos.

Realizando a simulação para as 3 configurações de forças atuantes e indicando o valor do deslocamento em $x = L/4$ (u_1), em $x = L/2$ (u_2) e em $x = 3L/4$ (u_3) obtém-se ao resultado apresentado na Tabela 6.

Tabela 5-deslocamentos encontrados para as 3 configurações de forças

Unidades em mm	F_1	$F_1 e F_2$	$F_1, F_2 e F_3$
u_1	$2,69. 10^{-4}$	$5,98. 10^{-4}$	$8,06. 10^{-4}$
u_2	$3,28. 10^{-4}$	$8,06. 10^{-4}$	$1,13. 10^{-3}$
u_3	$2,09. 10^{-4}$	$5,37. 10^{-4}$	$8,06. 10^{-4}$

Ainda na primeira etapa é possível determinar a rigidez da viga, que será utilizada nos cálculos das etapas seguintes, da seguinte maneira:

$$K = \frac{F_1}{y} \quad (54)$$

onde F_1 é a força encontrada na primeira etapa e y é o deslocamento encontrado no modelo analítico. Substituindo os valores é obtido o seguinte resultado:

$$K = \frac{901,18}{2,687 \cdot 10^{-4}} \quad (55)$$

$$K = 2,3 \cdot 10^6 \text{ N/m} \quad (56)$$

5.4.2. Segunda Etapa – Atuação dos Fios de SMA

Nesta etapa ocorrerá um aquecimento para induzir a recuperação de forma da martensita não-maclada para austenita a uma temperatura suficientemente alta para que ocorra 100% da transformação ($\beta=0$).

$$F = \sigma \cdot A = [E_A \cdot (\epsilon - \alpha \cdot \beta)] \cdot A \quad (57)$$

$$F = \frac{E_A \cdot A}{L_0} \cdot u_{FB} \quad (58)$$

$$u_{FB} = u_F - u_B \quad (59)$$

$$u_{FB} = u_F - \frac{F}{K_{viga}} \quad (60)$$

Substituindo u_{FB} e isolando-se F tem-se que:

$$F \cdot \left[1 + \frac{\left(\frac{E_A \cdot A}{L_0} \right)}{K_{viga}} \right] = \frac{E_A \cdot A}{L_0} \cdot u_F \quad (61)$$

$$F = \frac{\frac{E_A \cdot A}{L_0} \cdot u_F}{1 + \frac{\left(\frac{E_A \cdot A}{L_0} \right)}{K_{viga}}} \quad (62)$$

$$F = \frac{u_F}{\frac{1}{K_{SMA}^A} + \frac{1}{K_{viga}}} \quad (63)$$

Como u_F foi fixado na primeira etapa, temos o seu valor. A rigidez da viga, K , foi determinado ao final da primeira etapa (Eq. 56) e a rigidez elástica do fio com memória de forma na fase de austenita pode ser determinado segundo a equação:

$$K_{SMA}^A = \frac{E_A \cdot A}{L_0} \quad (64)$$

Substituindo estes valores na Eq. (62) é possível chegar ao valor da força na segunda etapa:

$$F = 6,62 \cdot 10^3 \text{ N} \quad (65)$$

Aplicando esse valor de força novamente nas 3 configurações de forças descritas em $x = L/4$, $L/2$ e $3L/4$, os deslocamentos em cada uma das configurações podem ser determinados através do modelo numérico desenvolvido.

A Figura 29 ilustra o deslocamento em u_1 para a segunda etapa, considerando uma força atuando sobre o ponto.

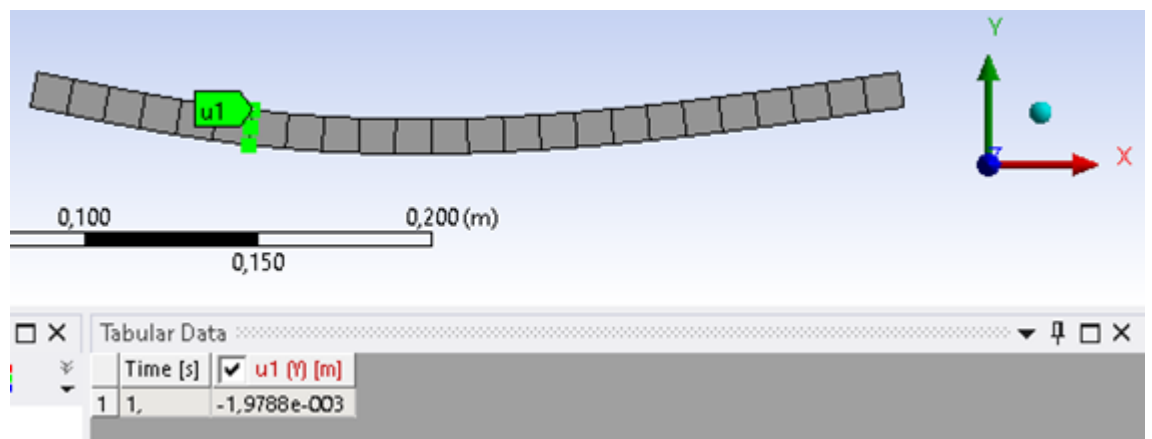


Figura 29-deslocamento segunda etapa em $L/4$. Modelo de Elementos Finitos.

5.4.3. Terceira Etapa – Retirada da Atuação dos Fios de SMA

Na terceira etapa ocorre o resfriamento do fio SMA e ele retorna de austenita para martensita não-maclada. Dessa forma, a força aplicada no fio terá uma

redução pois o módulo de elasticidade da martensita é igual a menos da metade do módulo de elasticidade da austenita.

O cálculo da força nesta etapa é similar ao que foi desenvolvido na etapa anterior sendo determinado pela seguinte equação:

$$F = \frac{u_F}{\frac{1}{K_{SMA}^M} + \frac{1}{K_{viga}}} \quad (66)$$

onde a rigidez elástica do fio com memória de forma na fase de martensita pode ser determinado segundo a equação:

$$K_{SMA}^M = \frac{E_M \cdot A}{L_0} \quad (67)$$

substituindo-se os valores de K_{SMA}^M e de K_{viga} na Eq. (66), é possível obter o valor da força na terceira etapa:

$$F = 1,78 \cdot 10^3 \text{ N} \quad (68)$$

Novamente este valor de força é aplicado para as configurações já citadas na etapa anterior e seus valores determinados pelo modelo numérico.

A Tabela 8 apresenta os resultados de deslocamento para as 3 configurações de atuação das 3 forças em cada uma das 3 etapas.

Tabela 6-Valores de deslocamento para cada etapa. Modelo de Elementos Finitos.

(m)	1ª etapa			2ª etapa			3ª etapa		
	F_1	$F_1 e F_2$	$F_1, F_2 e F_3$	F_1	$F_1 e F_2$	$F_1, F_2 e F_3$	F_1	$F_1 e F_2$	$F_1, F_2 e F_3$
$u_1(L/4)$	$2,69 \cdot 10^{-4}$	$5,98 \cdot 10^{-4}$	$8,06 \cdot 10^{-4}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$	$4,39 \cdot 10^{-3}$	$5,92 \cdot 10^{-3}$	$5,32 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$1,59 \cdot 10^{-3}$
$u_2(L/2)$	$3,28 \cdot 10^{-4}$	$8,06 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$2,41 \cdot 10^{-3}$	$5,92 \cdot 10^{-3}$	$8,33 \cdot 10^{-3}$	$6,49 \cdot 10^{-4}$	$1,59 \cdot 10^{-3}$	$2,24 \cdot 10^{-3}$
$u_3(3L/4)$	$2,09 \cdot 10^{-4}$	$5,37 \cdot 10^{-4}$	$8,06 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-3}$	$3,94 \cdot 10^{-3}$	$5,92 \cdot 10^{-3}$	$4,12 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$1,59 \cdot 10^{-3}$

5.5. TENSÕES NO FIO COM MEMÓRIA DE FORMA

Após o cálculo das deformações encontradas em cada etapa é preciso verificar se os fios SMA suportam as tensões geradas pelas forças em cada etapa.

Com os valores de força determinado nas etapas das seções anteriores é possível estimar o valor da tensão nos fios, em cada etapa de atuação, considerando as fases martensíticas e austenítica.

A tensão no fio pode ser determinada pela seguinte equação:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (69)$$

O diâmetro do fio escolhido é de 1 mm e a força em cada etapa é aplicada para determinar a tensão no fio de NiTiInol. A Tabela 6 apresenta os valores obtidos para a tensão nos fios.

Tabela 7-tensão máxima no fio em cada etapa

	Fase	$\sigma_{calculada}$
1ª etapa	Martensita	286 MPa
2ª etapa	Austenita	2,1 GPa
3ª etapa	Martensita	541 MPa

A primeira etapa é referente a instalação dos fios (deformação de 4%) ,e portanto, corresponde à tensão média indicada na figura 25, a segunda etapa ocorre após o aquecimento dos fios sofrendo alteração de martensita não-maclada para austenita e a terceira etapa ocorre o resfriamento dos fios e diminuição das tensões, porém não são restaurados os 4% iniciais, pois existe uma tensão residual após a instalação dos fios.

6. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS PARA UM PERFIL COM CURVATURA

Após o desenvolvimento e análise da resposta dos dois modelos simplificados (analítico e numérico) considerando uma viga reta, um modelo mais próximo ao perfil de asa escolhido é desenvolvido. Para isso, um perfil simétrico e elíptico é escolhido. Adota-se a mesma espessura do modelo de viga reta (10 mm) e uma largura de 100 mm, como pode ser observado na Figura 31. As simulações numéricas foram desenvolvidas através do pacote computacional baseado no método de elementos finitos Ansys/Workbench, versão Acadêmica de Estudante. (Ansys,2022)

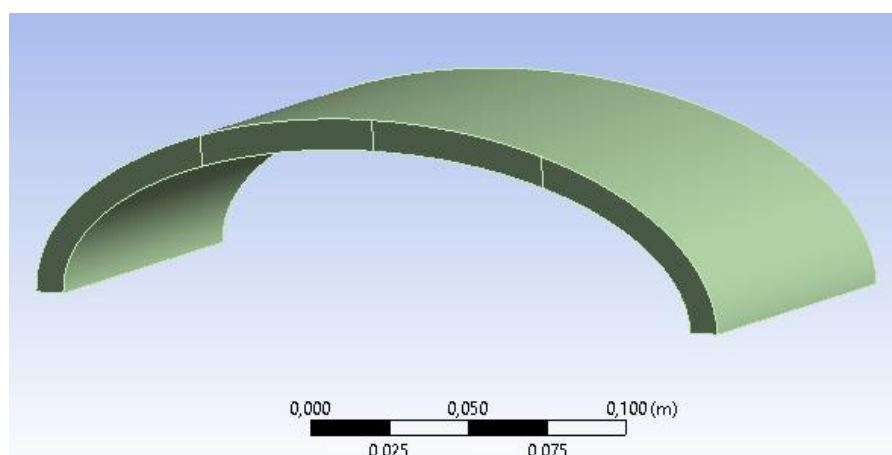


Figura 30 – Modelo sólido do perfil com curvatura desenvolvido no pacote computacional Ansys (Ansys, 2022)

Todas as etapas descritas anteriormente são, agora, analisadas com o uso deste modelo de perfil com curvatura, para determinação de deslocamentos e tensões atuantes na viga.

6.1. CARREGAMENTO E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para o desenvolvimento do modelo de viga reta foram consideradas condições de contorno de modo do tipo apoio em ambas as extremidades, tanto para

o modelo analítico como para o numérico. Para o modelo de perfil com curvatura foram consideradas outras restrições nas extremidades do perfil, conforme mostrado na Figura 31, sendo elas:

Extremidade direita (ponto E): engaste, fixando o deslocamento e o ângulo nas direções x , y e z .

Extremidade esquerda (ponto A): restrição angular nos 3 eixos e restrição de deslocamento em y e z , de modo a permitir o deslocamento apenas na direção x .

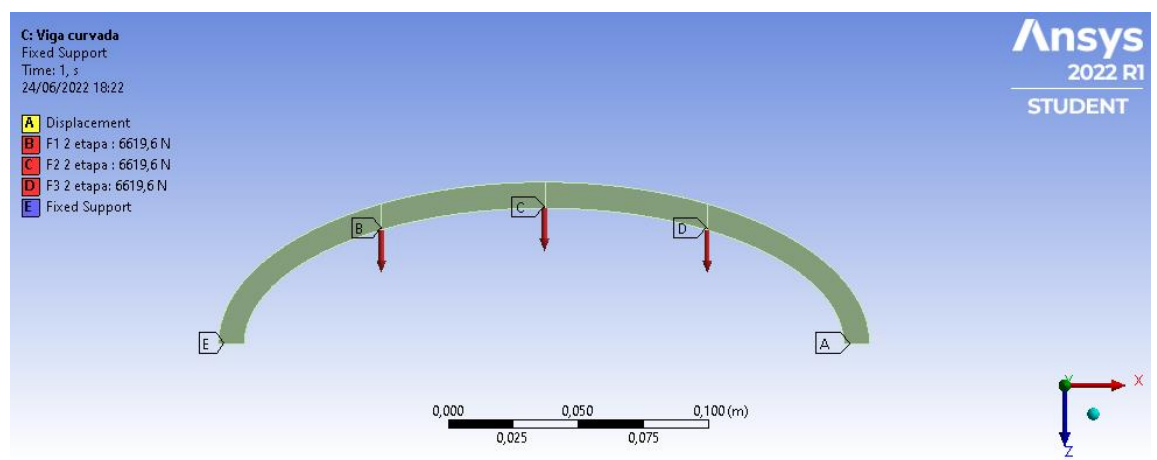


Figura 31- Condições de contorno do modelo de perfil com curvatura.

Estas restrições impostas nessa geometria permitem ao perfil o alongamento na direção x ao ser atuado pelas forças dos fios com memória de forma, possibilitando em uma mudança na geometria que consiga impactar aerodinamicamente o projeto. As forças promovidas pelos fios de SMA estão representadas na Figura 32 nos pontos B ($x = L/4$), C ($x = L/2$) e D ($x = 3L/4$).

6.2. MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Para o desenvolvimento das simulações numéricas é preciso definir a malha que será aplicada no estudo. Na análise foi utilizada a malha sugerida automaticamente pelo pacote computacional Ansys (Ansys, 2022) que é baseada nas dimensões e geometria da estrutura. A malha utilizada é mostrada na Figura 32,

possuindo elementos de dimensões com valores próximos a 13,8 mm. O tipo de elemento adotado é o SOLID187, um elemento 3D, quadrático definido por 10 nós.

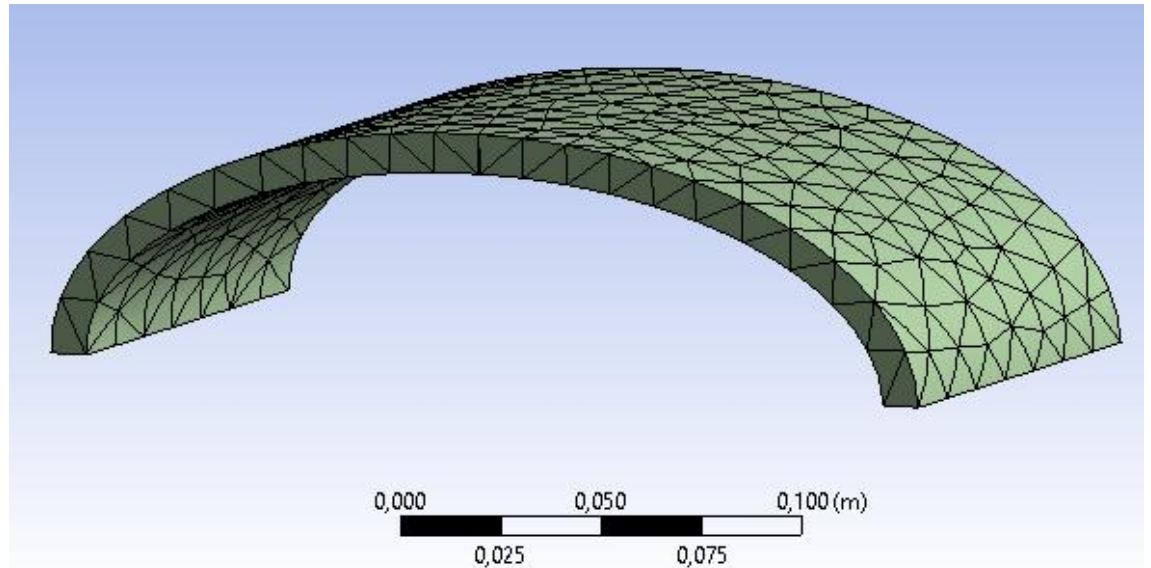


Figura 32-Malha utilizada. Perfil com curvatura.

O processo de refino da malha, através da redução do tamanho dos elementos, normalmente resulta em valores mais precisos. Por outro lado, o refino resulta em um maior tempo de processamento. Dessa forma, um estudo de convergência de malha foi feito para estabelecer o tamanho adequado da malha. A Tabela 10 apresenta os resultados de um estudo de convergência, onde é apresentado o valor da tensão equivalente de *von Mises* máxima (caso crítico) em função do tamanho do elemento.

Tabela 8-variação da tensão com o refino da malha

Tamanho do elemento (mm)	Tensão Equivalente de <i>von Mises</i> Máxima (MPa)
13,8	261
10	265

8	271
5	274

A análise de convergência foi desenvolvida até o limite máximo de refino que a versão Acadêmica de Estudante do Ansys (Ansys, 2022) permite. Para a estrutura analisada, a partir da situação inicial de 13,8 mm até o limite de 5 mm houve uma variação inferior a 5%. Levando em consideração que o refino da malha aumenta a qualidade do resultado, mas também eleva o tempo de processamento de dados e requer o uso de computadores com um poder de processamento elevado, dependendo do nível de precisão desejado para o resultado, não é necessário escolher-se a condição de maior refino. Assim, por considera-se que a variação de 5% é adequada, para os resultados apresentados a seguir utiliza-se a malha com dimensões de 13,8 mm.

6.3. TENSÕES NO PERFIL COM CURVATURA

Para verificar a viabilidade dessa estrutura é preciso que o perfil da asa suporte a força gerada pelos fios com memória de forma. Dessa forma foi desenvolvida uma análise de tensões para a situação mais crítica de carregamento, que é o caso com as 3 forças atuando na segunda etapa (austenítica). Esta análise tem como objetivo avaliar se os carregamentos aplicados promovem falha por escoamento do perfil. A Figura 33 apresenta a distribuição da tensão equivalente de *von Mises*.

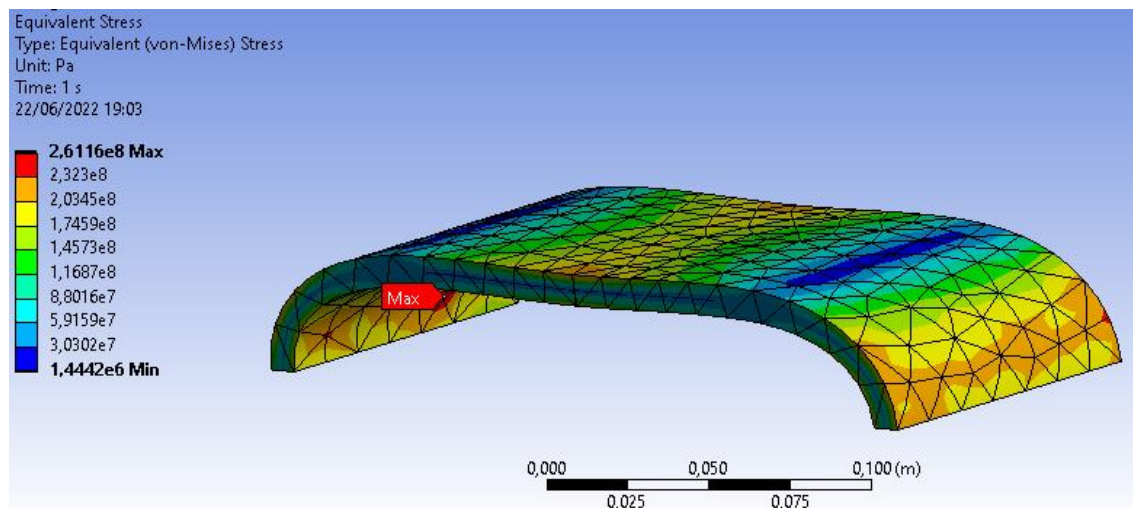


Figura 33-Distribuição da tensão equivalente de *von Mises*. Caso crítico de atuação das forças para o perfil com curvatura.

A simulação numérica mostra no ponto indicado em vermelho na figura uma tensão equivalente de *von Mises* máxima de 261 MPa. Conforme consta na Tabela 3, a liga de alumínio Al 2024 possui um limite de escoamento de 476 MPa, o que resulta em um fator de segurança de 1,8. Qualquer outra configuração de atuação de forças nas 3 etapas apresentadas promove valores de tensão equivalente de *von Mises* máxima menores, representando desta forma situações menos críticas do que esta configuração. Portanto pode-se considerar que a estrutura resiste ao escoamento para os esforços considerados promovidos pelos fios de SMA.

As análises apresentadas foram desenvolvidas sem a opção de “grandes deslocamentos” ativada no pacote comercial Ansys (Ansys, 2022). O cálculo de tensões levando em consideração grandes deslocamentos leva em consideração a alteração na geometria da viga de modo iterativo, refazendo os cálculos a cada passo conforme ocorre a deformação. Este é um modo que aumenta a precisão do cálculo, porém torna o processo de simulação mais lento. Dessa forma, foi realizada uma simulação com a opção de “grandes deslocamentos” ativada e o aumento na tensão máxima observado foi de aproximadamente 14%. Como o fator de segurança é elevado, este aumento não apresenta grandes implicações para as situações analisadas.

É importante frisar que um estudo completo do perfil deve envolver os carregamentos externos associados aos esforços aerodinâmicos e provenientes de elementos e dispositivos fixados na asa.

6.4. COMPARAÇÃO ENTRE AS TENSÕES OBTIDAS COM OS MODELOS

O primeiro modelo não considerava a mudança de fase dos elementos de SMA e, portanto, os valores de força encontrados no modelo preliminar são mais de 10 vezes maiores do que os obtidos no modelo aperfeiçoado que leva em consideração o modelo de Brinson. Por sua vez, os valores obtidos para o perfil com curvatura são cerca de dez vezes inferiores aos obtidos para o modelo aperfeiçoado.

Abaixo estão considerados os casos de tensão máxima (3 forças atuadas) simulados com as condições de contorno de cada situação previamente descrita simulada em elementos finitos.

Tensão máxima na viga no modelo preliminar: $\sigma = 3,16 \text{ GPa}$

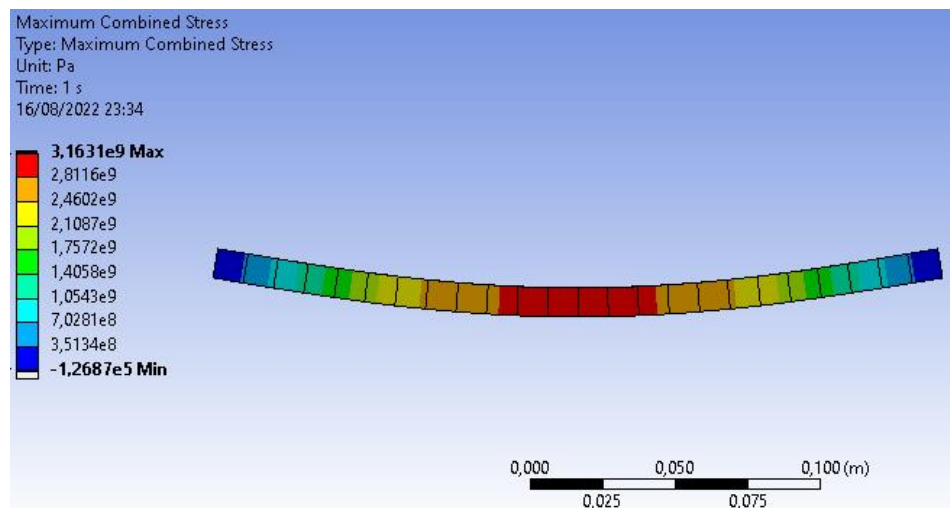


Figura 34- Tensão máxima (modelo preliminar)

Tensão máxima na viga no modelo aperfeiçoado: $\sigma = 496 \text{ MPa}$

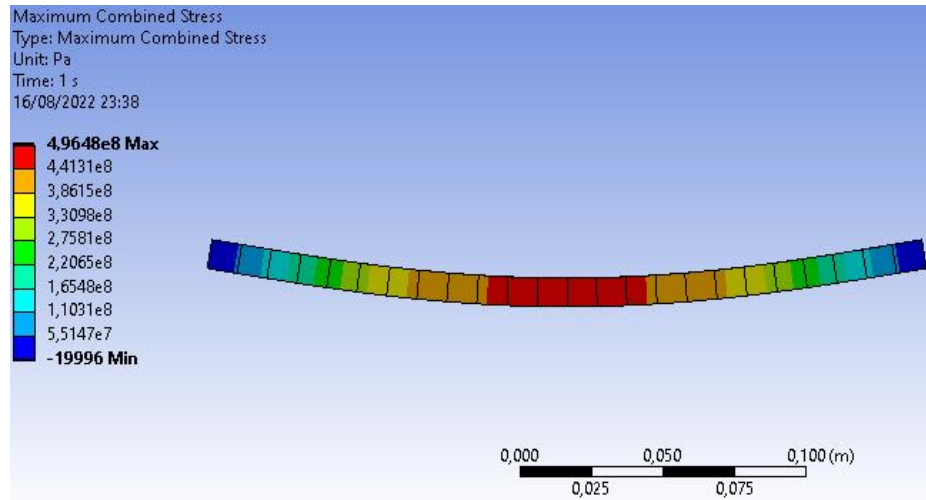


Figura 35- Tensão máxima (modelo aperfeiçoado)

Tensão máxima na viga no modelo de perfil com curvatura: $\sigma = 261 \text{ MPa}$

A tensão máxima no perfil com curvatura é ilustrada na figura 33.

Como os valores de tensão máxima no modelo aperfeiçoado e o modelo de perfil com curvatura apresentam uma diferença de 1,9 vezes será verificada a tensão no modelo aperfeiçoado para as mesmas condições de contorno impostas no modelo de perfil com curvatura, conforme indicado na Figura 34.

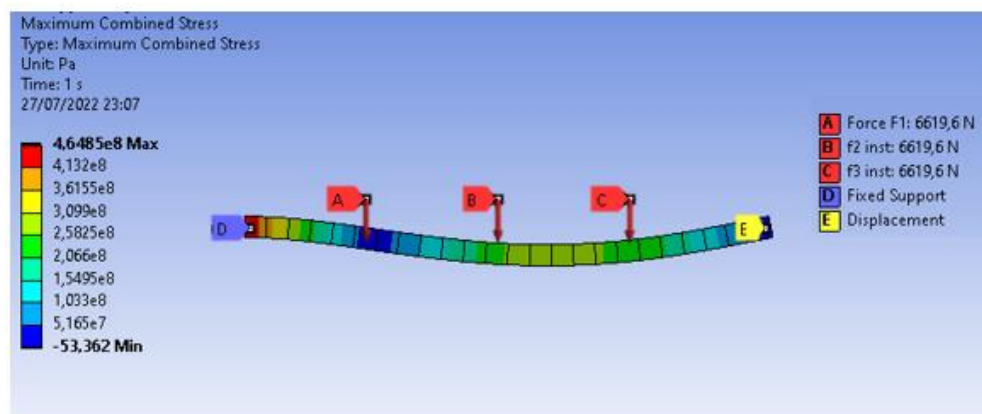


Figura 36- Condições de contorno alteradas para o modelo de elementos finitos para viga reta aperfeiçoado

A tensão máxima encontrada no modelo aperfeiçoado de viga reta adotando condições de contorno similares às consideradas no modelo para o perfil com curvatura é de 464 MPa. Assim, observa-se a redução da diferença entre a tensão máxima de *von Mises* prevista para os 2 modelos para 1,7 vezes. Esta

diferença está associada a geometrias diferentes para os perfis adotados nos dois modelos: perfil de viga reta e perfil com curvatura.

6.5. CONFIGURAÇÃO DEFORMADA DO PERFIL COM CURVATURA

A Figura 35 mostra a configuração deformada em escala real da viga curva com a atuação de 2 fios de SMA: central ($x = L/2$) e lado direito ($x = 3L/4$). A figura em sombra mostra a configuração inicial sem atuação. A figura destaca a mudança no perfil aerodinâmico da asa ao se atuar as forças nos fios.

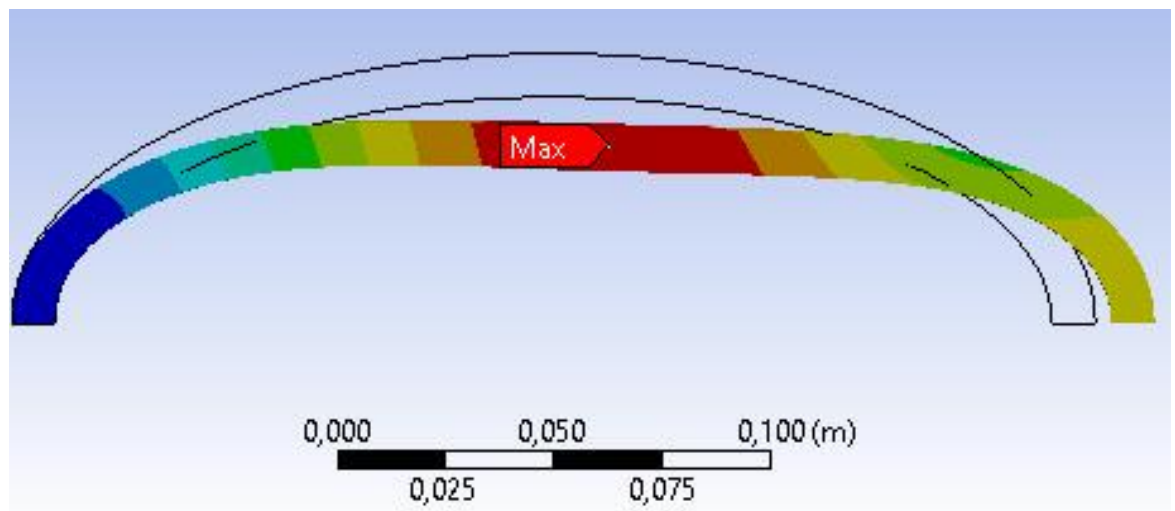


Figura 37- Comparação da configuração geométrica do perfil não atuado com perfil atuado por duas forças aplicadas em $x = L/2$ e $x = 3L/4$.

7. ANÁLISE AERODINÂMICA DAS CONFIGURAÇÕES DE PERFIS ATUADOS

Nesta seção é apresentada uma comparação dos fatores aerodinâmicos considerando quatro configurações de perfil: 1) não atuado; 2) atuado com uma força; 3) atuado com duas forças; e 4) atuado com três forças.

Para avaliar estes fatores, foi utilizado o pacote computacional gratuito XFLR5 (XFLR5, 2022). Este programa de análise de perfis, asas e aviões permite uma análise de diferentes perfis existentes ou criados, fornecendo os principais fatores aerodinâmicos. A Figura 36 mostra as 4 configurações geométricas obtidas através do modelo de elementos finitos para a viga curva e que serviram como base de entrada no programa XFLR5.

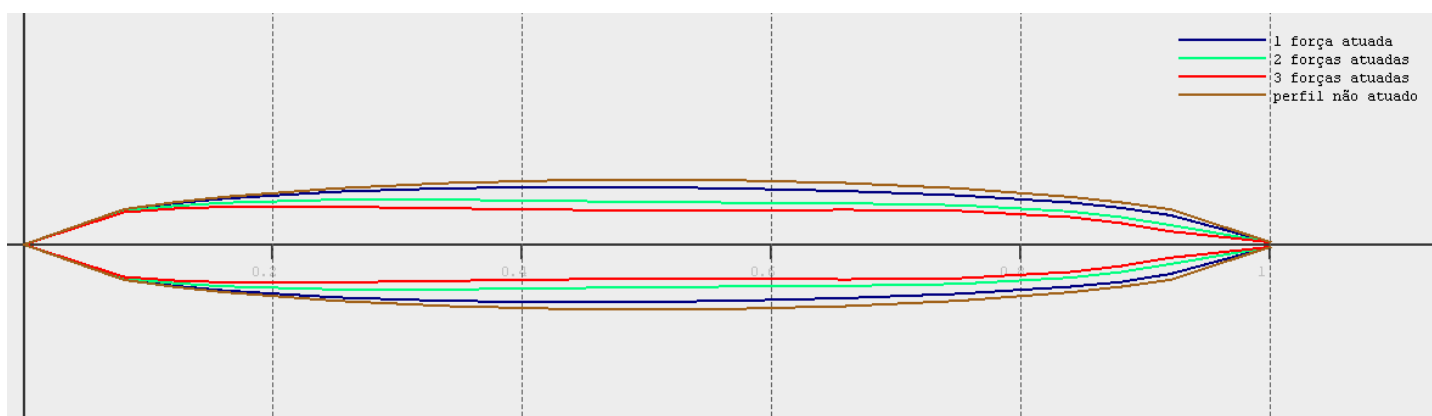


Figura 38- Modelos de perfis construído no pacote computacional XFLR5 (XFLR5, 2022)

Para criar esses perfis foi preciso determinar o valor de alguns pontos após a aplicação das forças nas 3 etapas. Assim, o modelo curvado desenvolvido foi dividido em seções, tendo sido escolhidas 13 seções, de modo a criar perfis geométricos próximos às configurações geométricas obtidas através do modelo de elementos finitos para o perfil com curvatura.

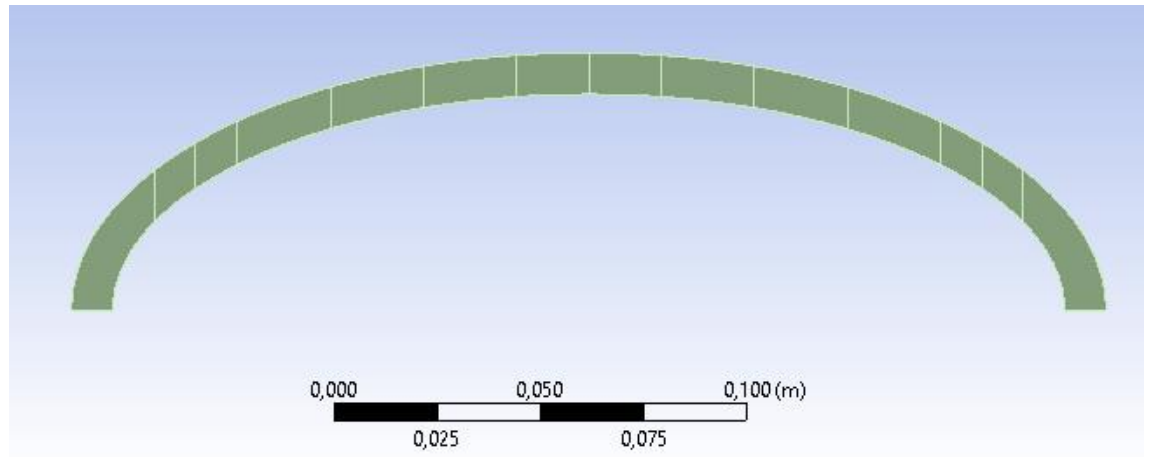


Figura 39- Modelo dividido em 13 pontos

Foram inseridos, além dos pontos onde atuam as forças, três pontos nos bordos de ataque e de fuga mais próximos pois são regiões de grande influência na resposta aerodinâmica. O restante dos pontos foi distribuído ao longo do perfil.

O pacote computacional permite prever, para diferentes valores de número de Reynolds, os valores dos parâmetros de sustentação, arrasto e eficiência. A Figura 38 ilustra o gráfico de um perfil atuado com uma força com diferentes valores de Reynolds de 30.000 até 3.000.000.

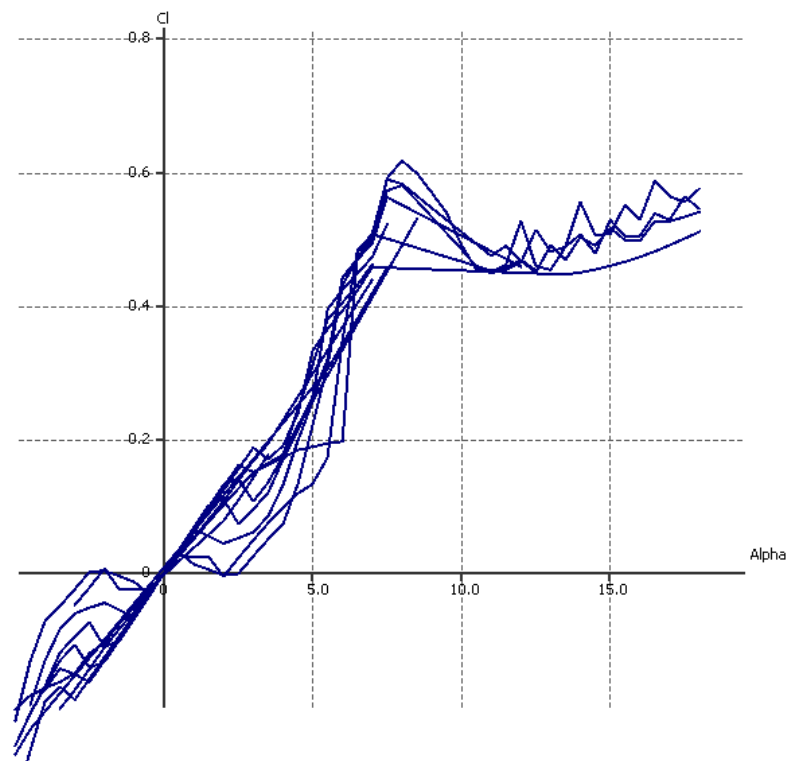


Figura 40- Cl x Alpha para a configuração com uma força atuada para diferentes números de Reynolds

Para uma análise comparativa entre os perfis atuados será escolhido um valor de Reynolds fixo. Uma vez que a aeronave estudada neste trabalho realiza voos de baixa velocidade e, portanto, com baixos valores de Reynolds associado, já que menores valores de Reynolds estão relacionados a baixos valores de velocidade. (Miranda, 2014). O valor do número de Reynolds escolhido para os resultados apresentados é de 200.000.

As curvas de eficiência ($Cl / Cd \times Alpha$) mostradas na Figura 39 para as 4 configurações geométricas do perfil indicam os valores de $Alpha$ que apresentam uma melhor relação entre sustentação (Cl) e arrasto (Cd). Dentro dessa faixa próxima ao valor de eficiência máxima serão observados os comportamentos de Cl e Cd .

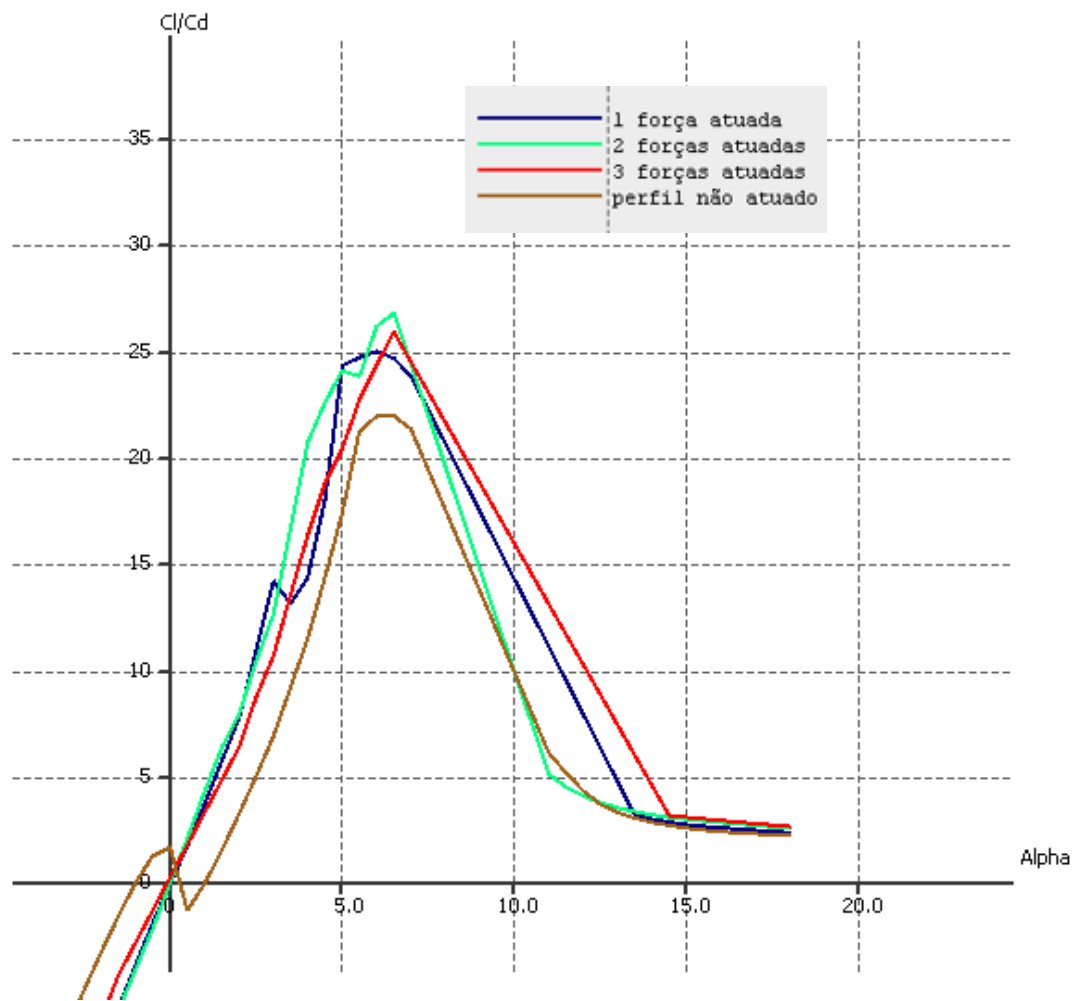


Figura 41- Curvas de eficiência para as 4 configurações geométricas do perfil.

É possível observar que a eficiência máxima para todas as 4 configurações ocorre na faixa de *Alpha* entre 5 e 7,5. A eficiência máxima para todos os perfis atuados é sempre superior ao não atuado, o qual apresenta um valor de 22,5 %. Para os perfis atuados, a eficiência máxima varia de 25 % a 27%.

O gráfico de sustentação ($C_l \times \text{Alpha}$) mostrado na Figura 40 indica a eficiência em gerar sustentação do perfil. Para todos os perfis atuados, é possível observar um aumento no coeficiente de sustentação em função em comparação com o perfil não atuado para grande parte dos valores de *Alpha*. Somente em uma pequena faixa em torno de $\text{Alpha} = 10$ a configuração não atuada supera a configuração com um fio atuado. A configuração do perfil com as 3 forças atuadas apresenta os maiores valores de C_l para todos os valores positivos de *Alpha*, inclusive na faixa de eficiência máxima.

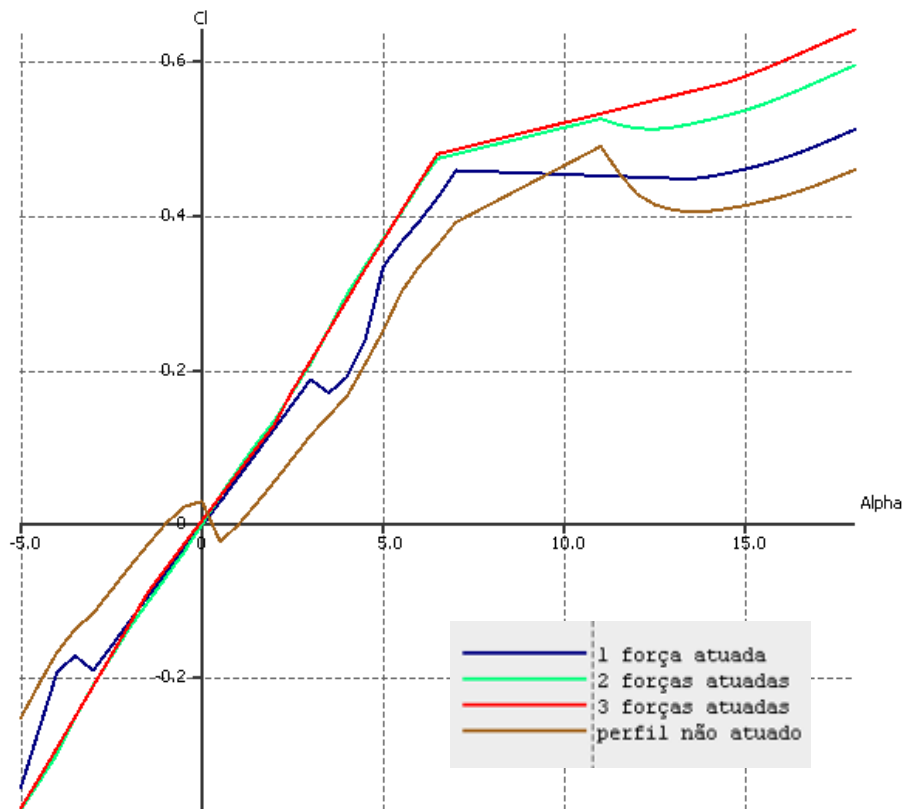


Figura 42-Curvas Cl x Alpha para as 4 configurações geométricas do perfil.

Observando a curva de arrasto (C_d x Alpha) mostrada na Figura 41 é possível observar que de fato o coeficiente de arrasto aumenta, mas de uma forma menos acentuada em relação ao coeficiente de sustentação. Apesar disso, dentro da faixa de eficiência máxima esse aumento em C_d vale a pena ressaltar que há um aumento de 38%, indo de 0.013 (sem atuação) para 0.018 (atuação de 3 fios).

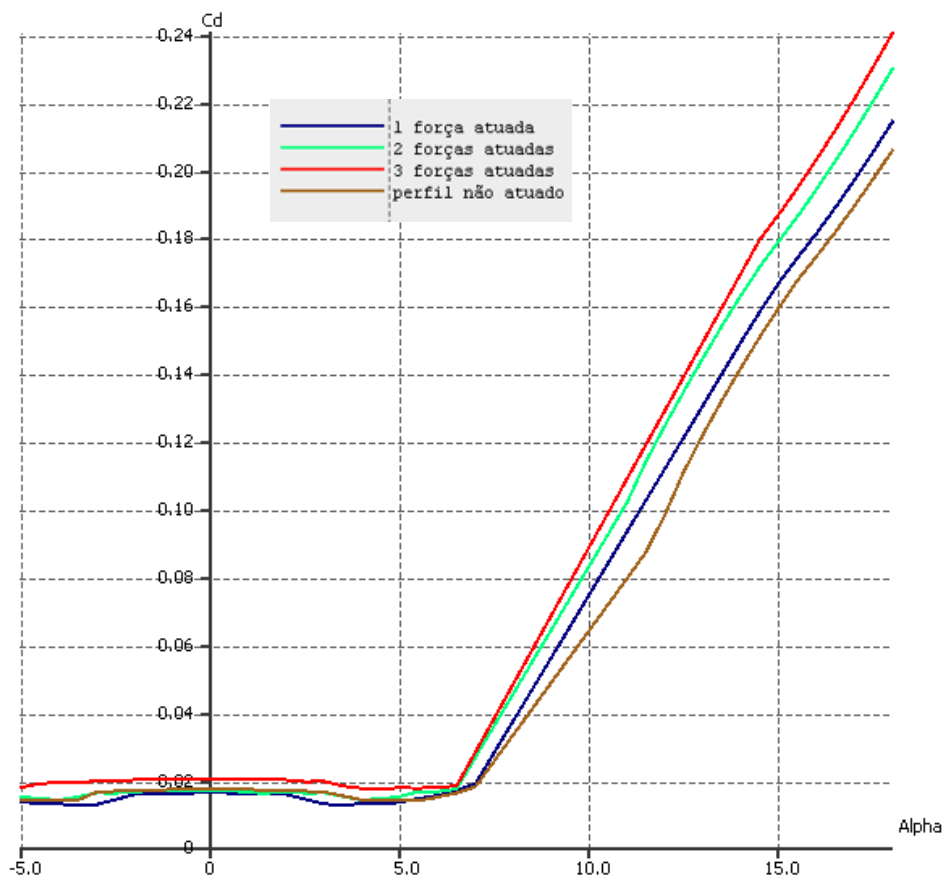


Figura 43-coeficiente de arrasto x alpha

8. CONCLUSÃO

Foram desenvolvidos 3 modelos simples para avaliar o desempenho do conceito de uma asa de perfil variável acionada através de fios de SMA. As etapas de instalação, acionamento e relaxamento dos fios foram consideradas nas análises. Os dois primeiros modelos simplificados consideram a geometria de uma viga reta e mostraram a viabilidade do uso de modelos analíticos baseados na linha elástica para avaliar as configurações deformadas do perfil. No entanto, em função das simplificações adotadas, como um comportamento linear-elástico para os fios de SMA, apresentaram valores muito elevados de tensão. A inclusão da parcela de deformação associada a transformação de fase possibilita a obtenção de resultados mais precisos. O modelo numérico baseado no método de elementos finitos para um perfil com curvatura, permitiu avaliar condições mais próximas da realidade.

A metodologia proposta possibilita futuros estudos com outras geometrias, inclusive a de perfis já existentes como os da classe NACA 00XX que apresentam simetria de eixo como a abordada no tema.

Um ponto de grande importância para a construção de aeronaves é o peso de sua estrutura e devido a uma consideração inicial de espessura da viga (modelo simplificado) que foi mantida ao longo do desenvolvimento do projeto resultou em um valor de massa/comprimento de 7,5 kg/m que pode ser reduzido ao se desenvolverem perfis de espessuras menores com reforços estruturais para que não crie um impacto tão elevado no peso total da estrutura.

É possível observar após a análise dos gráficos que a alteração gerada pela atuação dos fios com memória de forma cria melhorias na eficiência do perfil aerodinâmico de até 27% no caso estudado, onde se observou um ganho no coeficiente de sustentação enquanto o coeficiente de arrasto apresenta variação percentual, porém é superada pelo ganho em sustentação, aumentando assim a eficiência.

8.1. TRABALHOS FUTUROS

A seguir é apresentada uma lista de sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de um modelo de elementos finitos incluindo os fios de SMA, um modelo constitutivo de transformação de fase para representar o efeito de memória de forma dos fios de SMA;
- Aplicação de diferentes perfis (incluindo perfis já existentes como os da classe NACA e Eppler);
- Aplicação da metodologia a configurações com um número maior de fios atuados ao longo da seção, para permitir um melhor controle da geometria do perfil;
- Desenvolvimento de um protótipo e realização de ensaios experimentais para validação do conceito e dos modelos propostos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS, **Ansys Academic**. Disponível em: www.ansys.com/academic. Acesso em: 29/07/2022.

BEAUCHAMPS C.H., NADOLINK R.H., DICKINSON S.C., DEAN L.M. “**Proceedings I European Conference on Smart Structures And Materials**”. SPIE, v.1777 p. 189, 1992

CARDOSO, João Pedro Aguilera. **Desenvolvimento de um Dispositivo Inteligente Acionado por Memória de Forma em um Protótipo de Leme Para Embarcações**. Orientador: Prof. Sergio A. Oliveira Prof. Luciana Loureiro da S. Monteiro. 2017. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia mecânica, DEMEC, CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ, Cefet/RJ, 2017.

CINGOLANI E., VAN HUMBEECK J. and AHLERS, M. “**Stabilization and Two-Way Shape Memory Effect in Cu-Al-Ni Single Crystals**”. Metallurgical and Materials Transactions A, v. 30(3), pp. 493-499, 1999.

DONG Y., BOMING, Z. and JUN L. “**A changeable aerofoil actuated by shape memory alloy**”. Materials Science and Engineering A, v. 485, pp. 243–250, 2008.

EMBRAPA, AGX Vant arara. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br>

Hibbeler, R.C. **Structural Analysis**. 8 ed, Prentice Hall, 2012.

HOLMAN, J.P., **Transferência de Calor**. McGraw-Hill, 1983;

LA CAVA, C.A.P.L., PACHECO, MACHADO, L.G E SILVA, E.P.; “**Modelagem de Dispositivos Mecânicos Fabricados de Ligas com Memória de Forma**”, Projeto Final, Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET/RJ, 1999

LAGOUDAS, D.C. **Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications**. Nova Iorque: Springer Science, 2008.

LEITE, Camila Nunes de Lima; COSTA, Carolina Araujo de Queiroz; THEODORO, Marcella Penna Franca. **Desenvolvimento de um Dispositivo Origênico Atuado por Memória de Forma**. Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco. 2018. 96 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia mecânica, DEMEC, CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ, Cefet/RJ, 2018.

MAVROIDIS, C., “**Development of Advanced Actuator Using Shape Memory Alloys and Electroheological Fluids**”, Springer-Verlag, New York, NY, 2002

PAIVA, A.; **Modelagem do Comportamento de Ligas com Memória de Forma**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-RIO, 2004;

PAIVA, T. **Análise numérica de diferentes configurações de atuadores com memória de forma**, Dissertação de M.Sc., DIPPG CEFET-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017

PEREIRA, Juliana Hoyer Insaurreald. **Um estudo sobre atuadores lineares com molas helicoidais de ligas com memória de forma**. Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco. 2009. 125 f. TCC (Especialização) - Curso de Engenharia mecânica, DEMEC, CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ, Cefet/RJ, 2009.

RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda José. **Engenharia aeronáutica**. 1 ed. Rio de Janeiro: trilha, v. 1, 2014.

S BARBARINO *et al* 2014 **Smart Mater. Struct.** 23 063001

SOUZA, Leonardo Martins da Conceição de; RIGOTO FILHO, Marcos Alves; LEÃO NETO, Waldyr Cardoso de Castro. **Acionamento de Flaps de um Aeromodelo por meio de Molas com Comportamento de Memória de Forma**. Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco. 2015. 182 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia mecânica, DEMEC, CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ, Cefet/RJ, 2015.

SANTOS, Bruno Dias. **Modelagem de Estruturas Treliçadas com Elementos de Ligas com Memória de Forma utilizando o Método de Elementos Finitos**. Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco. 2017. 145 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia mecânica, DEMEC, CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ, Cefet/RJ, 2017.

WEI WANG *et al* 2014 **Bioinspir. Biomim.** 9 046006

XFLR5, **XFLR5**. Disponível em: www.xflr5.tech/xflr5.htm. Acesso em: 29/07/2022.

YOUNG, M.A.: **The Characteristics of Flaps**, Report and Memoranda N° 2622, 1947.