



**MODELAGEM E ANÁLISE DE UM DISPOSITIVO
MITIGADOR DE FLECHA PARA LINHAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BASEADO EM
LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA**

RÔMULO CASTRO NIEMEYER

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**MODELAGEM E ANÁLISE DE UM DISPOSITIVO
MITIGADOR DE FLECHA PARA LINHAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BASEADO EM
LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA**

RÔMULO CASTRO NIEMEYER

ORIENTADOR: Prof. Dr. EDSON PAULO DA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO:

BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO – 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**MODELAGEM E ANÁLISE DE UM DISPOSITIVO MITIGADOR DE
FLECHA PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA BASEADO EM LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA**

RÔMULO CASTRO NIEMEYER

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
SISTEMAS MECATRÔNICOS.**

APROVADA POR

Prof. Edson Paulo da Silva, PhD. (ENM-UnB)
(Orientador)

Prof. Jorge Ferreira de Almeida, Dr., (ENM - UnB)
(Examinador Externo)

Rudi Henri Van Els
(Examinador Interno)

BRASÍLIA/DF, 26 DE FEVEREIRO DE 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

NIEMEYER, RÔMULO CASTRO

Modelagem e Análise de um Dispositivo Mitigador de Flecha para Linhas de Transmissão de Energia Elétrica baseado em Ligas com Memória de Forma [Distrito Federal] 2016.

vii, 112p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2016).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Dispositivo Mitigação 2. Ligas SMA 3. Efeito de Memória de Forma 4. Atuadores de SMA 5. Transformação de Fases Martensita e Austenita

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NIEMEYER, R. C. (2016). Modelagem e Análise de um Dispositivo Mitigador de Flecha para Linhas de Transmissão de Energia Elétrica baseado em Ligas com Memória de Forma. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-94/2016, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, vii 112.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Rômulo Castro Niemeyer

TÍTULO: Modelagem e Análise de um Dispositivo Mitigador de Flecha para Linhas de Transmissão de Energia Elétrica baseado em Ligas com Memória de Forma.

GRAU: Mestre

ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Dissertação de Mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Rômulo Castro Niemeyer

SQN 314 Bloco E – Asa Norte

70.767-050 -- Brasília – DF – Brasil.

Dedicatória

Ao meu avô Aloysio Niemeyer,
pela ajuda de uma vida inteira.
À minha mãe, Maria Catarina
de Sena Castro, pelo amor
incondicional. E à minha esposa
amada, Fernanda Niemeyer, por
todo o amor e companheirismo.

Rômulo Castro Niemeyer

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por tornar possível minhas realizações.

À minha família, pelo apoio e incentivo.

Ao professor e orientador desse projeto, Edson Paulo da Silva, por todo ensinamento, colaboração, paciência e disponibilidade.

Aos amigos Luimar Filho e Otávio Luís, que caminharam comigo durante os momentos mais difíceis do curso, sempre demonstrando perseverança e coleguismo.

Aos meus chefes, Coronel Olmiro Fernandes Roppa e Major Adriano Inácio de Souza, pela confiança depositada em mim. Sem a ajuda desses militares não seria possível a realização desse trabalho.

Ao meu fiel escudeiro Luke, pelos 16 anos de amizade e companheirismo.

RESUMO

Os cabos de transmissão de energia elétrica, em determinadas condições operacionais, sofrem deformações associadas à dilatação térmica e fluência que podem levar a flechas excessivas que infringem as distâncias mínimas estabelecidas por normas de segurança. O objetivo do presente trabalho é explorar a capacidade termomecânica das Ligas com Memória de Forma (Shape Memory Alloys – SMA) para modelar e realizar a análise de um mitigador de flecha para linhas de transmissão de energia elétrica. A SMA se inserem na área de aplicação de materiais inteligentes e sua característica mais marcante é sua capacidade de recuperar uma forma previamente estabelecida quando aquecidos acima de uma determinada temperatura ou quando submetidos a determinados ciclos de carga. A partir de uma concepção já existente foi desenvolvido um modelo para análise e projeto de um dispositivo de mitigação de flecha. O modelo foi aplicado a um estudo de caso. Os resultados mostram que o dispositivo mitigador dimensionado a partir do modelo proposto mostra-se capaz de promover redução de flecha que mantém a distância de segurança prevista pela norma.

ABSTRACT

The electric power transmission cables, under certain operating conditions, suffer deformations associated with thermal expansion and creep that can lead to excessive sags that violate the criteria required by safety standards. The objective of this study is to explore the thermomechanical capacity of alloys with shape memory - SMA - to perform an model and analysis of a sag mitigator for power transmission lines. The SMAs fall into the area of application of smart materials and their most striking feature is its ability to recover a previously established form when heated above a certain temperature or when subjected to certain load cycles. From an existing design was developed a model for analysis and design of an sag mitigation device. This model was applied to a case study. The results show that the mitigating device dimensioned effected a sag reduction thereby maintaining the required safety distance.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
Símbolos Latinos	xiii
Símbolos Gregos	xiv
Subscritos	xiv
Siglas	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contexto e motivação	1
1.2 Objetivo.....	5
1.3 Metodologia	5
1.4 Estrutura do trabalho	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 Materiais inteligentes e Ligas com memória de forma.....	7
2.2 Transformação de fase Martensítica e Termoelasticidade	8
2.3 Comportamento Termomecânico nas SMA	10
2.3.1 Pseudoelasticidade.....	10
2.3.2 Quasiplasticidade.....	11
2.3.3 Efeito de Memória de Forma	12
2.3.4 Resposta das SMA Sob Carga Constante.....	13
2.4 Modelo de Brinson.....	14
2.5 Projetos de Linhas de Transmissão.....	17
2.5.1 Forças atuantes nos cabos condutores	17
2.5.2 Altura de Segurança	20
2.5.3 Cálculo de Flecha e do Comprimento do Cabo	21
2.5.4 Temperaturas e hipóteses de carga	22
2.6 O SLiM.....	26
2.7 Aquecimento de fios e o efeito Joule	28
3. MODELAGEM DE UM DISPOSITIVO DE MITIGAÇÃO	31
3.1 Determinação das dimensões do SLiM	33
3.2 Determinação das Flechas	34
3.2.1 Relação entre as flechas em temperaturas diferentes.....	34
3.2.2 Determinação do ΔL_{cabo}	35
3.2.3 Determinação do ΔL_{SMA}	36
3.2.4 Relação entre ΔL_{cabo} e ΔL_{SMA}	36
3.2.5 Relação de amplificação.....	38
3.3 Esforços estruturais nos componentes do SLiM.....	38
3.3.1 Equilíbrio de forças nas barras da alavanca	39
3.3.2 Esforços Cisalhantes nos pinos P_a , P_b e P_c	41
3.4 Relação entre a distância s e a força F_{sma}	42
3.5 Análise da Tensão de pré-esticamento após o retracionamento	44
4. ESTUDO DE CASO	46
4.1 Características dos componentes estruturais.....	46
4.2 Definições de Projeto.....	48
4.3 Cálculo da força no cabo condutor	48
4.4 Determinação das flechas e limites permitidos.....	49
4.5 Dimensionamento da variação de comprimento do SLiM.....	51
4.6 Dimensionamento da variação de comprimento do atuador.....	51
4.7 Dimensionamento da Alavanca	51
4.8 Dimensões do Dispositivo.....	52
4.9 Dimensionamento do feixe de fios de SMA	53
4.10 Análise de tensões e deformações.....	53
4.11 Carcaça	54
4.12 Alavanca.....	58
4.13 Placas de fixação.....	62
4.14 Desenhos Técnicos do Dispositivo Dimensionado	65
5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE DOS RESULTADOS	66

5.1	Dados de entrada	66
5.2	Análise do comportamento da SMA.....	68
5.3	Comportamento do dispositivo	73
5.4	Análise de resultados.....	80
6.	CONCLUSÕES	83
6.1	Sugestões de temas futuros	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	ANEXOS	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Fração Volumétrica de Martensita e as Temperaturas Características (Lagoudas, 2007 - Modificado).....	9
Figura 2-2 – Curva tensão-deformação pseudoelástica típica ($T > A_f$).	10
Figura 2-3 – Curva tensão-deformação quasiplástica típica ($T < M_f$).	11
Figura 2-4 – Efeito de Memória de Forma.	12
Figura 2-5 – Diagrama Tensão-Deformação-Temperatura (Delaey et al., 1975 - Modificado).	13
Figura 2-6 – Curva deformação x temperatura típica das SMA (DA SILVA, 2012).....	13
Figura 2-7 – Curva deformação x temperatura sob diferentes cargas constantes (LAGOUDAS, 2007 - Modificado).	14
Figura 2-8 – Diagrama de Forças sobre os suportes (Fuchs, 1982 - Modificado).	17
Figura 2-9 – Diagrama de Forças sobre os suportes.....	18
Figura 2-10 - Determinação da temperatura do cabo em função da corrente (Fuchs, 1982 - Modificado).	25
Figura 2-11 – Dispositivo SLIM (Shirmohamadi, 2006).	26
Figura 2-12 – Componentes do dispositivo SLiM (Shirmohamadi, 2006 - Modificado).	27
Figura 2-13 – Atuador SMA do SLiM (Shirmohamadi, 2006 - Modificado).....	27
Figura 2-14 – Mecanismo de retração do cabo pelo SLiM (Shirmohamadi, 2006 - Modificado).	28
Figura 3-1– Funcionamento do dispositivo e o ΔL_{cabo}	31
Figura 3-2 – Recuperação da deformação quasiplástica do atuador SMA.....	32
Figura 3-3 – Representação esquemática do SLiM.....	32
Figura 3-4 – Modelo do SLiM (PONTES, 2013 – modificado).....	33
Figura 3-5 – Modelo do SLiM.....	33
Figura 3-6 - Modelo do SLiM - fechado.	34
Figura 3-7 - Amplificação da recuperação de forma da liga de SMA por alavanca (Shirmohamadi, 2006 - Modificado).	37
Figura 3-8 – Arcos formados pela ação do atuador de SMA (PONTES, 2013 -modificado)..	37
Figura 3-9 – Representação do braço de alavanca.	39
Figura 3-10 – Diagrama de corpo livre do braço de alavanca.....	40
Figura 3-11 – Forças de reação na carcaça.....	42
Figura 3-12 – Esforços internos na carcaça.....	42
Figura 4-1 – Cabo IBIS 397,5 MCM.....	46
Figura 4-2 - Dimensões do modelo da carcaça.....	54
Figura 4-3 - Malha modelo carcaça.....	55
Figura 4-4 - Aplicação da carga na carcaça.....	56
Figura 4-5 - Campo de tensões na carcaça.	57
Figura 4-6 - Campo de deslocamentos da carcaça.	57
Figura 4-7 - Dimensões do modelo da alavanca.....	58
Figura 4-8 - Malha modelo alavanca.....	59
Figura 4-9 - Aplicação da carga na alavanca.....	60
Figura 4-10 - Campo de tensões na alavanca.	61
Figura 4-11 - Campo de deslocamentos para alavanca.	61
Figura 4-12 - Dimensões do modelo das placas de fixação.	62
Figura 4-13 - Malha modelo placa de fixação.....	62
Figura 4-14 - Aplicação da carga nas placas de fixação.....	63
Figura 4-15 - Campo de tensões nas placas de fixação.	64
Figura 4-16 - Campo de deslocamentos para as placas de fixação.	64
Figura 5-1 - Curva ε_{sma} x T - liga 1A.....	68

Figura 5-2 - Curva ϵ_{sma} x T - liga 1B.....	69
Figura 5-3 - Curva ϵ_{sma} x T - liga 1C.....	69
Figura 5-4 - Curvas ϵ_{sma} x T - ligas 1A, 1B e 1C.	70
Figura 5-5 - Curva ϵ_{sma} x T - liga 2A.....	70
Figura 5-6 - Curva ϵ_{sma} x T - liga 2B.....	71
Figura 5-7 - Curva ϵ_{sma} x T - liga 2C.....	71
Figura 5-8 - Curvas ϵ_{sma} x T - ligas 2A, 2B e 2C.	72
Figura 5-9 - Representação esquemática do SLIM em seu estado frio ($T < M_f$).....	72
Figura 5-10 - Representação esquemática do SLIM em seu estado frio ($T > A_f$).....	73
Figura 5-11 - Comportamento da flecha - liga 1A.	74
Figura 5-12 - Comportamento da flecha - liga 1B.	74
Figura 5-13 - Comportamento da flecha - liga 1C.	75
Figura 5-14 - Comportamento da flecha - liga 2A.	75
Figura 5-15 - Comportamento da flecha - liga 2B.	76
Figura 5-16 - Comportamento da flecha - liga 2C.	76
Figura 5-17- Curva EDS x T - liga 1A.	77
Figura 5-18 - Curva EDS x T - liga 1B.	78
Figura 5-19 - Curva EDS x T - liga 1C.	78
Figura 5-20 - Curva EDS x T - liga 2A.	79
Figura 5-21 - Curva EDS x T - liga 2B.	79
Figura 5-22 - Curva EDS x T - liga 2C.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – EDS (T_0) recomendado para cabos condutores (NBR 5422/1985).....	20
Tabela 2-2 - Distância básica de segurança (NBR 5422, 1985).....	20
Tabela 3-1 – Relação entre R , s , c , ΔL_{SMA} , L_F e A_{sma}	43
Tabela 4-1 – Características dimensionais do cabo IBIS 397,5 (Fadel, 2010).....	47
Tabela 4-2 – Propriedades mecânicas do cabo condutor utilizado (Fadel, 2010).....	47
Tabela 4-3 - Propriedades Mecânicas da SMA de NiTi (MTM DEPARTEMENT)	47
Tabela 4-4 - Dados de entrada para dimensionamento do dispositivo.....	48
Tabela 4-5 - Dimensões e características do modelo da carcaça.....	54
Tabela 4-6 - Informações da malha modelo carcaça.	55
Tabela 4-7 - Propriedades do material da carcaça.....	55
Tabela 4-8 - Dimensões e características do modelo da alavanca.....	58
Tabela 4-9 - Informações da malha modelo alavanca.....	59
Tabela 4-10 - Propriedades do material da alavanca.....	60
Tabela 4-11 - Dimensões e características do modelo das placas de fixação.....	62
Tabela 4-12 - Informações da malha modelo placas de fixação.....	63
Tabela 4-13 - Propriedades do material das placas de fixação.....	63
Tabela 5-1 – Constantes de transformação.....	66
Tabela 5-2 - Parâmetros geométricos e temperaturas do dispositivo.....	66
Tabela 5-3 - Ligas SMA utilizadas.....	67
Tabela 5-4 - Valores das flechas e EDS para as ligas.....	81

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

M_S	<i>Martensite start</i> – Temperatura inicial de formação da martensita	[°C]
M_f	<i>Martensite finish</i> – Temperatura final de formação da martensita	[°C]
A_s	<i>Austenit start</i> – Temperatura inicial de formação da austenita	[°C]
A_f	<i>Austenit finish</i> – Temperatura final de formação da austenita	[°C]
E	Módulo de elasticidade	[MPa]
E_A	Módulo de elasticidade da austenita	[MPa]
E_M	Módulo de elasticidade da martensita	[MPa]
L_F	Comprimento do fio de SMA no estado frio (abaixo de M_f)	[m]
L_Q	Comprimento do fio de SMA no estado quente (acima de A_f)	[m]
U	Tensão máxima de operação da linha	[kV]
D_U	Valor em metros, numericamente igual à tensão máxima de operação	[m]
A_b	Distância básica, listada na norma NBR 5422	
n	Coefficiente de segurança	-
k	Fator de forma	-
a	Vão entre torres	[m]
f	Flecha	[m]
H_s	Altura de segurança	[m]
H	Altura da torre	[m]
y	Posição vertical	[m]
x	Posição horizontal	[m]
C	Parâmetro de catenária	-
r	Comprimento da carcaça do dispositivo de mitigação	[m]
d	Comprimento característico do dispositivo de mitigação	[m]
F	Força axial no cabo condutor	[N]
F_{max}	Força axial máxima no cabo condutor	[N]
F_x	Força de reação no suporte do cabo condutor	[N]
T_0	Componente horizontal da força axial no cabo	[N]
F_y	Componente vertical da força axial no cabo	[N]
p	Peso unitário do cabo	[N/m]
p_s	Componente vertical do peso do cabo	[N/m]
\bar{T}	Temperatura	[°C]
\bar{T}_2	Temperatura final absoluta	[K]
\bar{T}_1	Temperatura ambiente absoluta	[K]
\bar{t}_0	Temperatura ambiente	[°C]
\bar{t}_1	Temperatura máxima admitida para flecha segura	[°C]
\bar{t}_2	Temperatura máxima de operação	[°C]
t	Tempo	[s]
F_{smax}	Componente da força SMA no eixo x	[N]
F_{smax}	Componente da força SMA no eixo y	[N]
F_{sma}	Força exercida pela SMA	[N]
M	Distância média entre os suportes A e B	[m]
M_o	Momento total no ponto o	[N.m]
c	Distância relativa ao braço da alavanca do dispositivo	[m]
s	Distância relativa ao braço da alavanca do dispositivo	[m]
V_{pino}	Componente da força cisalhante no pino	[N]
A_{pino}	Área total do pino	[mm ²]

F_{ra}	Força de reação na alavanca	[N]
F_{rc}	Força de reação no cabo condutor	[N]
n_{fios}	Número de fios de SMA	-
A_{sma}	Área total de SMA	[mm ²]
A_{fio}	Área do fio de SMA	[mm ²]
R	Relação de amplificação entre o atuador SMA e o SLiM	-
I	Corrente elétrica	[A]
q_t	Calor total	[J/s]
q_s	Calor radiação solar	[J/s]
q_j	Calor efeito Joule	[J/s]
q_{irrad}	Calor irradiação	[J/s]
q_{convec}	Calor convecção	[J/s]
q_{cond}	Calor condução	[J/s]
v_v	Velocidade do vento	[m/s]
e	Emissividade	[J/m ²]
C_{esp}	Calor Específico	-
V	Volume	
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção	
Nu	Número de Nussel	
Pr	Número de Prandtl	-
Gr	Número de Grashof	-

Símbolos Gregos

α	Angulo da força axial no cabo	[°]
α_t	Coefficiente de dilatação térmica	[1/°C]
ζ	Fração volumétrica de martensita	[%]
ρ	Resistência elétrica	[Ω]
λ	Condutividade térmica	[1/Ω.m]
\emptyset	Diâmetro	[m]
ζ_T	Fração volumétrica de martensita induzida termicamente	[%]
ζ_S	Fração volumétrica de martensita induzida mecanicamente	[%]
τ	Coefficiente de expansão térmica	-
θ	Inclinação do braço de alavanca	[°]
ε_{sma}	Deformação do fio de SMA	[%]
ε	Deformação	[%]
ε_0	Deformação recuperável	[%]
ε_L	Deformação recuperável máxima	[%]
τ_{adm}	Tensão de cisalhamento admissível no pino	[N/m ²]
σ	Tensão	[N/m ²]
ΔL_{cabo}	Varição no comprimento do cabo	[m]
ΔL_{sma}	Varição no comprimento do atuador de SMA	[m]

Subscritos

$crit$	Crítica/crítico
s	Inicial

<i>f</i>	Final
<i>esc</i>	Escoamento
<i>adm</i>	Admissível
<i>aus</i>	Austenita
<i>mar</i>	Martensita
<i>max</i>	Máximo (a)
<i>cabo</i>	Referente ao cabo condutor
<i>sma</i>	Referente à SMA
<i>pino</i>	Referente ao Pino
<i>M→A</i>	Transformação da Martensita para Austenita
<i>A→M</i>	Transformação da Austenita para Martensita
<i>x</i>	Referente ao eixo x
<i>y</i>	Referente ao eixo y
<i>rup</i>	Ruptura

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DAMiF	Dispositivo Adaptativo Mitigador de Flecha
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
LT	Linha de Transmissão
EDS	<i>Every Day Stress</i>
SMA	<i>Shape Memory Alloys</i>
SLiM	<i>Sagging Line Mitigator</i>
CA	Cabo de Alumínio
CAA	Cabo de Alumínio com Alma de Aço
CAL	Cabo de Liga de Alumínio
CALA	Cabo de Alumínio reforçado com Liga de Alumínio

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e motivação

As linhas de transmissão de energia elétrica (LTs) são projetadas para operarem de acordo com as solicitações da região específica em que serão instaladas (Fuchs, 1982). Dentre os fatores considerados para viabilizar a construção e operação de uma LT, a flecha formada pelo cabo condutor entre torres é um parâmetro limitante a ser observado, pois altera a distância de segurança entre o condutor e o solo, que é estabelecida por norma (NBR 5422, 1985).

O valor da flecha depende do comprimento do cabo quando suspenso, que está sujeito a variações em função de sua temperatura e também devido ao alongamento permanente (fluência) que irá sofrer no decorrer de seu tempo de uso (Fuchs, 1982). Durante o regime de operação ao longo da vida útil das LTs, alguns fatores externos como o aumento da temperatura ambiente na região em que é instalada a LT, a diminuição do fluxo de vento sobre ela, a necessidade de aumento de energia transportada e o fenômeno da fluência que ocorre no cabo condutor podem ocasionar uma flecha excessiva, que aumenta o risco de incêndios e outros problemas de segurança, pois representa risco de choque elétrico em pessoas e veículos, queimadas destrutivas e interrupção do fornecimento de energia (Fuchs, 1982). Um aumento da temperatura na LT, por quaisquer que sejam os fatores envolvidos no processo, causa uma dilatação linear no cabo condutor, que aumenta o seu comprimento e, conseqüentemente, sua flecha.

Mensah-Bonsu et. al. (2002) desenvolveram um método de monitoramento de flecha baseado em dados adquiridos através de GPS (Global Positioning System). O método é baseado em sinais de rádio que são pulsados na ordem de nanosegundos através de satélites, que fornecem valores muito precisos para os dados adquiridos de posicionamento do cabo. Os sinais provenientes de quatro ou mais satélites são recebidos por um receptor GPS, e através desses dados são aplicadas equações de cálculo da flecha, que dependem do tempo e da velocidade do sinal, e corrigidas por dados obtidos por outro GPS denominado DGPS (GPS diferencial). Após essas correções, é aplicado um filtro para rejeitar dados maus recebidos e finalmente obtido o valor para a flecha. A alimentação elétrica do sistema descrito é realizada

de maneira convencional, ou seja, por uma fonte de energia externa. O método de monitoramento por GPS se mostra satisfatório, com precisão na faixa de 19,6 centímetros em 70% do tempo e utiliza dois receptores de GPS, um deve estar localizado em uma estação de base e outro na LT. Isso implica, ainda, na construção de toda uma infraestrutura para a o tratamento dos dados.

Através de sensores de tensão elétrica separados, Poorani (2006) propôs um modelo para monitoramento de flecha em LTs considerando a potência total instalada na mesma. O modelo proposto é baseado na leitura da tensão elétrica e numa metodologia de cálculo indireta da temperatura do condutor para a obtenção do valor da flecha. O cálculo da flecha é realizado através de um programa de computador baseado em um algoritmo que estima o estado térmico do condutor. O procedimento é rápido, eficiente e barato. A direta dependência das medições dos valores de tensão e o modelo parabólico de geometria do condutor utilizado para o cálculo das flechas podem ajudar na confiabilidade e segurança de operação das LTs, obtendo de maneira indireta (através de cálculos computacionais) o comportamento do condutor.

Cloet et al. (2011) desenvolveram um método de monitoramento chamado de Sistema Ampacimon. Ele utiliza um módulo de monitoramento em tempo real que estima o valor da flecha através de uma análise de vibração, não sendo necessária nenhuma informação sobre a linha de transmissão ou o ambiente a que está submetida. Instalando o dispositivo chamado de Ampacimon diretamente na LT, o mesmo analisa a vibração no condutor e detecta a frequência fundamental no espaço compreendido entre dois suportes. Dessa frequência fundamental calcula-se a flecha nesse espaço analisado. Quanto menor a frequência natural, maior a flecha associada, e vice-versa. Parâmetros externos como carga elétrica, clima, fluência, topologia, presença de gelo, etc, afetam a flecha e, conseqüentemente, as frequências do cabo. O dispositivo Ampacimon é um avaliador direto da flecha, que faz suas leituras através de um acelerômetro com altíssima sensibilidade (tipicamente utilizados em aeronaves e veículos industriais). Os dados são processados, inicialmente, por um processador de sinal de dados (DSP), antes de ser enviado via GSM / GPRS para um servidor remoto, em que são recolhidos e analisados para se obter as leituras adequadas. O dispositivo pode ser instalado em qualquer posição no espaço compreendido entre duas torres, sua fonte de alimentação é o próprio campo magnético local e não precisa ser calibrado, pois utiliza os dados de frequência

fundamentais e não de uma amplitude de sinais. O Sistema Ampacimom apresentou resultados de monitoramento do tamanho da flecha com erros de $\pm 2\%$, Cloet et al. (2011).

Xiao et al. (2012) propuseram um sistema de monitoramento de flechas em LTs baseado na medição do ângulo entre o cabo condutor e o plano horizontal entre torres. Ao contrário do modelo parabólico utilizado por Poorani (2006), nesse modelo a inclinação do ângulo foi estabelecido por um modelo matemático da catenária do cabo condutor para a obtenção do valor da flecha. Ao medir o ângulo entre o cabo condutor e a horizontal, assim como ângulo de giro, através de um sensor de inclinação de eixo duplo, a flecha pode ser calculada com precisão no intervalo entre duas torres. O sistema é formado basicamente por duas unidades: a unidade de campo, que é instalada diretamente no cabo condutor, e a central de monitoramento. Combinando os parâmetros de construção do cabo condutor, a central de monitoramento é capaz de obter o valor da flecha no ponto mais baixo e o valor máximo para a flecha através da leitura dos dois ângulos fornecidos pela unidade de campo. A unidade de campo possui uma faixa de medição de $\pm 60^\circ$ e seus dados são transmitidos à central de monitoramento através de um circuito de processamento de sinal sem fio. Quando esses dados chegam à central, são organizados, analisados e armazenados. Caso haja dados de flechas anormais, automaticamente o sistema mandará um comando para a unidade de campo para coleta intensiva de mais dados, juntamente com um alarme de não conformidade.

Cada modelo para a determinação e monitoramento de flechas possui a suas vantagens e desvantagens. O método mais simples, o da observação direta, é um método menos complexo, porém, existe a necessidade de pessoal de operação constantemente no local. Apesar de amplamente utilizado, não é um método de monitoramento em tempo real. O método de monitoramento por GPS possui altíssima confiabilidade e precisão, porém, possui complexa implementação e utiliza algoritmos complexos para determinação da flecha, que o torna um método caro. O método de monitoramento através de obtenção da temperatura do condutor (Poorani, 2006) é relativamente barato, mas possui muitos parâmetros de medição e um algoritmo complexo, que causa um erro relativamente grande em relação aos outros métodos. Já o método que utiliza a aquisição de dados de inclinação do cabo condutor é relativamente simples, barato, e seu algoritmo é menos complexo, e mais preciso.

Os estudos relacionados ao monitoramento da flecha nas linhas de transmissão são utilizados para controle da quantidade de energia que passa pela LT, eles não são utilizados

para mitigar a flecha. Nesse sentido, idealiza-se uma forma de controlar automaticamente a distância condutor/solo de maneira que a LT continue a operar, dentro do estabelecido pela norma, em temperaturas superiores à que foi considerada no projeto, seja por motivos ambientais ou por aumento da ampacidade.

No que diz respeito à mitigação de flecha, as alternativas possíveis são: diminuir os espaços entre as torres; substituir o material do condutor por outro que possua um coeficiente de dilatação menor; aumentar a altura das torres de transmissão; construir linhas de transmissão paralelas; dentre outros (Shirmohamadi, 2002).

Assim, identifica-se no setor elétrico uma oportunidade de utilização de dispositivos capazes de compensar automaticamente variações nos comprimentos de condutores nas LTs, quando submetidos a variações de temperatura, com o intuito de reduzir a flecha. Nesse sentido, foi desenvolvido pelas empresas americanas *Material Integrity Solution Inc.* e *Power Transmission Solutions Inc.* um dispositivo de mitigação de flecha denominado *Sagging Line Mitigator – SLiM* – baseado no comportamento termomecânico das Ligas com Memória de Forma (Shirmohamadi, 2002). As Ligas com Memória de Forma (*Shape Memory Alloys – SMA*) enquadram-se na classe de materiais inteligentes, os quais desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de estruturas inteligentes (Janocha, 1999). As SMA têm a capacidade de recuperar uma deformação quando sujeitos a um ciclo térmico ou mecânico apropriado (Shirmohamadi, 2002).

O SLiM é montado em série com o cabo condutor e é deformado por ação do peso do cabo. Esse dispositivo retraciona o cabo quando, em função da temperatura, a flecha atinge determinado valor pré-estabelecido, garantindo com isso que a distância de segurança seja respeitada (Shirmohamadi, 2002). Assim, o SLiM explora a capacidade das SMA de recuperar deformação quando submetidas a determinadas variações de temperatura para retracionar o cabo, formando um sistema capaz de reagir de forma autônoma à variação de temperatura dos cabos condutores contraindo-os e, conseqüentemente, reduzindo a flecha (Shirmohamadi, 2002).

Ensaio com protótipos do SLiM foram realizados tanto em laboratório como em linhas vivas com resultados altamente promissores (Shirmohamadi 2002). Utilizando no ensaio um vão livre de 400m, em uma LT sem o SLiM, foi verificado que um aumento de temperatura de 50°C para 70°C gera um aumento da flecha de 12,70m para 13,50m, causando

com isso uma violação de 0,84 m, de acordo com as normas reguladoras. Com o SLiM atuando nessa mesma LT, e sob as mesmas condições, obteve-se uma flecha de 12,4 m quando atingidos os 70°C, levando a uma redução total de 1,153 m da flecha, tornando a linha operacional segundo as normas. Após realizada uma análise de fadiga, foi possível demonstrar ainda que esse dispositivo teria uma vida útil de aproximadamente 30 anos (Shirmohamadi 2002).

Da Silva (2012) desenvolveu um modelo matemático para representar o comportamento do SLiM. Sua análise consistiu no cálculo do comprimento de um cabo a 50°C e a 70°C com e sem a ação do SLiM. Para isso, foi utilizado o modelo de Brinson (1993) para prever a deformação que o elemento de SMA sofre sob a ação do peso do cabo e a variação de temperatura entre 50°C e 70°C. Em sua análise, foi verificado que, sem a ação do dispositivo, a variação da temperatura de 50°C para 70°C gera um aumento da flecha em 0,85m (6,7 %). Sob a ação do dispositivo, para a mesma variação de temperatura, a flecha é reduzida em 1,15m (8,5%) (Da Silva, 2012).

Considerando uma situação típica de operação de linhas de transmissão, Pontes (2013) determinou a geometria de um dispositivo de mitigação inspirado no SLiM, em função dos esforços aplicados sobre ele. Em seu trabalho, foram desenvolvidas importantes análises para o desenvolvimento do projeto de um dispositivo mitigador, como por exemplo, o levantamento de tensões e deformações que ocorrem nas peças do dispositivo, através de uma análise por elementos finitos. Pontes (2013) certificou que seu dispositivo suportou adequadamente as forças a que foi submetido.

1.2 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é propor um modelo de um dispositivo de mitigação de flecha baseado no comportamento termomecânico das SMA, assim como realizar sua análise aplicada a um estudo de caso.

1.3 Metodologia

A partir de uma proposta de mitigador de flecha baseado no comportamento das SMA, propõe-se no presente trabalho um modelo matemático para descrever o comportamento desse

dispositivo. Utilizando-se do estudo das equações de dimensionamento das LTs é realizada uma análise funcional do dispositivo proposto.

Para realização do estudo do comportamento mecânico do dispositivo, utiliza-se uma análise estrutural através de elementos finitos (tensões e deformações).

Através de uma simulação numérica do comportamento das SMA utilizando-se o Modelo de Brinson é realizada uma análise do comportamento do atuador SMA durante o processo de variação de temperatura.

1.4 Estrutura do trabalho

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o comportamento termomecânico das ligas com memória de forma, aspectos de projeto de linhas de transmissão de energia elétrica e uma descrição do dispositivo de mitigação proposto por Shirmohamadi (2002). No capítulo 3, é apresentada a concepção e o modelo construtivo do dispositivo de mitigação, que apresentam as diretrizes gerais para o seu dimensionamento, conforme as solicitações impostas pela Linha de Transmissão em que será utilizado. No capítulo 4 é apresentado um estudo de caso do modelo proposto, para poder prever e analisar o comportamento do dispositivo proposto. No capítulo 5 é apresentada uma simulação numérica do comportamento de diferentes SMA utilizadas e com isso, uma previsão do comportamento do dispositivo. Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais inteligentes e Ligas com memória de forma

Materiais inteligentes são aqueles que exibem acoplamento entre múltiplos domínios físicos, sendo capazes de converter energia entre esses domínios (Leo, 2007). Um domínio é qualquer quantidade física que pode ser descrita por um conjunto de duas variáveis de estado. Exemplos de tais materiais incluem aqueles que pode converter sinais elétricos em deformação mecânica ou podem converter deformação mecânica em uma saída elétrica. Outros exemplos são aqueles que convertem energia térmica em tensão mecânica, e aqueles que acoplam o movimento de espécies químicas no interior do material para uma saída mecânica ou saída de sinais elétricos (Leo, 2007). Nos últimos 20 anos, uma série de materiais têm sido classificados como inteligentes. Alguns destes materiais exibem uma variação de volume quando sujeito a um estímulo externo, tal como um potencial elétrico; outros encolhem, ampliam ou se movem quando aquecidos ou resfriados. Há ainda outros tipos de materiais inteligentes que produzem sinais elétricos quando dobrados ou esticados (Leo, 2007).

Os sensores são dispositivos que respondem a um estímulo físico, como mudança de temperatura, pressão, iluminação, etc e transmitem como resultado um sinal para monitoramento ou controle (Lane e Craig, 2012). Já os atuadores são dispositivos que respondem a estímulos na forma de uma mudança nas suas propriedades mecânicas, como por exemplo uma mudança dimensional ou uma mudança na viscosidade (Lane e Craig, 2012). Por séculos materiais vem sendo utilizados para reagir ao meio ambiente produzindo algum tipo de resposta. Em 1824, o cristal de sal de Rochelle foi descoberto, observou-se que o mesmo se tornava eletricamente polarizado com a aplicação de força. Desde essa época, outros numerosos materiais vêm sendo descobertos, tendo a inerente capacidade de converter uma forma de energia em outra (Lane e Craig, 2012).

Dentre os vários materiais inteligentes existentes, as ligas com memória de forma (Shape Memory Alloys – SMA) são caracterizados pela capacidade de recuperar sua forma quando a temperatura é aumentada. O que torna esse fenômeno possível é a transformação martensítica cristalograficamente reversível ou termoelástica (Lagoudas, 2007).

A transformação martensítica, como foi observado no sistema Fe - C, foi estabelecida como um processo irreversível. O conceito de transformação martensítica termoelástica, que explicou a transformação reversível da martensita, foi introduzido por Kurdjumov e Khandros (1949) baseado em observações experimentais da estrutura martensítica termicamente reversível em ligas CuZn e CuAl (Lagoudas, 2007).

O avanço para aplicações na engenharia ocorreu com a descoberta de Ni-Ti por Buehler e colaboradores ao investigarem materiais úteis para blindagem de calor (Buehler et al., 1963). Notou-se que, além das suas propriedades mecânicas, comparáveis a alguns metais de engenharia comuns, o material também possuía uma capacidade de recuperação de forma. Após esta observação, o termo "nitinol" foi criado em referência ao Laboratório Naval Ordnance (NOL) NiTi. O termo Efeito Memória Forma foi dado ao comportamento de recuperação de forma com a variação da temperatura (Lagoudas, 2007).

As SMA possuem duas fases distintas, cada uma com estrutura cristalina diferente e, portanto, com propriedades diferentes. Uma delas é a fase de alta temperatura chamada de Austenita (*A*) e a outra é a fase de baixa temperatura chamada Martensita (*M*). Para a liga NiTi, a fase Austenita é geralmente cúbica e tem uma estrutura cristalina diferente da Martensita, que é tetragonal de corpo centrado, menos rígida, mais flexível e facilmente deformável (Novák et al., 2008).

2.2 Transformação de fase Martensítica e Termoelasticidade

A transformação martensítica é uma transformação de fase não difusiva (não há movimentos atômicos em distâncias interatômicas consideráveis, de forma que não há variação de composição química por difusão). Os átomos se movem cooperativamente através de um mecanismo de deformação cisalhante (Otsuka e Wayman, 1998). Cada cristal martensítico formado pode ter uma direção de orientação diferente, chamada variante. O conjunto de variantes martensíticas podem existir em duas formas: a martensita maclada (*twinned*), a qual é formada por uma combinação de variantes "auto-acomodadas" e a forma martensítica demaclada (*detwinned*) ou martensita reorientada, em que uma variante específica é dominante (Delaey et al 1974; Krishnan et al., 1974). A transformação reversível de Austenita para Martensita e vice-versa, é a base para o comportamento das SMA. A transformação de Austenita para Martensita é chamada de direta e a transformação contrária é chamada reversa.

A Figura 2.1 representa o comportamento da fração volumétrica de Martensita em função das temperaturas associadas com as transformações de fase. Durante a transformação direta, M_s (*Martensite start*) é a temperatura inicial de formação de Martensita maclada e a M_f (*Martensite Finish*) é a temperatura final de formação da Martensita. Analogamente, durante o aquecimento, a transformação reversa inicia-se na temperatura A_s (*Austenitic Start*) e termina na temperatura A_f (*Austenitic finish*). Estas temperaturas são características de cada liga e variam em função, basicamente, da composição química e de processamento da liga (Delaey et al 1974; Krishnan et al., 1974). Após resfriamento (transformação direta), livre de carga, a estrutura cristalina muda de Austenita para Martensita, resultando na formação de várias variantes martensíticas, voltando para a forma de martensita maclada (Lagoudas, 2007).

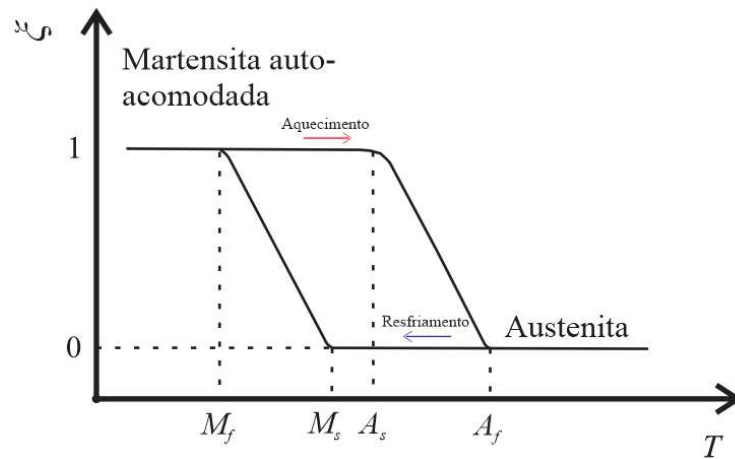


Figura 2-1 - Fração Volumétrica de Martensita e as Temperaturas Características (Lagoudas, 2007 - Modificado).

Quando solicitadas mecanicamente, e em função da temperatura, as SMA apresentam basicamente três fenômenos: abaixo de M_f a quasilasticidade, acima de A_f a pseudoelasticidade e na transição de uma temperatura inferior à M_s para uma temperatura superior à A_s , após ser deformada abaixo de M_s , o efeito memória de forma (Delaey et al., 1975, Krishnan et al., 1975, Warlimont, et al., 1974, Otsuka e Wayman, 1998, Funakubo, 1987).

2.3 Comportamento Termomecânico nas SMA

2.3.1 Pseudoelasticidade

Considera-se um corpo de prova de SMA a uma temperatura superior a A_f e livre de carga. Nesta condição, a fase austenítica é estável. De acordo com a Figura 2-2, que apresenta uma curva tensão-deformação típica para uma temperatura constante $T > A_f$, com a aplicação de um carregamento o material se comporta elasticamente até que uma tensão crítica seja alcançada (ponto A), quando dá-se início à transformação martensítica induzida por tensão (trecho AB). O material passa por uma transformação de fase martensítica induzida mecanicamente, devido à tensão aplicada, induzindo a formação de uma variante de martensita, que se conclui no ponto B . Ao descarregar a amostra antes do limite de escoamento, o material experimenta uma transformação inversa (trecho CD), já que para $T > A_f$ a martensita é uma fase instável na ausência de tensões (Delaey et al., 1975). Esse comportamento é chamado de pseudoelasticidade. Vale ressaltar que existe um limite à recuperação dessas deformações representado pelo limite elástico da fase produto obtida após a transformação, a partir de onde o material passa a se comportar plasticamente e a deformação não mais pode ser recuperada.

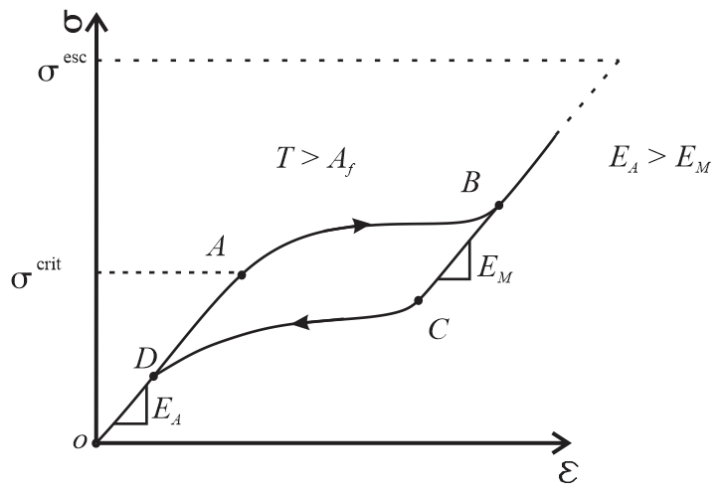


Figura 2-2 – Curva tensão-deformação pseudoelástica típica ($T > A_f$).

A transformação direta que ocorre no trecho AB não segue o mesmo caminho de volta na transformação reversa, no trecho CD . Essa histerese é caracterizada pela região compreendida entre os pontos A , B , C e D .

2.3.2 Quasiplasticidade

Considera-se agora a SMA em uma temperatura constante e inferior a M_f . Nesta temperatura e livre de tensões a liga existe na fase martensítica maclada (Delaey et al., 1975). Conforme ilustra a Figura 2-3, se a Martensita maclada for suficientemente carregada mecanicamente, observa-se, inicialmente, um comportamento elástico até uma tensão crítica σ_{crit} (ponto A), a partir da qual observa-se uma deformação a uma tensão praticamente constante (trecho AB). Essa deformação está associada a um processo da reorientação da Martensita maclada (Lagoudas, 2007). No ponto B é finalizado esse processo de reorientação, e caso o carregamento seja mantido o material volta a se comportar elasticamente.

O processo de reorientação da martensita maclada não envolve deformação plástica. Após uma deformação relativamente grande, que em algumas ligas pode chegar a 10% (Delaey et al., 1975), o material volta a apresentar um comportamento elástico. Ao descarregar o corpo de prova, o mesmo manterá a sua deformação, representada por ε_0 , como uma deformação quasiplástica. Este comportamento é denominado quasiplasticidade.

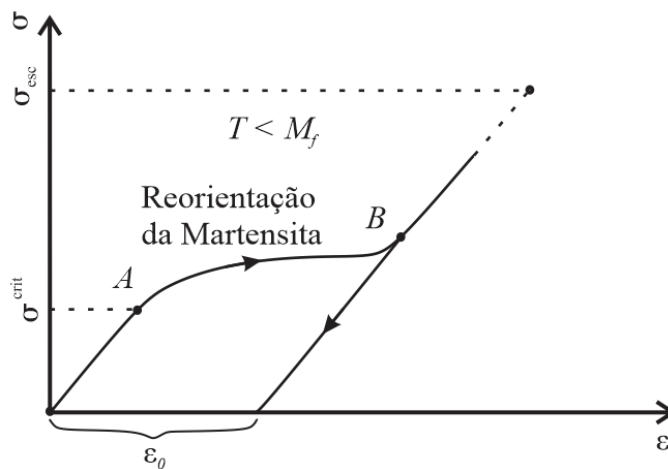


Figura 2-3 – Curva tensão-deformação quasiplástica típica ($T < M_f$).

A pseudoelasticidade e quasiplasticidade são observados à temperatura constante. No caso da pseudoelasticidade, trata-se de uma transformação martensítica induzida por tensão a uma temperatura acima de A_f . Na quasiplasticidade, trata-se de uma reorientação da martensita maclada abaixo de M_f e não envolve deformação plástica.

2.3.3 Efeito de Memória de Forma

Se o material deformado quasiplasticamente for aquecido acima de A_f , observar-se-á um “desaparecimento” da deformação quasiplástica. Esse fenômeno é denominado efeito de memória de forma. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 2-4, que mostra o caminho termomecânico percorrido durante as transformações em um diagrama tensão-deformação-temperatura.

Após aquecimento na ausência de tensão, a transformação inversa de Martensita Demaçada para Austenita se inicia na temperatura A_s (ponto E) e se completa na temperatura A_f (ponto F). Se não ocorrer nenhuma deformação plástica permanente durante o processo de obtenção da martensita demaçada (trecho BC), a forma original da SMA será completamente recuperada no ponto A .

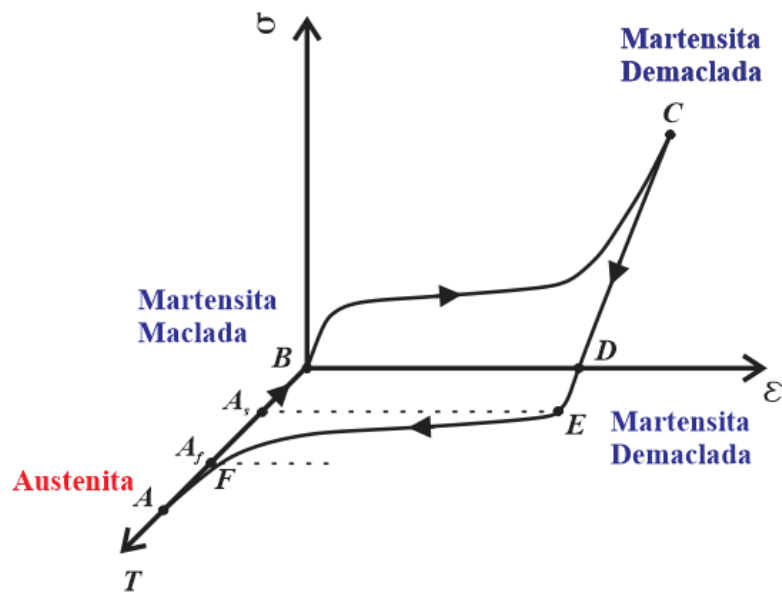


Figura 2-4 – Efeito de Memória de Forma.

O subsequente resfriamento de A para B resultará novamente na formação de martensita maclada. A recuperação de forma com o aquecimento se explica pelo fato de que acima de A_f a única fase termodinamicamente estável é a austenita, e essa fase desconhece a deformação quasiplástica. A martensita pode existir acima de A_f apenas sob carga (Delaey et al., 1975, Krishnan et al., 1975, Warlimont, et al., 1974, Otsuka e Wayman, 1998, Funakubo, 1987).

A Figura 2-5 ilustra os três fenômenos analisados em um diagrama tensão-deformação-temperatura.

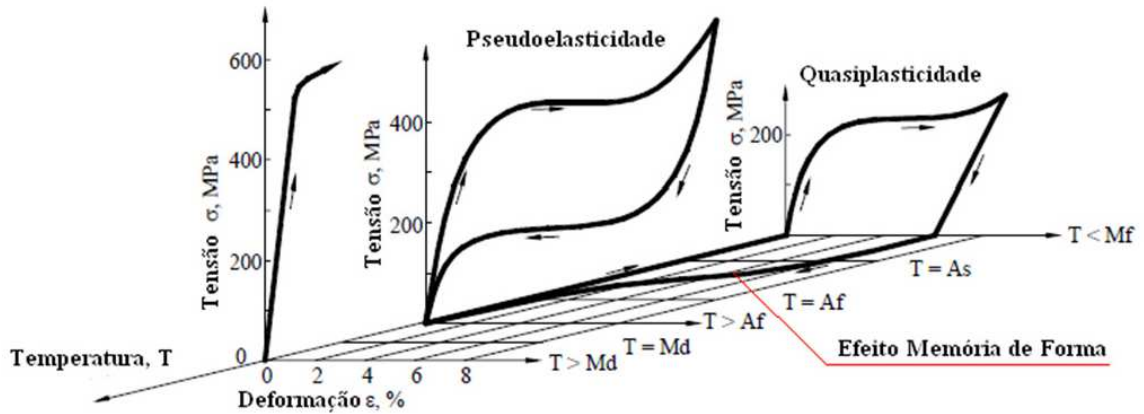


Figura 2-5 – Diagrama Tensão-Deformação-Temperatura (Delaey et al., 1975 - Modificado).

2.3.4 Resposta das SMA Sob Carga Constante

Aplicando-se uma carga suficientemente alta a uma temperatura abaixo de M_f o material sofrerá uma deformação quasiplástica ϵ_0 . Mantendo-se a carga e aquecendo e resfriando o material através das temperaturas de transformação de fase observa-se a curva representada na Figura 2.6.

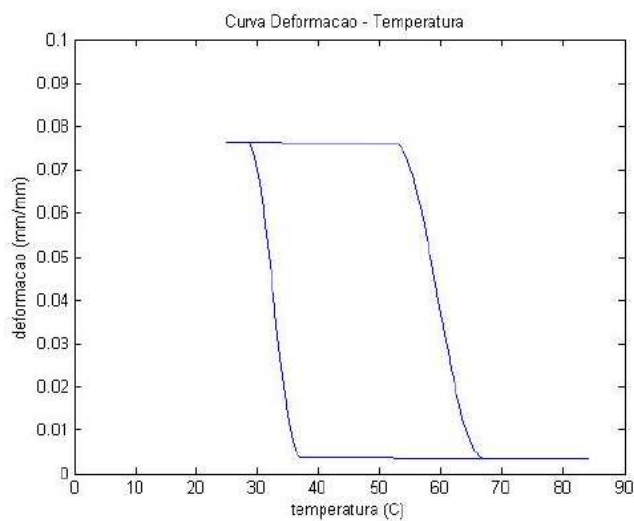


Figura 2-6 – Curva deformação x temperatura típica das SMA (DA SILVA, 2012).

Conforme ocorre o aumento da temperatura, nota-se a diminuição da deformação quasiplástica. E no resfriamento ocorre um aumento da deformação, até que o comprimento inicial é atingido. O princípio de funcionamento do dispositivo mitigador neste trabalho explora esse comportamento.

Uma propriedade importante para caracterização das SMA é sua deformação recuperável. Isso representa a quantidade de deformação quasiplástica que pode ser gerada pela mudança de fase (Delaey et al., 1975). A Figura 2-7 mostra o comportamento experimental de uma liga SMA de NiTi submetida às tensões constantes de 120 MPa, 200 MPa e 300 MPa, durante as transformações.

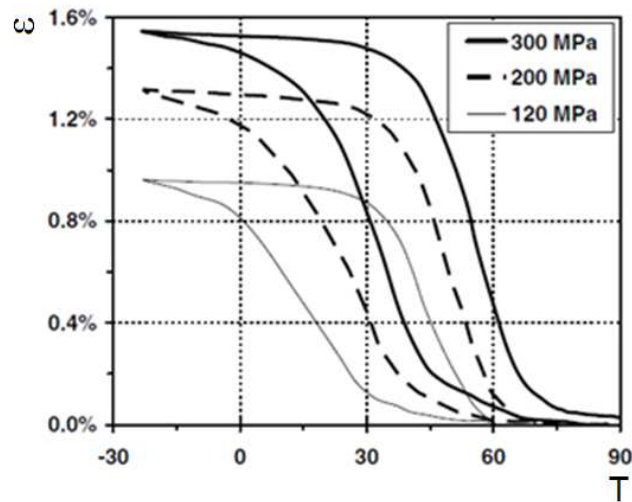


Figura 2-7 – Curva deformação x temperatura sob diferentes cargas constantes (LAGOUDAS, 2007 - Modificado).

2.4 Modelo de Brinson

Nos últimos anos, vários modelos para representar o comportamento termomecânico das ligas com memória de forma têm sido propostos. Dentre eles, o modelo proposto por Brinson (1993) é um dos mais simples e mais utilizados (DA SILVA, 2012).

O modelo de Brinson (1993) é uma evolução do modelo proposto por Tanaka (1985), cujas equações constitutivas e cinéticas são dadas respectivamente por:

$$\dot{\sigma} = E\dot{\epsilon} - \tau\dot{T} - \Omega\dot{\xi} . \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} \xi = 1 - \exp[b_M c_M (M_S - T) - b_M \cdot \sigma] & , \text{para } (A \rightarrow M) \\ \xi = \exp[b_A c_A (A_S - T) - b_A \cdot \sigma] & , \text{para } (M \rightarrow A) \end{cases} \quad (2.2)$$

onde E é o módulo de elasticidade, ξ é a fração volumétrica de martensita, Ω é o coeficiente de transformação de fase, τ é o coeficiente de expansão térmica e c_A , c_M , b_A , b_M são constantes materiais que relacionam temperatura e tensões críticas de transformação de fase. Esse modelo é baseado em teorias nas quais cada ponto do material é representado por uma mistura de fases cujas características microestruturais são descritas por uma ou mais variáveis descritivas. A característica chave desse modelo é o uso de uma ou mais variáveis internas para descrever a estrutura interna do material.

Na forma diferencial a equação constitutiva do modelo de Tanaka (1985), é dada por:

$$d\sigma = E(\varepsilon, \xi, \bar{T})d\varepsilon + \Omega(\varepsilon, \xi, \bar{T})d\xi - \tau(\varepsilon, \xi, \bar{T})d\bar{T}. \quad (2.3)$$

Assumindo que as funções materiais E , Ω e τ sejam constantes para um dado material, o modelo de Tanaka pode ser representado na forma integral como:

$$\sigma - \sigma_0 = E(\varepsilon - \varepsilon_0) + \Omega(\xi - \xi_0) - \tau(\bar{T} - \bar{T}_0) \quad (2.4)$$

onde σ_0 , ε_0 , ξ_0 e \bar{T}_0 representam o estado inicial do material.

Brinson (1993) redefine o módulo de elasticidade E em função de \bar{T} e de ξ , e decompõe ξ em duas partes: ξ_T que representa a fração volumétrica de martensita termicamente induzida e ξ_S que representa a fração volumétrica de martensita mecanicamente induzida:

$$\xi = \xi_S + \xi_T; \quad (2.5)$$

$$E(\xi) = E_A + \xi(E_M - E_A). \quad (2.6)$$

Assim, a equação constitutiva do modelo de Brinson na forma integral é dada por:

$$\sigma - \sigma_0 = E(\xi)\varepsilon - E(\xi_0)\varepsilon_0 + \Omega(\xi)\xi_S - \Omega(\xi_0)\xi_{S0} + \tau(\bar{T} - \bar{T}_0), \quad (2.7)$$

A cinética de transformação direta (Austenita \rightarrow Martensita) para $\bar{T} > M_S$ e

$\sigma_S^{crit} + C_M(\bar{T} - M_S) < \sigma < \sigma_f^{crit} + C_M(\bar{T} - M_S)$ é expressa por:

$$\xi_S = \frac{1-\xi_{S0}}{2} \cos \left\{ \frac{\pi}{\sigma_S^{crit} - \sigma_f^{crit}} [\sigma - \sigma_f^{crit} - C_M(\bar{T} - M_S)] \right\} + \frac{1+\xi_{S0}}{2}, \text{ e} \quad (2.8)$$

$$\xi_T = \xi_{S0} - \frac{\xi_{T0}}{1-\xi_{S0}} (\xi_S - \xi_{S0}). \quad (2.9)$$

onde as novas constantes materiais são c_A , c_M e a_M .

Enquanto na reorientação da martensita (Martensita Maclada \rightarrow Martensita Reorientada) para $\bar{T} < M_S$ e $\sigma_S^{crit} < \sigma < \sigma_f^{crit}$ as equações cinemáticas são:

$$\xi_S = \frac{1-\xi_{S0}}{2} \cos \left[\frac{\pi}{\sigma_S^{crit} - \sigma_f^{crit}} (\sigma - \sigma_f^{crit}) \right] + \frac{1+\xi_{S0}}{2}, \text{ e} \quad (2.10)$$

$$\xi_T = \xi_{S0} - \frac{\xi_{T0}}{1-\xi_{S0}} (\xi_S - \xi_{S0}) + \Delta_{T\xi}. \quad (2.11)$$

Se $M_f < \bar{T} < M_S$ e $\bar{T} < \bar{T}_0$, tem-se:

$$\Delta_{T\xi} = \frac{1-\xi_{T0}}{2} \{ \cos[a_M(\bar{T} - M_f)] + 1 \}, \quad (2.12)$$

Senão;

$$\Delta_{T\xi} = 0. \quad (2.13)$$

Por fim, na transformação reversa (Martensita \rightarrow Austenita), tem-se para $\bar{T} > A_S$ e $C_A(\bar{T} - A_f) < \sigma < C_A(\bar{T} - A_S)$ as equações cinemáticas:

$$\xi_S = \xi_{S0} - \frac{\xi_{S0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi), \quad (2.14)$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi). \quad (2.15)$$

No presente trabalho, será utilizada a equação constitutiva do modelo de Brinson considerando-se a tensão constante, resultando na equação 2.16:

$$\varepsilon = \frac{-E(\xi_0)\varepsilon_0 + \Omega(\xi)\xi_S - \Omega(\xi_0)\xi_{S0} + \tau(\bar{T} - \bar{T}_0)}{E(\xi)}. \quad (2.16)$$

2.5 Projetos de Linhas de Transmissão

Serão analisados nesta seção alguns conceitos de modelos utilizados em projetos de linhas de transmissão de energia elétrica.

2.5.1 Forças atuantes nos cabos condutores

Os condutores de LTs, para se manterem suspensos acima do solo, são submetidos a forças axiais que variam com as mudanças das condições ambientais a que são expostos. A diminuição de temperatura provoca aumento nas trações dos cabos e o vento atmosférico provoca uma pressão que se traduz também em aumento na tração axial. Quando a tração resultante atinge valores maiores que a resistência à ruptura dos condutores, poderão ocorrer deformações permanentes no cabo ou até mesmo a ruptura dos mesmos (Fuchs, 1982).

A Figura 2-8 mostra o diagrama de forças que envolvem as estruturas de suporte e um cabo condutor em uma linha de transmissão suspenso entre os pontos A e B , formando um vão a . Considerando-se os dois suportes na mesma altura H , a curva descrita pelo condutor será simétrica, e seu ponto mais baixo O encontrar-se-á sobre um eixo que passa a meia-distância entre A e B .

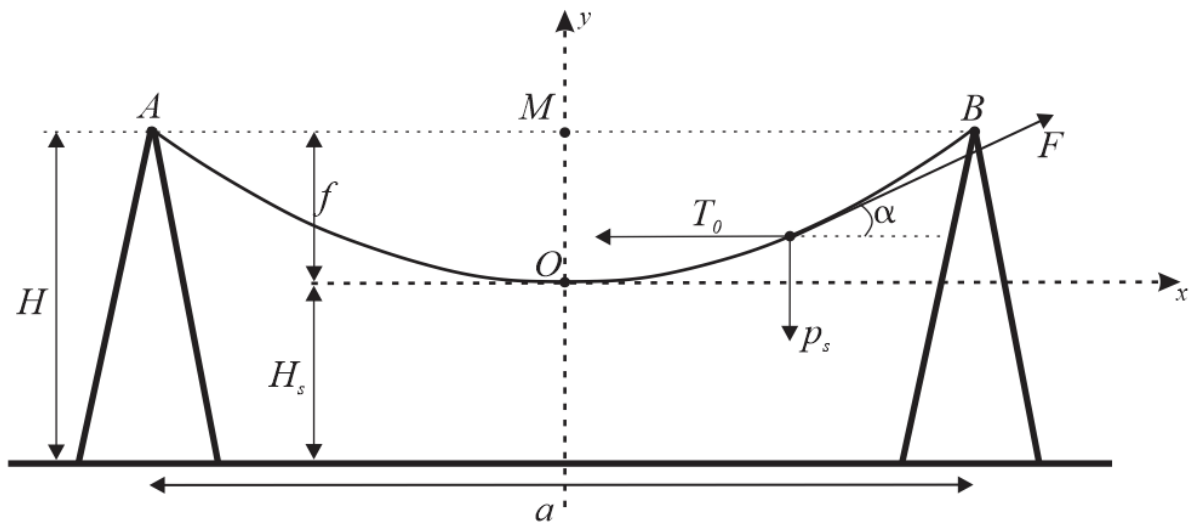


Figura 2-8 – Diagrama de Forças sobre os suportes (Fuchs, 1982 - Modificado).

Realizando uma análise de forças em equilíbrio atuantes no condutor em um ponto s qualquer entre os pontos O e B do cabo condutor, observa-se que a força axial F que atua no

cabo será tangente ao condutor nesse ponto, e terá uma componente horizontal T_0 que é absorvida pelo suporte do cabo condutor e uma componente vertical p_s representada pelo peso do condutor. Nessas condições, obtêm-se o seguinte equilíbrio de forças:

$$F \cdot \text{sen } \alpha = p_s , \quad (2.17)$$

$$F \cdot \text{cos } \alpha = T_0 , \quad (2.18)$$

onde α é o ângulo formado entre a força axial no ponto s e a reta horizontal nesse ponto.

Fazendo agora uma análise no ponto B da Figura 2-8, a força F tangente ao cabo poderá ser representada pela reação do suporte T_0 e p_s , uma vez que essa força tangente equilibra as demais conforme Figura 2-9.

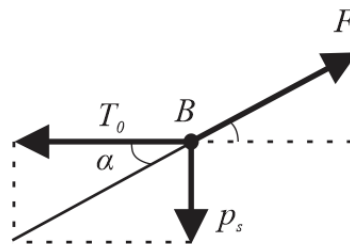


Figura 2-9 – Diagrama de Forças sobre os suportes.

Como a distância OB é $a/2$, a equação 2.16 pode ser reescrita na seguinte forma:

$$F \cdot \text{sen } \alpha = \frac{p \cdot a}{2}, \quad (2.19)$$

onde p é o peso unitário do condutor.

Assim, as forças atuantes no ponto B resumem-se à uma força horizontal e constante $T_0 = F \cdot \text{cos } \alpha$, que depende unicamente da Força de tensionamento do condutor, e uma força vertical $F_y = F \cdot \text{sen } \alpha = \frac{p \cdot a}{2}$, portanto igual ao peso do condutor no semivão $OB = a/2$, referente ao seu comprimento real.

Dividindo a equação 2.16 pela equação 2.17, obtêm-se a seguinte expressão:

$$\tan \alpha = \frac{ps}{T_0}$$

$$\text{ou ainda } \alpha = \tan^{-1} \frac{ps}{T_0}. \quad (2.20)$$

Analisando o equilíbrio de forças da Figura 2.9, nota-se que T_0 é constante para todo o comprimento do cabo condutor. Porém, o mesmo não acontece com F , que varia ao longo da curva em função da distância s . A força tangente F será mínima para $\alpha=0$ (no ponto O , logo $F = T_0$) e será máxima em A ou B quando:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{p.a}{2T_0}. \quad (2.21)$$

Um cálculo aproximado utilizado por Fuchs (1982), em que o cabo condutor segue o modelo de uma parábola ao invés da equação da catenária, utiliza o valor do ângulo quatro vezes menor que o mostrado na Equação 2.21, conforme a Equação 2.22:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{p.a}{8T_0}. \quad (2.22)$$

Sendo F a força axial de tração no cabo, que varia ao longo do mesmo, pode-se inferir que seu mínimo é junto ao vértice O da curva e seu máximo ocorre junto aos pontos de suspensão.

A componente horizontal da força F , representada por T_0 , é a força realizada pelos grampos que prendem o cabo condutor ao seu suporte e é chamada de tensão de pré-esticamento ou *EDS* (*Every Day Stress*). Por questões de segurança, a norma brasileira NBR5422/85 estabelece limitação quanto ao máximo esforço de tração admissível para essa força. De acordo com a referida norma, essa limitação é dada em função da carga de ruptura do cabo, F_{rup} :

$$T_0 = k \cdot F_{rup}, \quad (2.23)$$

onde k é um coeficiente de redução que varia de acordo com as condições de funcionamento (Fuchs, 1982). A Tabela 2.1 apresenta as cargas máximas recomendadas pela norma NBR5422 para diferentes tipos de condutores.

O parâmetro Hs é constante e representa a menor distância admissível entre o condutor e o solo e é chamada altura de segurança. A norma NBR 5422 (1985) fixa as condições básicas de segurança para o projeto de linhas de transmissão de energia elétrica, garantindo

afastamentos mínimos do condutor e seus acessórios energizados do terreno, de árvores, rodovias, estruturas, entre outros.

Tabela 2-1 – EDS (T_0) recomendado para cabos condutores (NBR 5422/1985).

Tipo de Cabo	(% de carga de ruptura)
Aço AR	16
Aço EAR	14
Aço-cobre	14
Aço Alumínio	14
CA	21
CAA	20
CAL	18
CALA	16
CAA-EF	16

2.5.2 Altura de Segurança

A altura de segurança H_s pode ser obtida através da equação 2.24 ou da equação 2.25, de acordo com o nível de tensão da LT.

Tabela 2-2 - Distância básica de segurança (NBR 5422, 1985).

Natureza da região ou obstáculos atravessados pela linha ou que dela se aproxime	Distância básica A_b (m)
Locais acessíveis apenas a pedestres	6,00
Locais onde circulam máquinas agrícolas	6,50
Rodovias, ruas e avenidas	8,00
Ferrovias não eletrificadas	9,00
Ferrovias eletrificadas ou com previsão de eletrificação	12,00
Suporte de linha pertencente à ferrovia	4,00
Águas navegáveis	$H+2,00$
Águas não navegáveis	6,00
Linhas de energia elétrica	1,20
Linhas de telecomunicações	1,80

Telhados e terraços	4,00
Paredes	3,00
Veículos rodoviários e ferroviários	3,00

$$Hs = A_b + 0,01 \left[\left(\frac{Du}{\sqrt[3]{3}} - 50 \right) \right], \text{ se } U > 87 \text{ kV}, \quad (2.24)$$

$$Hs = A_b, \text{ se } U \leq 87 \text{ kV}. \quad (2.25)$$

onde U é a tensão máxima de operação da linha em kV, Du é a distância numérica igual à tensão U em metros, Hs é a altura de segurança em metros e A_b é a distância básica em metros, obtida na referida norma (Tabela 2.2).

2.5.3 Cálculo de Flecha e do Comprimento do Cabo

Considerando, novamente, o sistema da Figura 2-8, a distância OM recebe o nome de flecha e é representada por f . Nas linhas de transmissão, as alturas de suspensão H estão diretamente relacionadas com o valor das flechas e com a distância entre o vértice das curvas e o solo Hs . A flecha f depende do vão, da temperatura e do valor da tração aplicada ao cabo quando de sua fixação nos suportes (EDS).

A flecha a ser utilizada em um projeto de linhas de transmissão deverá ser definida de acordo com a altura das torres, da topografia do terreno, das alturas de segurança exigidas e da forma da curva que os cabos terão quando estiverem com sua flecha máxima. A flecha utilizada na definição dessa curva deverá ser a maior flecha que poderá ocorrer durante a vida útil da LT (Fuchs, 1982).

A flecha pode ser calculada admitindo uma parábola como a função que define o eixo do cabo ou tomando-se a forma de uma catenária, que seria a melhor aproximação. Na prática, a utilização da parábola ao invés da catenária conduz a pequenos erros quando o vão também é pequeno, menor que 450 metros (Pereira Junior, 2002). Assim, empregando-se a equação da parábola obtêm-se:

$$f = \frac{p \cdot a^2}{8T_0}, \quad (2.26)$$

onde T_0 é a EDS, p o peso unitário do cabo e a o vão entre os suportes A e B .

Para obtenção da expressão que representa a flecha, admitindo-se que a representação matemática do cabo é uma catenária, retoma-se o sistema de coordenadas mostrado na Figura 2-8, e essa função é dada por:

$$y = \frac{T_0}{p} \left[\cosh \left(\frac{x}{\frac{T_0}{p}} - 1 \right) \right], \quad (2.27)$$

onde T_0 é a EDS (N) e p o peso unitário do cabo (N/m).

Assim, adotando a expressão da catenária, a flecha tem a seguinte expressão:

$$f = C \left[\cosh \left(\frac{a}{2c} - 1 \right) \right], \quad (2.28)$$

onde C é o parâmetro de catenária dado por:

$$C = \frac{T_0}{p}. \quad (2.29)$$

O comprimento desenvolvido por uma curva pode ser obtido a partir da fórmula da geometria analítica:

$$L = \int_{x_1}^{x_2} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{1/2} dx. \quad (2.30)$$

Integrando a Equação 2.30 ao longo do vão a , encontra-se o comprimento entre o vértice e o ponto de apoio do cabo condutor. Essa integração resulta em uma série rapidamente convergente, em que por aproximação pode-se aproveitar apenas os dois primeiros termos dessa série, obtendo assim a expressão:

$$L = a + \frac{8 \cdot f^2}{3a}. \quad (2.31)$$

2.5.4 Temperaturas e hipóteses de carga

Os cabos condutores estão sujeitos a variações de temperaturas bastante acentuadas (Fuchs, 1982). Sua temperatura depende, a cada instante, do equilíbrio entre o calor ganho e o calor cedido ao meio ambiente. O ganho de calor se deve, principalmente, ao efeito Joule e ao aquecimento pelo calor solar (Shirmohamadi, 2002). A determinação da temperatura é trabalhosa e, a rigor, só pode ser feita em termos estatísticos, com base em modelos meteorológicos, nas cargas elétricas e na probabilidade de ocorrências simultâneas (Fuchs, 1982). Os dados a serem utilizados no projeto devem ser coletados em postos de observação meteorológicos na própria região em que a LT será instalada, ou em regiões próximas e semelhantes, pois os fenômenos meteorológicos têm natureza aleatória, devendo ser analisados e quantificados por processos estatísticos e probabilísticos. Isso demanda uma grande quantidade de registros ao longo de muitos anos (Fuchs, 1982).

O valor da temperatura máxima dos cabos para condição de flecha máxima depende da temperatura média do ar, do efeito da corrente máxima coincidente com a temperatura máxima do ar e do efeito da radiação solar por ocasião da temperatura máxima do ar. Sob o ponto de vista técnico, deve-se considerar o efeito da temperatura elevada no comportamento mecânico dos condutores. Para cada tipo de cabo existe um valor limite de temperatura de operação em regime permanente sem que haja degradação de sua resistência mecânica e aumentos nas taxas de alongamentos permanentes. Por outro lado, temperaturas elevadas podem ser toleradas por curtos intervalos de tempo em condições de emergência (Fuchs, 1982). Para cabos dos tipos CA, CAA e CAL, que são os mais comumente utilizados, as máximas temperaturas de operação em regime permanente são fixadas entre 70°C e 85°C (Fuchs, 1982).

Um cabo atinge a temperatura de regime permanente quando houver equilíbrio entre o calor ganho e o calor perdido pelo cabo. Um cabo ganha calor, principalmente, pelo efeito Joule e pela radiação solar q_s [W/m], e perde calor por irradiação q_{irrad} [W/m] e convecção q_{conv} [W/m]. Estabelecendo o equilíbrio, tem-se a seguinte equação:

$$q_j = I^2 \cdot \rho_{cabo} \text{ [W/km]} \quad (2.32a)$$

$$q_j + q_s = q_{irrad} + q_{conv} , \quad (2.32b)$$

Da equação 2.32b obtêm-se:

$$I = \sqrt{\frac{(q_{irrad} + q_{conv} - q_s) \cdot 10^3}{\rho_{cabo}}} \quad (2.33)$$

Segundo Fuchs (1982), o equacionamento da transferência de calor para cabos condutores pode ser dado por:

$$q_{irrad} = 179,2 \cdot 10^3 \cdot e_c \cdot \phi_{cabo} \left[\left(\frac{\bar{T}_2}{1000} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_1}{1000} \right)^4 \right]; \quad (2.34)$$

$$q_{conv} = 945,6 \cdot (\bar{t}_2 - \bar{t}_1) \cdot 10^{-4} \cdot [0,32 + 0,43 \cdot (45946,8 \cdot v_v)^{0,52}]; \quad (2.35)$$

$$q_s = 204 \cdot \phi_{cabo} \quad (\text{Valor médio indicativo em climas temperados}) \quad (2.36)$$

onde ρ_{cabo} é a resistência do condutor à temperatura de equilíbrio em ohm/m. A emissividade é representada por e_c , que varia de 0,23 a 0,90 conforme o material do cabo (Fuchs, 1982). Para cabos de alumínio é recomendado um valor de 0,5 (Fuchs, 1982). ϕ_{cabo} é o diâmetro nominal do cabo em metros, \bar{t}_2 é a temperatura final do cabo em °C, \bar{t}_1 é a temperatura ambiente em °C, $\bar{T}_2 = (273 + \bar{t}_2)$ é a temperatura absoluta final do cabo em °K, $\bar{T}_1 = (273 + \bar{t}_1)$ é a temperatura absoluta do ambiente em °K e v_v é a velocidade do vento em m/s. Em geral, essa velocidade varia de 0,6 m/s a 1 m/s (Fuchs, 1982).

Uma informação importante para a realização dos projetos de LTs é a temperatura máxima que um condutor pode atingir sob a ação da corrente elétrica na linha, em sobreposição às condições ambientais existentes, pois desta temperatura dependerá o valor da flecha nos cabos e conseqüentemente, a distância solo-condutor. Muitas vezes pode-se estar interessado no caminho inverso desse cálculo, onde são dadas as condições ambientais iniciais e a corrente que passa pelo cabo e é necessário obter a temperatura que o mesmo irá atingir. Para tanto, Fuchs (1982) propõe uma metodologia que satisfaz esse fim, porém, não há solução direta, podendo-se recorrer a processos iterativos. O problema pode ser resolvido admitindo-se valores empíricos de temperatura máxima dos cabos e em seguida determinar suas capacidades correspondentes. Com esses valores, é traçado um gráfico obtendo-se a lei de variação $\bar{T} = f(I)$, conforme o exemplo Figura 2.10.

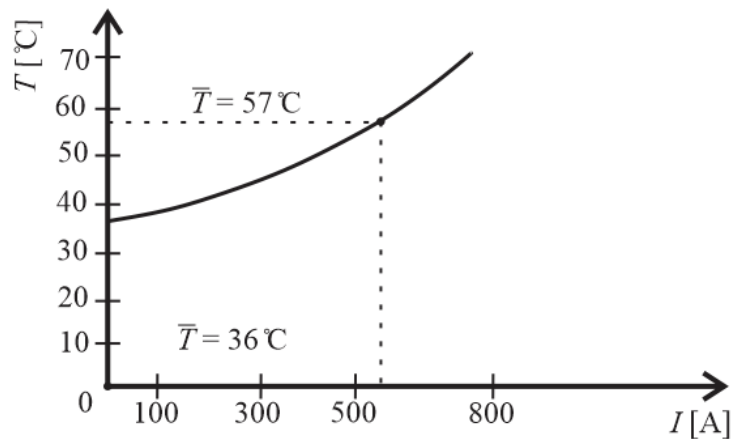


Figura 2-10 - Determinação da temperatura do cabo em função da corrente (Fuchs, 1982 -Modificado).

Após o advento da transmissão de energia em tensões elevadas, um novo fenômeno que pouco preocupava os projetistas começou a ser reconsiderado, o fenômeno da fluência (Fuchs, 1982). Com o emprego de condutores múltiplos e o número crescente de subcondutores por fase, verificou-se que a falta de conhecimento mais precisos sobre o assunto poderia acarretar alongamentos desiguais nos diversos subcondutores, comprometendo a configuração geométrica do feixe de cabos (Fuchs, 1982). Isso acarretaria operações custosas para o restabelecimento do funcionamento do feixe após sua ancoragem definitiva. Com o intuito de amenizar o problema, processos empíricos eram utilizados, com razoável sucesso em linhas com um cabo por fase. Porém, foi necessário, em anos subsequentes, que continuassem os estudos experimentais de envergadura visando formular leis empíricas sobre fluência que leve em conta todos os fatores que a influenciam. Experiências mostram que a fluência total nas linhas a longo prazo tende a ser igual aos valores calculados para a chamada condição de temperatura média anual, sem vento. Nas trações usuais para essa condição, os alongamentos totais independem da história de carregamento à qual o condutor foi submetido (Fuchs, 1982).

Wood (1972) investigou a fluência em cabos condutores, que permitiram identificar os principais fatores que influenciam o alongamento permanente dos cabos condutores e a maneira de quantificá-los. Esses fatores podem ser divididos em externos e internos. Os fatores externos são parâmetros independentes dos condutores e se originam no ambiente externo, de características construtivas e do uso da linha, como tensão mecânica, temperatura, maquinário e procedimentos de tensionamento (Wood, 1972). Já os fatores internos são os que envolvem diretamente as características dos cabos, tais como tipo do material, composição química,

microestrutura, tipo de condutor, geometria do condutor e métodos de fabricação. Caso exista um estudo de fluência do cabo condutor é possível a utilização de um dispositivo mitigador para compensar os alongamentos provocados.

2.6 O SLIM

Para mitigar problemas gerados por grandes flechas que infringem as distâncias mínimas de segurança condutor-solo, a empresa Material Integrity Solution Inc. desenvolveu um dispositivo chamado SLiM (*Sagging Line Mitigator*) ou Mitigador de flecha para linhas de transmissão. O dispositivo é montado em linha com o condutor. Baseado no comportamento termomecânico das SMA, o dispositivo é sensível à temperatura a qual o condutor está submetido e quando ela atinge determinado valor ele se contrai diminuindo o comprimento do cabo e, conseqüentemente, diminuindo a flecha. Com a diminuição da temperatura o dispositivo se expande aumentando conseqüentemente o comprimento do cabo.

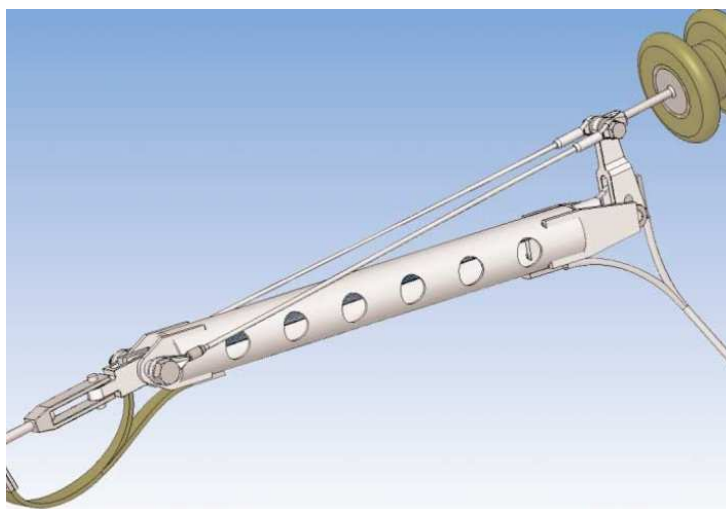


Figura 2-11 – Dispositivo SLiM (Shirmohamadi, 2006).

A instalação desse dispositivo é feita em linha com o cabo condutor, uma parte da corrente passa pelo núcleo do dispositivo, onde se encontra o atuador de SMA e outra parte passa por *jumpers*. Os *jumpers* funcionam como um divisor da energia elétrica total que passa pelo cabo condutor, trabalhando normalmente com uma taxa de divisão de corrente elétrica de 3:7, o que significa que em torno de 30% da energia elétrica que passa pelo cabo condutor passa pelo atuador SMA (Shirmohamadi, 2006). Os componentes principais do SLiM são mostrados na Figura 2-12.

O atuador SMA é a peça fundamental do SLiM, ele é constituído de um feixe de fios de SMA. A Figura 2-13 mostra o desenho esquemático do atuador SMA.

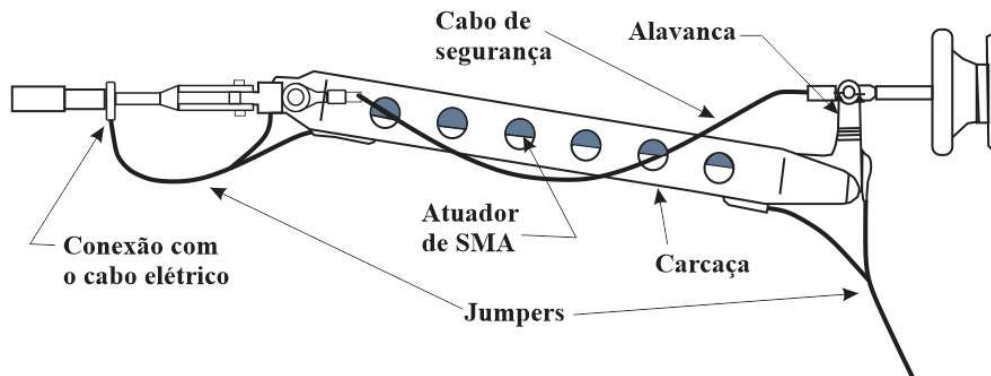


Figura 2-12 – Componentes do dispositivo SLiM (Shirmohamadi, 2006 - Modificado).

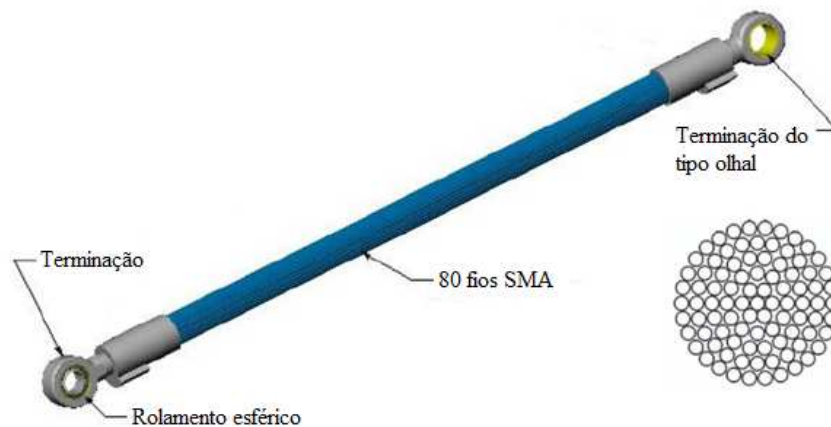


Figura 2-13 – Atuador SMA do SLiM (Shirmohamadi, 2006 - Modificado)

A carcaça do SLiM é um tubo que funciona como apoio para o tracionamento do atuador de SMA, além de sustentar o dispositivo na LT. A carcaça deve, além de servir de suporte para a amplificação do deslocamento do atuador SMA, suportar também as cargas que o cabo condutor aplica sobre ela, ou seja, a tensão de pré esticamento do cabo e peso do mesmo.

A alavanca é responsável pela amplificação do deslocamento produzido pelo atuador SMA. A Figura 2-14 ilustra o princípio de funcionamento do SLiM. Na condição em que o atuador SMA está em seu estado frio deformado (cor azul) ele possui seu comprimento máximo. Após seu aquecimento, o atuador se contrai do comprimento original utilizando a

alavanca para amplificar esse deslocamento, passando assim a posição em estado quente (cor vermelha).

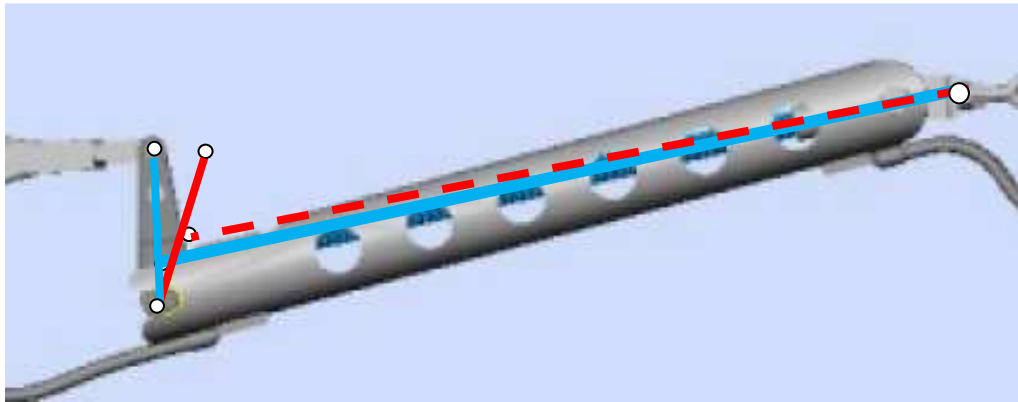


Figura 2-14 – Mecanismo de retração do cabo pelo SLiM (Shirmohamadi, 2006 - Modificado).

Caso o SLiM falhe mecanicamente, é utilizado um cabo de segurança para evitar a interrupção da transmissão de energia elétrica. Esse cabo é ligado aos pontos em que o dispositivo é acoplado ao cabo condutor.

2.7 Aquecimento de fios e o efeito Joule

Os fios de SMA podem ser aquecidos por corrente elétrica (efeito Joule). Contudo, deve ser tomado o cuidado necessário para não causar superaquecimento que poderá vir a ocasionar fadiga térmica. A fadiga térmica afeta o material com o passar do tempo e degrada lentamente a performance do Efeito de Memória de Forma. Estudos microestruturais mostram que as SMA são muito sensíveis a superaquecimento e fadiga proveniente de tensões térmicas (Velázquez, 2012).

Para que possa ser quantificado a produção de calor pelo efeito Joule, pode ser utilizada a lei de Lenz-Joule, representada pela equação 2.37:

$$q_j = I^2 \cdot \rho_{sma} , \quad (2.37)$$

onde q_j é o calor gerado por efeito Joule, I é a corrente elétrica e ρ_{sma} a resistência elétrica do fio condutor.

Segundo Velázquez (2012) podem ser utilizados os princípios básicos da transferência de calor para contabilizar o calor total envolvido no processo através das equações 2.38 e 2.39:

$$q_t = q_j - q_{cond} - q_{conv} - q_{irrad}, \quad (2.38)$$

$$\rho_{sma} C_{esp} V \frac{d\bar{T}}{dt} = q_j - q_{cond} - q_{conv} - q_{irrad}, \quad (2.39)$$

onde C_{esp} é o calor específico do material, V é o volume de SMA e \bar{T} é a temperatura no instante t .

No projeto atual, o calor devido à condução e à radiação pode ser considerado desprezível (Velázquez, 2012). O calor devido à convecção tem grande importância no caso do atuador operando em linha viva, que está sujeito a ventos atuantes sobre a LT. Ele pode ser obtido através das equações conhecidas dos princípios de transferência de calor (Velázquez, 2012):

$$q_{conv} = h \cdot A_{sma} \cdot (\bar{T}_2 - \bar{T}_1), \quad (2.40)$$

onde h é o coeficiente de troca de calor entre o SMA e o meio, A_{sma} a área da superfície de SMA, \bar{T}_1 a temperatura ambiente e \bar{T}_2 a temperatura da SMA. Substituindo 2.40 em 2.37 obtém-se:

$$\rho_{sma} C_{esp} V \frac{d\bar{T}}{dt} = I^2 \cdot \rho_{sma} - h \cdot A_{sma} \cdot (\bar{T}_2 - \bar{T}_1). \quad (2.41)$$

Para a determinação do coeficiente h , tem-se (Velázquez, 2012):

$$h = \frac{\lambda Nu}{l}, \quad (2.42)$$

onde λ é a condutividade térmica do meio convectivo, Nu o número de Nusselt que define a taxa de troca de calor por convecção e l uma característica dimensional dada por $l = Volume/Area$ ou $l = \emptyset$ no caso de fios. O número de Nusselt para a convecção natural pode ser obtido por:

$$Nu = 0,6 \cdot \frac{0,387(Gr \cdot Pr)^{1/6}}{[1 + (\frac{0,559}{Pr})^{9/16}]^{8/27}}, \quad (2.43)$$

onde Pr é o número de Prandtl e Gr o número de Grashof.

Com as equações mostradas no tópico 2.7 é possível descrever o comportamento dos fios SMA que compõem o feixe do atuador, durante o processo de aquecimento e resfriamento.

3. MODELAGEM DE UM DISPOSITIVO DE MITIGAÇÃO

Apresenta-se neste capítulo uma proposta de modelagem do SLiM. A partir de sua concepção (Shirmohamadi, 2006) propõe-se relações matemáticas que permitam o projeto e análise de dispositivos baseados no seu mecanismo de funcionamento. Conforme exposto no tópico 1.1 do presente projeto, existe a necessidade da LT continuar a operar acima da temperatura prevista em projeto, sem que sejam violadas as distâncias de segurança. A temperatura máxima de projeto é frequentemente ultrapassada devido a altas demandas por energia elétrica (Fuchs, 1982). Esse acréscimo na temperatura máxima causa um aumento no comprimento do condutor e consequentemente um aumento da sua flecha, podendo infringir a distância de segurança.

O dispositivo de mitigação atuará automaticamente a partir da temperatura máxima permitida. Assim, o atuador deverá diminuir o comprimento total do cabo condutor dilatado e sua flecha. A Figura 3.1 mostra o funcionamento do dispositivo no caso em que o dispositivo se encontra aberto ($\bar{T} < \bar{T}_{m\acute{a}x}$) e fechado ($\bar{T} > \bar{T}_{m\acute{a}x}$).

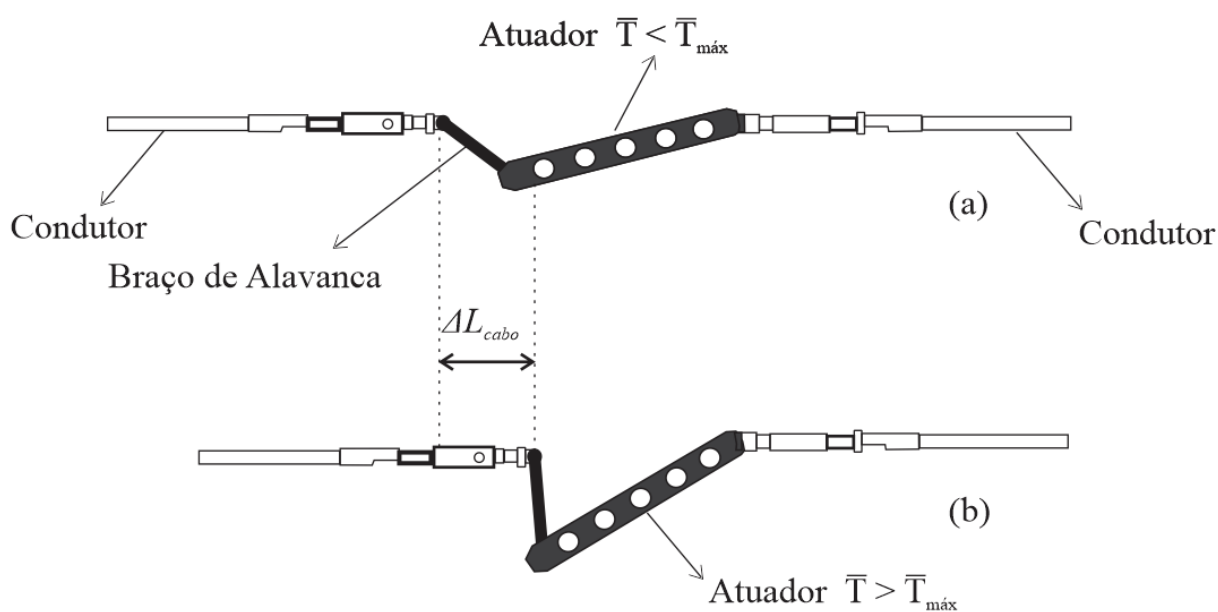


Figura 3-1– Funcionamento do dispositivo e o ΔL_{cabo} .
a) Aberto. b) Fechado.

O atuador de SMA encontra-se inicialmente deformado (aberto) na temperatura de referência (Figura 3.1-a). À medida que o cabo é aquecido, o atuador recupera sua forma

original acionando a alavanca que retrai o cabo em ΔL_{cabo} (Figura 3.1-b). Assim, ΔL_{cabo} é o valor da variação de comprimento do cabo em função da temperatura \bar{T} , amplificado pela alavanca do dispositivo, e ΔL_{SMA} o valor correspondente à recuperação máxima do atuador SMA. No caso das ligas NiTi essa deformação máxima é empiricamente de aproximadamente 8%. A Figura 3-2 ilustra a deformação do atuador SMA devido a uma variação de temperatura. Quando o material encontra-se no “estado frio” martensítico, $\bar{T} < M_f$, e é submetido a uma carga suficientemente alta, ele se deforma quasiplasticamente e tem o comprimento L_F . Quando é aquecido a uma temperatura acima de A_s assume o “estado quente” com comprimento L_Q , quando recupera a sua deformação quasiplástica.

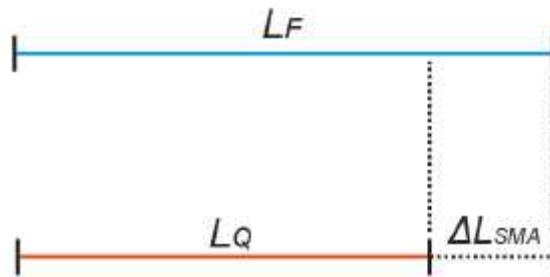


Figura 3-2 – Recuperação da deformação quasiplástica do atuador SMA.

A Figura 3-3 representa esquematicamente o dispositivo de mitigação. O ponto 0 é o ponto de articulação, em que a alavanca c faz o seu movimento rotacional, os pontos 1 e 3 são os pontos de ligação entre o dispositivo e o cabo condutor e o ponto 2 é o ponto de ligação entre o atuador SMA e o braço de alavanca. A distância r é o comprimento total do dispositivo e L_{sma} o comprimento do atuador SMA. A distância s é a distância entre o ponto 0 e o ponto de conexão do atuador com a alavanca 2 e c é a distância entre o ponto 0 e o ponto 3 (comprimento do braço de alavanca).

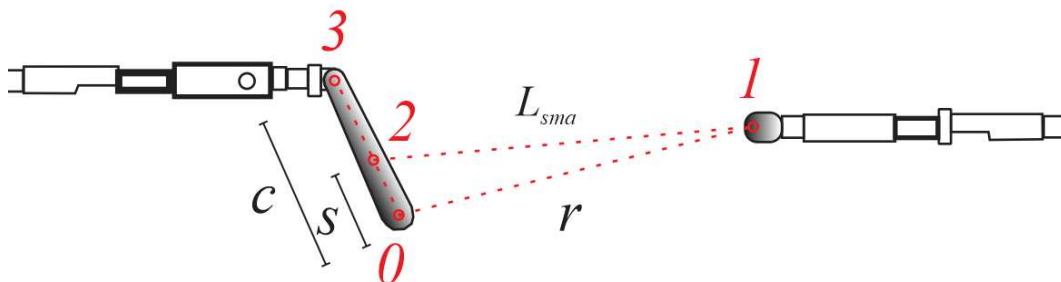


Figura 3-3 – Representação esquemática do SLiM.

3.1 Determinação das dimensões do SLiM

Considerando o modelo simplificado do SLiM para os estados quente e frio mostrados na Figura 3.4, o comprimento d_1 representa a distância entre os pontos 1 e 3, assim como o comprimento d_2 representa a distância entre os pontos 1 e 3'. Obtendo-se os valores de ΔL_{cabo} e ΔL_{SMA} , pode-se utilizar o modelo proposto por Pontes (2013) para estabelecer as relações geométricas entre as dimensões que compõe o dispositivo.

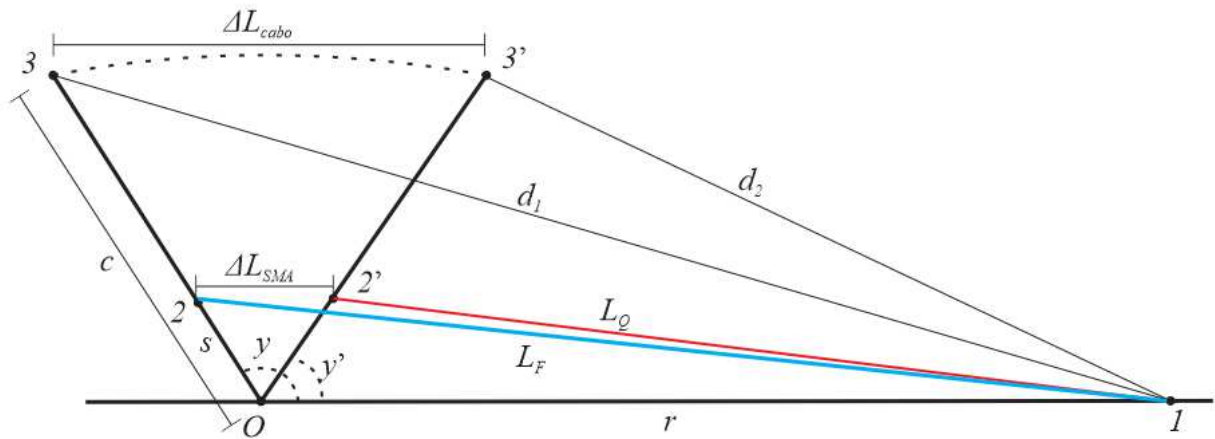


Figura 3-4 – Modelo do SLiM (PONTES, 2013 – modificado).

O ângulo γ é o ângulo formado entre a alavanca c e a carcaça no estado frio e γ' no estado quente. Para obtenção das relações trigonométricas que fornecerão as medidas das variáveis envolvidas, serão feitas análises considerando o dispositivo nos seus estados frio e quente, ou seja, no frio serão considerados os triângulos $O13$ e $O12$ e no quente serão considerados os triângulos $O13'$ e $O12'$, Figuras 3.5 e 3.6.

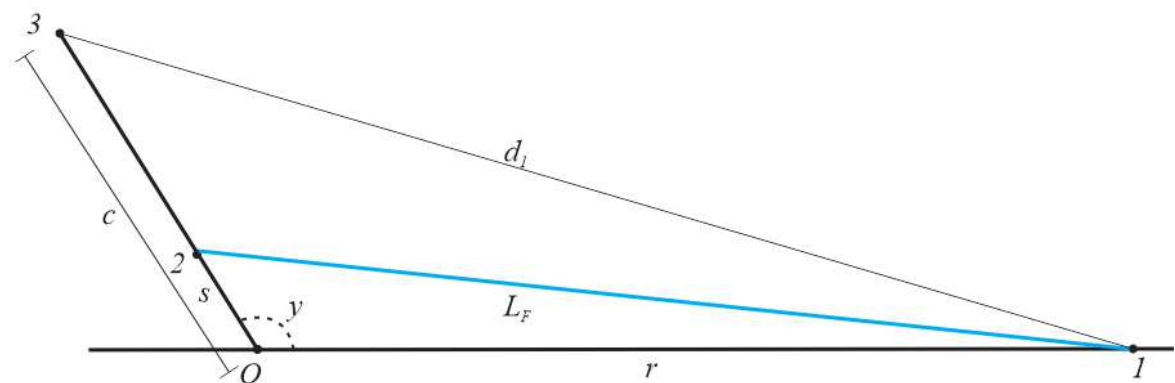


Figura 3-5 – Modelo do SLiM - aberto.

Do triângulo $O13$ e $O12$ da Figura 3.5 obtêm-se, através da Lei dos Cossenos, as seguintes relações:

$$d_1^2 = c^2 + r^2 - 2 \cdot c \cdot r \cdot \cos \gamma, \quad (3.1)$$

$$L_F^2 = r^2 + s^2 - 2 \cdot r \cdot s \cdot \cos \gamma. \quad (3.2)$$

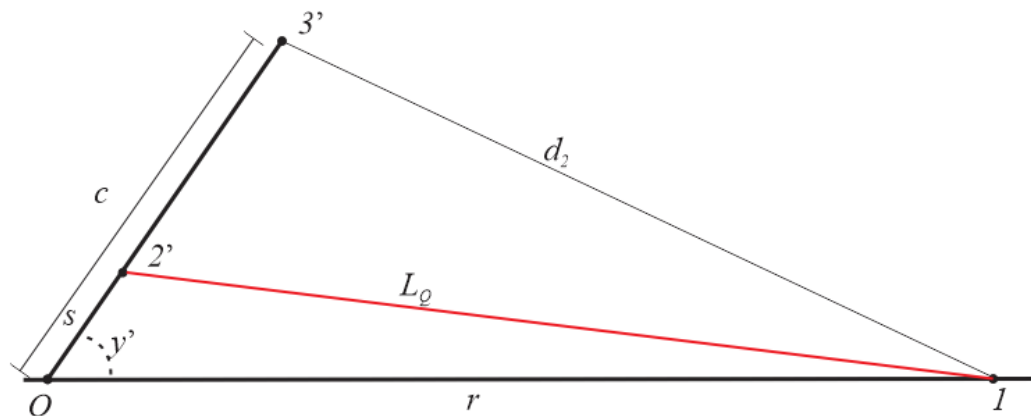


Figura 3-6 - Modelo do SLiM - fechado.

Do triângulo $O13'$ e $O12'$ da Figura 3.6 obtêm-se, respectivamente, as seguintes relações:

$$d_2^2 = c^2 + r^2 - 2 \cdot c \cdot r \cdot \cos \gamma', \quad (3.3)$$

$$L_Q^2 = r^2 + s^2 - 2 \cdot r \cdot s \cdot \cos \gamma'. \quad (3.4)$$

As equações 3.1 a 3.4 serão empregadas no dimensionamento do dispositivo apresentado no estudo de caso do Capítulo 4.

3.2 Determinação das Flechas

3.2.1 Relação entre as flechas em temperaturas diferentes

A flecha formada pelo cabo condutor na temperatura ambiente depende do peso linear do cabo p , do vão a entre os dois suportes e da tensão de pré-esticamento T_0 , conforme mostrado na Equação 2.26 (Fuchs, 1982). Com o valor da flecha f , pode-se obter o

comprimento do cabo L para a respectiva temperatura, através da Equação 2.31, que depende unicamente do valor da flecha e do vão. Para a obtenção de flechas em temperaturas acima da temperatura de referência, é necessário o cálculo da variação de comprimento do cabo, que depende de seu coeficiente de dilatação térmica linear e da variação da temperatura. Os coeficientes de dilatação térmica linear dos materiais com os quais os cabos são confeccionados têm valores significativos, provocando contrações e dilatações consideráveis sob variação de temperatura. Essas variações de comprimento dos condutores são diretamente proporcionais aos seus coeficientes de dilatação térmica e à variação da temperatura. Uma vez que a flecha do condutor depende de seu comprimento, esta variará de acordo com a temperatura (Fuchs, 1982). Assim,

$$L_f(\bar{T}) = L_i + [L_i \cdot \alpha_t \cdot (\bar{T} - \bar{T}_0)]. \quad (3.5)$$

onde $L_f(\bar{T})$ é o comprimento do cabo em função da temperatura, L_i o comprimento inicial do cabo e α_t o coeficiente de dilatação do cabo.

Após a obtenção do comprimento do cabo devido a uma determinada variação de temperatura através da Equação 3.5, utiliza-se novamente a Equação 3.6 para obtenção da nova flecha,

$$f(\bar{T}) = \sqrt{3 \cdot a \left(\frac{L_f - a}{8} \right)}. \quad (3.6)$$

Essa flecha depende da tensão máxima de operação da linha, da temperatura do condutor e das distâncias básicas de segurança previstas na norma NBR 5422 de 1985.

3.2.2 Determinação do ΔL_{cabo}

A flecha limite (f_{limite}) implica no comprimento máximo que o cabo poderá ter. Esse comprimento máximo permitido para o cabo condutor (L_{limite}) depende da temperatura máxima de operação para o qual o cabo foi projetado. Assim, a variação ΔL_{cabo} que o dispositivo mitigador deverá retrair será a diferença entre o comprimento do cabo em dada temperatura e o comprimento limite dado por:

$$\Delta L_{cabo} = L_f(\bar{T}) - L_{limite}. \quad (3.7)$$

Consequentemente, a respectiva variação da flecha será:

$$\Delta f_{cabo} = f(\bar{T}) - f_{limite}. \quad (3.8)$$

3.2.3 Determinação do ΔL_{SMA}

A deformação sofrida pelo atuador SMA é dada por:

$$\Delta L_{SMA} = L_F \cdot \varepsilon_{SMA}, \quad (3.9)$$

onde ε_{SMA} é a deformação recuperável do atuador SMA. Ela é uma propriedade do material. Mas,

$$\Delta L_{SMA} = L_F - L_Q. \quad (3.10)$$

Então, obtêm-se:

$$\varepsilon_{SMA} = \frac{L_F - L_Q}{L_F}, \quad (3.11)$$

$$L_Q = L_F(1 - \varepsilon_{SMA}), \quad (3.12)$$

onde L_F é o comprimento do atuador de SMA no estado frio, L_Q o comprimento do atuador SMA no estado quente e ε_{SMA} a deformação da SMA.

3.2.4 Relação entre ΔL_{cabo} e ΔL_{SMA}

Considerando que a liga SMA a ser empregada é a NiTi, pode-se considerar uma deformação recuperável de 8% ($\varepsilon_{SMA}=0,08$). Assim, essa recuperação de forma deve, de alguma forma, ser amplificada. Essa amplificação da recuperação de forma é obtida através do uso de uma alavanca, conforme Figura 3-7.

Segundo um estudo de caso realizado por Da Silva (2012), um protótipo do SLiM em um vão de 400 metros e submetido a um histórico de temperatura de 50 a 70 °C retraciona linearmente cerca de 200mm (ΔL_{cabo}). Se o elemento for instalado diretamente na LT, sem o uso de uma alavanca, o atuador SMA deveria ter um comprimento mínimo de 2,5 metros (considerando uma deformação de 8%) para retracionar o cabo em 200mm. Considerando a amplificação pela alavanca, o comprimento utilizado para o atuador é de 1m (Da Silva, 2012).



Figura 3-7 - Amplificação da recuperação de forma da liga de SMA por alavanca (Shirmohamadi, 2006 - Modificado).

Quando o condutor for aquecido, o atuador SMA de comprimento r (Figura 3.4) produz uma retração equivalente à ΔL_{SMA} , que amplificada pela alavanca produz no cabo uma retração equivalente à ΔL_{cabo} . Essa retração causada pelo atuador move a alavanca formando dois arcos de circunferência de raios s e c semelhantes, pois os ângulos percorridos por esses dois arcos são iguais. Assim, as retrações ΔL_{SMA} e ΔL_{cabo} podem ser consideradas equivalentes às cordas formadas por seus respectivos arcos, conforme Figura 3.8.

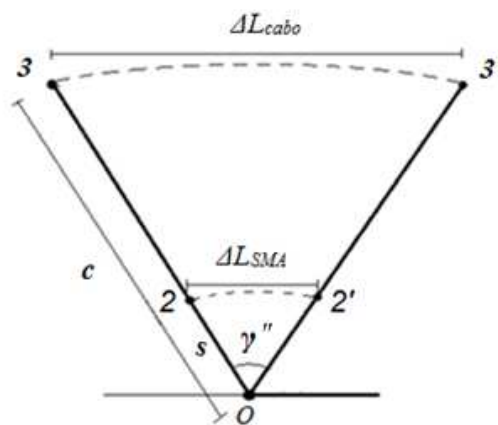


Figura 3-8 – Arcos formados pela ação do atuador de SMA (PONTES, 2013 -modificado).

Assim, para se obter uma relação geométrica entre s , c , ΔL_{SMA} e ΔL_{cabo} utiliza-se a equação para cálculo de cordas para um arco qualquer, obtida através da Lei dos Cossenos. Assim, considerando que $\gamma'' = \gamma - \gamma'$ tem-se:

$$\Delta L_{SMA} = s \cdot \sqrt{2 - 2 \cos \gamma''}, \text{ ou ainda} \quad (3.13)$$

$$\Delta L_{SMA} = 2 \cdot s \cdot \text{sen} \frac{\gamma''}{2}. \quad (3.14)$$

De maneira análoga, pode-se obter o valor de ΔL_{cabo} como:

$$\Delta L_{cabo} = c \cdot \sqrt{2 - 2 \cos \gamma''}, \text{ ou ainda} \quad (3.15)$$

$$\Delta L_{cabo} = 2 \cdot c \cdot \text{sen} \frac{\gamma''}{2}. \quad (3.16)$$

O ângulo γ'' percorrido pelo arco pode ser obtido através da equação:

$$\gamma'' = \cos^{-1} \left[1 - \left(\frac{\Delta L_{SMA}^2}{2 \cdot s^2} \right) \right], \text{ ou ainda} \quad (3.17)$$

$$\gamma'' = \cos^{-1} \left[1 - \left(\frac{\Delta L_{cabo}^2}{2 \cdot c^2} \right) \right]. \quad (3.18)$$

3.2.5 Relação de amplificação

A relação de amplificação R é definida como sendo a quantidade que ΔL_{SMA} será amplificado pelo braço de alavanca c resultando em uma amplificação total ΔL_{cabo} . Assim, o ΔL_{SMA} , quando multiplicado por R , será equivalente ao valor de retracionamento do cabo ΔL_{cabo} . Assim, R é definido como:

$$R = \frac{\Delta L_{cabo}}{\Delta L_{SMA}} = \frac{c}{s}. \quad (3.19)$$

Como ΔL_{SMA} depende apenas do comprimento inicial L_F e da deformação ϵ_{SMA} realizada pela liga com memória de forma, quanto maior for a relação de amplificação R , menor será o comprimento do atuador SMA. De 3.19 tem-se:

$$\Delta L_{SMA} = \frac{\Delta L_{cabo}}{R}, \quad (3.20)$$

$$L_{SMA} = \frac{\Delta L_{cabo}}{R \cdot \epsilon_{SMA}}. \quad (3.21)$$

3.3 Esforços estruturais nos componentes do SLiM

Serão analisados nesta seção os esforços atuantes na alavanca e nos pinos que compõem o dispositivo de mitigação.

3.3.1 Equilíbrio de forças nas barras da alavanca

O braço de alavanca promove a amplificação do movimento de retração do atuador de SMA. Logo seus componentes deverão ser dimensionados para suportar os esforços a que serão submetidos. A Figura 3.9 ilustra o braço de alavanca, que pode ser representada por placas duas barras e três pinos Pa , Pb e Pc . O pino Pa está localizado no ponto 3, Pb no ponto 2, que é o mesmo ponto de fixação do atuador SMA, e Pc no ponto O , sendo que o pino Pc funciona como ponto fixo de rotação.

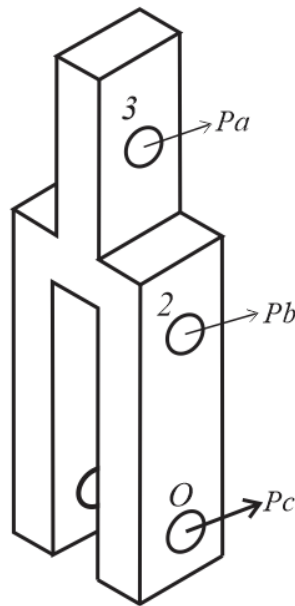


Figura 3-9 – Representação do braço de alavanca.

No ponto 3, o braço está submetido a uma tração F proveniente da carga de pré-esticamento do cabo e do peso específico do cabo. Em Pb , a força atuante é proveniente da retração do atuador SMA, F_{sma} , que possui suas componentes F_{smax} e F_{smy} . No ponto O atuam duas forças de reação F_x e F_y . Assim, pode ser considerado o seguinte diagrama de corpo livre da alavanca, conforme Figura 3.10, onde F é a força exercida pelo condutor no braço da alavanca, F_{sma} a força exercida pelo atuador SMA, F_{smax} e F_{smy} as componentes da força F_{sma} nos eixos x e y respectivamente e F_x e F_y as componentes da força resultante da reação no pino de articulação Pc . Analisando o diagrama de corpo livre do braço de alavanca, ao longo do eixo y , tem-se:

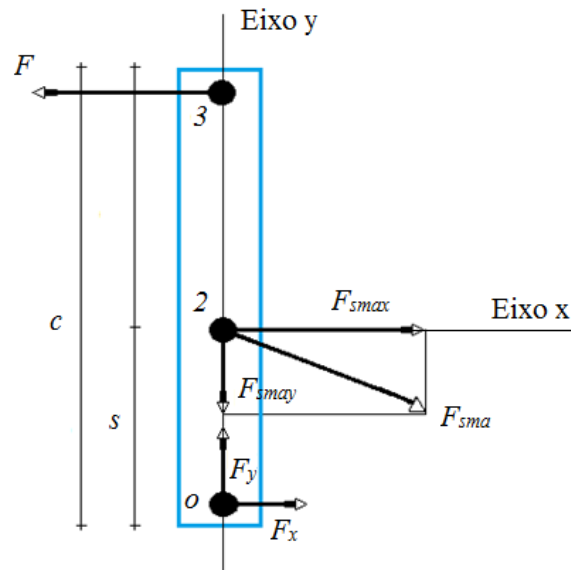


Figura 3-10 – Diagrama de corpo livre do braço de alavanca.

$$\sum F_y = 0, \quad (3.22)$$

$$F_y - F_{smay} = 0, \quad (3.23)$$

$$F_y = F_{smay} . \quad (3.24)$$

Analogamente, ao longo do eixo x , tem-se:

$$\sum F_x = 0, \quad (3.25)$$

$$F - F_{smax} - F_x = 0, \quad (3.26)$$

sendo $F = T$ tem-se:

$$F_x = T - F_{smax} . \quad (3.27)$$

Considerando o eixo de rotação no ponto O e considerando as distâncias $O3 = c$ e $O2 = s$ (conforme Figura 3-10), obtêm-se o seguinte equilíbrio de momentos:

$$\sum M_o = 0, \quad (3.28)$$

$$F \cdot c - F_{smax} \cdot s + M_o = 0 , \quad (3.29)$$

Como $M_o = 0$, tem-se:

$$F \cdot c = F_{smax} \cdot s , \quad (3.30)$$

$$F_{smax} = F \cdot \frac{c}{s} . \quad (3.31)$$

Substituindo a equação 3.31 na equação 3.26, tem-se:

$$F_x = F \left(1 - \frac{c}{s} \right) . \quad (3.32)$$

3.3.2 Esforços Cisalhantes nos pinos P_a , P_b e P_c

Pelo diagrama de corpo livre da Figura 3.10 nota-se que os pinos P_a , P_b e P_c estão sujeitos a cisalhamentos duplos. Assim, pode-se calcular o diâmetro mínimo necessário dos pinos utilizando a equação de esforços cisalhantes duplos juntamente com a equação de área do pino cilíndrico. Para os esforços cisalhantes duplos, tem-se:

$$\frac{V_{pino}}{2} = \frac{\tau_{adm}}{A_{pino}} , \quad (3.33)$$

onde $V_{pino}/2$ é a força cisalhante atuante no pino com cisalhamento duplo, τ_{adm} é a tensão cisalhante admissível do material do pino e A_{pino} é a área da seção transversal do pino. E para a área de seção transversal do pino, tem-se:

$$A_{pino} = \pi \left(\frac{\phi_{pino}^2}{4} \right) . \quad (3.34)$$

onde ϕ_{pino} é o diâmetro do pino.

Substituindo a equação 3.37, na equação 3.36 tem-se:

$$\pi \left(\frac{\phi_{pino}^2}{4} \right) = \frac{\tau_{adm}}{V_{pino}} \cdot 2 , \quad (3.35)$$

$$\phi_{pino} = \sqrt{\frac{8}{\pi} \cdot \frac{\tau_{adm}}{V_{pino}}}. \quad (3.36)$$

A carcaça do dispositivo está sujeita a duas forças de reação: a força de reação do braço de alavanca F_{ra} e a força de reação do cabo condutor F_{rc} , conforme Figura 3-11.



Figura 3-11 – Forças de reação na carcaça.

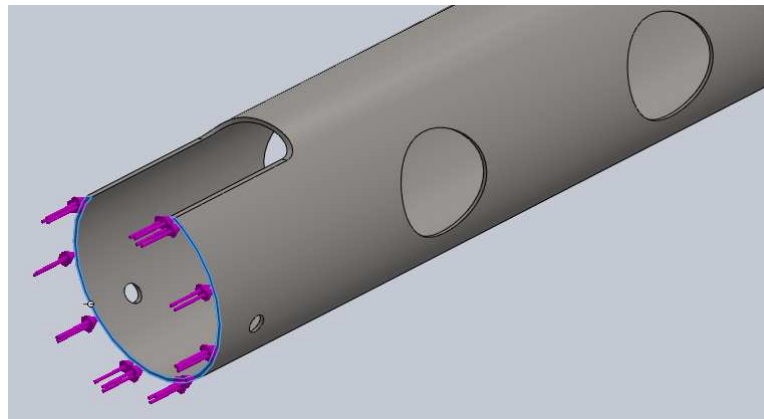


Figura 3-12 – Esforços internos na carcaça.

3.4 Relação entre a distância s e a força F_{sma}

A figura 3.10 mostra o braço de alavanca com seu eixo de rotação e as duas forças a que está submetido, F e F_{sma} , assim como as distâncias s e c .

A distância s , que é o ponto de aplicação da força F_{sma} , está diretamente relacionado com a resistência do feixe de fios de SMA (atuador) que será acoplado nesse ponto.

Se a distância s coincidir com c , a força realizada pela retração do atuador será igual à força F . À medida que afasta-se do ponto de aplicação de F em direção ao eixo de rotação da alavanca, a distância s diminui e a F_{sma} necessária para se equilibrar com a força F aumenta.

Assim, a diminuição da distância s implica em uma diminuição no ΔL_{SMA} (retração total que o atuador SMA deve realizar) e, por consequência, uma diminuição no seu comprimento no estado frio L_F . Em contrapartida, essa mesma diminuição da distância s causa também um aumento da área do atuador, pois para a mesma tensão de escoamento σ_{sma} têm-se uma força F_{sma} maior. Com isso, a distância s deverá ser determinada de modo que atenda ao limite máximo permitido pelo limite de escoamento do material do atuador.

Se considerada a distância c sendo um múltiplo da distância s , $c = s \cdot R$, sendo R uma relação de amplificação, pode-se obter diretamente a relação de proporcionalidade entre as forças F e F_{sma} .

$$c = s \cdot R, \quad (3.37)$$

$$F_{sma} = F \cdot R. \quad (3.38)$$

Como,

$$\sigma_{sma} = \frac{F_{sma}}{A_{sma}}, \quad (3.39)$$

tem-se que:

$$\frac{R \cdot F}{A_{sma}} < \sigma_{esc}. \quad (3.40)$$

Valores típicos para uma liga de NiTi variam entre $150 \text{ Mpa} < \sigma_{esc} < 300 \text{ Mpa}$. AERNOUDT (1987). A tabela 3.1 exemplifica a relação existente entre essas variáveis envolvidas na amplificação do movimento.

Tabela 3-1 – Relação entre R , s , c , ΔL_{SMA} , L_F e A_{sma} .

R	$S = c/R$	ΔL_{sma}	L_F	F_{sma}	A_{sma}
1	$s = c$	$\Delta L_{sma} = \Delta L_{cabo}$	L_F	$F_{sma} = T$	A_{sma}
2	$s = c/2$	$\Delta L_{sma} = \Delta L_{cabo}/2$	$L_F / 2$	$F_{sma} = 2.T$	$2 \cdot A_{sma}$
3	$s = c/3$	$\Delta L_{sma} = \Delta L_{cabo}/3$	$L_F / 3$	$F_{sma} = 3.T$	$3 \cdot A_{sma}$
4	$s = c/4$	$\Delta L_{sma} = \Delta L_{cabo}/4$	$L_F / 4$	$F_{sma} = 4.T$	$4 \cdot A_{sma}$

Analisando a Tabela 3.1, nota-se que for acoplado o atuador na distância $s=c$, os deslocamentos do atuador ΔL_{sma} e do dispositivo ΔL_{cabo} também se igualam, acontecendo o mesmo para a força no atuador F_{sma} e a tração proveniente do cabo condutor F . A medida que s vai diminuindo, ΔL_{SMA} e L_F diminuem proporcionalmente, porém, nessa mesma proporção a força F_{sma} aumenta e, conseqüentemente, a área da seção transversal do atuador A_{sma} também.

A distância s , além de influir nos parâmetros mostrados na Tabela 3.1, determina também como será a geometria da carcaça do dispositivo, pois o atuador deverá se localizar dentro dessa carcaça. Quanto maior for a distância s , maior será a área da seção transversal de sua carcaça.

Assim, é conveniente utilizar uma relação $1 < R < 2$, ou seja, uma distância s entre a metade do braço de alavanca e seu eixo de rotação, pois assim evita-se grandes valores do comprimento do atuador SMA (r) e grandes áreas de seção transversal da carcaça.

PONTES (2013) fez uma análise para diferentes valores de s e observou para cada valor a influência da distância s na área do atuador de SMA, no comprimento a frio do atuador e na montagem do atuador no braço da alavanca. Para o projeto de seu dispositivo de mitigação foi determinado um valor otimizado de $R=1,95$ que mostrou resultados satisfatórios na geometria de sua carcaça.

A determinação da quantidade de fios de SMA que o atuador necessita é dada por:

$$n_{fios} = \frac{A_{sma}}{A_{fio}}, \quad (3.41)$$

onde n_{fios} é o número de fios de SMA necessários, A_{sma} é a área total do feixe de SMA e A_{fio} é a área do fio que irá compor o feixe.

3.5 Análise da Tensão de pré-esticamento após o retracionamento

Sob a ação do SLiM o comprimento do cabo será reduzido e ocasionará forças não previstas no projeto dos suportes, impactando assim em sua tensão de pré-esticamento. Para que a ação do dispositivo não cause aumento dos esforços atuantes no sistema, deve-se analisar a tensão de pré-esticamento no cabo após o seu retracionamento.

Analisando-se as equações da flecha apresentadas no item 2.3.3 pode-se observar a influência do comprimento do cabo na flecha. As equações 2.26 (flecha parabólica) e 2.27 (flecha catenária) mostram que a distância f depende da tensão de pré-esticamento T_0 , do vão a e do peso específico do cabo p . Assim, da equação 2.26 tem-se:

$$T_0 = \frac{p \cdot a^2}{8f}, \quad (3.42)$$

onde T_0 é a tensão de pré-esticamento (EDS), p o peso unitário do cabo e f a flecha.

Mantendo-se o mesmo vão a entre os suportes e mesmo peso específico p do cabo condutor, essa equação indica que a flecha será função apenas da tensão de pré-esticamento do cabo condutor. Considerando-se um caso de operação da LT em que o cabo sofrerá uma dilatação térmica aumentando seu comprimento e conseqüentemente sua flecha, pode-se inferir das equações da flecha que a força de pré-esticamento T_0 , para um dado cabo, é inversamente proporcional ao seu comprimento e, conseqüentemente, inversamente proporcional também à sua flecha.

Quando sob atuação SLiM o cabo condutor, tem a diminuição do seu comprimento e, logo, o aumento da tensão de pré-esticamento. Se o dispositivo retracionar, o cabo que sofreu dilatação térmica, para o seu comprimento original, será obtida a mesma força de pré-esticamento inicial, mantendo-se o mesmo equilíbrio de força na condição inicial (em que o cabo opera na temperatura ambiente). Assim, aplicando-se a equação 3.44 para a situação de flecha antes do SLiM e depois do SLiM, obtém-se para os diferentes comprimentos de cabo, o valor da respectiva força de pré-esticamento.

Deve ser observada a condição em que o dispositivo de mitigação, em seu estado quente, retraciona o cabo condutor a um comprimento menor do que o mesmo foi projetado para operar na temperatura ambiente. Se o retracionamento ocasionar um comprimento menor do que o comprimento original do cabo, gerará uma força de pré-esticamento maior que a prevista em projeto, e caso não obedeça aos limites exigidos em norma, pode comprometer a segurança da operação da LT.

4. ESTUDO DE CASO

No presente capítulo são apresentadas as características e os cálculos realizados no dimensionamento de um dispositivo de mitigação que utiliza o mesmo princípio de funcionamento do SLiM. Utiliza-se aqui o equacionamento de projetos de LTs para caracterização de uma LT típica e o modelo apresentado no Capítulo 3 para dimensionamento do dispositivo.

Com o intuito de facilitar os cálculos realizados, foi criada uma planilha de Excel para a implementação das equações utilizadas. Essa planilha pode ser encontrada no ANEXO II - Memória de Cálculo.

4.1 Características dos componentes estruturais

Quanto ao cabo condutor considera-se aqui o IBIS – 397,5 MCM da fabricante NEXANS. Esse condutor é feito do material Al 1350-H19 e é o recomendado para linhas de transmissão com classe de tensão 138 kV.

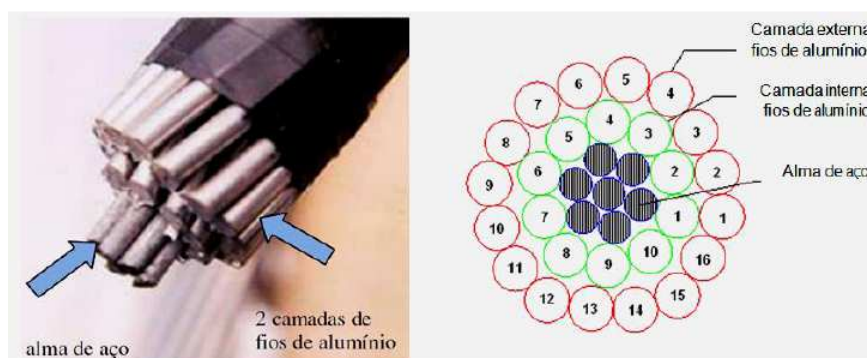


Figura 4-1 – Cabo IBIS 397,5 MCM.

As tabelas 4.1 e 4.2 mostram as características dimensionais e as propriedades mecânicas do cabo considerado.

Tabela 4-1 – Características dimensionais do cabo IBIS 397,5 (Fadel, 2010).

Condutor	Bitola MCM	Área Nominal [mm ²]			Encordamento (n fios x diâmetro)		Diâm. nominal cabo [mm]	Peso Linear [kg/km]	Carga de Ruptura [kgf]
		Alumínio	Aço	Total	Alumínio	Aço			
IBIS	397,5	201,21	234	435,21	26x3,139	7x2,441	19,88	557,5	7394

Tabela 4-2 – Propriedades mecânicas do cabo condutor utilizado (Fadel, 2010).

PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS	VALOR	UNIDADE
Coefficiente de Poisson	0,33	-
Densidade	2705	Kg/m ³
Dureza Brinell	50	-
Elongação na Quebra (Min)	1,5	%
Limite de escoamento	165	MPa
Limite de Resistência à Tração	186	MPa
Módulo de Elasticidade	68,9	GPa
Resistência a Fadiga para 5x10 ⁸ Ciclos	48,3	MPa
Resistência ao Cisalhamento	103	MPa

Uma liga de SMA muito utilizada em atuadores e disponível no mercado para diferentes aplicações é a liga de Níquel Titânio – NiTi. A tabela a seguir mostra características desse material fornecidas pelo MTM Departement - University of Leuve. Informações completas sobre esse material utilizado podem ser obtidas no ANEXO I.

Tabela 4-3 - Propriedades Mecânicas da SMA de NiTi (MTM DEPARTEMENT)

<i>MECHANICAL</i>			
Youngs moduls	GPa	70-98 [Me87] 95 [AMT,Hu91]	70-100 [Me87,Be87,AMT,EuMe] 80 [Hu91]
<i>of austenite</i>	GPa	70 [Be87] 98 [Ae87,Hu89], 97 [Ray2,Rayc]	70-100 [Ae87,Hu89], 72 [Wu90]
<i>of martensite</i>	GPa	/	70 [Wu90]
G (austenite)	GPa	27 [Be87]	/
yield strength	MPa	410 [Rayc]	/
<i>of austenite</i>	MPa	200-800 [Ae87,Me87,Hu89] 100-600 [Be87] 410 [Be87]	350 [Wu90], 150-300 [Me87]
<i>of martensite</i>	MPa	150-300 [Ae87,Me87,Hu89], 50-300 [Be87]	80 [Wu90], 150-300 [Ae87,Hu89]
ultimate tensile strength	MPa	800-1000 [Ta90,Ta89,AMT,Hu91] 900-1500 [St90] 860 [Rayc] 800 [Ho89], 800-1100 [Ae87,Hu89]	400-700 [Ta90,Ta89,St90] 600 [Wu90] 800-900 [AMT] 700-800 [EuMe,Hu91] 500 [Ho89], 700-800 [Ae87,Me87,Hu89]
<i>of martensite</i>	MPa	700-1100 (annealed) [Me87,Be87], 860 [Ray2] 1300-2000 (not anneal) [Me87,Be87]	/
elongation at failure	%	40-50 [Ta90,Ta89] 50 [Hu91] 30-50 [St90]	10 [Hu89] 10-15 [Ta90,Ta89,EuMe,St90] 15 [Hu91]
<i>of austenite</i>	%	15-20 [Ray2,Rayc]	/
<i>of martensite</i>	%	40-50 [Ae87,Me87,Hu89] 20-60 [Be87] 30-50 [AMT]	10-15 [Ae87,Me87,Hu89] 15 [AMT]

4.2 Definições de Projeto

O dispositivo de mitigação será dimensionado para atuar em um vão com comprimento total de 400 m, a partir desse vão será definido o comprimento do cabo, assim como a força atuante no cabo condutor.

A tensão de pré esticamento é definida por normas e é aplicada por uma talha de alavanca ancorada a um bloco de fixação. O valor utilizado comumente para a tensão de pré esticamento é de 20% da tensão de ruptura do cabo condutor. A tensão de ruptura do cabo IBIS é 7394 kgf, conforme Tabela 4.1, logo, a tensão de pré esticamento a ser utilizada é de 1478,8 kgf.

A Tabela 4.4 mostra os parâmetros de entrada para realização dos cálculos do dimensionamento do dispositivo.

Tabela 4-4 - Dados de entrada para dimensionamento do dispositivo.

VARIÁVEL	VALOR	UNIDADE	DESCRIÇÃO
a	400	m	Vão entre suportes.
\bar{t}_0	24	°C	Temperatura ambiente.
\bar{t}_1	50	°C	Temperatura máxima admitida para flecha segura.
\bar{t}_2	70	°C	Temperatura máxima de operação.
α	$18,25 \times 10^{-6}$	°C ⁻¹	Coefficiente de dilatação linear do cabo condutor.
ϵ_{sma}	8	%	Deformação recuperável da liga de SMA.
γ	120	Grau	Ângulo máximo da alavanca em relação à carcaça, (PONTES 2013).
γ'	60	Grau	Ângulo mínimo da alavanca em relação à carcaça, (PONTES 2013).

4.3 Cálculo da força no cabo condutor

Para a obtenção da força atuante no cabo condutor junto aos suportes, deve-se inicialmente obter o ângulo α que a força tangente ao cabo faz com a horizontal, utilizando a Equação 4.1.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{p \cdot a}{8T_0} = 4,39^\circ. \quad (4.1)$$

onde T_0 é 1478,8 kgf, a é igual à 400 m e p igual à 0,5575 kgf/m .

Em seguida, através da Equação 4.2, pode-se calcular a força axial T no ponto de maior esforço, que ocorre com o ângulo α em relação à horizontal:

$$T = \frac{T_0}{\cos \alpha} = 1483,16 \text{ kgf} = 14.535,01 \text{ N} , \quad (4.2)$$

onde T_0 é 1478,8 kgf e α igual à 4,39 °.

4.4 Determinação das flechas e limites permitidos

Para obtenção da flecha à temperatura ambiente (24°C) em função da tensão de pré esticamento e da geometria do vão, usa-se a Equação (3.5):

$$f = \frac{p \cdot a^2}{8T_0} = 7,54 \text{ m} , \quad (4.3)$$

onde p é 0,5575 kgf/m, a é 400 m e T_0 é igual à 1478,8 kgf.

Para obtenção do comprimento do cabo condutor à temperatura ambiente (24°C), tem-se a Equação 4.4:

$$L = a + \frac{8 \cdot f^2}{3a} = 400,38 \text{ m} , \quad (4.4)$$

onde f é 7,54 m, a é igual à 400 m e T_0 é 1478,8 kgf.

A medida que a temperatura do cabo aumenta, ele sofre uma expansão linear que aumenta o seu comprimento e, conseqüentemente, sua flecha.

Para o presente estudo de caso, será considerada como limite a flecha de 9,24 m. Qualquer aumento na flecha do cabo a partir dessa flecha limite definida será considerado infração da altura de segurança permitida. Assim, a temperatura referente à flecha limite permitida para esse estudo é de 50 °C, conforme é demonstrado a seguir.

Obtêm-se o comprimento do cabo condutor na temperatura limite através da equação 3.7:

$$L_f(\bar{T}) = L_i + [L_i \cdot \alpha_t \cdot (\bar{T} - \bar{T}_0)],$$

$$L_f(50) = 400,39 + [400,39 \cdot 0,00001825 \cdot (50 - 24)],$$

$$L_f(50) = 400,57 \text{ m.}$$

onde α é 0,00001825 [1/°C].

Em seguida, calcula-se a flecha máxima permitida através da equação 3.8:

$$f_{50^\circ\text{C}} = \sqrt{3 \cdot a \left(\frac{L_f(50) - a}{8} \right)} = 9,36 \text{ m},$$

onde a é 400 m e $L_f(50)$ é igual à 400,57 m.

Uma temperatura máxima de operação comumente alcança por condutores desse tipo é de 70°C (Fadel, 2010). Utilizando essa temperatura como base para cálculo de temperatura excedida (acima de 50°C) obtêm-se os seguintes valores de comprimento de cabo e flecha para essa temperatura:

Comprimento do cabo condutor:

$$L_f(\bar{T}) = L_i + [L_i \cdot \alpha_t \cdot (\bar{T} - \bar{T}_0)],$$

$$L_f(70) = 400,57 + [400,57 \cdot 0,00001825 \cdot (70 - 50)],$$

$$L_{70^\circ} = 400,72 \text{ m.}$$

Flecha:

$$f_{70^\circ\text{C}} = \sqrt{3 \cdot a \left(\frac{L_f(70) - a}{8} \right)} = 10,36 \text{ m.}$$

onde a é 400 m e $L_f(70)$ é igual à 400,72 m.

Assim, observa-se que quando o condutor atinge uma temperatura de 70°C sua flecha é de 10,36m. A flecha máxima tolerada para esse condutor é 9,24 m. Assim, tem-se uma violação de 1,11 m.

$$f_{\text{violação}} = f_{70^{\circ}\text{C}} - f_{50^{\circ}\text{C}} = 1,12 \text{ m.} \quad (4.5)$$

4.5 Dimensionamento da variação de comprimento do SLiM

O comprimento total que o dispositivo de mitigação deverá realizar para retracionar o cabo condutor até o comprimento estabelecido como limite, ΔL_{cabo} é dado por:

$$\Delta L_{\text{cabo}} = L_f(70) - L_f(50) = 400,72 - 400,57 = 0,14621 \text{ m.} \quad (4.6)$$

A partir dessa variação de comprimento, serão dimensionados os outros parâmetros do dispositivo.

4.6 Dimensionamento da variação de comprimento do atuador

A variação de comprimento do atuador SMA, ΔL_{SMA} , depende da deformação recuperável da liga com memória de forma ε_{SMA} e do comprimento inicial do atuador a frio L_F .

Considerando-se um atuador SMA com seu comprimento a frio L_F de 1m, e considerando-se também que a liga utilizada é NiTi comumente disponível comercialmente, pode-se considerar a deformação recuperável típica de $\varepsilon_{\text{SMA}} = 8\%$, daí tem-se a partir da equação 3.11:

$$\Delta L_{\text{SMA}} = \varepsilon_{\text{SMA}} \cdot L_F = 0,08 \cdot 1 = 0,08 \text{ m.}$$

4.7 Dimensionamento da Alavanca

A partir dos valores de ΔL_{cabo} e ΔL_{SMA} , obtem-se o valor da relação de amplificação R através da equação 3.21, que deverá ser realizada pela alavanca.

$$R = \frac{\Delta L_{\text{cabo}}}{\Delta L_{\text{SMA}}} = \frac{c}{s} = 1,83. \quad (4.7)$$

Os comprimentos c e s são obtidos pelas equações 3.18 e 3.16 respectivamente. Considerando $\gamma = 120^{\circ}$ e $\gamma' = 60^{\circ}$, obtem-se um ângulo $\gamma'' = 60^{\circ}$. Assim, tem-se:

$$\Delta L_{cabo} = 2 \cdot c \cdot \sin \frac{\gamma''}{2} ,$$

$$0,14621 = 2 \cdot c \cdot \sin \frac{60}{2} ,$$

$$c = 0,1462 \text{ m} .$$

de 4.7, tem-se s :

$$s = \frac{c}{R} = 0,08 \text{ m} .$$

4.8 Dimensões do Dispositivo

Após a obtenção de ΔL_{cabo} e ΔL_{SMA} e das dimensões da alavanca, r é dado pela equação 3.2:

$$L_F^2 = r^2 + s^2 - 2 \cdot r \cdot s \cdot \cos \gamma ,$$

$$1^2 = r^2 + 0,08^2 - 2 \cdot r \cdot 0,08 \cdot \cos 120^\circ ,$$

$$r = 0,9575 \text{ m} .$$

Para obtenção da distância d_1 , utiliza-se a equação 3.1:

$$d_1^2 = c^2 + r^2 - 2 \cdot c \cdot r \cdot \cos \gamma ,$$

$$d_1 = 0,15^2 + 0,9575^2 - 2 \cdot 0,15 \cdot 0,9575 \cdot \cos 120^\circ ,$$

$$d_1 = 1,04 \text{ m} .$$

Para obtenção da distância d_2 , utiliza-se a equação 3.3:

$$d_2^2 = c^2 + r^2 - 2 \cdot c \cdot r \cdot \cos \gamma' ,$$

$$d_2 = 0,15^2 + 0,9575^2 - 2 \cdot 0,15 \cdot 0,9575 \cdot \cos 60^\circ ,$$

$$d_2 = 0,89 \text{ m} .$$

4.9 Dimensionamento do feixe de fios de SMA

A força F_{SMA} depende do ponto de aplicação s no braço de alavanca e logo, depende também da relação de amplificação R . Assim, depois de obtido essa relação, a força a que o feixe de fios de SMA será submetido é dada por:

$$F_{sma} = T \cdot R = 14535,01 \cdot 1,83 = 26,5 \text{ kN.} \quad (4.8)$$

onde T é a força que o cabo condutor exerce sobre a alavanca e R é a relação de amplificação.

Para a determinação da área transversal do atuador SMA, é considerado o menor valor da variação de tensão apresentada na Tabela 4.3, $\sigma_{sma} = 150 \text{ MPa}$ para a liga de NiTi. Assim, tem-se:

$$\sigma_{sma} = \frac{F_{sma}}{A_{sma}}, \quad \text{ou} \quad A_{sma} = \frac{F_{sma}}{\sigma_{sma}} = 177,1 \text{ mm}^2, \quad (4.9)$$

onde F_{SMA} é a força necessária para o feixe de SMA acionar a alavanca e σ_{sma} é a tensão de reorientação de martensita da liga de NiTi (150 MPa).

A área obtida pela equação 4.9 é a área transversal total necessária para que o feixe de fios de NiTi suporte os esforços provenientes da ação de tracionamento do cabo condutor. A partir dessa área, pode-se determinar a quantidade de fios que compõe o feixe do atuador SMA.

Com base nos diâmetros de fios SMA comumente encontrados no mercado, considera-se um fio de diâmetro 2,67mm. Assim, tem-se:

$$n_{fios} = \frac{A_{sma}}{A_{fio}} = \frac{17,71 \times 10^{-5}}{5,6 \times 10^{-6}} = 31,6, \quad (4.10)$$

$$n_{fios} = 32.$$

4.10 Análise de tensões e deformações

No presente tópico é apresentada uma análise de tensões dos principais componentes estruturais do SLiM, com base no dimensionamento obtido no estudo de caso. Na construção dos modelos, foram utilizados materiais e espessuras de chapas metálicas disponíveis no

mercado (Anexo IV). A análise de tensões e deformações dos componentes do SLiM foi feita através de elementos finitos, no programa Solidworks® Premium v.20.0.0.5022-2012, pelo critério de Von Mises. O estudo das cargas aplicadas assume que o material envolvido é elástico linear, sofre pequenas deformações em relação ao seu tamanho total e que as cargas aplicadas sobre ele são estáticas, ou seja, não variam com o tempo e são aplicadas lentamente.

4.11 Carcaça

A Tabela 4.5 resume os valores calculados que foram utilizados no modelo da carcaça construído. A Figura 4.2 mostra a carcaça e suas respectivas dimensões.

Tabela 4-5 - Dimensões e características do modelo da carcaça

VARIÁVEL	VALOR	UNIDADE	DESCRIÇÃO
r	0,9575	m	Comprimento total.
L_F	1,0000	m	Comprimento atuador SMA frio.
L_Q	0,9201	m	Comprimento atuador SMA quente.
d_1	1,0384	m	Distância 1-3 característica a frio.
d_2	0,8934	m	Distância 1-3' característica a quente.
γ	120	°	Ângulo máximo da alavanca.
'	60	°	Ângulo mínimo da alavanca.

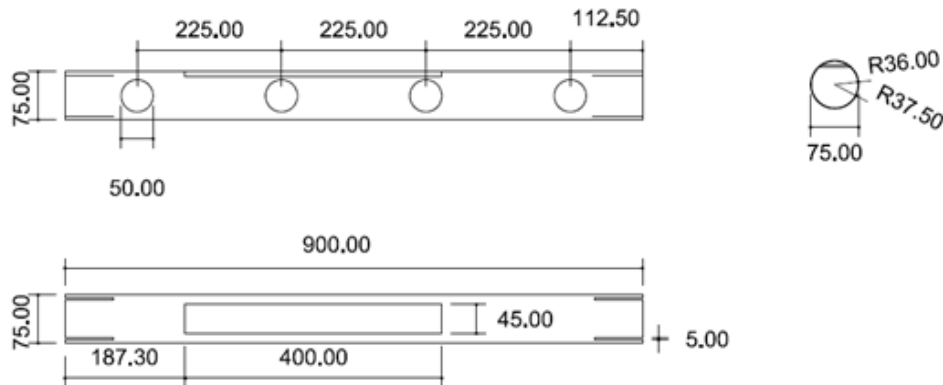


Figura 4-2 - Dimensões do modelo da carcaça.

A Figura 4.3 mostra o modelo construído com a respectiva malha para a análise através de elementos finitos e a Tabela 4.6 mostra as informações da malha.

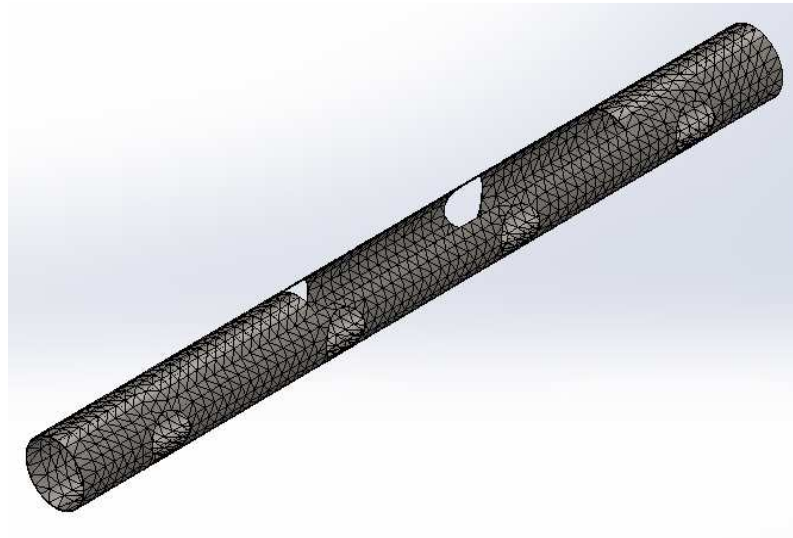


Figura 4-3 - Malha modelo carcaça
Tabela 4-6 - Informações da malha modelo carcaça.

CARACTERÍSTICA	QUANTIDADE	UNIDADE
Tipo de malha	Sólida	-
Total de nós	16191	-
Total de elementos	7850	-
Proporção máxima	402.92	-
Massa	1.36734	kg
Volume	0.000173082	m ³
Densidade	7900	kg/m ³
Peso	13.4	N

O material utilizado para a carcaça foi o aço AISI 1020 e suas características são apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4-7 - Propriedades do material da carcaça

AÇO UTILIZADO	TIPO DO MODELO	CRITÉRIO DE FALHA	LIMITE DE ESCOAMENTO	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO
AISI 1020	Isotrópico linear elástico	Von Mises	3.51571e+008 N/m ²	4.20507e+008 N/m ²

Para a carga aplicada sobre a carcaça, foi considerado que uma de suas extremidades permanece fixa e a outra recebe o carregamento, conforme pode ser observado na Figura 4-4. As propriedades volumétricas do modelo podem ser encontradas detalhadamente no Anexo IV.

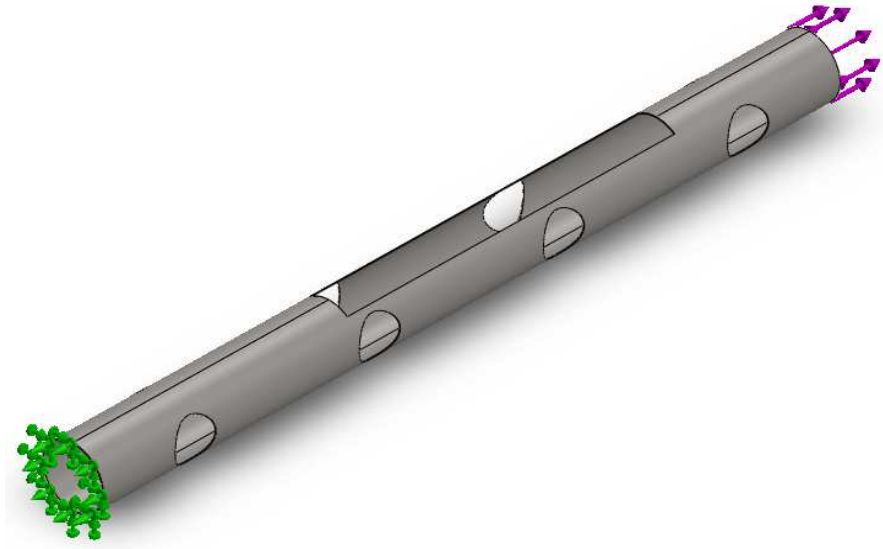


Figura 4-4 - Aplicação da carga na carcaça.

Com a aplicação da carga no modelo construído, obtém-se o campo de tensões mostrado na figura Figura 4-5.

Através do citado critério, pode-se concluir que a tensão máxima ocorre no rasgo da carcaça previsto para o movimento do atuador SMA (ponto de *máx* na Figura 4-5), possui um valor de 265,37 MPa e está consideravelmente abaixo do limite de escoamento do aço selecionado para a construção do dispositivo (351,57 MPa).

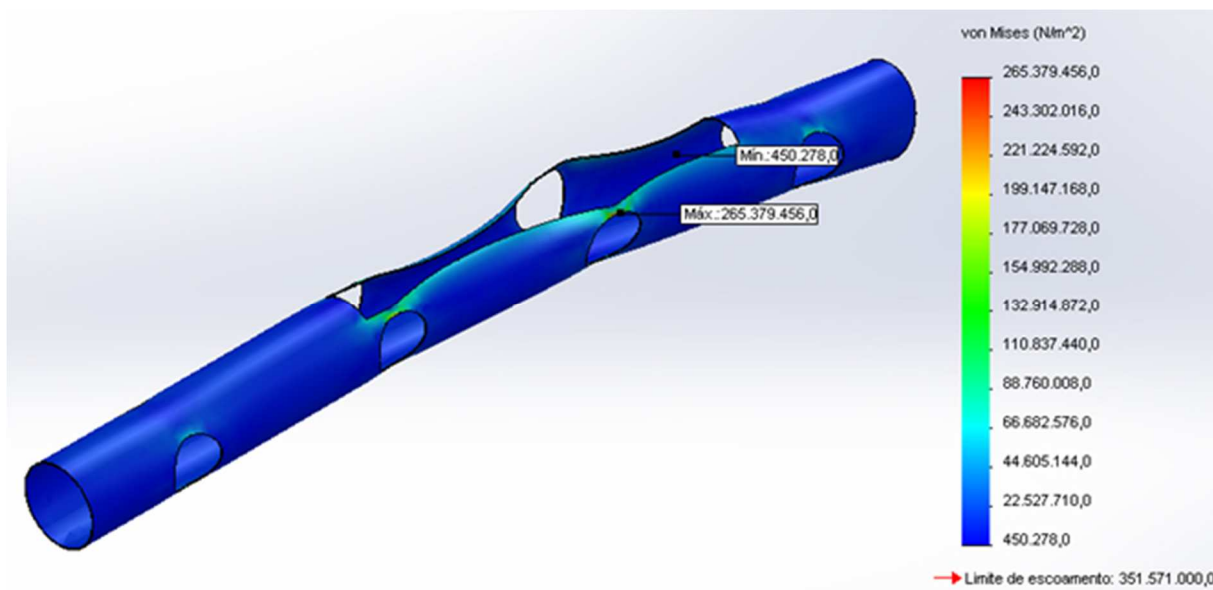


Figura 4-5 - Campo de tensões na carcaça.

Na Figura 4.6 pode ser observado os deslocamentos máximos que ocorreram na carcaça, que alcança seu ponto máximo no lado em que é instalada a alavanca (ponto *máx* mostrado na Figura 4-6, em vermelho).

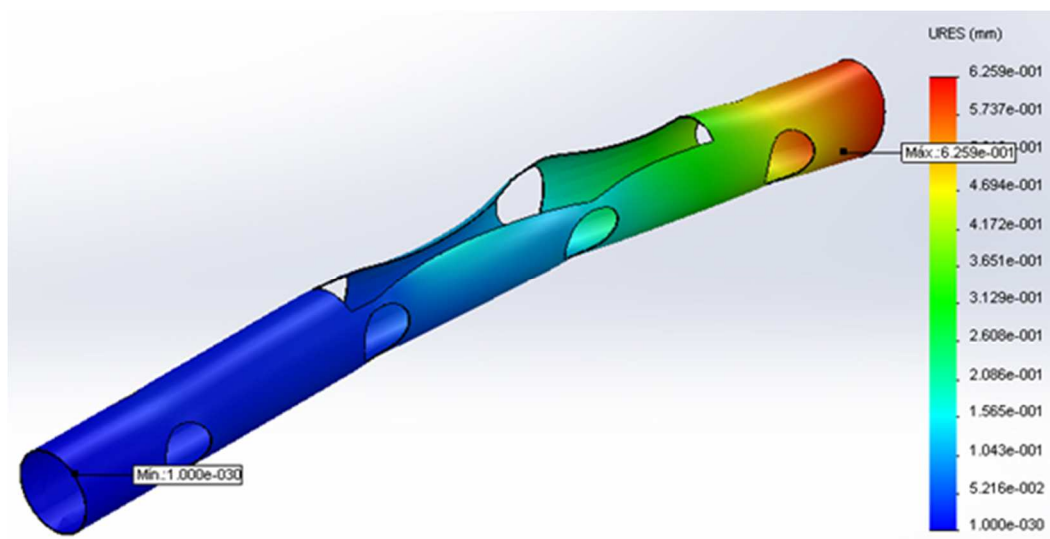


Figura 4-6 - Campo de deslocamentos da carcaça.

A análise completa das peças do dispositivo (incluindo uma opção de geometria retangular da carcaça do dispositivo), juntamente com os resultados obtidos podem ser encontrados no anexo IV.

4.12 Alavanca

Da mesma forma, foi realizada a análise da alavanca do SLiM, utilizando as mesmas considerações para o cálculo da carcaça.

A Tabela 4.8 resume os valores calculados que foram utilizados no modelo da alavanca. A Figura 4.7 mostra a alavanca e suas respectivas dimensões.

Tabela 4-8 - Dimensões e características do modelo da alavanca

VARIÁVEL	VALOR	UNIDADE	DESCRIÇÃO
c	0,1462	m	Distância c .
s	0,0800	m	Distância s .
\varnothing_a	0,0158	m	Furo referente ao pino P_a .
\varnothing_b	0,0127	m	Furo referente ao pino P_b .
\varnothing_c	0,0158	m	Furo referente ao pino P_c .
R	1,830	-	Relação de amplificação.
espessura	0,0200	m	Espessura da alavanca.

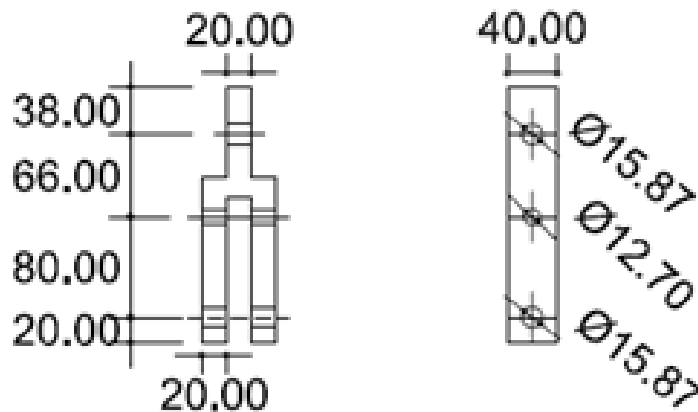


Figura 4-7 - Dimensões do modelo da alavanca.

A Figura 4.8 mostra o modelo construído com a respectiva malha para a análise através de elementos finitos e a Tabela 4.9 mostra as informações da malha.

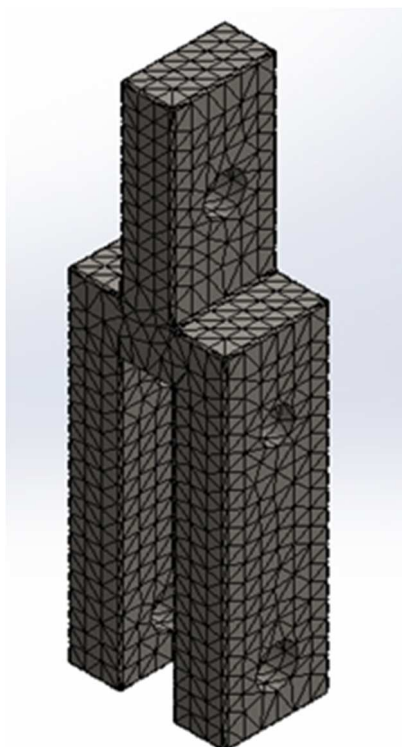


Figura 4-8 - Malha modelo alavanca.

Tabela 4-9 - Informações da malha modelo alavanca

CARACTERÍSTICA	QUANTIDADE	UNIDADE
Tipo de malha	Sólida	-
Total de nós	15488	-
Total de elementos	9239	-
Proporção máxima	13.347	-
Massa	2.10222	kg
Volume	0.000266104	m ³
Densidade	7900	kg/m ³
Peso	20.6018	N

O material utilizado para a alavanca foi o aço AISI 1020 e suas características são apresentadas na Tabela 4.10

Tabela 4-10 - Propriedades do material da alavanca

AÇO UTILIZADO	TIPO DO MODELO	CRITÉRIO DE FALHA	LIMITE DE ESCOAMENTO	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO
AISI 1020	Isotrópico linear elástico	Von Mises	3.51571e+008 N/m ²	4.20507e+008 N/m ²

Para a carga aplicada sobre a alavanca, foi considerado que os furos referentes aos pinos P_a e P_c permanecem fixos e o furo referente ao pino P_b recebe o carregamento proveniente do atuador SMA, conforme pode ser observado na Figura 4-9. As propriedades volumétricas do modelo podem ser encontradas detalhadamente no Anexo IV.

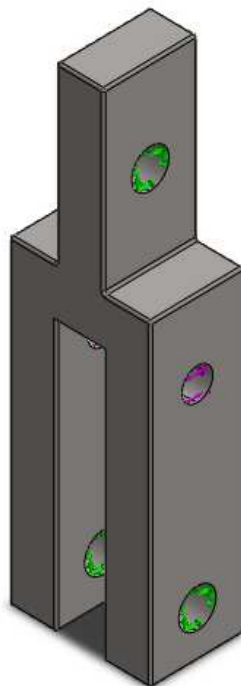


Figura 4-9 - Aplicação da carga na alavanca.

Com a aplicação da carga no modelo construído, obtém-se o campo de tensões mostrado na Figura 4.10.

Através do critério de Von Mises, pode-se concluir que a tensão máxima na alavanca ocorre no furo relativo ao pino P_a , em que ela traciona o cabo condutor (conforme Figura 4.10), possui um valor de 124,23 MPa e está consideravelmente abaixo do limite de escoamento do aço selecionado para a construção do dispositivo (351,57 MPa).

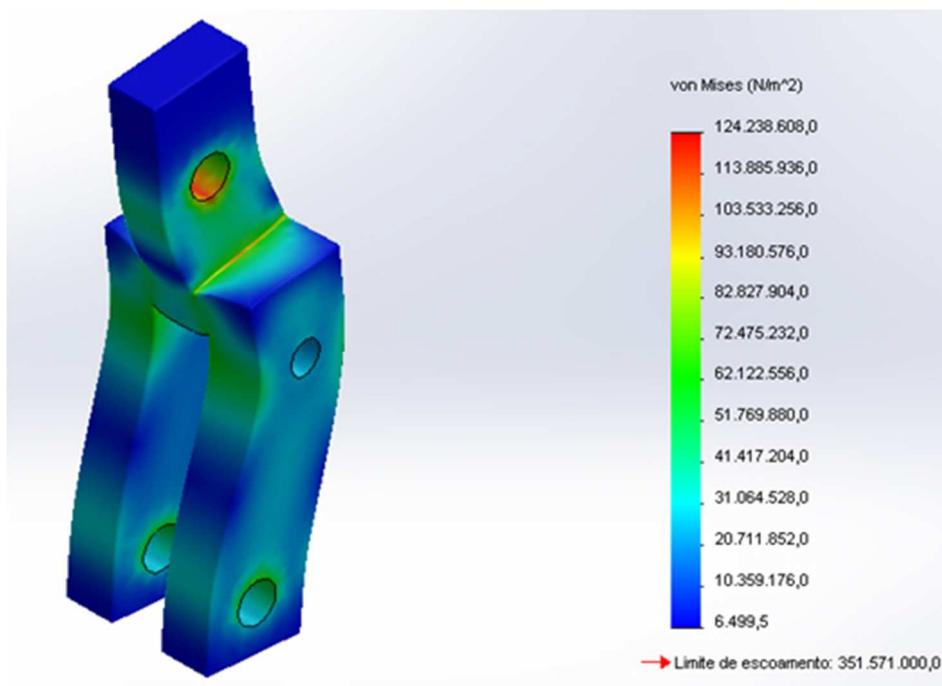


Figura 4-10 - Campo de tensões na alavanca.

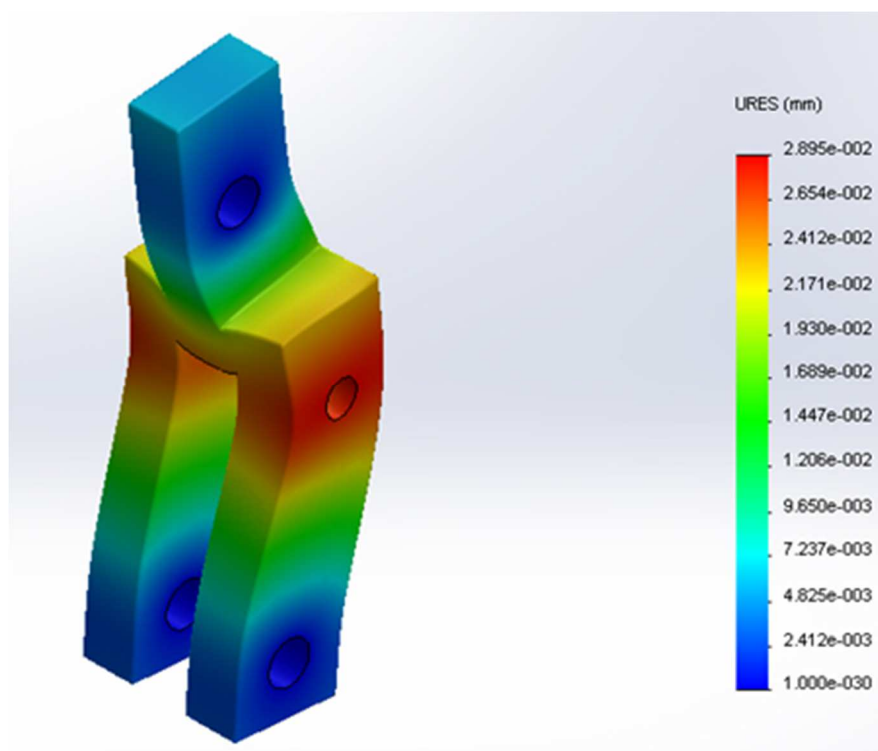


Figura 4-11 - Campo de deslocamentos para alavanca.

Na Figura 4.11 podem ser observados os deslocamentos que ocorreram na alavanca do SLiM, que alcança seu ponto máximo na região referente ao pino P_b , em vermelho. Os resultados completos da análise realizada podem ser encontrados no anexo IV.

4.13 Placas de fixação

As placas são utilizadas para a fixação da alavanca na carcaça do SLiM. Foi realizada a análise das placas utilizando-se as mesmas considerações para o cálculo da carcaça e da alavanca. A Tabela 4.11 resume os valores calculados que foram utilizados no modelo da alavanca. A Figura 4.12 mostra a alavanca e suas respectivas dimensões.

Tabela 4-11 - Dimensões e características do modelo das placas de fixação

VARIÁVEL	VALOR	UNIDADE	DESCRIÇÃO
comprimento	0,1750	m	Comprimento da placa.
altura	0,0650	m	Altura da placa.
espessura	0,0500	m	Espessura da placa.
\varnothing_c	0,0158	m	Furo referente ao pino P_c .

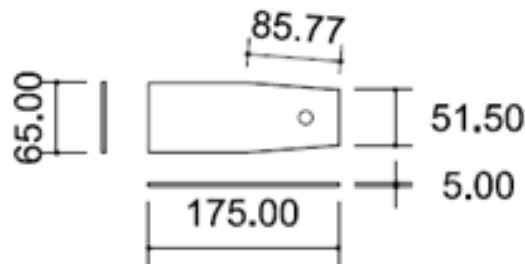


Figura 4-12 - Dimensões do modelo das placas de fixação.

A Figura 4.13 mostra o modelo construído com a respectiva malha para a análise através de elementos finitos e a Tabela 4.12 mostra as informações da malha.

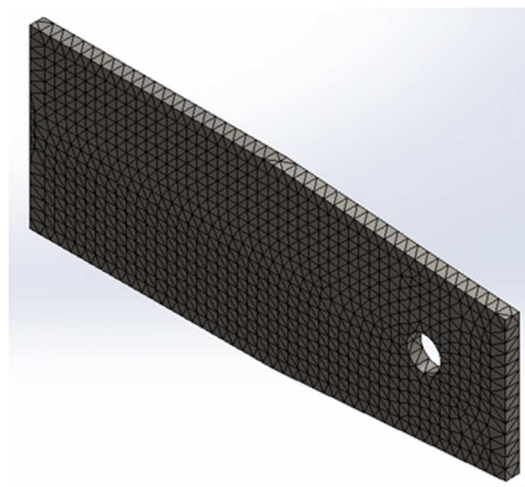


Figura 4-13 - Malha modelo placa de fixação.

Tabela 4-12 - Informações da malha modelo placas de fixação

CARACTERÍSTICA	QUANTIDADE	UNIDADE
Tipo de malha	Sólida	-
Total de nós	15289	-
Total de elementos	8896	-
Proporção máxima	3.8982	-
Massa	0.421531	kg
Volume	5.33583e-005	m ³
Densidade	7900	kg/m ³
Peso	4.131	N

O material utilizado para as placas foi o aço AISI 1020 e suas características são apresentadas na Tabela 4.13.

Tabela 4-13 - Propriedades do material das placas de fixação

AÇO UTILIZADO	TIPO DO MODELO	CRITÉRIO DE FALHA	LIMITE DE ESCOAMENTO	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO
AISI 1020	Isotrópico linear elástico	Von Mises	3.51571e+008 N/m ²	4.20507e+008 N/m ²

Para a carga aplicada sobre as placas de fixação, foi considerado que a sua face anterior permanece fixa e o furo referente ao pino P_c recebe o carregamento, conforme pode ser observado na Figura 4.14 As propriedades volumétricas do modelo podem ser encontradas detalhadamente no Anexo IV.

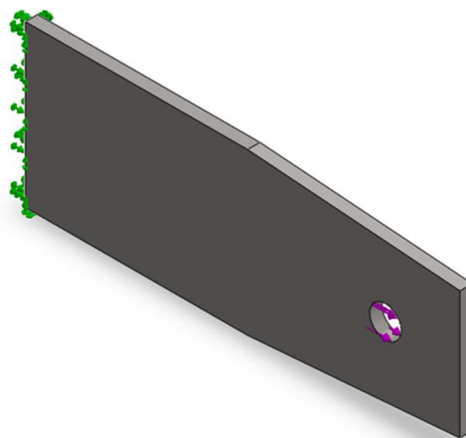


Figura 4-14 - Aplicação da carga nas placas de fixação.

Com a aplicação da carga no modelo construído, obtém-se o campo de tensões mostrado na Figura 4.15.

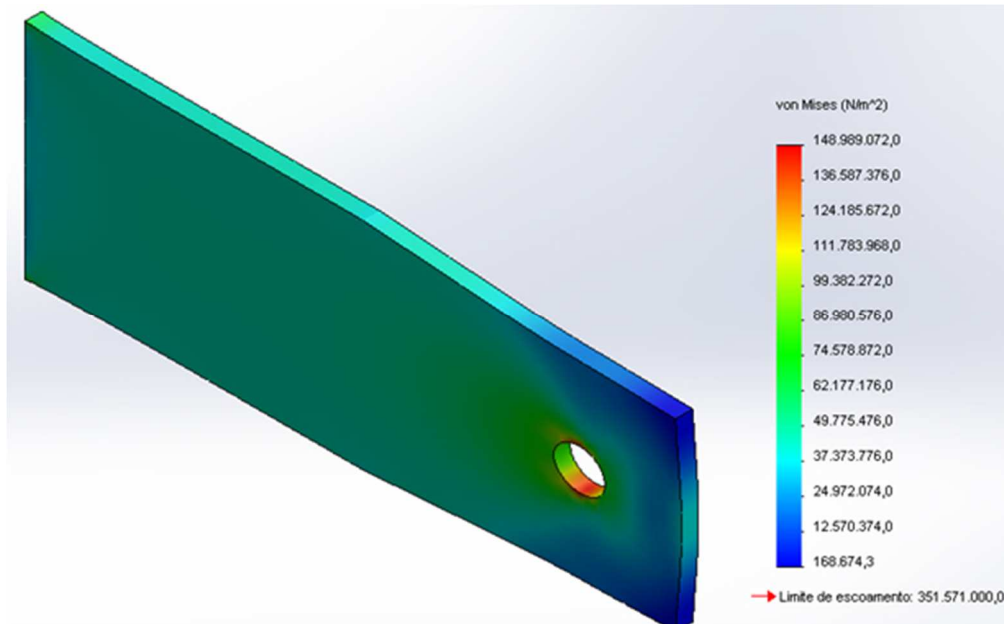


Figura 4-15 - Campo de tensões nas placas de fixação.

Através do critério de Von Mises, pode-se concluir que a tensão máxima nas placas de fixação ocorre em seu furo (conforme Figura 4.15) e possui um valor de 148,98 MPa e está consideravelmente abaixo do limite de escoamento do aço selecionado para a construção do dispositivo (351,57 MPa).

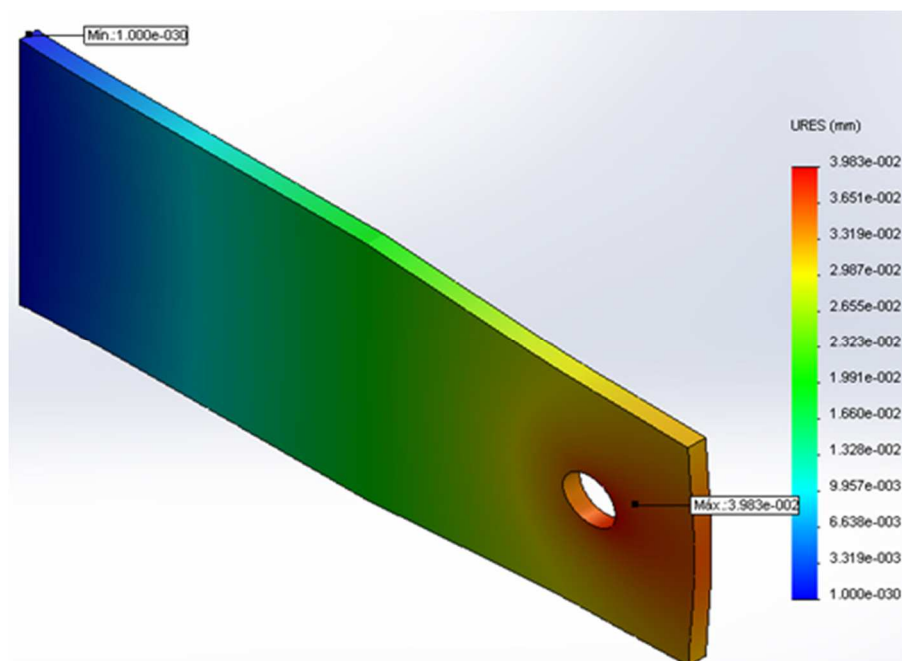


Figura 4-16 - Campo de deslocamentos para as placas de fixação.

Na Figura 4.16 podem ser observados os deslocamentos que ocorreram nas placas de fixação do SLiM, que alcança seu ponto máximo na região em vermelho. Os resultados completos da análise realizada podem ser encontrados no anexo IV.

4.14 Desenhos Técnicos do Dispositivo Dimensionado

Com os dados obtidos no estudo de caso apresentado no presente capítulo foi possível a realização dos desenhos técnicos referentes ao dispositivo dimensionado, utilizando-se o programa AUTOCAD® v.2013. Todos os desenhos técnicos realizados são encontrados no ANEXO III.

Considerando alguns possíveis formatos para a seção transversal da carcaça do dispositivo, no presente trabalho optou-se por apresentar dois tipos de seção transversal para a carcaça, os formatos cilíndrico e retangular. O formato cilíndrico provavelmente apresentará uma dificuldade construtiva maior que o dispositivo com seção transversal retangular.

Para os dois tipos de carcaças existem diferentes placas de fixação a serem utilizadas. As placas de fixação deverão ser soldadas à carcaça do dispositivo e é nelas que são posicionados os pinos que permitem a fixação do atuador SMA.

5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o intuito de prever o funcionamento do dispositivo de mitigação projetado, foi realizada uma simulação numérica para prever o comportamento do atuador SMA, e consequentemente o comportamento do dispositivo. Essa simulação foi realizada através da implementação no programa MATLAB® do Modelo de Brinson (1993) que descreve o comportamento termomecânico das ligas com memória de forma. No ANEXO V pode ser encontrado o código fonte utilizado no programa MATLAB® para a implementação do modelo de Brinson.

5.1 Dados de entrada

As constantes de transformação utilizadas nas equações 2.1 à 2.15, referentes à aplicação do modelo de Brinson, foram obtidas de uma liga típica de NiTi fornecidas por Dye (1990) e Liang (1990) e são listadas na Tabela 5.1.

Tabela 5-1 – Constantes de transformação

Módulo de Elasticidade	Constantes de Transformação
$E_A = 67 \times 10^3 \text{ MPa}$	$C_M = 8 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$
$E_M = 26,3 \times 10^3 \text{ MPa}$	$C_A = 13,8 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$
$\tau = 0,55 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$	$\sigma_s^{cr} = 100 \text{ MPa}$
	$\sigma_s^{cr} = 170 \text{ MPa}$

Os parâmetros geométricos e temperaturas considerados para o dispositivo são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5-2 - Parâmetros geométricos e temperaturas do dispositivo

VARIÁVEL	VALOR	UNIDADE	DESCRIÇÃO
a	400	m	Vão entre suportes.
p	5,575	N/m	Peso por metro do cabo.
F_{rup}	72.535,14	N	Carga de Ruptura do cabo.
T_0	14.507,03	N	EDS, 20% da carga de ruptura do cabo.
σ_{sma}	100	MPa	Tensão no atuador SMA.
L_0	1	m	Comprimento do atuador SMA.

\bar{t}_0	24	°C	Temperatura ambiente.
\bar{t}_1	50	°C	Temperatura máxima admitida para flecha segura.
\bar{t}_2	70	°C	Temperatura máxima de operação.
α	$18,25 \times 10^{-6}$	°C ⁻¹	Coefficiente de dilatação linear do cabo condutor.
γ	120	°	Ângulo máximo da alavanca em relação à carcaça.
γ'	60	°	Ângulo mínimo da alavanca em relação à carcaça.

A tensão considerada no atuador SMA foi obtida utilizando-se o valor da tração no cabo calculado pela equação 4.3 e a área do atuador SMA no valor de $17,71 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ calculado pela equação 4.9. Para a tensão resultante, foi aplicado um coeficiente de segurança de 20%. Resultando assim, em uma tensão $\sigma = 100 \text{ MPa}$.

Para definição dos parâmetros termoelásticos a serem utilizados, foram consideradas 2 ligas hipotéticas que utilizam as temperaturas de transformação típicas de SMA. Para cada uma das duas ligas, foram utilizadas suas respectivas temperaturas de transformação e três diferentes deformações máximas recuperáveis, conforme mostrado na Tab. 5.3.

Tabela 5-3 - Ligas SMA utilizadas

Liga hipotética	M_f	M_s	A_s	A_f	ϵ_{sma}
1A	9°C	26°C	34,5°C	50°C	0,056
1B	9°C	26°C	34,5°C	50°C	0,067
1C	9°C	26°C	34,5°C	50°C	0,080
2A	23°C	32°C	34,5°C	50°C	0,056
2B	23°C	32°C	34,5°C	50°C	0,067
2C	23°C	32°C	34,5°C	50°C	0,080

5.2 Análise do comportamento da SMA

O feixe de SMA está submetido a uma carga constante (proveniente do peso do cabo e da carga de pré-esticamento) a uma temperatura ambiente na fase martensítica, ou seja, deformado quasiplasticamente. Com o aumento da temperatura acima de A_f o atuador SMA inicia uma contração que progride com o aumento da temperatura até que a sua deformação quasiplástica seja completamente recuperada. No instante inicial o atuador SMA encontra-se na temperatura ambiente de 24 °C e em seguida é aquecido até 73 °C. Para a realização dessa análise foi considerada a hipótese de que o atuador SMA está na mesma temperatura do cabo condutor.

As Figuras 5.1 a 5.4 apresentam as curvas deformação do atuador (ϵ_{sma}) em função da temperatura para as ligas 1A, 1B e 1C.

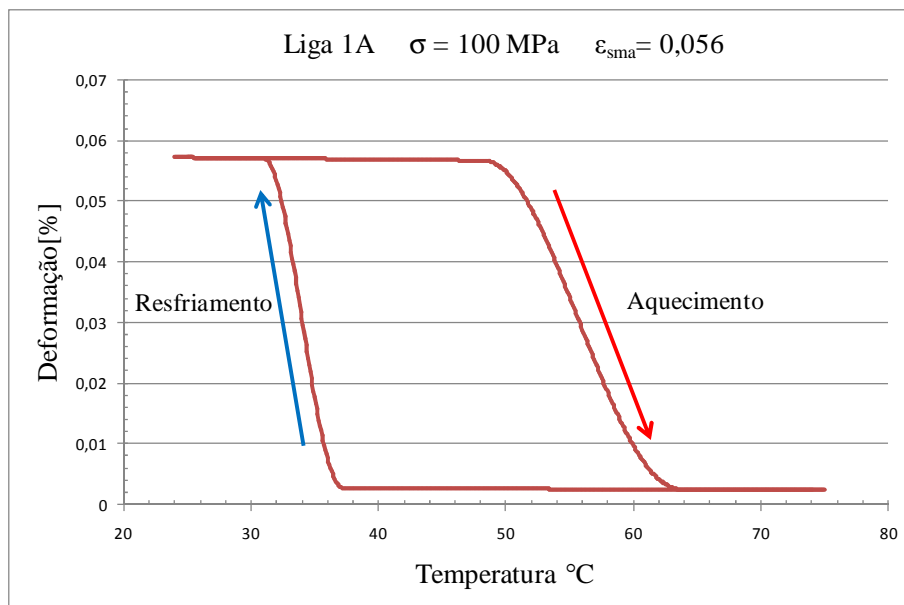


Figura 5-1 - Curva ϵ_{sma} x T - liga 1A.

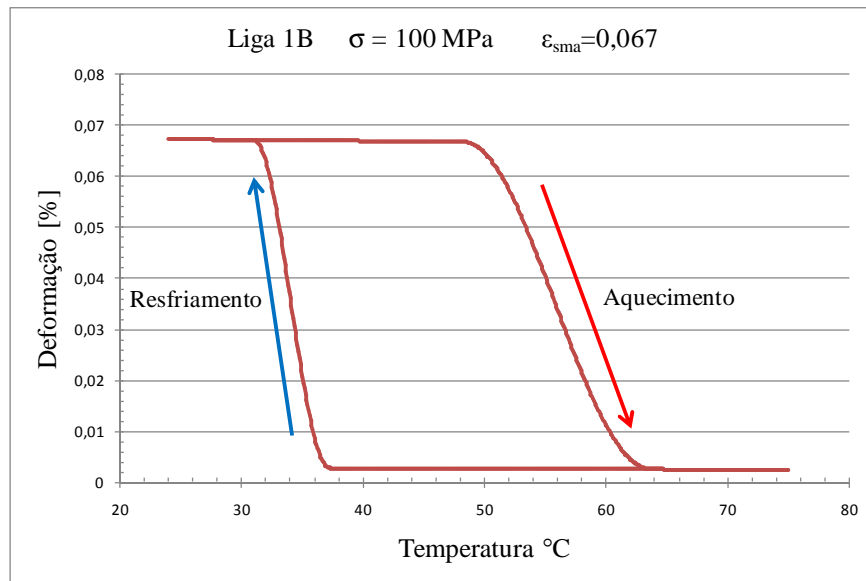


Figura 5-2 - Curva $\epsilon_{\text{sma}} \times T$ - liga 1B.

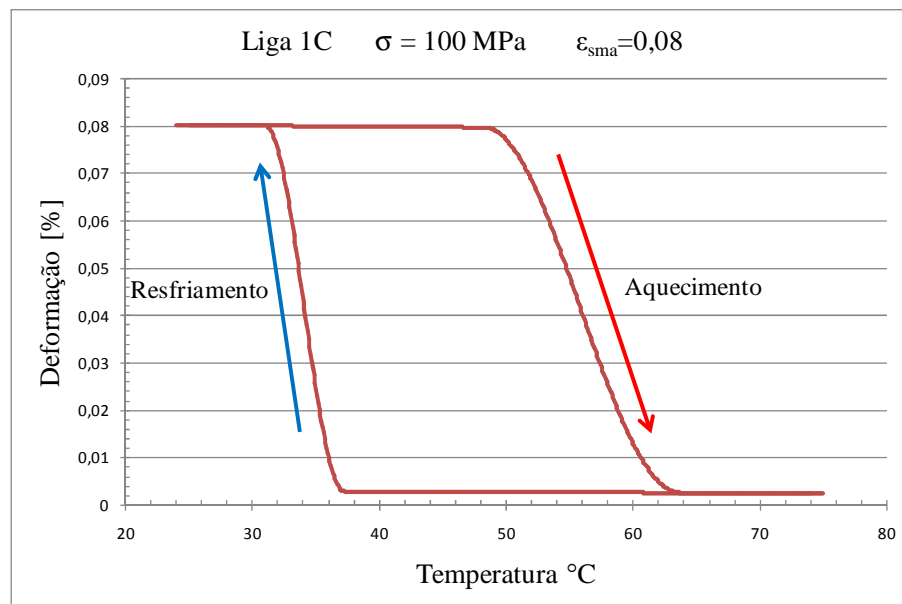


Figura 5-3 - Curva $\epsilon_{\text{sma}} \times T$ - liga 1C.

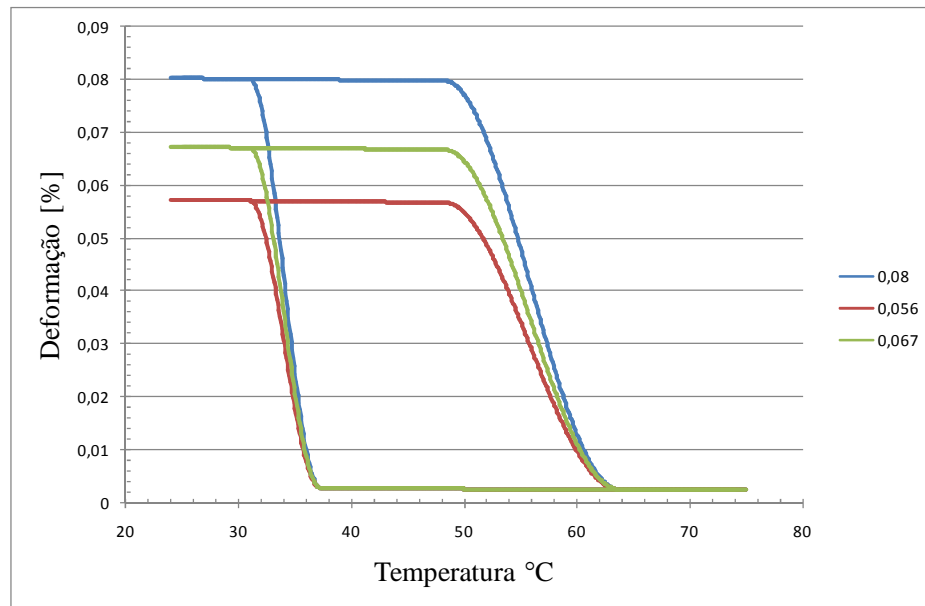


Figura 5-4 - Curvas ϵ_{sma} x T - ligas 1A, 1B e 1C.

As Figuras 5.5 a 5.8 apresentam as curvas de deformação do atuador (ϵ_{sma}) em função da temperatura para as ligas 2A, 2B e 2C.

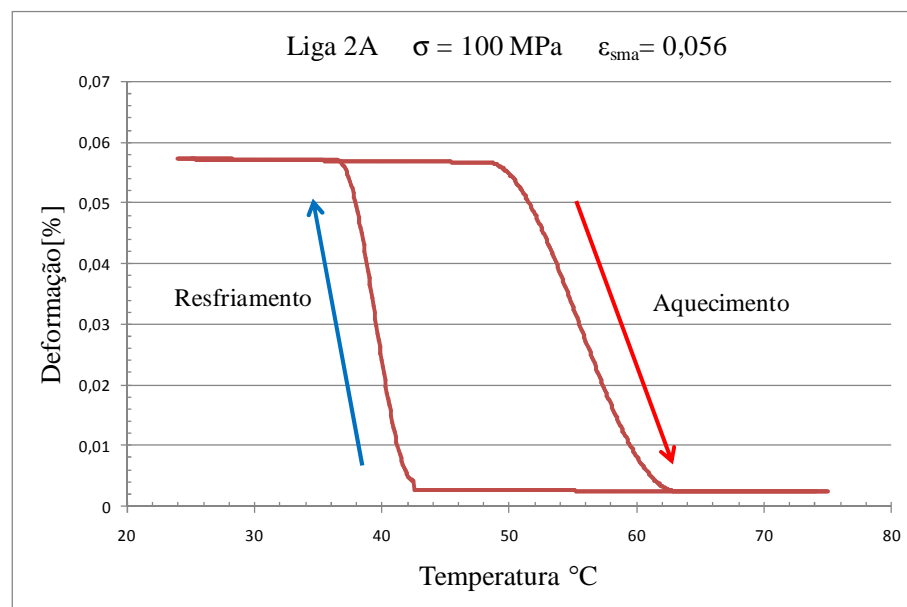


Figura 5-5 - Curva ϵ_{sma} x T - liga 2A.

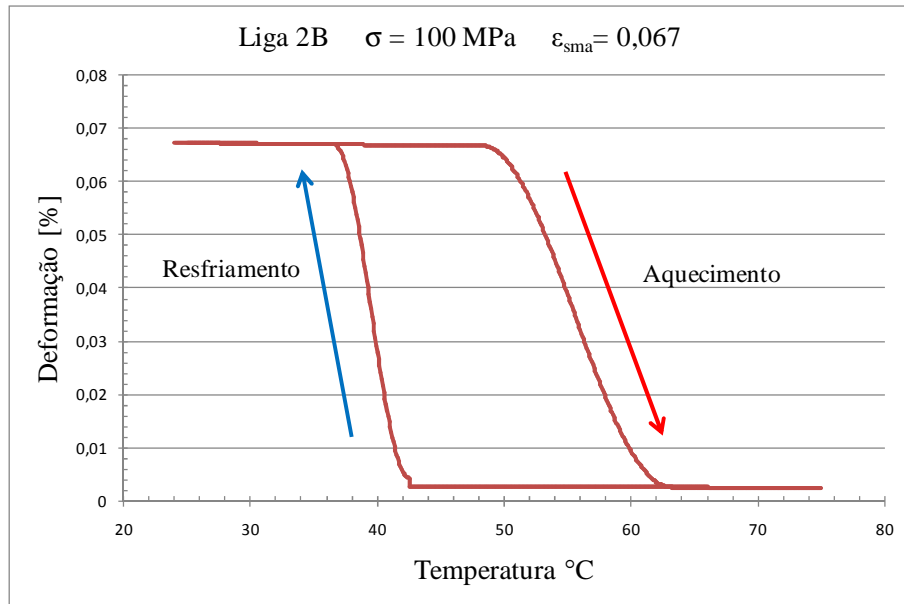


Figura 5-6 - Curva $\epsilon_{\text{sma}} \times T$ - liga 2B.

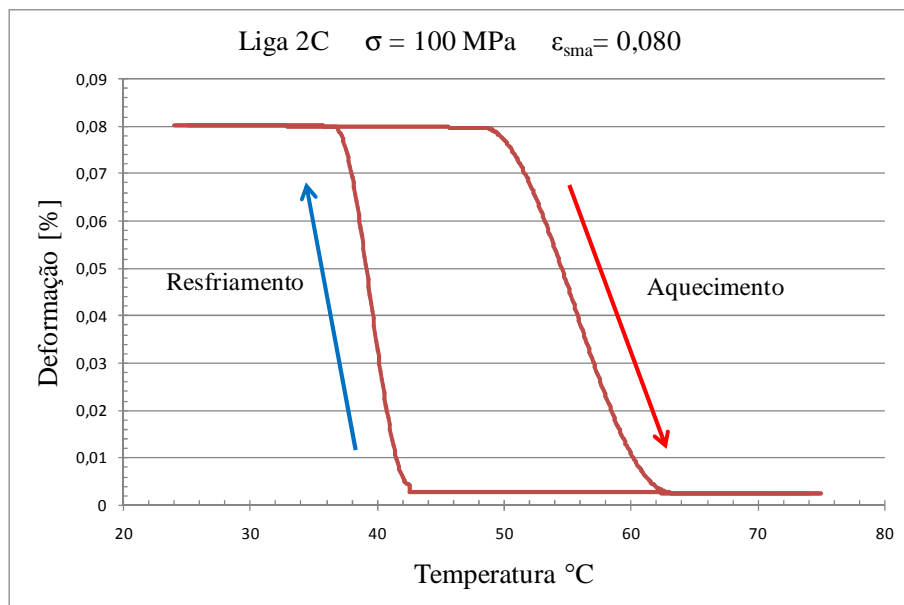


Figura 5-7 - Curva $\epsilon_{\text{sma}} \times T$ - liga 2C.

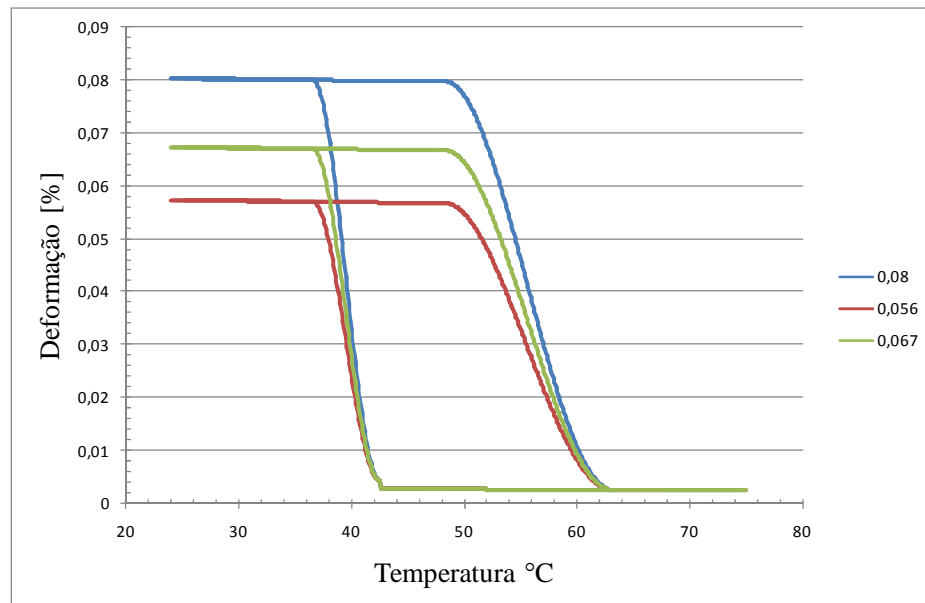


Figura 5-8 - Curvas $\epsilon_{sma} \times T$ - ligas 2A, 2B e 2C.

Na temperatura de 24°C, o atuador SMA simulado encontra-se na fase Martensítica deformado quasiplasticamente, portanto, possui sua deformação inicial com o dispositivo mitigador aberto, em seu estado frio, conforme figura 5.09.

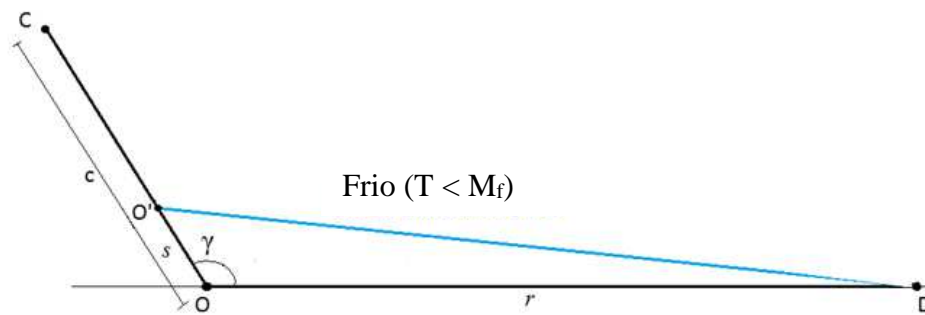


Figura 5-9 - Representação esquemática do SLIM em seu estado frio ($T < M_f$).

Quando a temperatura atinge 50°C, da-se início à transformação inversa, em que o material SMA vai mudando da fase martensítica para austenítica com o aumento da temperatura. À medida que a transformação evolui o atuador vai contraindo-se para sua forma

original e, conseqüentemente, retracionando o cabo condutor e diminuindo sua flecha. Acima da temperatura de 70°C o atuador SMA encontra-se completamente retraído (100% fase austenítica) encontrando-se em seu estado quente, conforme mostrado na Figura 5.10.

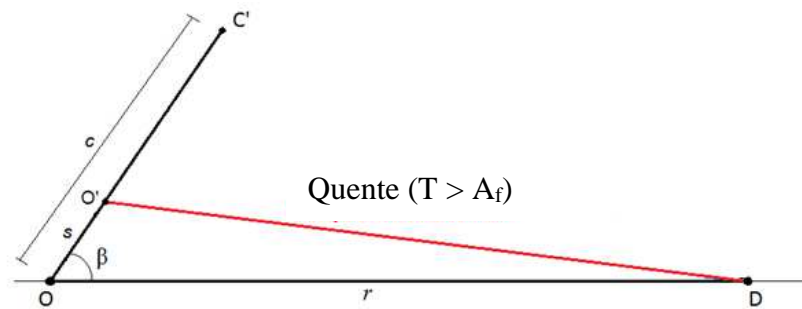


Figura 5-10 - Representação esquemática do SLIM em seu estado frio ($T > A_f$).

5.3 Comportamento do dispositivo

Para que se possa fazer a análise do comportamento do dispositivo foram utilizadas as equações 3.7 e 3.8. A equação 3.7 foi utilizada para descrever a variação do comprimento do cabo em relação à variação de temperatura e a equação 3.8 para descrever a flecha em função da variação da temperatura. Para a obtenção do comportamento do atuador SMA foram utilizadas as equações 3.11 e 3.23, que descrevem a variação no seu comprimento associada à temperatura.

As Figuras 5.11 a 5.13 apresentam as curvas da flecha em função da temperatura para as ligas 1A, 1B e 1C. A curva em vermelho é relativa ao comportamento da flecha durante o aumento de temperatura com a ação do dispositivo. A curva na cor cinza é relativa à projeção do valor da flecha sem a atuação do dispositivo. A curva na cor azul mostra o comportamento da flecha durante a diminuição da temperatura com a ação do dispositivo.

Para cada tipo de liga SMA utilizada é possível observar a ação do dispositivo mitigador a partir da temperatura ambiente (24°C), passando pela temperatura limite (50°C) até a temperatura máxima de operação (70°C). Após a apresentação dos gráficos, serão apresentadas suas respectivas análises no tópico 5.4.

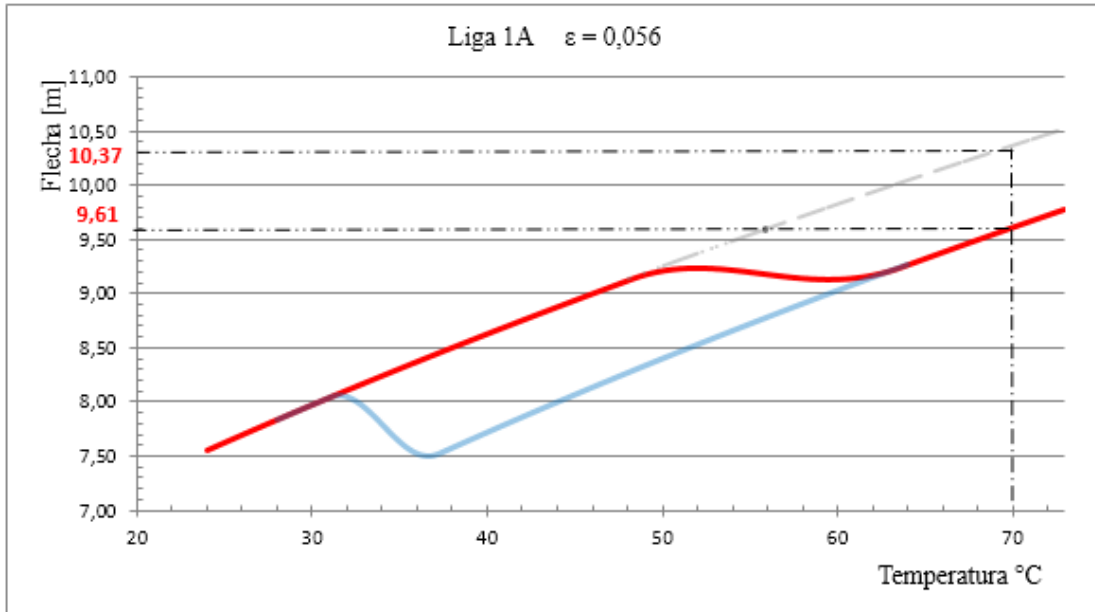


Figura 5-11 - Comportamento da flecha - liga 1A.

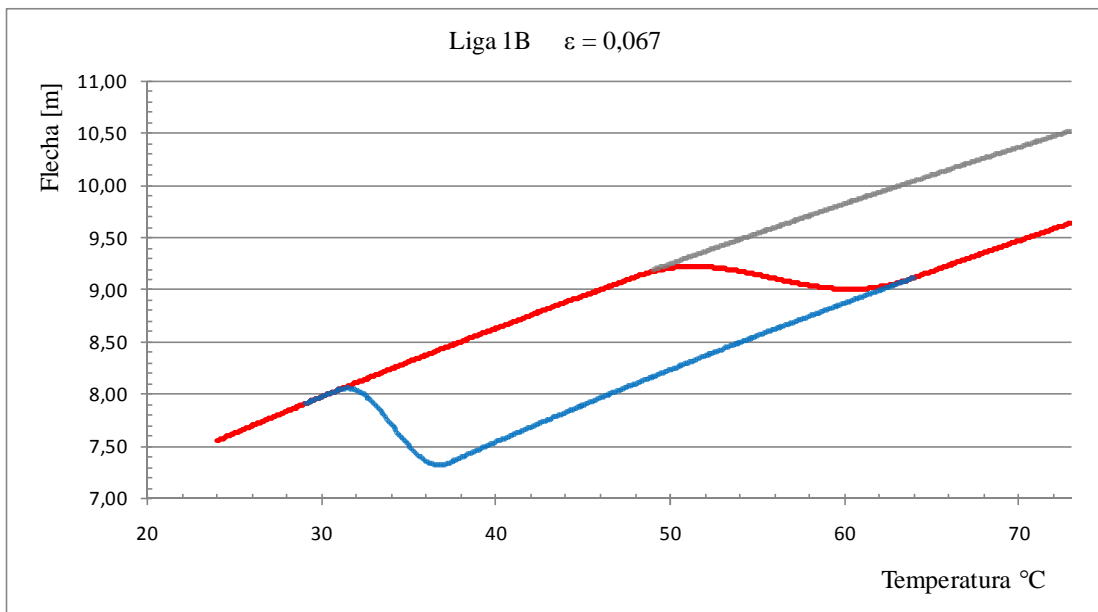


Figura 5-12 - Comportamento da flecha - liga 1B.

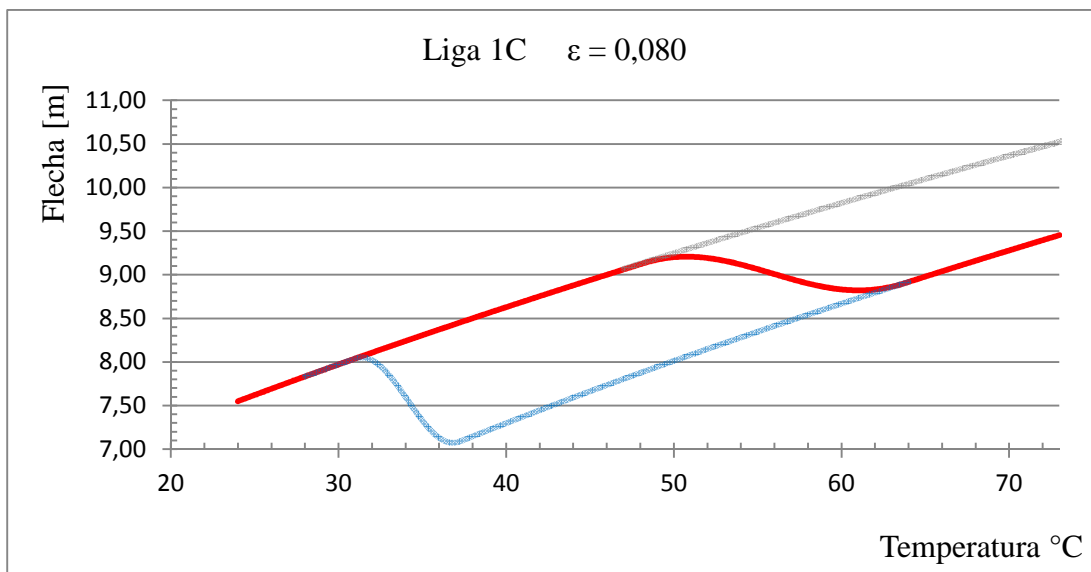


Figura 5-13 - Comportamento da flecha - liga 1C.

As Figuras 5.14 a 5.16 apresentam as curvas da flecha em função da temperatura para as ligas 2A, 2B e 2C.

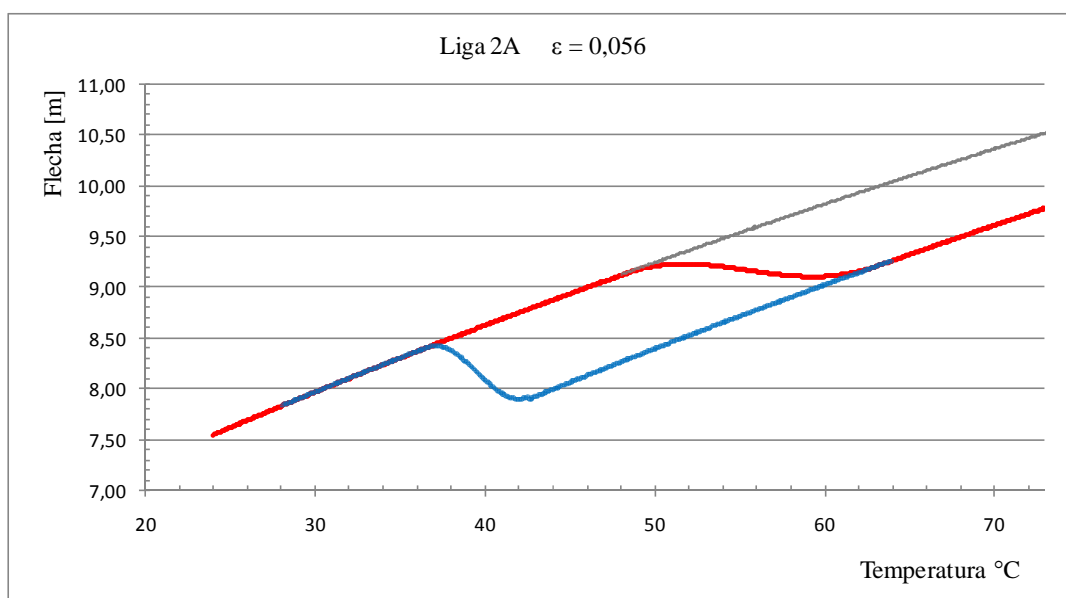


Figura 5-14 - Comportamento da flecha - liga 2A.

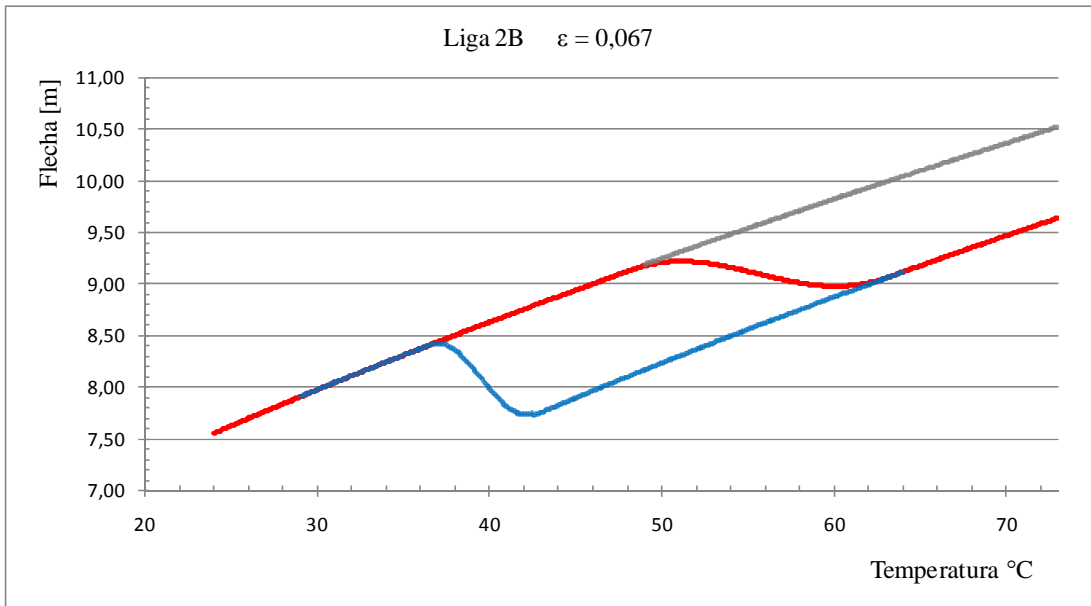


Figura 5-15 - Comportamento da flecha - liga 2B.

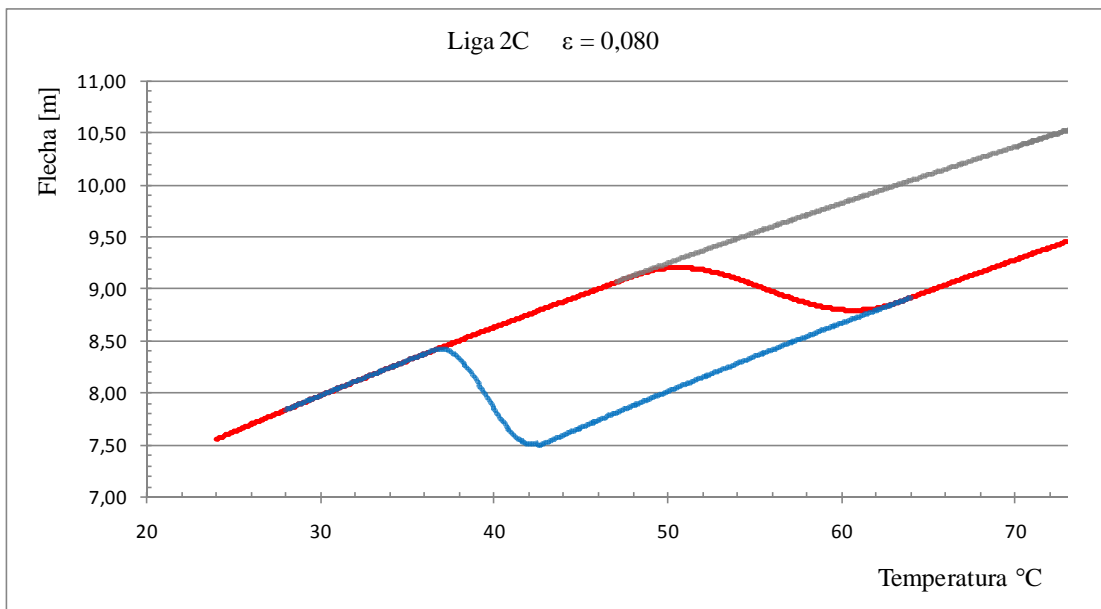


Figura 5-16 - Comportamento da flecha - liga 2C.

Um importante parâmetro a ser analisado, é o valor da tensão de pré esticamento após o retracionamento. Como foi analisado no item 3.4, a flecha é função do EDS, do vão e do peso específico do cabo condutor. Na presente análise, o vão e o peso específico do condutor permanecem constantes, e a relação entre a tensão de pré-esticamento e a flecha mitigada é inversamente proporcional. À medida que o cabo condutor dilata, seu comprimento aumenta e a sua tensão de pré-esticamento diminui. Com o retracionamento, o comprimento do cabo diminui essa tensão volta a aumentar. Para a análise do EDS referente à variação da flecha, foi utilizada a equação 3.44, que descreve a variação do EDS em função dos valores da flecha para o aquecimento e resfriamento do cabo.

Os gráficos das Figuras 5.17 a 5.19 apresentam as curvas do EDS em função da temperatura para as ligas 1A, 1B e 1C. A curva em vermelho descreve o EDS durante o aumento da temperatura e a curva em azul é relativa ao EDS durante a diminuição da temperatura. Após a apresentação dos gráficos, serão apresentadas suas respectivas análises no tópico 5.4.

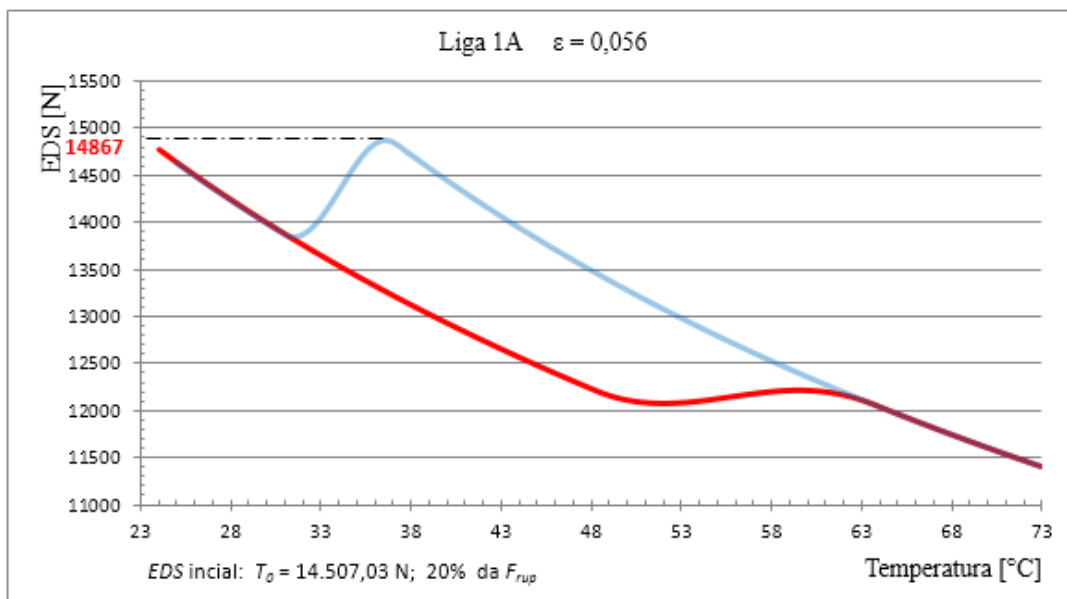


Figura 5-17- Curva EDS x T - liga 1A.

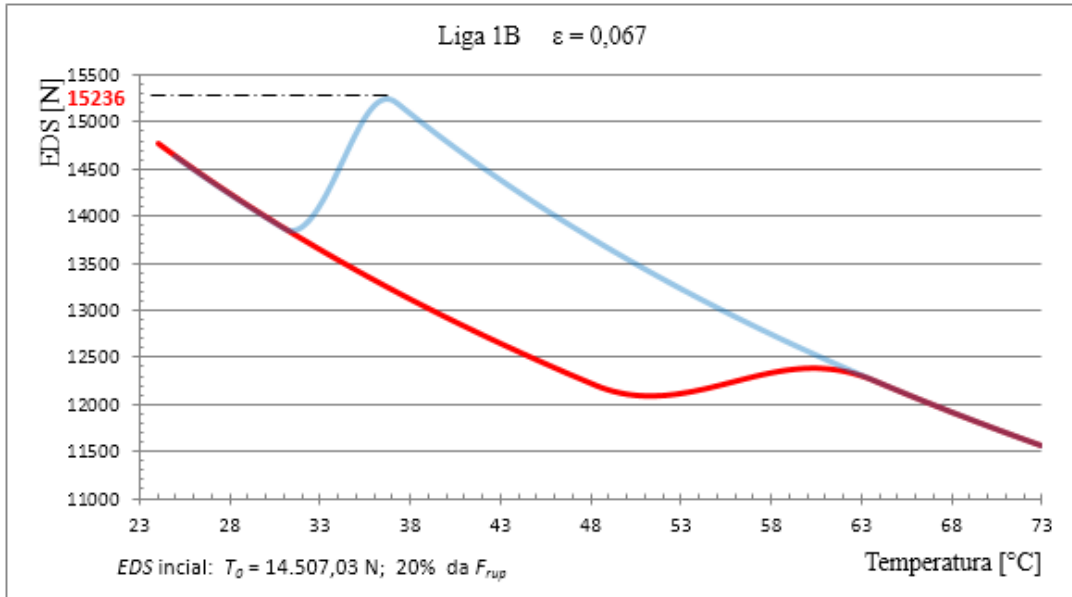


Figura 5-18 - Curva EDS x T - liga 1B.

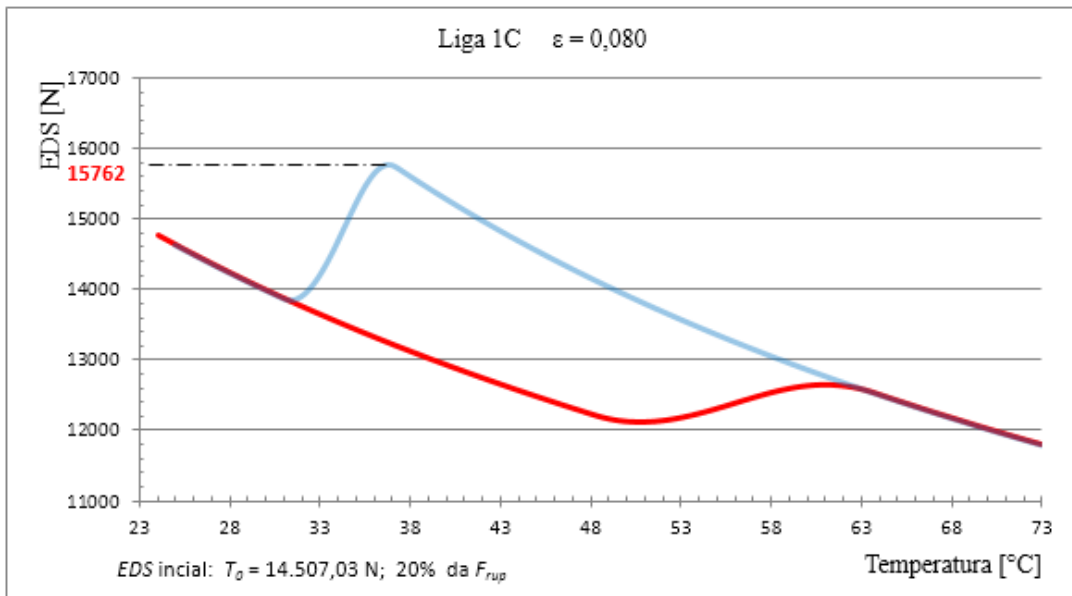


Figura 5-19 - Curva EDS x T - liga 1C.

Os gráficos das Figuras 5.20 a 5.22 apresentam as curvas do EDS em função da temperatura para as ligas 2A, 2B e 2C. A curva em vermelho descreve o EDS durante o

aumento da temperatura e a curva em azul é relativa ao EDS durante a diminuição da temperatura.

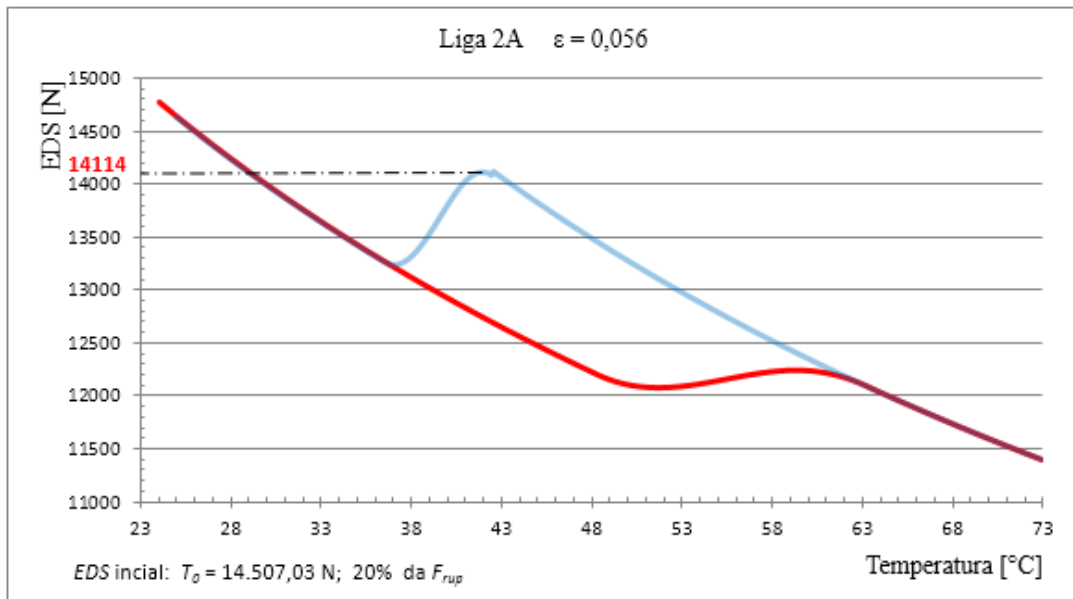


Figura 5-20 - Curva EDS x T - liga 2A.

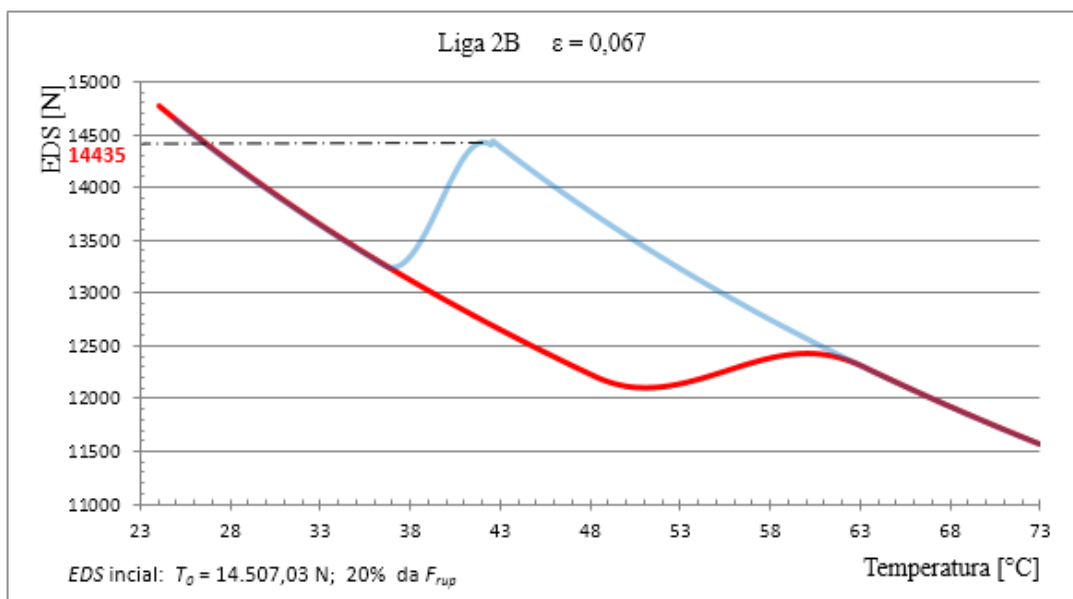


Figura 5-21 - Curva EDS x T - liga 2B.

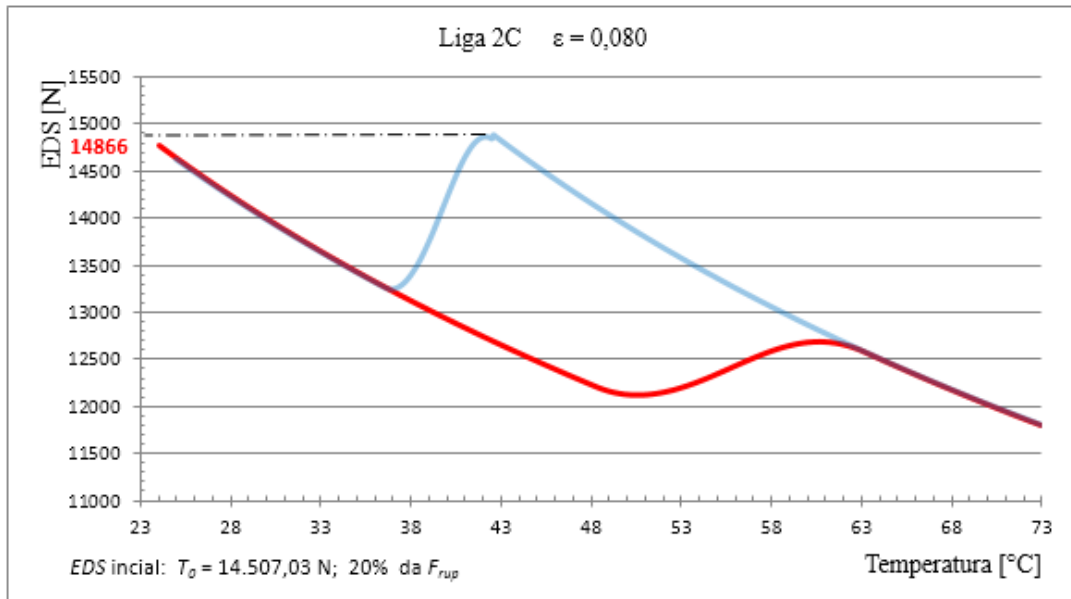


Figura 5-22 - Curva EDS x T - liga 2C.

5.4 Análise de resultados

Analisando os gráficos das Figuras 5.11 a 5.16, observa-se que a flecha relativa à temperatura ambiente de 24°C é de 7,55 m. Com o aumento da temperatura, a flecha aumenta linearmente até a temperatura de 50°C, temperatura definida para o dispositivo entrar em operação. Acima da temperatura A_f , onde a liga encontra-se com sua deformação quasiplástica completamente recuperada, a flecha volta a aumentar linearmente até a temperatura máxima de 70°C, pois a dilatação térmica do cabo segue no regime linear durante todo o processo de aquecimento e resfriamento do cabo condutor. Uma característica importante do funcionamento do dispositivo é sua capacidade de trabalhar como sensor e atuador simultaneamente. Caso o cabo condutor opere entre a temperatura de 24°C à 50°C (abaixo da temperatura de flecha segura definida), o cabo não será retracionado, pois seu comportamento como sensor permite detectar esse intervalo de temperatura de operação, não havendo necessidade do atuador entrar em funcionamento.

A tabela 5.4 mostra os resultados obtidos para as flechas e EDS na temperatura máxima de operação de 70°C.

Tabela 5-4 - Valores das flechas e EDS para as ligas

Liga	ε_{sma}	f sem dispositivo à 70°C	f com dispositivo à 70°C	f mitigada	%	EDS máx	T EDS máx
1A	0,056	10,37 m	9,61 m	0,76 m	7,33 %	14.867 N	36,58°C resf
1B	0,067	10,37 m	9,47 m	0,90 m	8,68 %	15.236 N	36,75°C resf
1C	0,080	10,37 m	9,28 m	1,09 m	10,51 %	15.762 N	36,75°C resf
2A	0,056	10,37 m	9,61 m	0,76 m	7,33 %	14.114 N	42,58°C resf
2B	0,067	10,37 m	9,47 m	0,90 m	8,68 %	14.435 N	42,58°C resf
2C	0,080	10,37 m	9,28 m	1,09 m	10,51 %	14.866 N	42,08°C resf

Analisando os gráficos do item 5.3 e a tabela 5.4, observa-se uma relação diretamente proporcional entre a deformação máxima recuperável da liga SMA e a flecha mitigada. As ligas 1A e 1B possuem deformação recuperável de 5,6% e 6,7%, que resultam em uma flecha mitigada na temperatura máxima de operação de 70°C correspondente à 7,33% e 8,68% da flecha originalmente formada pelo cabo sem o dispositivo mitigador. O mesmo ocorre para as ligas 2A e 2B.

Os resultados de maiores flechas mitigadas foram obtidos pelas ligas 1C e 2C, que utilizam 8% de deformação recuperável, onde observou-se que o valor de flecha mitigada na temperatura máxima de operação de 70°C, corresponde à 10,51% da flecha.

Analisando-se o EDS para cada liga através dos gráficos das figuras 17 a 22, nota-se que o EDS parte do seu valor inicial $T_0 = 14.507,03$ N (definido na tabela 5.2) na temperatura ambiente de 24°C e diminui no decorrer do aquecimento até alcançar o valor mínimo na temperatura de 50°C, em que o dispositivo entra em operação. A ação do dispositivo diminui a flecha fazendo com que o EDS torne a aumentar durante todo o tracionamento. Após o término do tracionamento o EDS volta a diminuir com o aumento da temperatura, pois o cabo continua a dilatar. Apesar da ação do dispositivo causar o aumento do EDS, durante o aumento de temperatura (curva vermelha das figuras 5.17 a 5.22) o valor máximo considerado para o EDS não é ultrapassado.

Contudo, para as ligas 1A, 1B, 1C e 2C o valor máximo permitido de T_0 foi ultrapassado durante o processo de resfriamento (curva azul dos gráficos 5.17, 5.18, 5.19 e

5.22), como pode ser observado na Tabela 5.4. Durante a diminuição da temperatura o cabo diminui o seu comprimento diminuindo assim a flecha, porém o atuador não se deforma quasiplasticamente nesse mesmo intervalo de temperatura. O dispositivo mantém o cabo tracionado até a temperatura M_s em que inicia-se a formação da martensita onde o atuador SMA se deforma quasiplasticamente alcançando seu comprimento L_0 na temperatura M_f e conseqüentemente aumentando a flecha. Esse comportamento observado é devido a histerese apresentada pelas ligas SMA, que faz com que a transformação martensítica direta e inversa percorram caminhos diferentes.

Analisando-se os diferentes resultados de EDS para as ligas utilizadas mostrados na Tabela 5.4, nota-se que a definição das temperaturas M_f e M_s influenciam diretamente o EDS durante o processo de resfriamento do cabo. Para as ligas 1A, 1B e 1C, o valor máximo do EDS ocorreu na temperatura de 36,58°C e para as ligas 2A, 2B e 2C esse valor ocorreu na temperatura de 42,58°C. Conforme os valores das temperaturas de transformação na Tabela 5.3, é observado que as temperaturas M_f e M_s para as ligas do tipo 1 são menores do que as da liga do tipo 2. Com isso, nota-se que para não haver infração dos valores permitidos de EDS, devem ser utilizados valores de M_f e M_s acima da temperatura ambiente de operação do cabo, para que o atuador SMA se deforme quasiplasticamente recuperando seu comprimento L_0 em uma temperatura próxima a temperatura em que o dispositivo entra em operação (menor histerese possível).

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou como resultado a análise de um dispositivo de mitigação de flecha em linhas de transmissão elétrica baseado no funcionamento do dispositivo SLIM. Foi apresentado a concepção de um modelo matemático geral de dimensionamento do dispositivo mitigador capaz de reagir às variações de temperatura e retracionar o cabo evitando que as distâncias de segurança condutor/solo sejam ultrapassadas.

Com a aplicação do modelo matemático desenvolvido a um estudo de caso em que foram considerados um vão de 400 m e uma tensão de pré-esticamento de 14507,02 N (20% da carga de ruptura do cabo IBIS – 397,5 MCM), foi possível dimensionar e projetar um dispositivo de mitigação, juntamente com a análise de tensões de seus principais componentes estruturais através de elementos finitos, pelo critério de Von Mises. Os valores dimensionais obtidos permitiram que fossem executados os desenhos técnicos do dispositivo, permitindo com isso uma eventual fabricação. A análise de tensões por Von Mises obtida por elementos finitos constatou a segurança do modelo projetado, onde todas as tensões aplicadas nos pontos dos componentes do dispositivo foram menores que o limite de escoamento do material. O valor máximo de tensão aplicada na carcaça do dispositivo foi de 265 MPa, onde o limite de escoamento do material definido para sua construção 351 MPa

Foi realizada uma simulação numérica através da implementação do Modelo de Brinson para prever o comportamento do atuador SMA utilizando-se seis ligas hipotéticas com valores diferentes de deformação quasiplástica recuperável e diferentes temperaturas de transformação. Foi observado que existe uma relação diretamente proporcional entre a deformação máxima recuperável e a flecha máxima mitigada. As ligas utilizadas possuem deformações 5,6%, 6,7% e 8%, onde foram obtidos os valores máximos de flecha mitigada de 0,76m, 0,90m e 1,09m, que correspondem a 7,33%, 8,68% e 10,51% respectivamente, do valor da flecha originalmente formada pelo cabo sem o dispositivo mitigador.

Foi realizado um estudo da tensão de pré-esticamento após a ação de retracionamento do dispositivo mitigador (every day stress) e concluiu-se que as temperaturas M_f e M_s influenciam diretamente o EDS durante o processo de resfriamento do cabo, o que torna a definição dessas temperaturas um parâmetro limitador do dimensionamento do dispositivo,

pois o EDS após o retracionamento deve permanecer dentro dos limites permitidos. Foi constatado que as temperaturas M_f e M_s para a liga selecionada devem ser definidas acima da temperatura ambiente, o mais próximo possível das temperaturas A_s e A_f .

Através da análise dos resultados observou-se que o dispositivo se mostrou capaz de reagir ao aumento de temperatura do cabo condutor, retracionando o cabo dentro dos limites definidos.

6.1 Sugestões de temas futuros

1. Realização do projeto elétrico do dispositivo mitigador.
2. Construção de um dispositivo de mitigação utilizando-se do modelo proposto no presente trabalho.
3. Construção de uma bancada para ensaios, juntamente com um sistema de aquecimento do atuador de SMA que simule a sua operação em linha viva.
4. Estudo do comportamento dinâmico do cabo, após a inserção do dispositivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AERNOUDT, J. Van Humbeeck, L. Delaey and W. Van Moorleghem, in: **The Science and Technology of Shape Memory Alloys**, Ed. V. Torra (Impresrapit, Barcelona, 1987) p.221., 1987.

AKHRAS, GEORGES, “**Smart Materials and Smart Systems for the Future**”, Canadian Military Journal, autumn 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “**NBR 5422: Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica**”. Rio de Janeiro, 1985.

BASTO, OSCAR TEIXEIRA. **Apostila de Transmissão de Energia Elétrica 1 – 3ª parte**; Recife-PE 2002.

BRINSON, L.C., “**One Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation With Non-Constant Material Functions**”. J. Intell. Syst., p.229-242, 1993.

Cloet, J-L Lilien, P. Ferrières, “**Uprating Transmission Lines throught the use of an innovative real-time monitoring system**”, Elia (Belgian Transmission System Operator) University of Liège, Belgium, 2011.

DA SILVA, N. M., “**Análise de um Sistema de Mitigação de Catenária em Linha de Transmissão de Energia Elétrica Baseado em Ligas com Memória de Forma**”, Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012.

DELAEY, L., KRISHNAN, R. V., WARLIMONT, H., “**Thermoelasticity, Pseudoelasticity and Memory Effects Associated With Martensitic Transformations. Part 1: Structural and Microstructural Changes Associated With the Transformations**”. Journal of Materials Science, 9 (1975), pp. 1521-1535.

DYE, T. E., “**An Experimental Invertigation of the Behavior of Nitinol**”. MS thesis, Virginia Tech, 1990.

DYNALLOY: Nickel-Titanium Alloy Physical Properties [internet]. Disponível em : <http://www.dynalloy.com/pdfs/TCF1140.pdf>

FADEL, AIDA ALVES, “**Avaliação do Efeito de Tracionamento em Elevados Níveis de EDS Sobre a Resistência em Fadiga do Condutor IBIS (caa 397,5)**”, Tese de Doutorado em ciências mecânicas, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

FUCHS, RUBENS DARIO. **Projeto Mecânico de Linhas Aéreas de Transmissão**; São Paulo-SP 1982.

- FUNAKUBO, H., **“Shape Memory Alloys”**. Gordon & Bleach. New York, 1987.
- JANOCHA, HARTMUT, **“Adaptronics and Smart Structures, basics, materials, design and applications”**, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1999.
- IEEE Winter Technical Meeting, **“Material Integrity Solutions Inc”**, TCP/ESMOL Joint Meeting, Las Vegas, NV, 2003.
- LAGOUDAS, DIMITRIS C., **“Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications”**, Department of Aerospace Engineering Texas A&M University, College Station, TX, USA, 2008.
- LANE, RICHARD; CRAIG, BENJAMIN, **“Materials That Sense and Respond: an introduction to Smart Materials”**, AMPTIAC Technical Staff, Rome, NY, 2012.
- LEO, D. J. **“Engineering Analysis of Smart Material”**. Department of Mechanical Engineering Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia, 2007.
- LÜSSI, K.M., **“A Study and Implementation Analysis of An Anti-Sagging Device for Power Transmission Lines Using Shape Memory Alloys”**, Dissertação de Mestrado, Department of Mechanical Engineering, University of KwaZulu-Natal, KwaZulu-Natal, South Africa, 147p. 2009.
- MENSAH-BONSU, CHRIS., UBALDO FERNÁNDEZ KREKELER, GERALD THOMAS HEYDT, YURI HOVERSON, JOHN SCHILLECI, AND BAJ L. AGRAWAL, FELLOW **“Application of the Global Positioning System to the Measurement of Overhead Power Transmission Conductor Sag”**, IEEE Transactions on power delivery, vol. 17, no. 1, january 2002.
- NEUMANN, D. Adaptronics – **“A Concept for the Development of Adaptive and Multifunctional Structures. In.: JANOCHA, H. (Editor) Adaptronics and smart structures”** - Basics, materials, design and applications. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1999, p. 1-12.
- NOVÁK, V., SITTNER, P., DAYANANDA, G. n, BRAZ-FERNANDES, F. M., MAKESH, K. K., **“Electric resistance variation of NiTi shape memory alloy wires in thermomechanical tests: Experiments and simulation”**, Material Science and Engineering A, Vol. 481-482, pp. 127-'33, 2008.
- OTSUKA, K., WAYMAN, C. M., **“Mechanism of Shape Memory Effect and Superelasticity”**. Cambridge University Press, Cambridge, 1998, p. 27-48.
- PAIVA, A., **“Modelagem do Comportamento Termomecânico das Ligas com Memória de Forma”**, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 113p. 2004.
- PEREIRA JUNIOR, E. J., **“Uma Formulação Consistente para Análise Não-Linear de Estruturas de Cabos Suspensos”**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, BH, 148p. 2002.

PONTES, W. C. C., “**Projeto de um dispositivo mitigador de catenaria em linhas de transmissão de energia elétrica baseado em ligas com memória de forma**”, Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

POORANI RAMACHANDRAN, Student Member, IEEE and Vijay Vittal, Fellow, IEEE, “**On-Line Monitoring of Sag in Overhead Transmission Lines with Leveled Spans**”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 2006.

SEVERINO, JUCILÉIA FILOMENA B., “**Sistema Digital de Medição Direta da Flecha em Linhas de Transmissão com o uso de Sensores Ópticos e Comunicação Via Tecnologia GPRS**”, Dissertação de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Minas Gerais, Brasil, 2006.

SHIRMOHAMADI, M., **Sag Compesator for Suspended Lines Using Rotary Motion**, USA Patent number 5.792.983, USA, 1989.

SHIRMOHAMADI, M., **Sag Compesator for Suspended Lines**, USA Patent number **6.057.508**, USA, 2000.

SHIRMOHAMADI, M., “**Sagging Line Mitigator Final Report**”. California Energy Commission, Berkeley, CA, 2002.

SHIRMOHAMADI, M., KOPPERDAHL, D., LONGO, V., TORRE, W., CARR, J., BARHOOVER, D., ADAPA, R., “**Demonstration of the Sagging Line Mitigator On a San Diego Gas and Electric line at Escondido**”, CA, EPRI - Increased Power Flow Conference, Boston, MA, August 19-20, 2004.

TANAKA, K., “**A Thermomechanical Sketch of Shape Memory Effect: One-Dimensional Tensile Behaviour**”. Materials Science Research Internacional, v.18, pp. 251, 1985.

VELÁZQUEZ, R., PISSALOUX, E. E., “**Modelling and Temperature Control of Shape Memory Alloys with Fast Electrical Heating**”. Mecatrónica y Control de Sistemas, Universidad Panamericana, Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique, CNRS - Université Paris, International Journal of Mechanics and Control, Vol. 13, n 02, 2012.

<http://sirius.mtm.kuleuven.be/> - MTM Departement (Metaalkunde en Toegepaste Materiaalkund) - University of Leuven. Dados experimentais da liga NiTi, acessado em 21 de agosto de 2013.

WOOD, A. B., “**A Practical Method of Conductor Creep Determinations**”, Revista Electra, n 24, CIGRÉ, Paris, Out, 1972.

XIA XIAO, YAN XU, JIANGHUA ZHANG, KEN XU, “**Research on Sag Online Monitoring System for Power Transmission Wire Based on Tilt Measurement**”, State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China, 2012.

ANEXOS

ANEXO I – PROPRIEDADES DA LIGA DE NITI (MTM DEPARTEMENT)

Table: Property values of shape memory alloys

PROPERTY	UNIT	Ni-Ti	Cu-Zn-Al
<i>PHYSICAL</i>			
melting point	Celsius	1240-1310 [Ae87,Me87,Be87,Hu89] 1250 [AMT] 1300 [Rayc]	950-1020 [Ae87,Me87,Hu89,EuMe] 1020 [AMT]
density	g/cm ³	6.4-6.5 [Ta90,Ae87,Me87,Be87,Hu89,Ta89,Hu91] 6.45 [AMT] 6.52 [Ray2] 6.5 [St90, Ray3, Ho89]	7.8-8.0 [Ta90,Ae87,Me87,Hu89,Ta89,EuMe,Hu91] 7.64 [Wu90] 7.9 [AMT] 8.0 [St90] 7.5 [Ho89]
therm conduct. at 293K	W/(mK)	10-18 [Ae87,Be87,Hu89,AMT,Alko], 18 [Hu91]	120 [Wu90,Ae87,Hu89,Hu91.], 84 [EuMe]
of austenite	W/(mK)	18 [Me87,Rayc]	120 [Me87,AMT]
of martensite	W/(mK)	8.6 [Me87,Rayc]	/
coef of therm. expans.	(E-6)/K	6.6-10 [AMT]	17 [AMT]
of austenite	(E-6)/K	11 [Me87,Rayc] 10 [Me87,Hu89,Ray2]	/
of martensite	(E-6)/K	6.6 [Ae87,Me87,Hu89,Ray2,Rayc]	16-18 [Ae87,Me87,Hu89,AMT]
specific heat	J/(kg.K)	470-620 [Ae87,Me87,Hu89] 490 [AMT] 450 [Be87]	390 [Ae87,Me87,Hu89,AMT] 400 [Wu90]
transform enthalpy	J/kg	19000 [Be87] 28000 [AMT]	7000-9000 [Ae87,Me87,Hu89,EuMe], 7000 [AMT]
corrosion performance	*	similar to 300 series stainless steel [Me87,Rayc] comparable to pure Ti [Be87] excellent [AMT,Hu91]	similar to aluminium bronzes [Me87] poor [Hu91] excellent [EuMe] fair [AMT]
biological compatibility	*	excellent [AMT], ++ [Hu91]	bad [AMT], - [Hu91]
wear resistance	*	good	/
<i>ELECTROMAGNETIC</i>			
resistivity	(E-6), Ohm.m	0.5-1.1 [Ae87,Me87,Hu89,AMT,Hu91] 0.7-1.0 [Ta90,Ta89] 0.8 [Ray2]	0.07-0.12 [Ae87,Hu89,AMT,EuMe,Hu91] 0.85-0.97 [Wu90], 0.08-0.13 [Ta90,Ta89]
of austenite	(E-6), Ohm.m	1.0 [Me87,Rayc]	0.07 [Me87]
of martensite	(E-6), Ohm.m	0.8 [Me87,Rayc]	0.12 [Me87]
thermo-electric power	(E-6), V/K	9-13 (mart) [Ae87,Hu89], 5-8 (aust) [Ae87,Hu89]	/
magnetic permeability	*	<1.002 [Me87,Be87,Rayc]	/
magnetic susceptibility	emu/g	3.106. [Me87,Rayc]	/

<i>MECHANICAL</i>			
Youngs modulus	GPa	70-98 [Me87] 95 [AMT,Hu91]	70-100 [Me87,Be87,AMT,EuMe] 80 [Hu91]
<i>of austenite</i>	GPa	70 [Be87] 98 [Ae87,Hu89], 97 [Ray2,Rayc]	70-100 [Ae87,Hu89], 72 [Wu90]
<i>of martensite</i>	GPa	/	70 [Wu90]
G (austenite)	GPa	27 [Be87]	/
yield strength	MPa	410 [Rayc]	/
<i>of austenite</i>	MPa	200-800 [Ae87,Me87,Hu89] 100-600 [Be87] 410 [Be87]	350 [Wu90], 150-300 [Me87]
<i>of martensite</i>	MPa	150-300 [Ae87,Me87,Hu89], 50-300 [Be87]	80 [Wu90], 150-300 [Ae87,Hu89]
ultimate tensile strength	MPa	800-1000 [Ta90, Ta89,AMT,Hu91] 900-1500 [St90] 860 [Rayc] 800 [Ho89], 800-1100 [Ae87,Hu89]	400-700 [Ta90, Ta89,St90] 600 [Wu90] 800-900 [AMT] 700-800 [EuMe,Hu91] 500 [Ho89], 700-800 [Ae87,Me87,Hu89]
<i>of martensite</i>	MPa	700-1100 (annealed) [Me87,Be87], 860 [Ray2] 1300-2000 (not anneal) [Me87,Be87]	/
elongation at failure	%	40-50 [Ta90, Ta89] 50 [Hu91] 30-50 [St90]	10 [Hu89] 10-15 [Ta90, Ta89, EuMe, St90] 15 [Hu91]
<i>of austenite</i>	%	15-20 [Ray2,Rayc]	/
<i>of martensite</i>	%	40-50 [Ae87,Me87,Hu89] 20-60 [Be87] 30-50 [AMT]	10-15 [Ae87,Me87,Hu89] 15 [AMT]
fatigue strength	MPa	350 [Ae87,Me87,Hu89,AMT]	270 [Ae87,Me87,Hu89,AMT,EuMe]
N=1000000			
grain size	microm	1-10 [Me87] 50-100 [Ae87,Hu89] 20-100 [AMT]	50-100 [Ae87,Me87,Hu89,EuMe] 50-150 [AMT]
elastic anisotropy 2.C44.(C11-C22)-1	*	2 [Me87]	15 [Wu90,Me87]

ANEXO II – MEMÓRIA DE CÁLCULO DIMENSIONAMENTO MITIGADOR

1-CÁLCULO DA FORÇA NO CABO

1. Entrada de dados

1.1 Dados do cabo

Crup= 7394	[kgf]	Carga de ruptura do cabo 20% EDS	
T0= 1478,8	[kgf]	Tensão de pré esticamento	14507,028 [N]
A= 400	[m]	Comprimento do vão	
p= 0,56849	[kgf/m]	peso por metro do cabo	

2. Determinação da Força atuante no cabo condutor

2.1 Ângulo alfa

$tg\ \alpha = p\ A^2 / 8T0$		Tangente do ângulo alfa
tg alfa= 0,076885		Tangente do ângulo alfa em radianos
Alfa= 0,076734349	[rad]	Ângulo alfa em radianos
Alfa= 4,39655433	[graus]	ângulo alfa em graus

2.2 Tração Axial no cabo condutor

$T = T0 / \text{Cos}(\alpha)$	[kgf]	Tensão axial , utilizando algulo alfa em radianos
T= 1483,16	[kgf]	Tensão axial em kgf
T= 14535,01	[N]	Tensão axial em N

2-CÁLCULO DAS FLECHAS E DO ΔL_{cabo}

1. Cálculo da Flecha e comprimento do condutor para temperatura ambiente 24 graus

Considerações:

T0= 1478,8	[kgf]	Tensão de pré-esticamento do cabo
ρ = 0,56849	[kgf/m]	Peso por metro do cabo
A= 400	[m]	Comprimento do Vão

1.1 Flecha e comprimento do condutor para 24 graus

f24= 7,69	[m]	calculado através da fórmula $f = \rho \cdot A^2 / 8T0$
L24= 400,39	[m]	calculado através da fórmula $L = A + (8f^2/3A)$

2. Cálculo da Flecha e comprimento do condutor para 50 graus

2.1 Cálculo da dilatação térmica do condutor

Considerações:

α = 0,00001825	[1/°C]	Coefficiente de expansão térmica linear do condutor (retirado do catálogo de cabos NEXANS)
t= 50	°C	Temperatura do cabo condutor dilatado
t0= 24	°C	Temperatura inicial do cabo condutor
L50= 400,58	[m]	Calculado através da fórmula $L_f = L_i + (L_i \cdot \alpha \cdot (t_f - t_i))$

2.2 Cálculo da Flecha para a temperatura de 50 graus

f50= 9,36	[m]	Calculado através da fórmula $f = \text{raiz} \{3A (L - A / 8) \}$
-----------	-----	--

3. Cálculo da Flecha e comprimento do condutor para 70 graus

Considerações:

α = 0,00001825	[1/°C]	Coefficiente de expansão térmica linear do condutor (retirado do catálogo de cabos NEXANS)
t= 70	°C	Temperatura do cabo condutor dilatado
t0= 50	°C	Temperatura inicial do cabo condutor

3.1 Cálculo da dilatação térmica do condutor

L70= 400,73	[m]	Calculado através da fórmula $L_f = L_i + (L_i \cdot \alpha \cdot (t_f - t_i))$
-------------	-----	---

3.2 Cálculo da Flecha para a temperatura de 70 graus

f70= 10,47	[m]	Calculado através da fórmula $f = \text{raiz} \{3A (L - A / 8) \}$
------------	-----	--

4. Cálculo da Flecha de violação da distância permitida

Considerações:

f24= 7,69	[m]
f50= 9,36	[m]
f70= 10,47	[m]

3-CÁLCULO DO ΔL_{SMA}

1. Cálculo do Δl_{sma}

Considerações:

$\epsilon_{sma} =$	8 [%]	Taxa de deformação típica SMA
$L_{sma} =$	1 [m]	Determinação arbitrária do comprimento da SMA

1.1 Cálculo do ΔL_{sma}

$\Delta L_{sma} = 0,08$ [m] Obtido através da fórmula $\Delta L_{sma} = \epsilon_{sma} * L_{sma}$

2. Cálculo da relação de amplificação

$R = 1,83$ [adimensional] $R = \frac{\Delta L_{DAMI F}}{\Delta L_{SMA}} = \frac{c}{s}$

4-CÁLCULO DA ALAVANCA

1. Considerações para o cálculo das distâncias "c" e "s"

Considerações:

$\theta =$	60 [°]	1,05	[rad]	ângulo geral do arco formado pela ação do atuador, no caso, $\theta = \beta$
$\beta =$	60 [°]	1,05	[rad]	ângulo mínimo do deslocamento do atuador PONTES (2013)
$\gamma =$	120 [°]	2,09	[rad]	ângulo máximo do deslocamento do atuador PONTES (2013)

$\Delta L_{DAMI F} = 0,14621$ [m] Deslocamento mínimo do dispositivo, calculado anteriormente
 $R = 1,83$ [adimensional] Relação de amplificação, calculada anteriormente

2. Cálculo da distância "c"

$c = 0,1462$ [m]
 $c = 146,2$ [mm]

$$\Delta L_{DAMI F} = 2 . c . \sin \frac{\theta}{2}$$

3. Cálculo das distâncias "s"

$s = 0,08$ [m]
 $s = 80$ [mm]

$$R = \frac{\Delta L_{DAMI F}}{\Delta L_{SMA}} = \frac{c}{s}$$

5-DIMENSIONAMENTO ATUADOR SMA

1. Considerações para o dimensionamento atuador de SMA

Considerações:

Tesc sma= 150	[Mpa]	Tensão de escoamento do SMA para a fase MARTENSÍTICA
Tesc sma= 150000000	[Pa]	Tensão de escoamento do SMA para a fase MARTENSÍTICA em Pa
Dfiosma= 2,67	[mm]	Diâmetro dos fios de SMA
Afiosma= 5,60	[mm ²]	Área dos fios de SMA em milímetros quadrados
Afiosma= 5,59886E-06	[m ²]	Área dos fios de SMA em metros quadrados

2. Cálculo da Força realizada pelo Atuador de SMA

2.1 Cálculo da força "F_{sma}"

$$F_{sma} = 26565,12917 \quad [N] \quad F_{sma} = T_{\sigma} \cdot R$$

2.2 Cálculo da área de SMA necessária

$$\begin{aligned} A_{sma} &= 0,0001771 \quad [m^2] \\ A_{sma} &= 177,10 \quad [mm^2] \end{aligned} \quad \sigma_{sma} = \frac{F_{sma}}{A_{sma}}$$

2.3 Cálculo da quantidade de fios de SMA necessários

Nfios= A_{sma} / A_{fiosma} Número de fios de SMA necessário, de acordo com o diametro dos fios inseridos na entrada de dados

Nfios= 31,63159398 Número de fios calculados

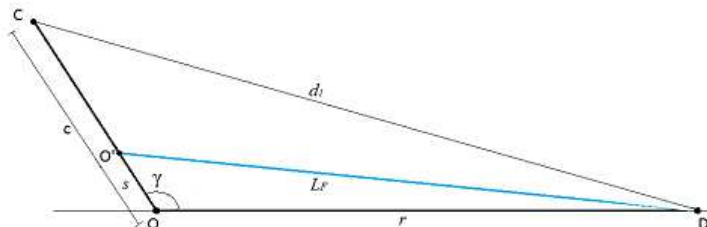
Nfios= 32 Número de fios selecionados

6-DIMENSIONAMENTO DO DISPOSITIVO

1. Considerações para o dimensionamento do DAMIF

c = 0,15	[m]	distancia "c" do braço da alavanca
s = 0,08	[m]	distancia "s" do braço da alavanca
Lf = 1,00	[m]	comprimento do feixe de SMA a frio
$\gamma = 120,00$	[°]	$2,09$ [rad] ângulo máximo do deslocamento do atuador PONTES (2013)
$\beta = 60,00$	[°]	$1,05$ [rad] ângulo mínimo do deslocamento do atuador PONTES (2013)

2. Cálculo das distâncias com o dispositivo FRIO



2.1 Cálculo da distância "r"

$$r = 0,9575 \quad [\text{m}]$$

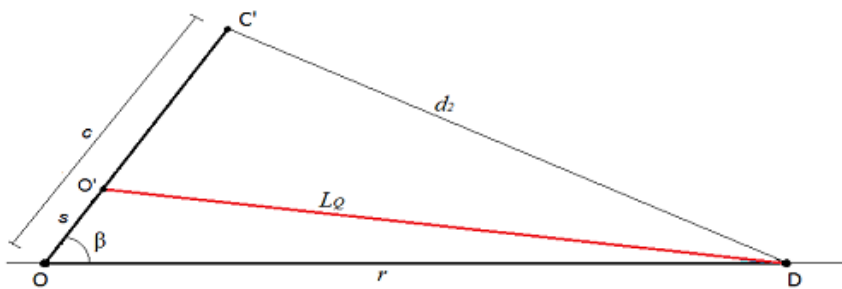
$$L_p^2 = r^2 + s^2 - 2 \cdot r \cdot s \cdot \cos \gamma \quad (\text{cálculo realizado à mão, eq de 2 grau})$$

2.2 Cálculo da distância "d1"

$$d_1 = 1,04 \quad [\text{m}]$$

$$d_1^2 = c^2 + r^2 - 2 \cdot c \cdot r \cdot \cos \gamma$$

3. Cálculo das distâncias com o dispositivo QUENTE



3.1 Cálculo da distância "Lq"

$$L_q = 0,920112 \quad [\text{m}]$$

$$L_q^2 = r^2 + s^2 - 2 \cdot r \cdot s \cdot \cos \beta$$

3.2 Cálculo da distância "d2"

$$d_2 = 0,89 \quad [\text{m}]$$

$$d_2^2 = c^2 + r^2 - 2 \cdot c \cdot r \cdot \cos \beta$$

ANEXO III – DESENHOS CONSTRUTIVOS DO DISPOSITIVO MITIGADOR

ANEXO IV – ESTUDOS POR ELEMENTOS FINITOS DAS PEÇAS DO DISPOSITIVO

Espessuras de chapa disponíveis no mercado

Espesuras			Dimensões					
Nominais mm	Polegadas	No U.S.G.	2000 mm	2000 mm	2000 mm	3000 mm	3000 mm	3000 mm
			x 1000 mm	x 1220 mm	x 1250 mm	x 1000 mm	x 1220 mm	x 1250 mm
0,30	-	30	4,800	5,856	6,000	7,200	8,784	9,000
0,40	1/64"	28	6,400	7,808	8,000	9,600	11,712	12,000
0,50	-	26	8,000	9,760	10,000	9,600	14,640	15,000
0,60	-	24	9,800	11,712	12,000	14,400	17,588	18,000
0,80	1/32"	22	12,800	15,616	19,200	19,200	23,424	24,000
1,00	-	20	16,000	19,520	20,000	24,000	29,280	30,000
1,20	-	18	19,200	23,424	24,000	28,800	35,136	36,000
1,50	1/16"	16	24,000	29,280	30,000	36,000	43,920	45,000
2,00	5/64"	14	32,000	39,040	40,000	48,000	58,560	60,000
2,50	-	13	40,000	48,800	50,000	60,000	73,200	75,000
3,00	1/8"	11	48,000	58,580	60,000	72,000	87,840	90,000
3,50	9/64"	10	56,000	68,320	70,000	84,000	102,480	105,000
4,00	5/32"	9	64,000	78,080	80,000	96,000	117,120	120,000
4,50	11/64"	8	72,000	87,840	90,000	108,000	131,780	135,000
4,76	3/16"	7	76,160	92,915	95,200	114,240	139,373	142,800
5,00	-	6	80,000	97,800	100,000	120,000	146,400	150,000
6,00	-	4	96,000	117,120	120,000	144,000	175,680	180,000
6,35	1/4"	3	101,600	123,952	127,000	152,400	185,928	190,500
7,93	5/16"	0	126,880	154,794	158,600	190,320	232,190	237,900
10,00	3/8"	-	160,000	195,200	200,000	240,000	292,800	300,000
12,70	1/2"	-	203,200	297,904	254,000	304,800	371,858	381,000
15,87	5/8"	-	253,920	309,782	317,400	380,880	464,674	476,100
19,05	3/4"	-	304,800	371,856	381,000	457,200	557,784	571,500
22,22	7/8"	-	355,520	433,734	444,400	533,280	650,602	666,600
25,40	1"	-	406,400	495,808	508,000	609,600	743,712	762,000
31,75	1.14"	-	508,000	619,760	635,000	762,000	929,640	952,500
38,10	1.1/2"	-	609,600	743,712	762,000	914,400	1115,588	1143,000
44,45	1.3/4"	-	711,200	867,664	889,000	1066,800	1301,496	1333,500
50,80	2"	-	812,800	991,616	1016,000	1219,200	1487,424	1524,000
65,09	2.9/16"	-	1041,440	1270,557	1301,800	1562,160	1905,835	1925,700
69,85	2.3/4"	-	1117,600	1363,472	1397,000	1676,400	2045,208	2095,500
88,90	3.1/2"	-	1422,400	1735,328	1778,000	2133,600	2602,992	2667,000
101,60	4"	-	1625,600	1963,232	2032,000	2438,400	2974,848	3048,000
5,50	7/32	5	88,000	107,60	110,000	132,000	161,040	165,000

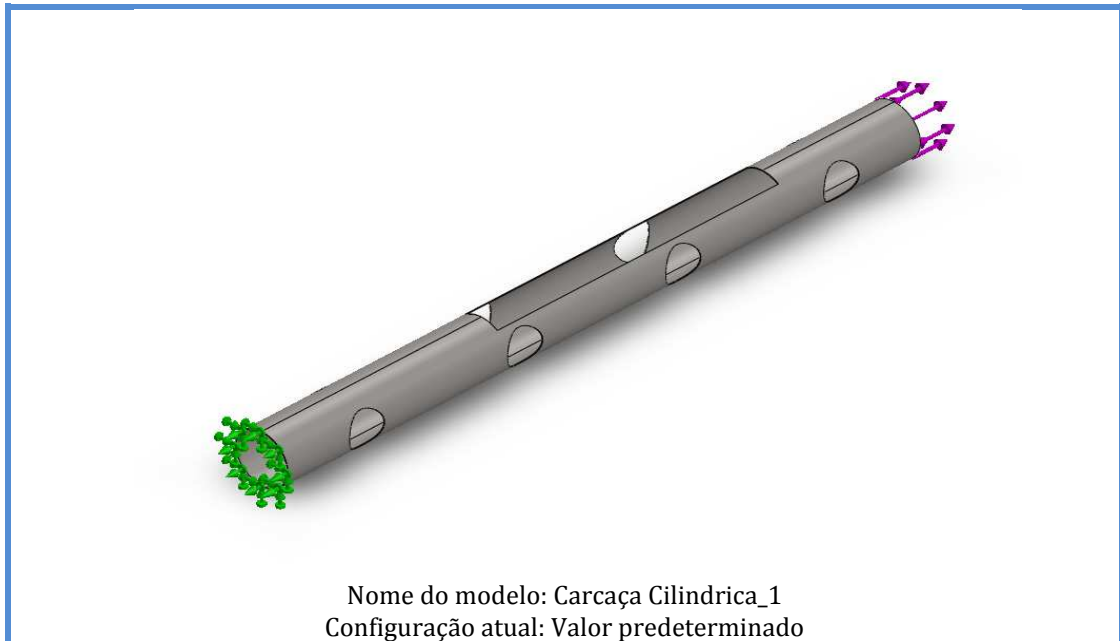
Simulação de Carça Cilindrica_1

Data:quarta-feira,3 de dezembro de 2014

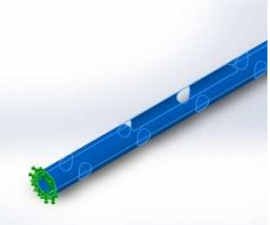
Projetista: Rômulo Castro Niemeyer

Nome do estudo:SimulationXpress Study

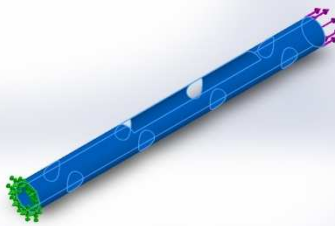
Tipo de análise:Estático



Corpos sólidos

	Tratado como	Propriedades volumétricas	Caminho/Data do documento modificado
Corte-extrusão2 	Corpo sólido	Massa:1.36734 kg Volume:0.000173082 m ³ Densidade:7900 kg/m ³ Peso:13.4 N	C:\Users\CRO_11\Desktop\Desenhos Solid Works\Carça Cilindrica_1.SLDPRT Dec 03 18:26:55 2014

Referência do modelo	Propriedades	Componentes
----------------------	--------------	-------------

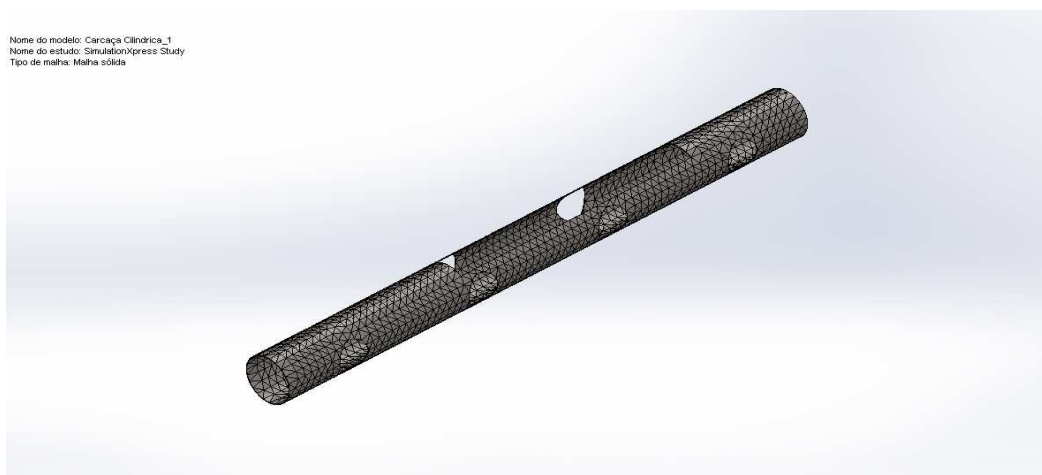
	<p>Nome: AISI 1020 Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Critério de falha predeterminado: Tensão de von Mises máxima Limite de escoamento: 3.51571e+008 N/m² Resistência à tração: 4.20507e+008 N/m²</p>	<p>Corpo sólido 1(Corte-extrusão2)(Carcaça Cilindrica_1)</p>
---	---	---

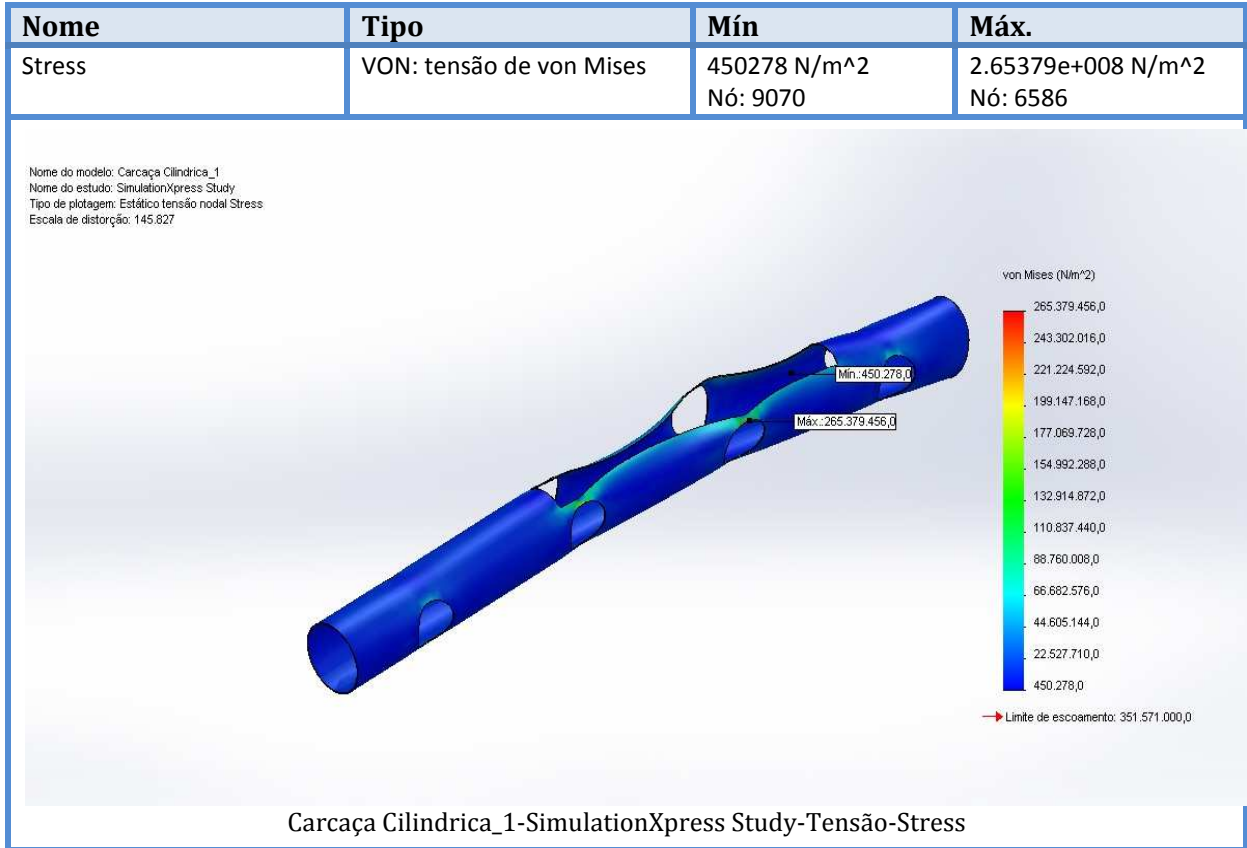
Informações de malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Transição automática:	Desativada
Incluir loops de malha automáticos:	Desativada
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	11.8192 mm
Tolerância	0.590961 mm
Qualidade da malha	Alta

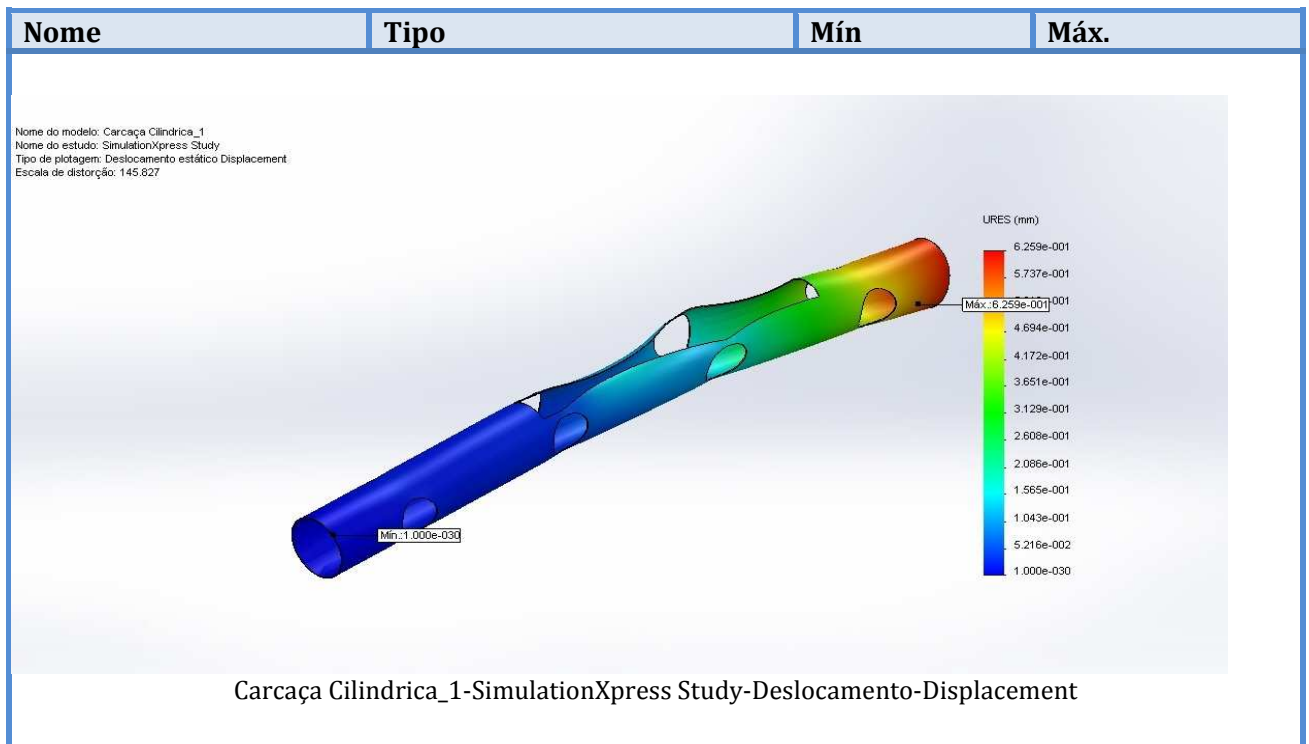
Informações de malha - Detalhes

Total de nós	16191
Total de elementos	7850
Proporção máxima	402.92
% de elementos com Proporção < 3	0.0127
% de elementos com Proporção < 10	69
% de elementos distorcidos(Jacobiana)	0
Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss):	00:00:10
Nome do computador:	ENVY



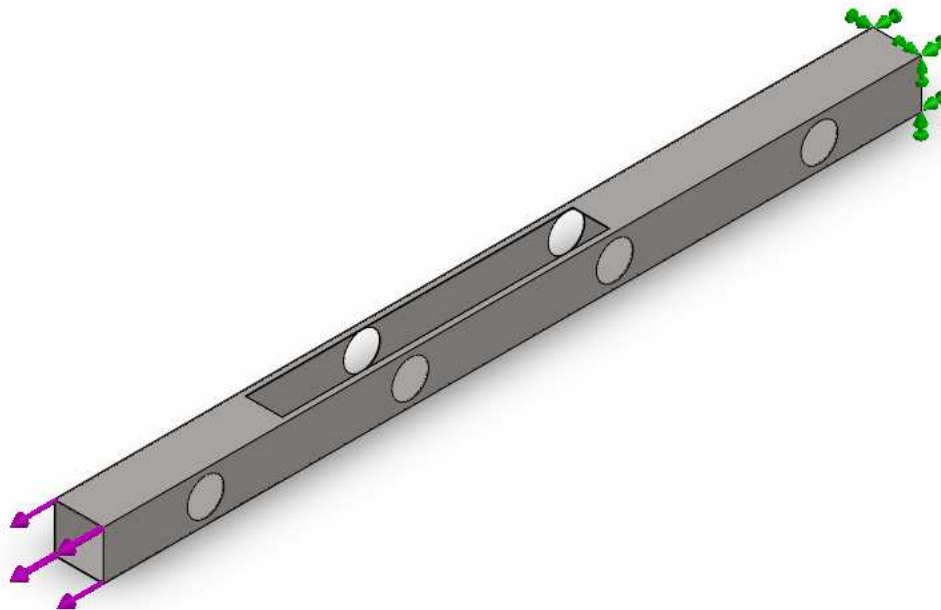


Nome	Tipo	Mín	Máx.
Displacement	URES: Deslocamento resultante	0 mm Nó: 269	0.625865 mm Nó: 15117




Simulação de Carcaça Retangular

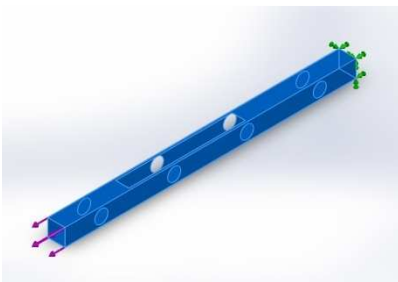
Data: quarta-feira, 3 de dezembro de 2014
Projetista: Rômulo Castro Niemeyer
Nome do estudo: SimulationXpress Study
Tipo de análise: Estático



Nome do modelo: Carcaça Retangular
 Configuração atual: Valor predeterminado

Corpos sólidos

	Tratado como	Propriedades volumétricas	Caminho/Data do documento modificado
 Corte-extrusão2	Corpo sólido	Massa:1.62168 kg Volume:0.000205277 m ³ Densidade:7900 kg/m ³ Peso:15.8925 N	C:\Users\CRO_11\Desktop\ Desenhos Solid Works\Carcaça Retangular.SLDPRT Dec 03 20:49:49 2014

Referência do modelo	Propriedades	Componentes
	Nome: AISI 1020 Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Critério de falha predeterminado: Tensão de von Mises máxima Limite de escoamento: 3.51571e+008 N/m² Resistência à tração: 4.20507e+008 N/m²	Corpo sólido 1(Corte-extrusão2)(Carcaça Retangular)

Informações de malha

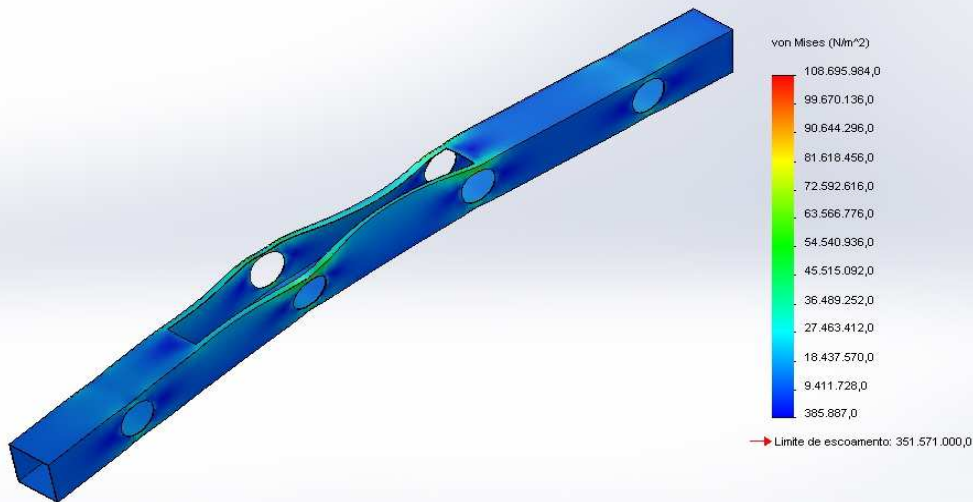
Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Transição automática:	Desativada
Incluir loops de malha automáticos:	Desativada
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	12.8537 mm
Tolerância	0.642687 mm
Qualidade da malha	Alta

Informações de malha - Detalhes

Total de nós	17478
Total de elementos	8453
Proporção máxima	47.383
% de elementos com Proporção < 3	0
% de elementos com Proporção < 10	95
% de elementos distorcidos(Jacobiana)	0
Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss):	00:00:10
Nome do computador:	ENVY

Nome	Tipo	Mín	Máx.
Stress	VON: tensão de von Mises	385887 N/m ² Nó: 12527	1.08696e+008 N/m ² Nó: 2743

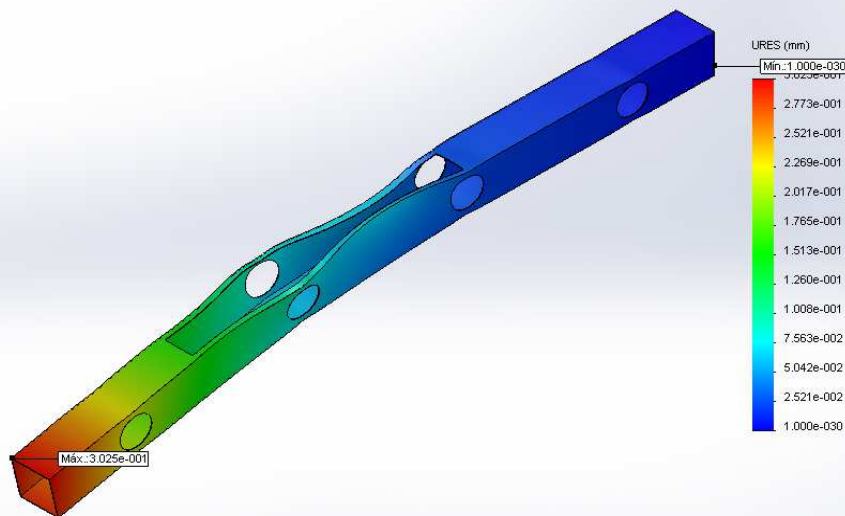
Nome do modelo: Carcaça Retangular
Nome do estudo: SimulationXpress Study
Tipo de plotagem: Estático tensão nodal Stress
Escala de distorção: 351.323



Carcaça Retangular-SimulationXpress Study-Tensão-Stress

Nome	Tipo	Mín	Máx.
Displacement	URES: Deslocamento resultante	0 mm Nó: 224	0.302504 mm Nó: 309

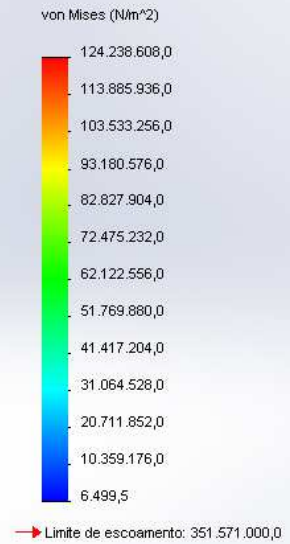
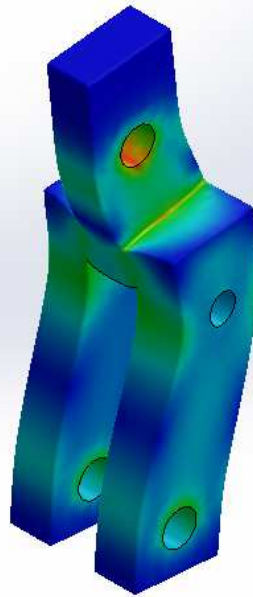
Nome do modelo: Carcaça Retangular
Nome do estudo: SimulationXpress Study
Tipo de plotagem: Deslocamento estático Displacement
Escala de distorção: 351.323



Carcaça Retangular-SimulationXpress Study-Deslocamento-Displacement

Nome	Tipo	Mín	Máx.
Stress	VON: tensão de von Mises	6499.51 N/m ² Nó: 6209	1.24239e+008 N/m ² Nó: 139

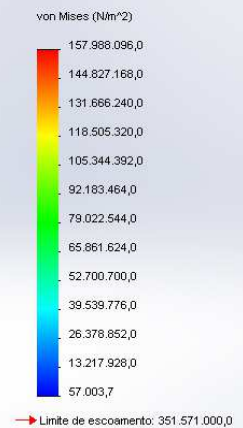
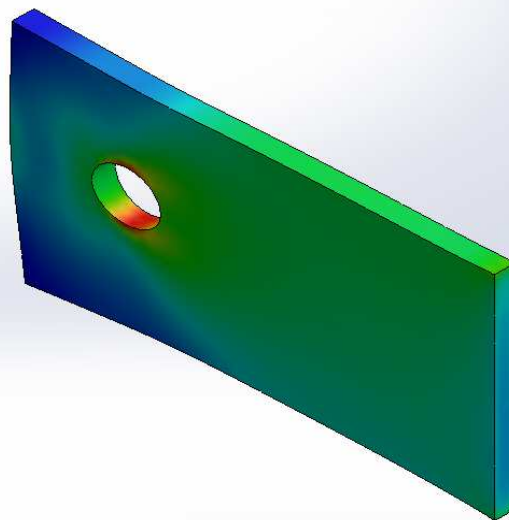
x: Alavanca Romulo Teste
 x: SimulationXpress Study
 n: Estático tensão nodal Stress
 ção: 705.118



Alavanca -SimulationXpress Study-Tensão-Stress

Nome	Tipo	Mín	Máx.
Stress	VON: tensão de von Mises	57003.7 N/m ² Nó: 7714	1.57988e+008 N/m ² Nó: 12355

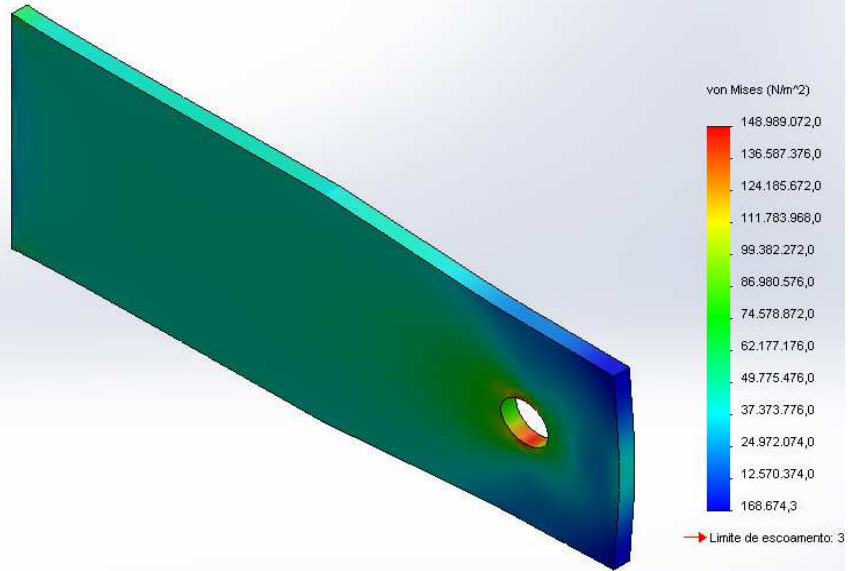
Nome do modelo: Placa Carcaça Retangular
 Nome do estudo: SimulationXpress Study
 Tipo de plotagem: Estático tensão nodal Stress
 Escala de distorção: 350.125



Placa Carcaça Retangular-SimulationXpress Study-Tensão-Stress

Nome	Tipo	Mín	Máx.
Stress	VON: tensão de von Mises	168674 N/m ² Nó: 893	1.48989e+008 N/m ² Nó: 15266

Nome do modelo: Placa Carçaça Cilíndrica
Nome do estudo: SimulationXpress Study
Tipo de plotagem: Estático tensão nodal Stress
Escala de distorção: 439.424



Placa Carçaça Cilíndrica-SimulationXpress Study-Tensão-Stress

ANEXO V – IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE BRINSON PARA SMA

```
% Este programa é uma implementação do modelo de Brinson para simular  
% o comportamento do atuador de SMA dimensionado.
```

```
% Definição das constantes referentes à liga de  
% NiTi (Dye, 1990; Lianda, 1990)
```

```
clc  
clear all  
close all
```

```
Da = 67*10^3;  
Dm = 26.3*10^3;  
theta = 0.55;  
Mf = 9;  
Ms = 18.4;  
As = 34.5;  
Af = 50.0;  
Cm = 8;  
Ca = 13.8;  
sigmas = 100;  
sigmaf = 170;  
E1 = 0.067;
```

```
% Definição das condições iniciais
```

```
E0 = 0;  
es0 = 0;  
eT0 = 0;  
sigma0 = 0;  
e0 = 0;  
T = 25;  
T0 = T;  
T(1) = T;
```

```
% Parametros Geometricos do DAMiF
```

```
b = 0.32;  
Lf = 1.0; % Comprimento frio do SMA  
a = 400; % vão  
Lcabo = 400.1144; % Comprimento do cabo  
alfa = 18.43*10^-6; % Coeficiente de Dilatação Térmica
```

```
% Escolha das variáveis de entrada
```

```
sigmamax = 250;  
Tmax = 84;
```

```
% Cálculo de constantes utilizadas no programa
```

```
aM = pi/(Ms-Mf);  
aA = pi/(Af-As);  
deltaTe = 0;
```

```
% Aplicação da tensão até o valor desejado
```

```

if Mf < T
    if T < Ms
        eT0 = (1-eT0)/2*(cos(aM*(T-Mf))+1);
        e0 = eT0;
    end
end
if T <= Mf
    eT0 = 1;
    e0 = eT0;
end
D0 = Da+e0*(Dm-Da);
omega0 = -E1*D0;
for i = 1:600
    tempo(i) = 0.1*i;
    sigma(i) = sigmamax/60*tempo(i);

% Casos T >= Ms

    if T >= Ms
        if sigma(i) <= sigmas+Cm*(T-Ms)
            es(i) = es0;
            eT(i) = eT0;
            e(i) = e0;
        end
        if sigmas+Cm*(T-Ms) < sigma(i)
            if sigma(i) < sigmaf+Cm*(T-Ms)
                es(i) = (1-es0)/2*cos(pi/(sigmas-sigmaf)*(sigma(i)-sigmaf-
Cm*(T-Ms)))+(1+es0)/2;
                eT(i) = eT0-eT0*(es(i)-es0)/(1-es0);
                e(i) = es(i)+eT(i);
                cte1 = es(i);
                cte2 = eT(i);
                cte3 = e(i);
            end
        end
        if sigma(i) >= sigmaf+Cm*(T-Ms)
            es(i) = cte1;
            eT(i) = cte2;
            e(i) = cte3;
        end
    end

% Casos T < Ms

    if T < Ms

        if sigma(i) <= sigmas
            es(i) = es0;
            eT(i) = eT0;
            e(i) = e0;
        end
        if sigmas < sigma(i)
            if sigma(i) < sigmaf
                es(i) = (1-es0)/2*cos(pi*(sigma(i)-sigmaf)/(sigmas-
sigmaf)))+(1+es0)/2;
                if Mf < T
                    if T < T0
                        deltaTe = (1-eT0)/2*(cos(aM*(T-Mf))+1);

```

```

        end
        end
        eT(i) = eT0-eT0*(es(i)-es0)/(1-es0)+deltaTe;
        e(i) = es(i)+eT(i);
        cte1 = es(i);
        cte2 = eT(i);
        cte3 = e(i);
    end
end
if sigma(i) >= sigmaf
    es(i) = cte1;
    eT(i) = cte2;
    e(i) = cte3;
end
end
D = Da+e(i)*(Dm-Da);
omega = -El*D;
E(i) = 1/D*(sigma(i)-sigma0 +D0*E0-omega*es(i)+omega0*es0-theta*(T-
T0));

end

E0 = E(600);
E(1) = E0;
Lslim(1) = (- (Lf^2)*(-2*E0+E0.^2))/(2*b);
f_ns(1) = sqrt(3*a*((Lcabo+Lslim(1))-a)/8);
f(1)=sqrt(3*a*((Lcabo+Lslim(1))-a)/8);
e0 = e(600);
e(1) = e0;
es0 = es(600);
es(1) = es0;
eT0 = eT(600);
eT(1) = eT0;
if es(1) >= 0.9995
    es(1) = 1;
    e(1) = 1;
end
D0 = Da+e0*(Dm-Da);
omega0 = -El*D0;
sigma0 = sigmamax;
tempo(1) = 0;

% Aplicação da subida da temperatura rampa

for i = 1:600
    tempo(i+1) = 0.1*i;
    T(i+1) = (Tmax-25)/60*tempo(i+1) + T0;
    if sigmamax >= Ca*(T(i+1)-As)
        es(i+1) = es(i);
        eT(i+1) = eT(i);
        e(i+1) = e(i);
    end
    if T(i+1) > As
        if Ca*(T(i+1)-Af) < sigmamax
            if sigmamax < Ca*(T(i+1)-As)
                e(i+1) = e0/2*(cos(aA*(T(i+1)-As-sigmamax/Ca))+1);
                es(i+1) = es0 - es0/e0*(e0-e(i+1));
                eT(i+1) = eT0-eT0/e0*(e0-e(i+1));
                D = Da+e(i+1)*(Dm-Da);
                omega = -El*D;
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end
if sigmamax < Ca*(T(i+1)-Af)
    es(i+1) = es(i);
    eT(i+1) = eT(i);
    e(i+1) = e(i);
end
if es(i+1) >= 0.9995
    es(i+1) = 1;
    e(i+1) = 1;
end
D = Da+e(i+1)*(Dm-Da);
omega = -El*D;
E(i+1) = 1/D*(sigmamax-sigma0 +D0*E0-omega*es(i+1)+omega0*es0-
theta*(T(i+1)-T0));
Lslim(i+1) = (-(Lf^2)*(-2*E(i)+E(i).^2))/(2*b);
f(i+1) = sqrt(3*a*((Lcabo+(Lcabo*alfa*(T(i+1)-T0))+Lslim(i+1))-a)/8);
f_ns(i+1)=sqrt(3*a*((Lcabo+(Lcabo*alfa*(T(i+1)-T0))+Lslim(1))-a)/8);
    end

% Aplicação da descida da temperatura rampa

for i = 601:1200
    tempo(i+1) = i*0.1;
    T(i+1) = 1/60*((25-Tmax)*tempo(i+1)+120*Tmax-1500);
% Casos T >= Ms

    if T(i+1) >= Ms
        if sigmamax <= sigmas+Cm*(T(i+1)-Ms)
            es(i+1) = es(i);
            eT(i+1) = eT(i);
            e(i+1) = e(i);
        end
        if sigmas+Cm*(T(i+1)-Ms) < sigmamax
            if sigmamax < sigmaf+Cm*(T(i+1)-Ms)
                es(i+1) = (1-es(601))/2*cos(pi/(sigmas-sigmaf)*(sigmamax-
sigmaf-Cm*(T(i+1)-Ms)))+(1+es(601))/2;
                eT(i+1) = eT0-eT0*(es(i+1)-es0)/(1-es0);
                e(i+1) = es(i+1)+eT(i+1);
            end
        end
        if sigmamax >= sigmaf+Cm*(T(i+1)-Ms)
            es(i+1) = es(i);
            eT(i+1) = eT(i);
            e(i+1) = e(i);
        end
    end

% Casos T < Ms

    if T(i+1) < Ms

        if sigmamax <= sigmas
            es(i+1) = es(i);
            eT(i+1) = eT(i);
            e(i+1) = e(i);
        end
        if sigmas < sigmamax

```

```

        if sigmamax < sigmaf
            es(i+1) = (1-es0)/2*cos(pi*(sigmamax-sigmaf)/(sigmas-
sigmaf))+(1+es0)/2;
            if Mf < T(i+1)
                if T(i+1) < Ms
                    if T(i+1) < T0
                        deltaTe = (1-eT0)/2*(cos(aM*(T(i+1)-Mf))+1);
                    end
                end
            end
            eT(i+1) = eT0-eT0*(es(i+1)-es0)/(1-es0)+deltaTe;
            e(i+1) = es(i+1)+eT(i+1);
        end
        if sigmamax >= sigmaf
            es(i+1) = es(i);
            eT(i+1) = eT(i);
            e(i+1) = e(i);
        end
        if es(i+1) >= 0.9995
            es(i+1) = 1;
            e(i+1) = 1;
        end
        D = Da+e(i+1)*(Dm-Da);
        omega = -E1*D;
        E(i+1) = 1/D*(sigmamax-sigma0 + D0*E0-omega*es(i+1)+omega0*es0-
theta*(T(i+1)-T0));
        Lslim(i+1) = (-Lf^2)*(-2*E(i)+E(i).^2)/(2*b);
        f(i+1) = sqrt(3*a*((Lcabo+(Lcabo*alfa*(T(i+1)-T0))+Lslim(i+1))-a)/8);
        f_ns(i+1)=sqrt(3*a*((Lcabo+(Lcabo*alfa*(T(i+1)-T0))+Lslim(1))-a)/8);
end

```