CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ESTUDO DE DISPOSITIVOS PSEUDOELÁSTICOS PARA A APLICAÇÃO EM ATENUADORES DE VIBRAÇÃO

Ivan Ivanovitsch Thesi Riagusoff

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientador:

Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Rio de Janeiro

Agosto, 2012

ESTUDO DE DISPOSITIVOS PSEUDOELÁSTICOS PARA A APLICAÇÃO EM ATENUADORES DE VIBRAÇÃO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Ivan Ivanovitsch Thesi Riagusoff

Aprovada por:

_____

Presidente, Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco, D.Sc.
(orientador)

_____

Ricardo Alexandre de Amar Aguiar, D.Sc.

_____

Silvio Romero de Barros, D.Sc.

_____

Marcelo Amorim Savi, D.Sc. (UFRJ)

Rio de Janeiro

Agosto, 2012

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

R481 Riagusoff, Ivan Ivanovitsch Thesi
Estudo de dispositivos pseudoelásticos para a aplicação em atenuadores de vibração / Ivan Ivanovitsch Thesi Riagusoff.—2012.
xix, 106f. + apêndices : il. col. , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2012.
Bibliografia : f.101-106
Orientador : Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

1. Engenharia mecânica. 2. Liga de memória de forma. 3. Materiais inteligentes. 4. Método dos elementos finitos. I. Pacheco, Pedro Manuel Calas Lopes (Orient.). II. Título.

CDD 669

RESUMO

ESTUDO DE DISPOSITIVOS PSEUDOELÁSTICOS PARA A APLICAÇÃO EM ATENUADORES DE VIBRAÇÃO

Ivan Ivanovitsch Thesi Riagusoff

Orientador:
Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

As ligas com memória de forma (SMAs - Shape Memory Alloys) possuem a capacidade de desenvolver grandes forças e deslocamentos através de um baixo consumo de energia. Devido a estas características especiais, as SMAs têm sido utilizadas em diversas aplicações. O laço de histerese pseudoelástico observado nas SMAs austeníticas está associado a dissipação de energia. Dessa forma, elementos de SMA pseudoelásticos podem ser utilizados como atenuadores de vibrações. Este trabalho apresenta um modelo numérico não linear baseado no Método de Elementos Finitos para estudar o comportamento de atenuadores de vibração com elementos de SMA. O modelo considera grandes deslocamentos e a presença de duas fases (martensita e austenita) e é aplicado ao estudo do comportamento pseudoelástico de três geometrias de elementos de SMA: barras cilíndricas, molas helicoidais e molas Belleville. Os resultados numéricos mostram que o modelo apresenta uma boa concordância com resultados experimentais, indicando que pode ser utilizado para representar o comportamento de elementos pseudoelásticos de SMA. Finalmente, diversas condições de carregamentos são analisadas com os modelos propostos para avaliar a capacidade de dissipação de energia das três geometrias de elementos de SMA pseudoelásticos.

Palavras-chave:
Ligas com Memória de Forma; Pseudoelasticidade; Modelagem; Simulação Numérica; Método de Elementos Finitos.

Rio de Janeiro

Agosto, 2012

ABSTRACT

STUDY OF PSEUDOELASTIC DEVICES APPLIED TO VIBRATION ATTENUATORS

Ivan Ivanovitsch Thesi Riagusoff

Advisor:
Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, as partial fulfillment of the requirements for the Master degree in Mechanical Engineering and Materials Technology.

Shape memory alloys (SMAs) present the capability to develop large forces and displacements with low power consumption. Due its special characteristics SMAs has been used in many different applications. Pseudoelastic hysteresis loop observed in austenitic SMAs is associated to energy dissipation. Therefore, pseudoelastic SMA elements can be used as vibration attenuators. This work presents a nonlinear numerical model based on the Finite Element Method to study the behavior of vibration attenuators with SMA elements. The model considers the presence of two phases (martensite and austenite) and large displacements, and is applied to study the pseudoelastic behavior of three geometries of SMA absorber elements: cylindrical bars, helical springs and Belleville springs. Numerical results show that the model is in close agreement with those obtained by experimental tests, indicating that the model can be used to represent the pseudoelastic behavior of SMA elements. Finally several loading conditions are analyzed with the proposed models to assess the capability of the three pseudoeleastic SMA elements to dissipate energy.

Keywords:
Shape Memory Alloys; Pseudoelasticity; Modeling; Numerical Simulation; Finite Element Method

Rio de Janeiro

August, 2012

Dedico aos meus filhos Rafael Medeiros Thesi e Guilherme Medeiros Thesi.

Agradecimentos

Agradeço a minha família por sempre me mostrar a importância da educação.

Agradeço ao meu professor orientador Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco, por toda a orientação e paciência dedicadas neste trabalho.

Aos professores Paulo Pedro Kenedi, Hector Reynaldo Meneses Costa e Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, que muito contribuíram para a minha formação, além de sempre me incentivarem desde o início a participar em iniciações científicas e projetos acadêmicos como o Mini Baja.

Agradeço aos meus amigos da Engineering Simulation and Scientific Software (ESSS) Mauricio Rangel Pacheco, Roberto Monteiro Basto da Silva, Hugo Bottino Di Gioia Almeida e Phelippe de Araujo Pereira por todo apoio e paciência durante a etapa de conlusão deste trabalho.

Sumário

Introdução **1**

I. Materiais com Memória de Forma **4**

I.1 O Efeito da Pseudoelasticidade 8

I.2 O Efeito da Memória de Forma 10

I.3 Aplicações com Ligas com Memória de Forma 13

I.4 Motivação das Ligas com Memória de Forma para Absorção de Energia 18

II. Atenuadores de Energia **21**

II.1 Atenuadores de Energia Tradicionais 24

II.2 Atenuadores de Vibrações com Ligas com Memória de Forma 29

III. Modelo Constitutivo para a Modelagem de Ligas com Memória de Forma **34**

III.1 Modelo Constitutivo Utilizado no Software de Elementos Finitos ANSYS 34

IV. Modelos Numéricos **43**

IV.1 O Método de Elementos Finitos 43

IV.2 Tipos de Elementos Utilizados no Software de Elementos Finitos ANSYS 45

IV.3 Geometrias Utilizadas nos Modelos de Elementos Finitos 47

IV.3.1 Geometria da Mola Belleville 47

IV.3.2 Geometria da Barra Cilíndrica 49

IV.3.3 Geometria da Mola Helicoidal 50

IV.4 Malhas Utilizadas nos Modelos de Elementos Finitos 51

IV.4.1 Malha de Elementos Finitos da Mola Belleville 51

IV.4.2 Malha de Elementos Finitos da Barra Cilíndrica 52

IV.4.3 Malha de Elementos Finitos da Mola Helicoidal 52

IV.5 Hipóteses Adotadas para os Modelos de Elementos Finitos 53

IV.5.1 Hipóteses Adotadas na Mola Belleville 53

IV.5.2 Hipóteses Adotadas na Barra Cilíndrica 56

IV.5.3 Hipóteses Adotadas na Mola Helicoidal 58

IV.6 Calibração das Propriedades Mecânicas Através de Dados Experimentais 59

V. Resultados dos Modelos Numéricos **69**

V.1 Resultados para o Modelo da Mola Belleville 69
V.2 Resultados para os Modelos de Barra Cilíndrica 76
V.3 Resultados para o Modelo da Mola Helicoidal 88
V.4 Comparação dos Resultados 97

Conclusão **99**

Referências Bibliográficas **101**

Apêndice I **107**

Apêndice II **115**

Anexo I **117**

Lista de Figuras

Figura I.1 - Resposta em função do estímulo para alguns materiais, adaptado de HU (2007). 4

Figura I.2 - Comportamentos termomecânicos das SMAs: 1 - Pseudoelasticidade, adaptado de LAGOUDAS (2008); 2 - SME, adaptado de LAGOUDAS (2008); 3 - Transformação de fase devida à variação de temperatura (PAIVA, 2004); 4 - TWSME (PAIVA, 2004). 5

Figura I.3 - Transformação de fase induzida por temperatura em uma SMA sem carregamento mecânico, adaptado de LAGOUDAS (2008). 6

Figura I.4 - Comportamento de pseudoelasticidade (MONTEIRO JR, 2007). Trecho *A B* na curva representa o início e fim da transformação de fase *A* -> M^+. O trecho *C D* representa a transformação de fase M^+ -> *A*. 8

Figura I.5 - Comportamento de pseudoelasticidade parcial (MONTEIRO JR, 2007). 9

Figura I.6 - Efeito de memória de forma (PAIVA, 2004). 10

Figura I.7 - Curva *σ-ε-T* de um ensaio uniaxial exibindo o efeito de memória de forma para uma liga de NiTi típica, adaptado de LAGOUDAS (2008). 11

Figura I.8 - 1 - Efeito de memória de forma de duas vias (TWSME) e 2 - Curva *σ-ε-T* (PAIVA, 2004). 12

Figura I.9 - Armação do óculos feita de SMA (LAGOUDAS, 2008). 13

Figura I.10 - Atuadores de liga com memória de forma nas aletas com geometria variável durante um vôo de teste (LAGOUDAS, 2008). 14

Figura I.11 – Dobradiça em SMA nas posições dobrada e desdobrada (LAGOUDAS, 2008)... 15

Figura I.12 - Representação esquemática de uma luva de conexão utilizando o efeito de memóra de forma. A luva em vermelho está em sua condição inicial, a luva em preto representa ela após o aquecimento (DARJAN, 2007). 15

Figura I.13 - Exemplo de um motor térmico com mola SMA (LAGOUDAS, 2008). 16

Figura I.14 - Absorvedor com fios de SMA, adaptado de HAN *et al* (2005). 16

Figura I.15 - Diferentes tipos de stents auto expansivos feitos de NiTi (MELZER e STÖECKEL, 2010). 17

Figura I.16 - Filtro de Simon aberto em duas vistas na esquerda (PAIVA, 2004). Detalhamento da sequência de lançamento na direita (DARJAN, 2007). 18

Figura II.1 - Idealização para diversos mecanismos de atenuação de energia, adaptado de UNIVERSITY AT BUFFALO (2001). 22

Figura II.2 - Conceito de um TVA (PAIVA, 2004). 23

Figura II.3 - Conceito de um ATVA (WILLIAMS *et al*, 2002). 23

Figura II.4 - Atenuador de borracha com núcleo de chumbo (AGOM METAL RUBBER ENGINEERING, 2012). 24

Figura II.5 - Absorvedor do tipo deslizamento de fricção, adaptado de UNIVERSITY AT BUFFALO (2001). 25

Figura II.6 - Absorvedor de fricção do tipo Pall (SHAO, 2012). 25

Figura II.7 - Vista em corte transversal de um amortecedor com acumulador, adaptado de HWANG (2012). 26

Figura II.8 - Exemplo de um amortecedor viscoelástico (UNIVERSITY AT BUFFALO, 2001)... 27

Figura II.9 - Atenuador histerético metálico ADAS (UNIVERSITY AT BUFFALO, 2001). 27

Figura II.10 - Atenuador histerético metálico TADAS (UNIVERSITY AT BUFFALO, 2001). 28

Figura II.11 - Curva *F-u* experimental de um TADAS (UNIVERSITY AT BUFFALO, 2001). 28

Figura II.12 - Curva σ-ε com detalhes da transformação de fase austenítica para martensítica ($A \rightarrow M^{+}$) e vice-versa (PAN e CHO, 2007). 29

Figura II.13 - Curva *F-u* mostrando a energia total até o final do carregamento (W) e a energia líquida absorvida (ΔW), adaptado de PAN e CHO (2007). 30

Figura II.14 - Atenuador de SMA para ponte estaiada, adaptado de PUGLIESE e CASEY (2012). 31

Figura II.15 - Dispositivo com cabos restritores superelásticos de SMA para pontes, adaptado de DESROCHES e SMITH (2003). 31

Figura II.16 - Torre do sino na igreja de San Giorgio com tendões híbridos de aço com dispositivos de SMA, adaptado de MOTAVALLI *et al* (2009). Detalhe do dispositivo montado em um tendão (FUGAZZA, 2003). 32

Figura II.17 - Curva *F-u* para o dispositivo de SMA montado em um dos tendões, adaptado de MOTAVALLI *et al* (2009). 33

Figura II.18 - Dispositivos utilizados no telhado da Basílica de San Francesco (FIP INDUSTRIALE, 2012). 33

Figura III.1 - Comportamento da pseudoelasticidade (AURICCHIO *et al*, 1997). 35

Figura III.2 - Curva σ-ε idealizada para o comportamento pseudoelástico. 41

Figura IV.1 - Etapas para a aplicação do M.E.F. (ALMEIDA, 2011). 43

Figura IV.2 - Elemento PLANE183 e as formas possíveis (ANSYS, 2012). 45
Figura IV.3 - Elementos CONTA172 e TARGE169 utilizados (ANSYS, 2012). 46
Figura IV.4 - Elemento SOLID186 e suas formas possíveis (ANSYS, 2012). 46
Figura IV.5 - Dispositivo com as molas Belleville ensaiadas no trabalho de SPEICHER *et al* (2009). 47
Figura IV.6 - Dimensões da mola Belleville conforme handbook da SCHNORR (2003). 47
Figura IV.7 - Geometria 2D da mola Belleville estudada. 49
Figura IV.8 - Geometria 2D da mola Belleville com expansão cíclica de 360º. 49
Figura IV.9 - Geometria 3D da barra, exemplo com D = 6,35 mm e L = 70 mm. 50
Figura IV.10 - Geometria 3D da mola helicoidal, D = 51,30 mm, d = 12,70 mm, passo de 25,4 mm e 6,5 espiras. 50
Figura IV.11 - Malha do modelo 2D da mola Belleville. 51
Figura IV.12 - Malha 2D da mola Belleville com expansão cíclica de 360º. 51
Figura IV.13 - Exemplo da malha 3D de uma barra (D = 6,35 mm e L = 70 mm). 52
Figura IV.14 - Exemplo de malha da mola helicoidal (D = 51,30 mm, d = 12,70 mm, passo de 25,4 mm e 6,5 espiras). 52
Figura IV.15 - Interfaces de contato na mola Belleville. 53
Figura IV.16 - Condição de contorno de suporte fixo aplicada no disco inferior. 54
Figura IV.17 - Condição de contorno/carregamento aplicados no disco superior. 55
Figura IV.18 - Histórico do deslocamento aplicado no disco superior. 55
Figura IV.19 - Sistema de coordenadas local para extração da curva *F-u*. 56
Figura IV.20 - Condição de contorno de deslocamento na barra. 56
Figura IV.21 - Condição de contorno de rotação na barra. 57
Figura IV.22 - Carregamento de deslocamento aplicado na barra. 57
Figura IV.23 - Condição de contorno aplicada na mola helicoidal. 58
Figura IV.24 - Carregamento de deslocamento aplicada na mola helicoidal. 58
Figura IV.25 - Ilustração do dispositivo atenuador de vibração em tração/compressão proposto por SPEICHER *et al* (2009). 59
Figura IV.26 - Molas helicoidal e Belleville ensaiadas no trabalho de SPEICHER *et al* (2009). 60

Figura IV.27 - Curvas *F-u* experimentais para três molas Belleville em compressão. A mola 3 sofreu um tratamento térmico difereciado. Adaptado de SPEICHER *et al* (2009). 61

Figura IV.28 - Estudo de convergência de malha para a mola Belleville com modelo de material linear elástico. 62

Figura IV.29 - Exemplo da curva característica de uma mola Belleville (SCHNORR, 2003). 63

Figura IV.30 - Estudo de convergência de malha para a mola Belleville com modelo de material de SMA. 66

Figura IV.31 - Resultado final da calibração numérica. 67

Figura IV.32 - Curva pseudoelástica com as constantes da calibração numérica. 68

Figura V.1 - Deslocamento na direção Y (t = 4 s) na mola Belleville. 69

Figura V.2 - Tensão principal máxima (t = 4 s) na mola Belleville. 69

Figura V.3 - Evolução da tensão principal máxima na mola Belleville. 70

Figura V.4 - Tensão equivalente de *von Mises* (t = 4 s) na mola Belleville. 70

Figura V.5 - Evolução da tensão equivalente de *von Mises* na mola Belleville. 71

Figura V.6 - Fração de martensita (t = 4 s) na mola Belleville. 71

Figura V.7 - Fração de austenita (t = 4 s) na mola Belleville. 72

Figura V.8 - Evolução das frações de martensita/austenita globais na mola Belleville. 72

Figura V.9 - Fração da martensita em função da deformação total equivalente. 73

Figura V.10 - Fração da austenita em função da deformação total equivalente. 73

Figura V.11 - Localização do ponto de medição do deslocamento (eixo *Y*) no disco superior da mola Belleville. 74

Figura V.12 - Evolução do deslocamento no ponto de medição. 74

Figura V.13 - Localização do ponto de medição da força de reação. 74

Figura V.14 - Evolução da componente *Y* da força de reação no disco inferior. 75

Figura V.15 - Curva *F-u* para o dispositivo com mola Belleville de SMA. 75

Figura V.16 - Primeira hipótese de geometria equivalente (ϕ28,08 mm, L = 9,06 mm). 76

Figura V.17 - Segunda hipótese de geometria equivalente (ϕ12,70 mm, L = 44,26 mm). 77

Figura V.18 - Convergência de malha para a barra de SMA com ϕ12,70 mm. 78

Figura V.19 - Convergência de malha para a barra de SMA com ϕ6,35 mm. 78

Figura V.20 - Energia absorvida para os diversos comprimentos de barra. 79

Figura V.21 - Tensão longitudinal para os diversos comprimentos de barras. 79
Figura V.22 - Evolução da tensão longitudinal (ϕ12,70 mm, L = 375 mm). 80
Figura V.23 - Evolução da tensão longitudinal (ϕ6,35 mm, L = 230 mm). 80
Figura V.24 - Deformação total equivalente para os comprimentos de barras. 81
Figura V.25 - Densidade de energia para os diversos comprimentos de barras. 81
Figura V.26 - Frações de martensita/austenita para os diversos comprimentos. 82
Figura V.27 - Frações de martensita/austenita (ϕ12,70 mm com L = 375 mm). 83
Figura V.28 - Frações de martensita/austenita (ϕ6,35 mm com L = 230 mm). 83
Figura V.29 - Fração de martensita em função da deformação total equivalente (ϕ12,70 mm e L = 375 mm)..... 84
Figura V.30 - Fração de austenita em função da deformação total equivalente (ϕ12,70 mm e L = 375 mm)..... 84
Figura V.31 - Fração de martensita em função da deformação total equivalente (ϕ6,35 mm e L = 230 mm)..... 85
Figura V.32 - Fração de austenita em função da deformação total equivalente (ϕ6,35 mm e L = 230 mm). 85
Figura V.33 - Evolução da força de reação na barra de ϕ12,7 mm com L = 375 mm..... 86
Figura V.34 - Evolução da força de reação na barra de ϕ6,35mm com L = 230 mm..... 86
Figura V.35 - Curva *F-u* para a barra de SMA (ϕ12,7 mm com L = 375 mm). 87
Figura V.36 - Curva *F-u* para a barra de SMA (ϕ6,35mm com L = 230 mm). 87
Figura V.37 - Estudo de convergência de malha para a mola helicoidal com modelo de material linear elástico. 89
Figura V.38 - Estudo de sensibilidade ao deslocamento aplicado na mola helicoidal. 89
Figura V.39 - Estudo de convergência de malha para a mola helicoidal com modelo de material de SMA. 90
Figura V.40 - Deslocamento na direção X (t = 1 s) na mola helicoidal. 90
Figura V.41 - Tensão principal máxima (t = 1 s) na mola helicoidal. 91
Figura V.42 - Evolução da tensão principal máxima na mola helicoidal. 91
Figura V.43 - Tensão cisalhante máxima (t = 1 s) na mola helicoidal. 92
Figura V.44 - Evolução da tensão cisalhante máxima na mola helicoidal. 92
Figura V.45 - Tensão equivalente de *von Mises* (t = 1 s) na mola helicoidal. 93
Figura V.46 - Evolução da tensão equivalente de *von Mises* na mola helicoidal. 93

Figura V.47 - Fração de martensita (t = 1 s) na mola helicoidal. 94

Figura V.48 - Fração de austenita (t = 1 s) na mola helicoidal. 94

Figura V.49 - Evolução das frações de martensita/austenita na mola helicoidal. 95

Figura V.50 - Fração da martensita em função da deformação total equivalente..... 95

Figura V.51 - Fração da austenita em função da deformação total equivalente..... 96

Figura V.52 - Evolução da força de reação na mola helicoidal. 96

Figura V.53 - Curva *F-u* para a mola helicoidal de SMA. 97

Figura V.54 - Curvas *F-u* normalizadas para a mola Belleville, barras (ϕ12,70mm e ϕ6,35mm) e mola helicoidal. 98

Lista de Tabelas

Tabela I.1 - Propriedades típicas de uma liga NiTi, adaptado de LU e WENG (2000); FUGAZZA (2003). 7

Tabela I.2 - Propriedades de diversos atuadores, adaptado de MONTEIRO JR (2007). 19

Tabela III.1 - Descrição das propriedades mecânicas para a pseudoelasticidade de acordo com o modelo de AURICCHIO (2001). 42

Tabela IV.1 - Descrição das dimensões da mola Belleville (SCHNORR, 2003). 48

Tabela IV.2 - Dimensões da mola Belleville (SPEICHER *et al*, 2009). 48

Tabela IV.3 - Coeficientes de atrito aço/aço, adaptado de BUDYNAS−NISBETT (2006)..... 54

Tabela IV.4 - Comparação entre os valores empíricos e numéricos (modelo 5). 65

Tabela IV.5 - Propriedades mecânicas obtidas na calibração numérica. 67

Tabela V.1 - Comparação dos resultados..... 98

Lista de Símbolos Gregos

α - Parâmetro que afeta a resposta em compressão e tração

β - Ângulo do cone da mola Belleville

$\{\Delta\varepsilon^{tr}\}$ - Deformação de transformação incremental

ΔW -Trabalho líquido no laço de histerese

ε - Deformação

ε_L - Máxima deformação residual para a SMA

ε_{Res} - Deformação residual

θ - Componente volumétrica da deformação ε

θ^{tr} - Componente volumétrica da deformação de transformação ε^{tr}

μ - Coeficiente de atrito

υ - Razão de Poisson

ξ_A - Fração da austenita

ξ_M - Fração de martensita

$\dot{\xi}_A$ - Taxa da fração de austenita

$\dot{\xi}_M$ - Taxa da fração de martensita

$\dot{\xi}_A^{AM}$ - Taxa da fração de austenita na transformação A -> M

$\dot{\xi}_A^{MA}$ - Taxa da fração de austenita na transformação M -> A

$\dot{\xi}_M^{AM}$ - Taxa da fração de martensita na transformação A -> M

$\dot{\xi}_M^{MA}$ - Taxa da fração de martensita na transformação M -> A

σ - Tensão

σ_{III} - Tensão no ponto de contato da mola Belleville com o disco inferior

σ_f^{AM} - Tensão final da transformação de fase

σ_f^{MA} - Tensão final da inversão da transformação de fase

σ_s^{AM} - Tensão de início da transformação de fase

σ_s^{MA} - Tensão de início da inversão da transformação de fase

$\tau_{máx}$ - Tensão cisalhante máxima na seção do fio da mola helicoidal

ϕ - Diâmetro da barra de seção circular

Lista de Símbolos Latinos

A - Austenita

A_f - Temperatura de fim da formação de austenita

A_s - Temperatura de início da formação de austenita

C - Índice de curvatura da mola helicoidal

$[C]$ - Matriz de amortecimento

d - Diâmetro do fio da mola helicoidal

D - Diâmetro da barra de seção circular / Diâmetro externo da mola helicoidal

$[D]$ - Matriz tensão-deformação elástica

D_e - Diâmetro externo da mola Belleville

D_i - Diâmetro interno da mola Belleville

D_0 - Diâmetro do centro de rotação da mola Belleville

E - Módulo de elasticidade

F - Força

F_t - Força no instante t

$\{F\}$ - Vetor força

$\dot{F}$ - Primeira derivada em relação ao tempo da superfície de escoamento

$F(\boldsymbol{\sigma})$ - Superfície de escoamento responsável pela transformação de fase

G - Módulo de cisalhamento

h_0 - Altura do cone da mola Belleville descarregada

H^{AM} - Quantidade escalar que controla a transformação de fase A->M

H^{MA} - Quantidade escalar que controla a transformação de fase M->A

K - Rigidez / Módulo de compressibilidade

K_t - Rigidez no instante t

$[K]$ - Matriz de rigidez

l_0 - Altura da mola Belleville

L - Comprimento da barra de seção circular

$[M]$ - Matriz de massa

M - Martensita

M_s - Temperatura de início da formação de martensita

M_f - Temperatura de fim da formação de martensita

M^+ - Martensita não-maclada induzida por tensão trativa

M^- - Martensita não-maclada induzida por tensão compressiva

N - Número de espiras da mola helicoidal

p - Componente volumétrica da tensão

R_f^{AM} - Parâmetro que relaciona σ_f^{AM} e α na transformação de fase A->M

R_f^{MA} - Parâmetro que relaciona σ_f^{MA} e α na transformação de fase M->A

R_s^{AM} - Parâmetro que relaciona σ_s^{AM} e α na transformação de fase A->M

R_s^{MA} - Parâmetro que relaciona σ_s^{MA} e α na transformação de fase M->A

s - Deslocamento aplicado na mola Belleville

$\|\boldsymbol{s}\|$ - Norma Euclidiana no espaço $\boldsymbol{S}$ dos tensores simétricos e desviatórios

t - Espessura da mola Belleville

T - Temperatura

u - Deslocamento

u_t - Deslocamento no instante t

$\{u\}$ - Vetor deslocamento

$\{\dot{u}\}$ - Vetor velocidade

$\{\ddot{u}\}$ - Vetor aceleração

W - Trabalho

Introdução

A ligas com efeito de memória de forma (*Shape Memory Alloys – SMAs*) apresentam dois fenômenos com elevados potenciais de aplicação em diversas áreas. Estas características peculiares são a pseudoelasticidade e o efeito da memória de forma. O uso das ligas NiTi está gradativamente se expandindo, indo de aplicações ortodônticas até atuadores na indústria aeroespacial.

O efeito da pseudoelasticidade nas SMAs pode ser utilizado para dissipar energia, o que torna este material apropriado para a atenuação de vibrações (FUGAZZA, 2003). A pseudoelasticidade está associada a um comportamento histerético que pode ser utilizado para promover a dissipação de energia mecânica em cada ciclo. Além disso, a mudança da inclinação na curva tensão-deformação devido à transformação de fase, proporciona a este material ótima capacidade de atenuar vibrações (LAGOUDAS, 2009), pois pode ser associada à rigidez do elemento. Outra característica marcante das SMAs é a sua capacidade de restauração do seu centro ou ponto de equilíbrio (*recentering*) após o deslocamento induzido por uma tensão significativa (PUGLIESE e CASEY, 2012).

Os atenuadores de vibração são elementos que possuem a capacidade de reduzir as interações entre a fonte de vibração e um outro corpo. Os atenuadores podem ser passivos, ativos ou adaptativos (MEIROVITCH, 1990). No caso dos atenuadores de vibração passivos, estes apresentam a capacidade constante de amortecimento (MEIROVITCH, 1990; PUGLIESE e CASEY, 2012). Os atenuadores ativos apresentam uma faixa mais ampla de frequência se comparados aos passivos. A sintonização nos atenuadores ativos pode ser feita através de ajustes nos ganhos de realimentação, não necessitando de nenhum ajuste em parâmetros físicos (MARQUES, 2000). Os atenuadores adaptativos são uma combinação dos dois anteriores citados. O sentido de adaptativo é caracterizado pela variação de parâmetros físicos, seja ela feita de forma automática ou com a intervenção de um operador, garantindo assim a sintonização em uma banda de frequência bem maior em comparação aos atenuadores passivos e ativos (MARQUES, 2000).

A disponibilidade de ferramentas numéricas existentes aliada aos avançados modelos constitutivos implementados, têm possibilitado avanços na modelagem do efeito pseudoelástico presentes nas SMAs. Neste trabalho modelos numéricos baseados no método de elementos finitos foram desenvolvidos, para avaliar o

desempenho de atenuadores de vibração passivos de SMA em três diferentes geometrias: barra, mola helicoidal e mola Belleville.

Esta dissertação está organizada em 5 Capítulos, 2 Apêndices e 1 Anexo.

- **Capítulo I:** Este capítulo apresenta uma revisão das principais características das ligas com memória de forma, também apresenta o efeito da pseudoelasticidade e o efeito de memória de forma. Aplicações com SMAs são exemplificadas na sequência, no final, apresenta-se a motivação para o uso das SMAs na absorção de energia.

- **Capítulo II:** A importância dos atenuadores de vibração em sistemas e estruturas é introduzida e na continuidade, são apresentados os atenuadores de energia tradicionais. Por último, os atenuadores de energia com ligas metálicas com memória de forma são apresentados.

- **Capítulo III:** Uma breve apresentação sobre a modelagem constitutiva de SMAs é apresentada e depois, mostra-se o modelo constitutivo utilizado no software de elementos finitos ANSYS.

- **Capítulo IV:** Neste capítulo o método numérico de elementos finitos e os tipos de elementos utilizados no software ANSYS são apresentados. As propriedades mecânicas para os modelos do estudo foram obtidas, através da calibração com dados experimentais realizados por SPEICHER *et al* (2009). As geometrias e hipóteses adotadas também são apresentadas.

- **Capítulo V:** A análise dos resultados dos modelos numéricos para as geometrias da mola Belleville, barra de seção circular e mola helicoidal são apresentadas neste capítulo.

- **Apêndice I:** Este apêndice apresenta as malhas dos modelos numéricos, utilizadas nos estudos de convergência para os modelos da mola Belleville, barra de seção circular e mola helicoidal.

- **Apêndice II:** Algumas planilhas eletrônicas desenvolvidas para este estudo são mostradas neste apêndice.

- **Anexo I:** Contem as folhas de dados com parâmetros utilizados na etapa de calibração com os dados experimentais.

I. Materiais com Memória de Forma

Materiais que respondem dinamicamente aos estímulos externos podem ser considerados inteligentes. Um material, ou um sistema, pode ser considerado adaptativo quando é capaz de responder a um estímulo e esta resposta (mudança de forma, rigidez, etc.) é repetitiva (HU, 2007). Um esquema sobre a relação resposta-estímulo é apresentada na Figura I.1.

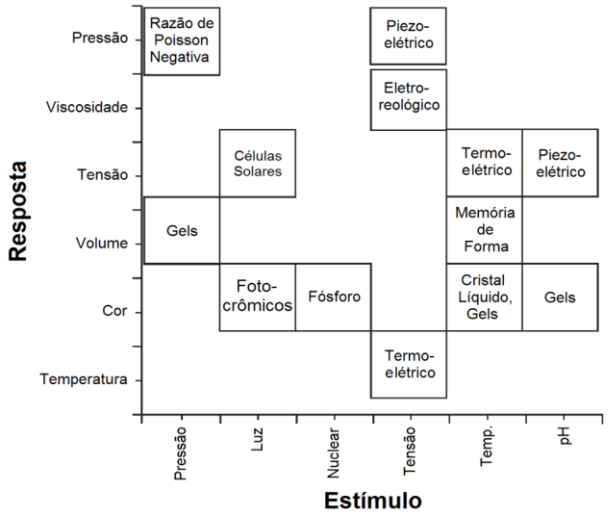


Figura I.1 - Resposta em função do estímulo para alguns materiais, adaptado de HU (2007).

O avanço na ciência e tecnologia nas últimas décadas tornou acessível a aplicação dos materiais inteligentes em diversas áreas. Existe uma tendência do uso destes materiais de forma extensiva num futuro próximo, proporcionando inovação tecnológica em muitas aplicações.

Alguns dos materiais inteligentes mais estudados são: as ligas metálicas com memória de forma, materiais poliméricos com efeito de memória, fluidos magneto-reológicos (reologia modificada em função de um campo magnético) e fluidos eletro-reológicos (mudança das características reológicas quando sumbetido a um campo elétrico) (BORN, 2007).

O efeito de memória de forma foi observado primeiro em amostras de ouro-cádmio em 1932, este fenômeno também foi observado no bronze (cobre-zinco) em 1938. Em 1962 William J. Buehler e seus colegas descobriram no U.S. Naval Ordnance Laboratory (NOL) que ligas níquel-titânio apresentam o efeito de memória de forma, originando assim o nome NiTi-NOL (HU, 2007).

As ligas metálicas com memória de forma apresentam vários comportamentos termomecânicos complexos, a saber: 1 - Pseudoelasticidade; 2 - Efeito de memória de forma (*Shape Memory Effect* – SME); 3 - Transformação de fase devido à variação de temperatura e 4 - Efeito de memória de forma reversível (*Two-Way Shape Memory Effect* – TWSME) (PAIVA, 2004). Estes comportamentos presentes nas SMAs são ilustrados na Figura I.2.

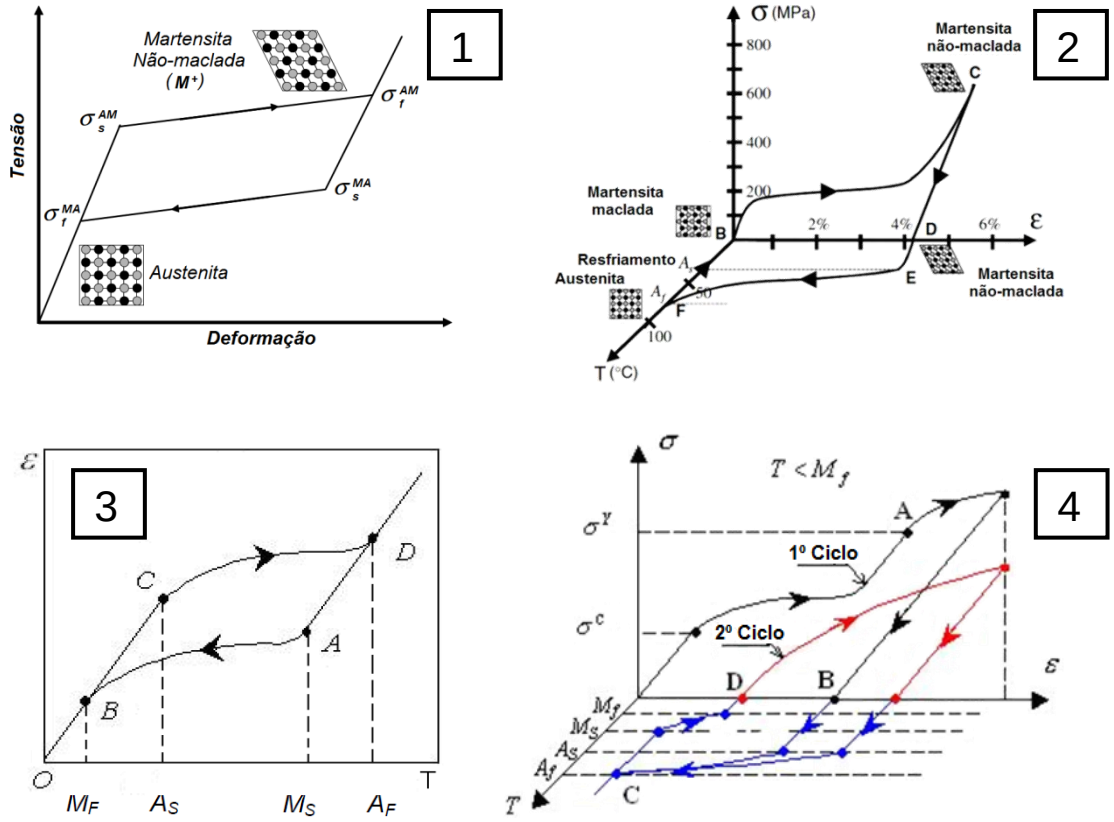


Figura I.2 - Comportamentos termomecânicos das SMAs: 1 - Pseudoelasticidade, adaptado de LAGOUDAS (2008); 2 - SME, adaptado de LAGOUDAS (2008); 3 - Transformação de fase devida à variação de temperatura (PAIVA, 2004); 4 - TWSME (PAIVA, 2004).

O comportamento especial das SMAs não está presente na maioria dos materiais metálicos tradicionais. A pseudoelasticidade e o efeito de memória de forma são a base de aplicações inovadoras desde aplicações simples até a biomédica e aeroespacial.

As características especiais das ligas de SMA metálicas ocorrem devido à existência de duas estruturas cristalográficas: a austenita, que possui uma fase ordenada, e a martensita, que apresenta uma estrutura com um menor grau de ordem. As suas transformações de austenita em martensita e vice-versa são do tipo sólido-sólido sem difusão (OLIVEIRA, 2008). Normalmente considera-se a presença de 4 fases: austenita (*A*), martensita maclada (*twinned martensite*) (*M*) e as martensitas não-macladas (*detwinned martensite*) associadas à presença de um campo de tensão trativo (M^+) e compressivo (M^-) (PAIVA, 2004).

Em uma situação onde o material está livre de tensões, definem-se 4 temperaturas, associadas às temperaturas de início e fim de transformação para carregamentos de aquecimento e resfriamento. Assim, para um aquecimento partindo de uma condição onde o material é totalmente martensítico, as temperaturas A_s e A_f (Figura I.3), representam, respectivamente, as temperaturas de início e fim de transformação de martensita em austenita. Por sua vez, para um resfriamento partindo de uma condição onde o material é totalmente austenítico, as temperaturas M_s e M_f (Figura I.3) representam, respectivamente, as temperatura de início e fim de transformação de austenita em martensita.

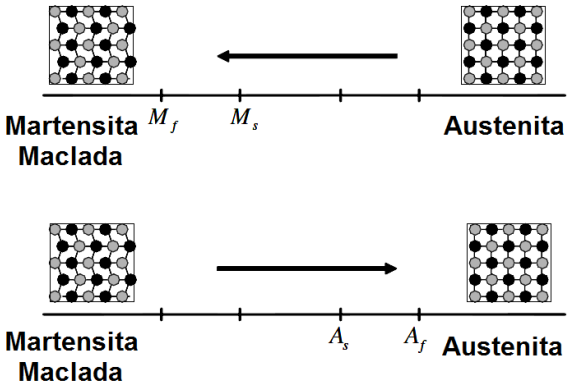


Figura I.3 - Transformação de fase induzida por temperatura em uma SMA sem carregamento mecânico, adaptado de LAGOUDAS (2008).

Algumas dessas ligas são as de NiTi e ligas à base de cobre como CuZnAl e CuAlNi (RUSTIGHI *et al*, 2003). As ligas NiTi são baseadas em uma combinação equiatômica composta de níquel e titânio. Estas ligas possuem a capacidade de suportar elevadas deformações, também apresentam boa estabilidade em aplicações cíclicas, elevada resistividade elétrica e resistência à corrosão.

As ligas à base de cobre embora possam ser obtidas por processos metalúrgicos mais baratos, possuem a deformação máxima em torno de 5 % (laços de histerese menores que as SMAs de NiTi), além disso, se não houverem aditivos para o controle do tamanho do grão estes podem aumentar muito proporcionando fragilidade (FUGAZZA, 2003). Segundo LAGOUDAS (2008), WU e LIN (2000), as ligas à base de cobre apresentam baixas temperaturas de início da formação de martensita (M_s), geralmente em torno de -180ºC.

Dentre estes tipos de ligas metálicas, as constituídas de níquel-titânio (NiTi) são as mais utilizadas devido às suas excelentes propriedades mecânicas e resistência à corrosão. A Tabela I.1 mostra as propriedades típicas de uma liga NiTi. Maiores informações podem ser encontradas no Anexo I.

Tabela I.1 - Propriedades típicas de uma liga NiTi, adaptado de LU e WENG (2000); FUGAZZA (2003).

Propriedade	**Liga NiTi**
Massa específica	6,45 g/cm^3
Biocompatibilidade	Excelente
Torqueabilidade	Excelente
Resistência à corrosão	Semelhante às ligas de Ti
Recuperação ao alongamento	8 %
Módulo de elasticidade da austenita	≈ 80 GPa
Módulo de elasticidade da martensita	≈ 20 a 40 GPa
Tensão limite de resistência	≈ 1240MPa
Tensão de escoamento da austenita	190 a 700 MPa
Tensão de escoamento da martensita	70 a 140 MPa
Resistividade da austenita	≈ 100 μΩ cm
Resistividade da martensita	≈ 70 μΩ cm
Condutividade térmica da austenita	18 W/cmºC
Condutividade térmica da martensita	8,5 W/cmºC
Coeficiente de dilatação térmica	6,6 ~ 11,0 μm/m ºC

I.1 O Efeito da Pseudoelasticidade

O efeito da pseudoelasticidade também é conhecido como superelasticidade. Este é um processo que se desenvolve a temperatura constante e está relacionado com uma mudança de fase microestrutural (GEROLDO, 2009; DUERIG *et al*, 1996). Através deste efeito as ligas com memória de forma podem apresentar deformações recuperáveis após o descarregamento com valores muito superiores à maioria dos materias metálicos disponíveis em engenharia.

A pseudoelasticidade ocorre em SMAs a uma temperatura acima da temperatura de austenitização, A_f. Nesta faixa de temperatura, a fase austenítica é estável em uma condição livre de tensão. A Figura I.4 ilustra um processo de carregamento seguido de descarregamento mecânico. Quando o carregamento mecânico é aplicado, o material se comporta de forma elástica até atingir a tensão crítica σ^c (ponto *A*). A partir do valor da tensão crítica, dá-se início à transformação de fase *A* -> M^+ que se desenvolve até o ponto *B* (MONTEIRO JR, 2007; PAIVA, 2004). Esta transformação de fase é do tipo sólido-sólido sem difusão. No momento do descarregamento, o material experimenta a transformação inversa, M^+ -> *A*, uma vez que na temperatura $T > A_f$, a martensita é instável a partir do ponto *C* e este processo se desenvolve até atingir ponto *D*, onde o material apresenta composição austenítica (LA CAVA, 1999). Na Figura I.4 é possível observar os trechos de início e fim da transformação de fase, *A* -> M^+ e M^+ -> *A* respectivamente.

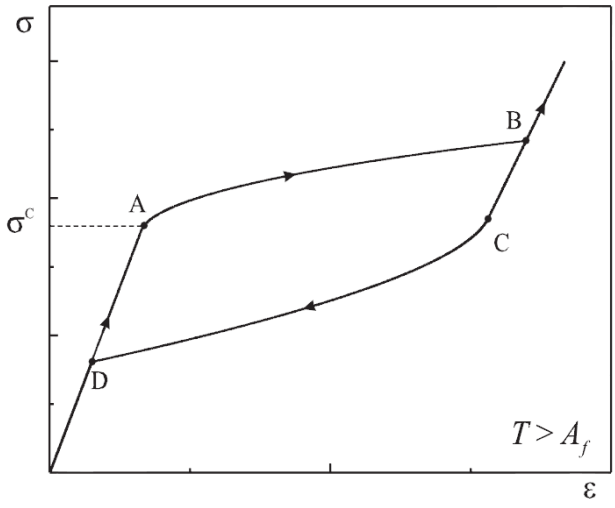


Figura I.4 - Comportamento de pseudoelasticidade (MONTEIRO JR, 2007). Trecho *A B* na curva representa o início e fim da transformação de fase *A* -> M^+. O trecho *C D* representa a transformação de fase M^+ -> *A*.

A área do laço de histerese observada nas curvas com pseudoelasticidade está associada à energia dissipada durante o processo de mudança de fase. Esta característica possibilita o desenvolvimento de diversas aplicações em engenharia como, por exemplo, sistemas de absorção de vibração.

Embora as ligas com memória sejam capazes de suportar grandes deformações, a recuperação delas têm um limite. O limite é representado pelo limite elástico da fase produto obtida depois da transformação, a partir de onde a liga passa a se comportar plasticamente e a deformação é irreversível (PAIVA, 2004).

Caso a liga com memória de forma esteja em uma temperatura $A_s < T < A_f$, para a qual exista uma fração de fase martensítica na liga em uma situação livre de tensões, ao carregar e descarregar o material, nem toda a deformação será recuperada, surgimento uma deformação residual ε_{Res}. A recuperação dessa deformação residual pode ser obtida através do aquecimento da liga a uma temperatura acima A_f (MONTEIRO JR, 2007). Na literatura este efeito é chamado de pseudoelasticidade parcial. A Figura I.5 apresenta o comportamento de pseudoelasticidade parcial.

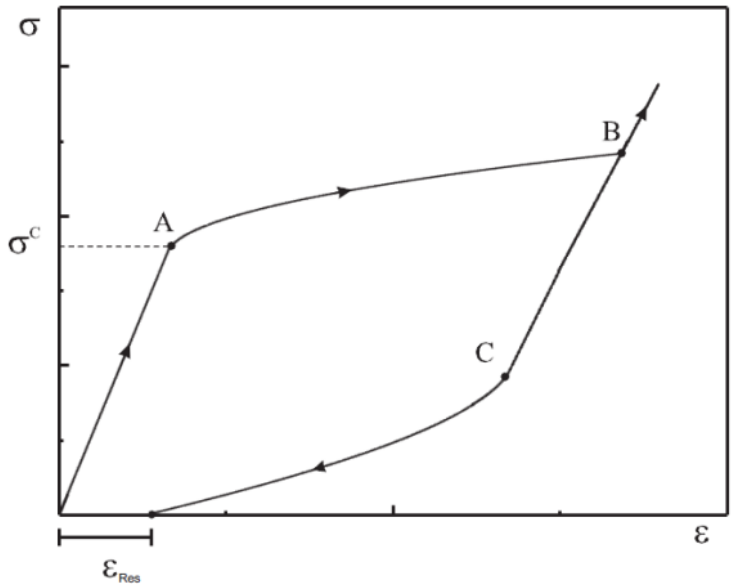


Figura I.5 - Comportamento de pseudoelasticidade parcial (MONTEIRO JR, 2007).

I.2 O Efeito da Memória de Forma

O efeito da memória de forma de uma via, ou simplesmente efeito da memória de forma, é o fenômeno que ocorre quando uma liga recupera a sua forma original após uma etapa de aquecimento a partir de uma condição onde o material apresenta martensita não maclada promovida por um carregamento mecânico aplicado.

Embora uma grande variedade de ligas metálicas exibam o efeito da memoria de forma, somente aquelas que são capazes de recuperar quantidades substanciais de deformação (5 ~ 10 %) ou que geram forças significantes durante a mudança de forma são de interesse comercial.

O efeito da memória de forma se desenvolve para situações onde o material livre de tensões apresenta uma estrutura martensítica maclada em temperaturas inferiores à temperatura de formação da martensita. A Figura I.6 ilustra o efeito de memória de forma. Quando um carregamento mecânico é aplicado a resposta é elástica até o ponto *A*, onde a tensão crítica é alcançada. Em seguida começa a ocorrer a reorientação da martensita, resultando em uma variante martensítica relacionada com a tração, M^+. É possível notar que neste momento (trecho *A*-*B*) a tensão não apresenta um aumento muito acentuado em comparação com a deformação. Após a retirada do carregamento (ponto *B* na Figura I.6), a martensita gerada pela tensão é estável e observa-se a presença de uma deformação residual no ponto *C*. O retorno à forma original ocorre após a aplicação de um processo que envolve o aquecimento a uma temperatura superior a A_f, seguido do resfriamento até uma temperatura abaixo de M_f. Após este processo, o material recupera a deformação residual, retornando à geometria inicial (GEROLDO, 2009; PAIVA, 2004). Na Figura I.6 é possível observar o efeito de memória de forma em uma curva σ-ε.

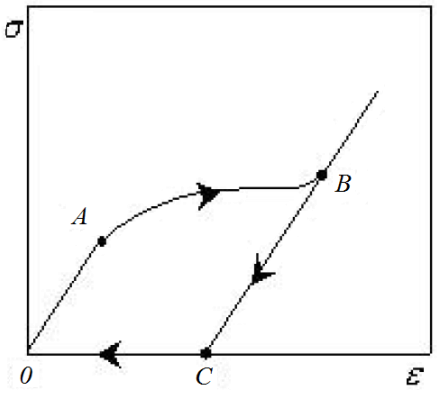


Figura I.6 - Efeito de memória de forma (PAIVA, 2004).

Diferentemente do que ocorre na pseudoelasticidade, a remoção das tensões não induz a transformação inversa já que em baixas temperaturas, a martensita induzida por tração é estável. Este processo só pode ser revertido quando a amostra é aquecida e a martensita induzida por tração, transforma-se em austenita, recuperando a deformação residual existente (ponto *C* da Figura I.6).

O efeito de memória de forma pode ser melhor compreendido seguindo-se o caminho do carregamento termomecânico, em uma curva *σ-ε-T* conforme a figura abaixo.

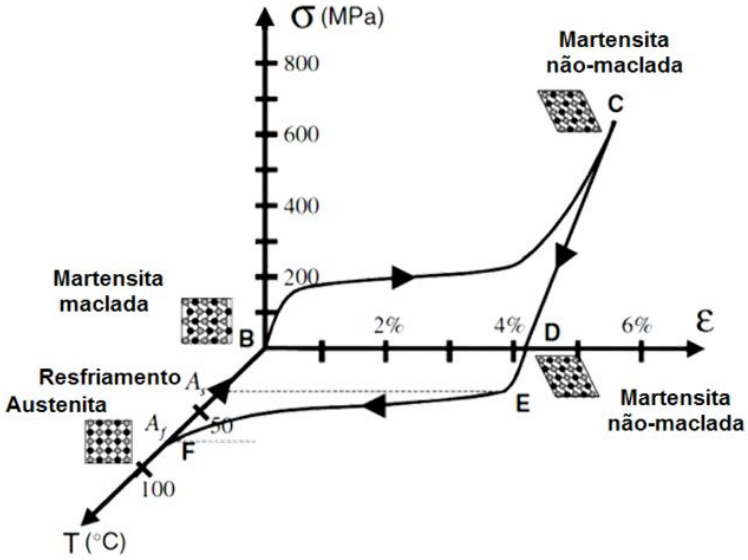


Figura I.7 - Curva *σ-ε-T* de um ensaio uniaxial exibindo o efeito de memória de forma para uma liga de NiTi típica, adaptado de LAGOUDAS (2008).

A curva *σ-ε-T* da Figura I.7 representa as características de um fio de SMA, utilizado hipoteticamente, em um dispositivo como atuador de única ação conforme exemplo de LAGOUGAS (2008, pp. 12):

> *"Este fio mantido em uma temperatura abaixo da M_f, é tensionado na direção axial. Sob o carregamento aplicado, o material exibe o comportamento elástico e continua a deformar-se elasticamente conforme o aumento de tensão. Quando a tensão devida ao carregamento mecânico aplicado alcança aproximadamente 150 MPa, o fio de SMA começa a se alongar significativamente com pouco incremento de tensão. Este ponto marca o início do processo de reorientação da martensita maclada em martensita não-maclada no fio. O processo continua até a deformação total alcançar aproximadamente 4 % e fio ficar totalmente sem maclas. Neste ponto, o fio começa experimentar um aumento da rigidez conforme o aumento da tensão. Após o descarregamento do fio, o aquecimento promove a transformação da martensita não-maclada em austenita, o subsequente resfriamento transforma a austenita em martensita maclada, retornando o fio ao seu estado inicial".*

Em muitas SMAs é possível o desenvolvimento do efeito de memória de forma reversível, ou de duas vias (*Two-Way Shape Memory Effect – TWSME*) (LA CAVA, 1999; PAIVA, 2004). Em termos de tensão-deformação as TWSME tem menos potencial do que as SMAs de uma via, entretanto, as forças de restauração podem ser tão elevadas quando as obtidas nas SMAs de uma via (LA CAVA, 1999). Segundo PAIVA (2004) e LAGOUDAS (2008), este efeito permite a associação de uma forma diferente para cada fase em função de temperaturas diferentes.

Para a obtenção deste efeito, é necessária a realização de vários ciclos termomecânicos consecutivos de carga e descarga. Neste processo, nota-se que a deformação residual acumulada tende a aumentar e ao fim de um certo número de ciclos, esta deformação apresenta uma estabilização. Quando este patamar é alcançado costuma-se dizer que material foi treinado. A deformação residual não reversível está associada a alterações da microestrutura do material (martensita residual, aumento da densidade de discordâncias, entre outros) (GEROLDO, 2009). PAIVA (2004) em seu estudo menciona dois tipos de treinamento para o efeito de TWSME: 1 - Ciclos de SME e 2 - Ciclos de SIMT (*Stress-Induced Martensite Training*) através de plasticidade. Na curva σ-ε-T da Figura I.8 é possível ver o incremento da deformação residual do 1º para o 2º ciclo de carregamento.

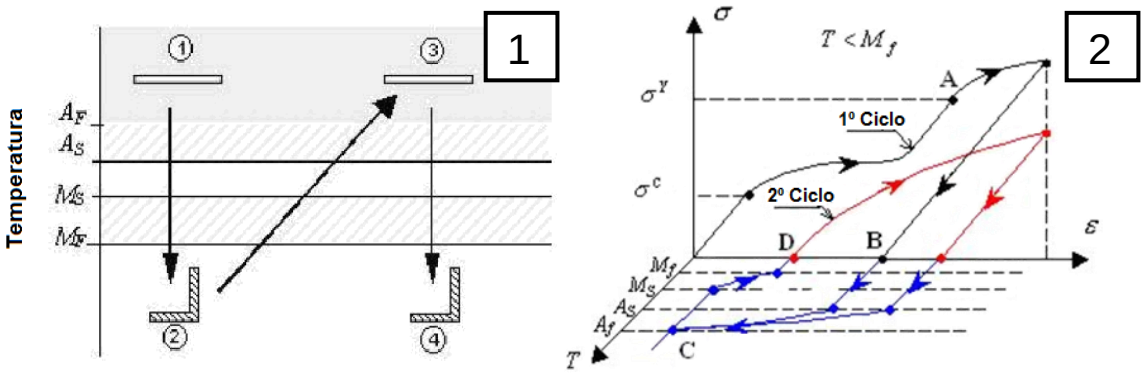


Figura I.8 - 1 - Efeito de memória de forma de duas vias (TWSME) e 2 - Curva σ-ε-T (PAIVA, 2004).

Para uma liga de NiTi policristalina, os resultados experimentais mostram que a deformação total imposta para o treinamento é de 10 ~ 20 %, o número de ciclos para o aprendizado do material é de aproximadamente 20 (PAIVA, 2004).

I.3 Aplicações com Ligas com Memória de Forma

As ligas com memória de forma possuem propriedades particulares que não são encontradas em materiais tradicionalmente utilizados em engenharia (FUGAZZA, 2003).

Desde as últimas décadas engenheiros e cientistas de várias áreas vêm desenvolvendo aplicações com elementos de SMAs, para então, colocá-las em prática em soluções do dia-a-dia (LAGOUDAS, 2008). Um dos exemplos mais conhecidos do uso de SMAs são os *stents* e os filtros de *Simon* na área médica. Outros exemplos envolvem aplicações simples como armação de óculos, indo até mais elaboradas como atuadores, luvas de união em tubulações aeronáuticas, motores conceituais, atenuadores de vibração entre outros (LAGOUDAS, 2008; BORN, 2007; DARJAN, 2007; CASAROTTI, 2004).

Uma aplicação simples e de uso comum são as armações de óculos produzidas com ligas com memória de forma. A sua estrutura pode suportar grandes deformações e instantaneamente retornar à sua forma original. Este fenômeno é o resultado do efeito da pseudoelasticidade. A transformação da austenita em martensita neste caso é induzida pela tensão. Com a remoção do carregamento a fase martensítica retorna para a austenita, recuperando assim a sua geometria original. O Exemplo de óculos com armação de SMA é apresentado na Figura I.9.



Figura I.9 - Armação do óculos feita de SMA (LAGOUDAS, 2008).

Como exemplo de aplicação na indústria aeronáutica, pode-se citar uma solução desenvolvida para reduzir o ruído dos motores a jato durante a decolagem e pouso, cujos níveis se tornaram altamente regulados no mundo todo. Para reduzir o ruído, foi proposta a instalação de atuadores SMA nas aletas do compartimento das turbinas. As vigas de SMA instaladas flexionam as aletas na direção do fluxo de ar durante vôos de baixa altitude ou em baixa velocidade, alterando as condições do escoamento e reduzindo assim o nível de ruído dos motores (LAGOUDAS, 2008). O novo dispositivo proposto é mostrada na Figura I.10.



Figura I.10 - Atuadores de liga com memória de forma nas aletas com geometria variável durante um vôo de teste (LAGOUDAS, 2008).

No campo aeroespacial as ligas com memória de forma também têm sido usadas como atuadores (BIRMAN, 1997). A Figura I.11 apresenta um exemplo de dobradiça em SMA desenvolvida para atuar na abertura de painéis solares. Um atuador semelhante ao da Figura I.11 foi utilizado na missão da sonda Mars Pathfinder em 1997 (LAGOUDAS, 2008).

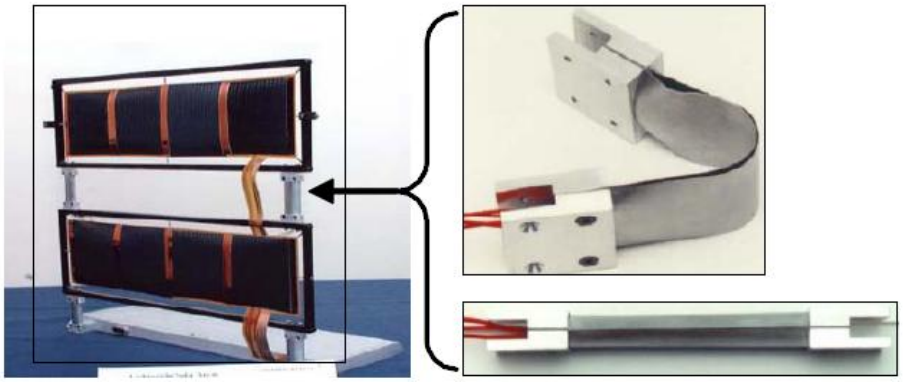


Figura I.11 – Dobradiça em SMA nas posições dobrada e desdobrada (LAGOUDAS, 2008).

O efeito de memória de forma também é utilizado em luvas de conexões tubulares. Estas luvas possuem o diâmetro inicial um pouco menor do que os tubos e o processo de montagem consiste em: 1 – Expandir o diâmetro da luva em baixa temperatura enquanto ela se encontra no estado martensítico através de uma deformação mecânica. 2 – Após a montagem da luva expandida na tubulação, o procedimento seguinte consiste no aquecimento da luva para que a luva retorne à sua forma original, gerando uma contração que unirá os tubos. A Figura I.12 ilustra esquematicamente esta aplicação.

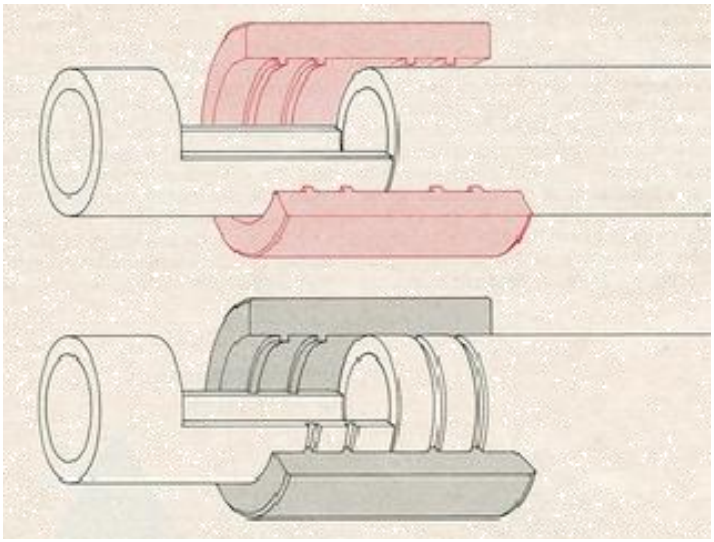


Figura I.12 - Representação esquemática de uma luva de conexão utilizando o efeito de memóra de forma. A luva em vermelho está em sua condição inicial, a luva em preto representa ela após o aquecimento (DARJAN, 2007).

Uma aplicação conceitual de um motor térmico com mola de SMA é apresentado na Figura I.13 (LAGOUDAS, 2008). Outros protótipos de motores com SMA também podem ser encontradas em SCHILLER (2002). Neste protótipo observa-se no primeiro quadro a mola no seu estado inicial e sem carregamento. No quadro do meio a mola é tensionada devido ao peso adicionado em sua extremidade, este carregamento induz a transformação de fase austenítica em martensítica. No último quadro a mola é aquecida pelo efeito Joule resultante da passagem de corrente elétrica, o aquecimento na mola reverte a transformação de fase e a mola retorno ao seu estado inicial.

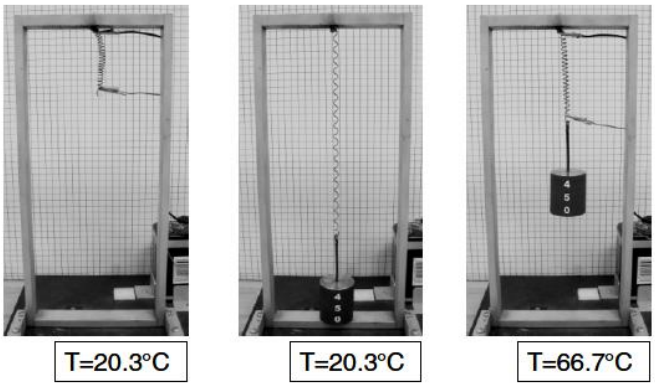


Figura I.13 - Exemplo de um motor térmico com mola SMA (LAGOUDAS, 2008).

Dispositivos construídos com ligas com memória de forma podem ser utilizados como atenuadores de vibração. O princípio destes atenuadores é a utilização da histerese no efeito pseudoelástico para absorver a energia mecânica. Um absorvedor experimental capaz de atuar em carregamentos compressivos, trativos e torsionais pode ser visto na Figura I.14.

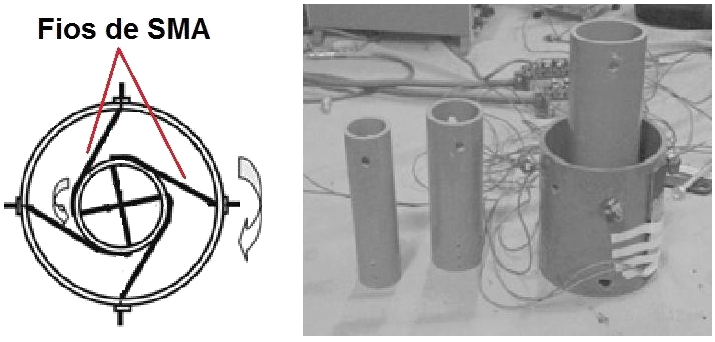


Figura I.14 - Absorvedor com fios de SMA, adaptado de HAN *et al* (2005).

A biocompatibilidade das ligas com memória de forma torna este material indicado para diversas aplicações médicas como por exemplo, fios ortodonticos, agulhas, fios guia, instrumentos para válvula do coração, *stents* auto-expansíveis, filtros da veia cava, instrumentos cirúrgicos minimamente invasivos, dentre muitas outras aplicações (GONG e PELTON, 2002). DUERIG *et al* (1996) citam que uma das principais vantagens das ligas com efeito pseudoelástico é a capacidade de realizar o retorno de mola (springback) em deformações de até 11 %, enquanto que este valor atinge no máximo, 0,5 % na maioria dos materiais utilizados na área médica como o aço inoxidável.

Uma das aplicações mais conhecidas de SMA na área médica são os *stents*. Este nome é uma homenagem ao seu criador o dentista C. T. Stent (PAIVA, 2004). Os *stents* tem a finalidade de manter o diâmetro interno de vasos sanguíneos (DUERIG *et al*, 1996). O processo de aplicação do stent consiste da inserção e posicionamento utilizando-se um catéter dentro de um vaso sanguíneo. No seu estado inicial o *stent* é comprimido antes da aplicação. Esta compressão transforma a fase austenítica em martensítica, após o aquecimento pelo calor do corpo o *stent* retornará à sua geometria inicial (DUERIG *et al*, 1996). A Figura I.15 apresenta diversos tipos de dispositivos auto expansivos feitos de NiTi.

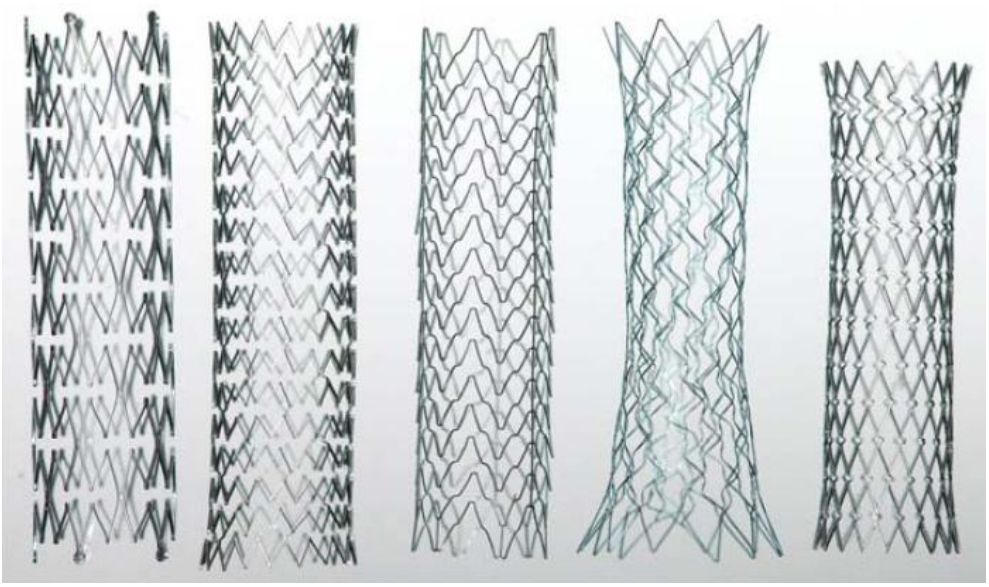


Figura I.15 - Diferentes tipos de stents auto expansivos feitos de NiTi (MELZER e STÖECKEL, 2010).

Outra aplicação importante na medicina é o filtro de *Simon* (*Simon Nitinol Filter* - SNF), este filtro foi o primeiro dispositivo vascular desenvolvido com SMA e foi utilizado no tratamento de embolia pulmonar (RYHÄNEN, 1999). O filtro serve para reter coágulos que circulam no sangue, os coágolos que ficam presos posteriormente se dissolvem no mesmo local de sua instalação (DUERIG *et al*, 1996). A primeira etapa da aplicação do filtro consiste na sua conformação para que seja possível inserí-lo na extremidade do catéter (quadro 1 da Figura I.16). Para contornar a abertura prematura do filtro devido ao calor do corpo, é necessário que haja o resfriamento através de uma solução salina. Após o lançamento do filtro no local desejado, a solução salina é interrompida e o aquecimento da circulação sanguínea fará com que o filtro retorne à sua geometria inicial (quadro 5 da Figura I.16) (PAIVA, 2004; DUERIG *et al*, 1996).

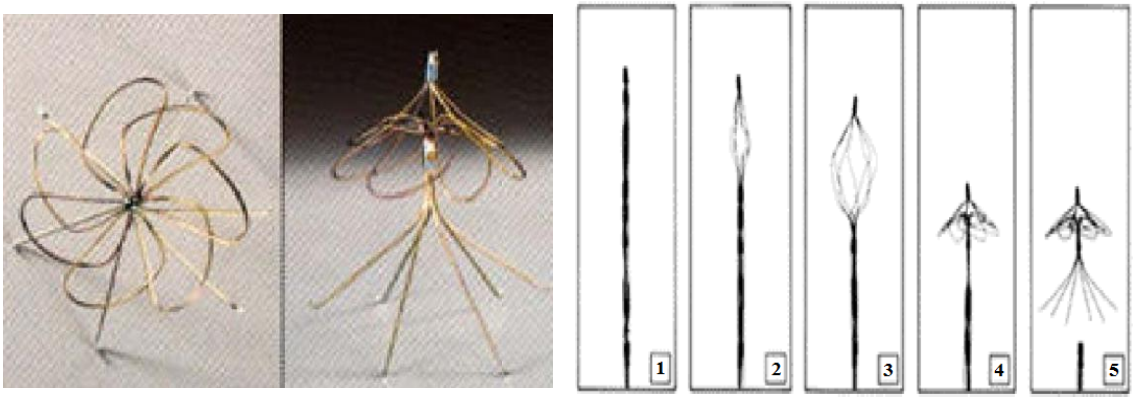


Figura I.16 - Filtro de Simon aberto em duas vistas na esquerda (PAIVA, 2004). Detalhamento da sequência de lançamento na direita (DARJAN, 2007).

I.4 Motivação das Ligas com Memória de Forma para Absorção de Energia

As ligas com memória de forma têm a capacidade de serem submetidas a grandes deformações mecânicas que podem ser recuperadas, voltando à sua configuração inicial sem deformações permanentes após o descarregamento mecânico ou com a aplicação de um aquecimento. Embora existam polímeros com o efeito de memória, o foco deste estudo são as ligas metálicas com memória de forma.

Esta propriedade está estritamente relacionada com uma transformação sólido-sólido reversível, que pode ser induzida por tensão ou temperatura (DOLCE e CARDONE, 2001). Dispositivos construídos de SMA têm uma elevada capacidade de dissipar energia no processo de carregamento-descarregamento (histerese), tornando-os uma boa opção para aplicações como atenuadores de vibração.

As ligas com memória de forma podem ser consideradas adaptativas no sentido de que mais energia é dissipada, através da histerese, como uma resposta ao aumento da amplitude. Os atenuadores de vibração de SMA são especialmente atrativos para os casos onde os carregamentos são de natureza randômica. Quando uma excitação inesperada causar excesso de vibração, mais energia será dissipada e a vibração será atenuada (AMARIEI *et al*, 2009).

Uma grande vantagem do uso de SMAs em atenuadores de vibração é a sua alta razão potência/peso (RUSTIGHI *et al* , 2003). A Tabela I.2 mostra as características para diversos tipos de atuadores, nela é possível observar a elevada densidade de trabalho para a liga NiTi. Isto ocorre também quando este material atua como atenuador de vibração. Nesta tabela também observa-se que a frequência de trabalho da liga NiTi é inferior a 100 Hz. No caso das ligas NiTi, a tensão elétrica é normalmente aplicada no atuador para gerar um aquecimento pelo efeito Joule, o qual promove a transformação de fase modificando a microestrutura.

Tabela I.2 - Propriedades de diversos atuadores, adaptado de MONTEIRO JR (2007).

Tipo de Atuador	**Densidade de Trabalho (MW/m^3)**	**Frequência Máxima (kHz)**	**Tensão (V)**
NiTi (SMA)	25	< 0,1	2 ~ 5
Polímero Condutor	3,4	> 1	~ 5
Termo-pneumático	0,5	< 0,1	~ 10
Bimetálico	0,4	< 0,1	~ 5
Eletromagnético	0,4	> 1	~ 20
Eletrostático	0,18	> 10	5 ~ 500
Piezoelétrico	0,12	> 5	5 ~ 100

Uma área de aplicação importante para a utilização de elementos com SMAs é a de dispositivos sísmicos. DOLCE e CARDONE (2001) apresentam algumas limitações existentes na tecnologia atual empregada nos dispositivos sísmicos disponíveis: 1 - Limitações relacionadas à durabilidade e envelhecimento; 2 - Manutenção; 3 - Confiabilidade à longo prazo; 4 - Substituição após fortes terremotos; 5 - Dependência de propriedades mecânicas da temperatura; 6 - Restauração da geometria no final de um terremoto. O mesmo autor também vislumbra que as ligas com memória de forma podem abrir um novo cenário no campo de proteção de construções contra vibrações sísmicas, uma vez que eles têm o potencial de eliminar as limitações da tecnologia atual.

Os atenuadores passivos de SMA não consomem energia externa (quando são baseados na pseudoelasticidade) e são capazes de estabilizar uma estrutura flexível. Outra vantagem destes dispositivos são a baixa manutenção requerida mesmo após fortes terremotos (SOLTANE *et al*, 2010). DOLCE e CARDONE (2001a) e DOLCE e CARDONE (2001b) apontam que além da boa resistência à fadiga, SMAs também possuem bom controle da força, perfeita restauração do seu centro e alta resistência à corrosão.

Embora os SMAs tenham vantagens interessantes, o estudo de RUSTIGHI *et al* (2003) cita duas limitações que são a baixa resposta no tempo (largura de banda limitada) e a baixa eficiência na conservação de energia quando estes são estimulados com sinais elétricos (quando são baseados no efeito de memória de forma).

Para melhor compreensão das limitações existentes nos atenuadores de vibração que utilizam SMAs, é necessário que sejam realizadas mais investigações experimentais. Modelos constitutivos aplicados à modelagem da pseudoelasticidade e efeito de memória de forma, recentemete, foram implementados em ferramentas CAE (*Computer Aided Engineering*) comerciais. A utilização do Método de Elementos Finitos é capaz de auxiliar nas estimativas iniciais de geometria para protótipos nestes experimentos.

II. Atenuadores de Energia

A vibração é o fenômeno físico caracterizado pelo movimento oscilatório de um objeto em relação a sua posição de equilíbrio. As vibrações podem ser transmitidas pelo meio na forma de deslocamentos, velocidades ou acelerações. A vibração pode ser intencionalmente gerada com alguma finalidade, por exemplo, uma planta de lavagem em uma mineradora. O lado prejudicial da vibração pode ser, por exemplo, a fadiga estrutural em estruturas mecânicas, provenientes de tensões induzidas por vibrações. A vibração na prática pode ser causada por um simples desbalanceamento em um eixo indo até efeitos mais complexos como a Vibração Induzida por Vórtices (*Vortex Induced Vibration – VIV*).

Em projetos de estruturas, as frequências naturais do sistema devem ser evitadas para não ocorrer a ressonância. No caso de pontes estaiadas, TORRA *et al* (2009) afirmam que em pontes onde existe a eliminação das vibrações relacionadas à açoes do vento, chuva e/ou tráfego, existe também um aumento na segurança e vida útil da estrutura. Um exemplo clássico na história foi o colapso da ponte Tacoma Narrows na década de 40, onde uma brisa proporcionou a ressonância da ponte. Após cerca de uma hora, a ponte apresentou uma amplitude de deslocamento muito elevada, entrando em colapso.

Os níveis de vibração em um sistema podem ser controlados de três formas diferentes: 1 - Redução da intensidade da fonte excitadora; 2 - Isolamento da estrutura excitada; 3 - Modificação das características dinâmicas da estrutura (DU, 2003).

Segundo MEIROVITCH (1990), isoladores de vibração são dispositivos que têm a capacidade de reduzir as interações entre a fonte de vibração e um outro corpo, através da atenuação das vibrações mecânicas. Os atenuadores de vibração podem ser passivos, ativos ou adaptativos.

Os atenuadores de vibração passivos possuem a capacidade constante de amortecimento e estas são fixadas pelas características de rigidez e amortecimento que tem origem no seu projeto (MEIROVITCH, 1990).

PUGLIESE e CASEY (2012) dividem os isoladores de vibração passivos em três tipos: 1 - Dispositivos histeréticos que dissipam energia através do atrito por deslizamento ou escoamento de metais; 2 - Dispositivos viscoelásticos que dissipam energia através do deslocamento de sólidos ou fluidos viscoelásticos; 3 - Atenuadores dinâmicos de vibração que aumentam o amortecimento pela introdução de osciladores

complementares. Na Figura II.1 é possível observar as curvas força-deslocamento (*F-u*) idealizadas para mecanismos de atenuação de energia.

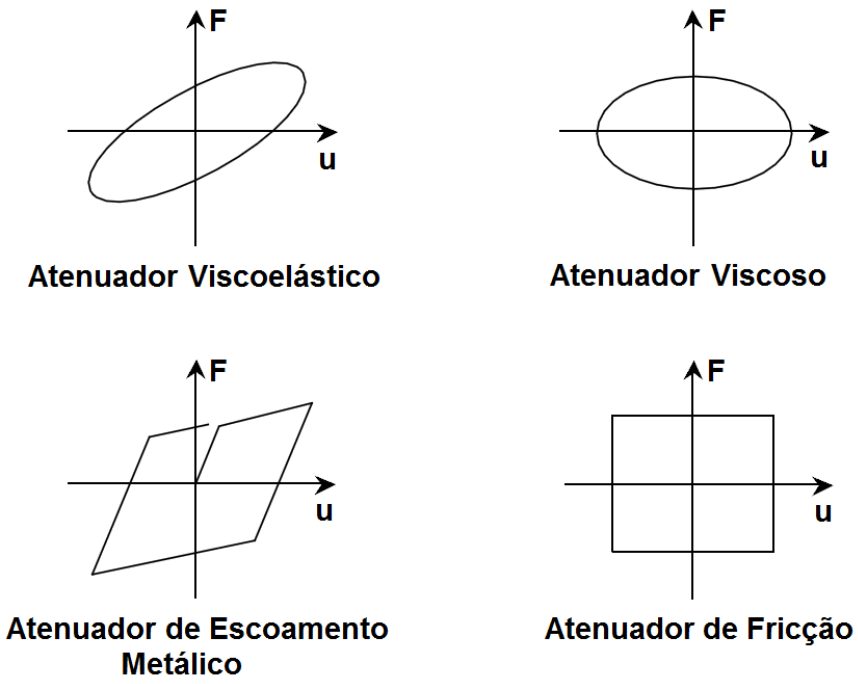


Figura II.1 - Idealização para diversos mecanismos de atenuação de energia, adaptado de UNIVERSITY AT BUFFALO (2001).

No campo dos atenuadores dinâmicos de vibração, um dispositivo bem estabelecido é o Absorvedor de Vibrações Sintonizado - TVA (*Tuned Vibration Absorber*). PAIVA (2004) em seu estudo explica que os TVAs são compostos de um oscilador secundário anexado ao sistema primário, quando a frequência natural do oscilador secundário é sintonizada com a frequência de excitação do sistema primário, a consequência disto será a atenução da vibração no sistema primário. Embora estes dispositivos possam ser desenvolvidos de diversas formas, eles basicamente atuam como simples sistemas massa-mola (RUSTIGHI *et al*, 2003). Na literatura, o sistema secundário é frequentemente tratado como neutralizador e o sistema primário, como a estrutura ou máquina. O conceito de um TVA é apresentado na Figura II.2, onde é possível observar que a massa e rigidez são bem menores que as do sistema primário. Também existe um amortecedor acoplado ao neutralizador.

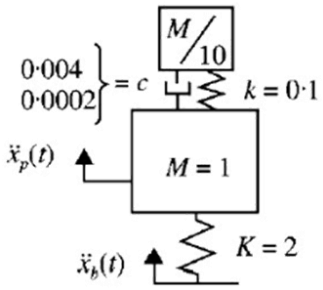


Figura II.2 - Conceito de um TVA (PAIVA, 2004).

Os atenuadores de vibração ativos são dispositivos que respondem aos estímulos externos do meio. A sua capacidade de dissipação de energia é ajustada através de um sitema de controle, um exemplo deste tipo de atenuador pode ser um dispositivo que utiliza fluido magnetoreológico (MEIROVITCH, 1990).

O terceiro tipo de atenuador de acordo com MEIROVITCH (1990) são os atenuadores adaptativos. Estes atenuadores permitem o ajuste da dissipação de energia através de um sistema de controle, este sistema tem a capacidade de se adaptar rapidamente através da análise constante dos dados de entrada e saída (MEIROVITCH, 1990). Uma variação do TVA com comportamento adaptativo (ATVA) desenvolvido com fios de SMA foi apresentada por WILLIAMS *et al* (2002) (Figura II.3). Estes dispositivos são recomendados quando a frequência é variável ou incerta. O princípio de funcionamento do ATVA com SMA é baseado na mudança de sua rigidez conforme a temperatura em que os elementos se encontram. Essa característica torna possível a atenuação da vibração de uma faixa de frequência no sistema primário, apenas alterando-se o módulo de elasticidade em função do aquecimento ou resfriamento dos elementos de SMA. RUSTIGHI *et al* (2003) citam que a principal vantagem dos ATVAs é que pouco amortecimento pode ser utilizado se a sintonia for precisa, reduzindo assim a necessidade de grandes massas.

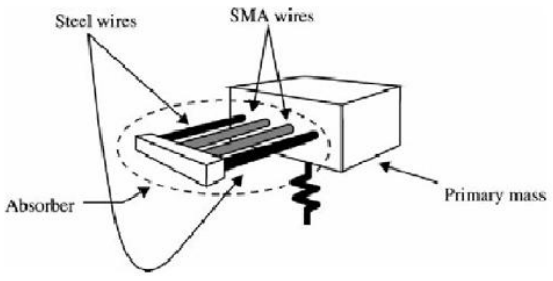


Figura II.3 - Conceito de um ATVA (WILLIAMS *et al*, 2002).

II.1 Atenuadores de Energia Tradicionais

Atenuadores são dispositivos de dissipação de energia onde esta capacidade serve para absorver movimentos em diversas aplicações. Este princípio pode ser aplicado em suspensões de veículos indo até aplicações estruturais na área de engenharia de terremotos. CASAROTTI (2004) em seu trabalho sobre isoladores em pontes e dispositivos de dissipação, afirma que estes elementos não necessitam de fontes externas de força e a dissipação de energia está relacionada com o deslocamento que a estrutura sofre. CASAROTTI (2004) também apresenta em seu estudo uma completa revisão dos vários dispositivos utilizados em aplicações de engenharia de terremotos. Os dispositivos de atenuação, podem de uma forma geral, ser agrupados de acordo com o seu princípio: vicoelásticos, viscosos, histeréticos de plasticidade do aço ou da fricção.

Os atenuadores de vibração elastoméricos consistem de camadas de borracha reforçadas com placas de aço. Nos Estados Unidos estes dispositivos podem ser classificados conforme normas vigentes em baixo amortecimento, alto amortecimento e de borracha com chumbo (UNIVERSITY AT BUFFALO, 2001). Os de baixo amortecimento, possuem um coeficiente de amortecimento viscoso de aproximadamente 0,05, enquanto que os de alto amortecimento, apresentam um valor em torno de 0,1 ~ 0,2. A curva força-deslocamento para estes elementos é linear com um amortecimento viscoso, sua curva fica semelhante ao viscoelástico na Figura II.1. Estes dispositivos quando submetidos à grandes deslocamentos laterais tendem a mudar seu limite de carga crítica, rigidez horizontal e o amortecimento (CASAROTTI, 2004). A figura Figura II.4 apresenta um atenuador de borracha com núcleo de chumbo.



Figura II.4 - Atenuador de borracha com núcleo de chumbo (AGOM METAL RUBBER ENGINEERING, 2012).

Os atenuadores baseados em deslizamento são suportes deslizantes que proporcionam o amortecimento pela fricção. Os dois tipos mais comuns são os de rolamento e o sistema de pêndulo de frição. O tipo de rolamento é largamente utilizado em pontes para permitir a expansão e contração térmica (CASAROTTI, 2004). Uma característica interessante dos atenuadores do tipo pêndulo de fricção, segundo CASAROTTI (2004), é que estes isoladores são por natureza, dispositivos de restauração do seu centro. Uma vez que a superfície de deslizamento é côncava, o deslizador de fricção (Figura II.5), tenderia a encontrar a sua posição de equilíbrio no centro da superfície côncava. A histerese nos dispositivos de restauração de centro é normalmente alta, a desvantagem é a sua alta rigidez inicial (CASAROTTI, 2004). A Figura II.5 mostra um exemplo de um isolador de deslizamento.

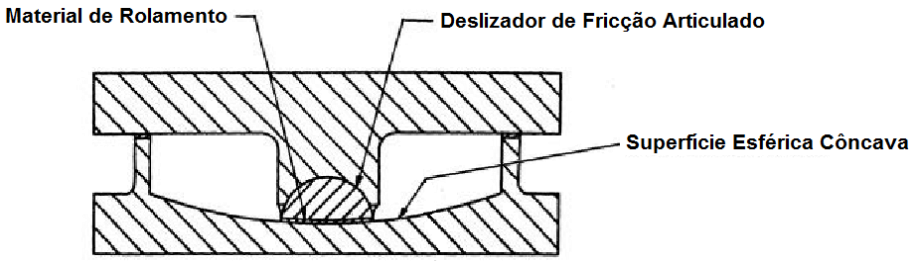


Figura II.5 - Absorvedor do tipo deslizamento de fricção, adaptado de UNIVERSITY AT BUFFALO (2001).

Outra opção de atenuador de energia amplamente utilizado em estruturas são os atenuadores que utilizam o princípio da fricção no contato para dissipar energia (Figura II.6). O funcionamento consiste em permitir que a estrutura se desloque moderadamente sem dano nos seus membros estruturais (CASAROTTI, 2004). Estes elementos não possuem alto custo de fabricação, entretanto, eles podem apresentar problemas de corrosão o que alteraria suas características e o rígido controle da pré-carga aplicada nos parafusos das placas.



Figura II.6 - Absorvedor de fricção do tipo Pall (SHAO, 2012).

Os atenuadores de vibração viscosos possuem um comportamento dependente da velocidade. A força exercida pelo atenuador é consequentemente diferente para cada nível de carregamento (SHAO, 2012). Amortecedores hidráulicos utilizam as propriedades viscosas do fluido como princípio de atenuação de vibração. Estes atenuadores possuem um custo maior se comparado aos atenuadores do tipo de fricção (SHAO, 2012). A curva força-deslocamento para um atenuador de vibração viscoso é representada na Figura II.1. Esta curva pode ser mais circular quando o amortecedor não possui mecanismo de alívio ou, um pouco mais quadrada semelhante ao amortecedor de fricção, quando este possui mecanismo de alívio. Um exemplo de atenuador de vibração viscoso é apresentado na Figura II.7.

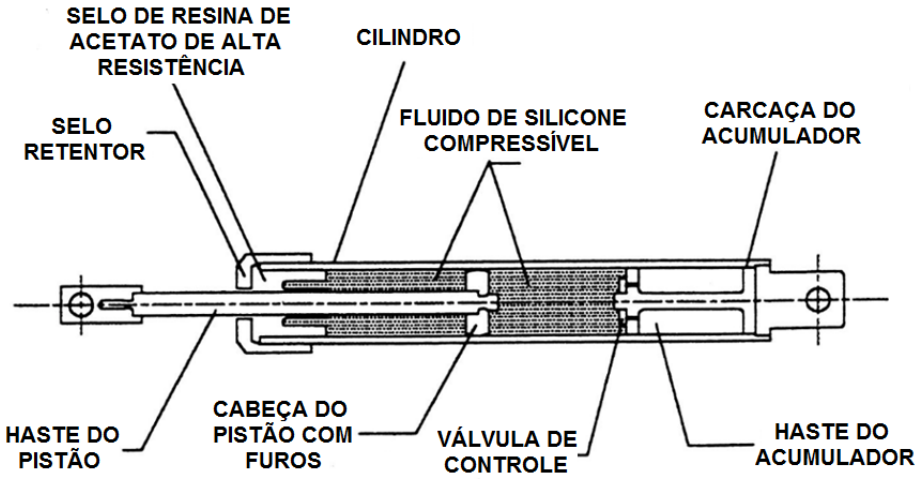


Figura II.7 - Vista em corte transversal de um amortecedor com acumulador, adaptado de HWANG (2012).

Os atenuadores de vibração do tipo viscoelásticos são construídos com camadas de um material polimérico viscoelástico, montados entre placas de aço (SANTOS, 2003). A sua aplicação mais comum é a supressão da vibração causada por ventos em edifícios altos. O princípio de funcionamento é fundamentado na dissipação de energia devido ao movimento cisalhante entre as placas (SANTOS, 2003; HWANG, 2012). O material viscoelástico destes amortecedores possuem propriedades mecânicas complexas, dependentes da temperatura e também da frequência de excitação. A curva força-deslocamento deste tipo de amortecedor tem a característica viscoelástica na Figura II.1. Um amortecedor viscoelástico é ilustrado na Figura II.8.

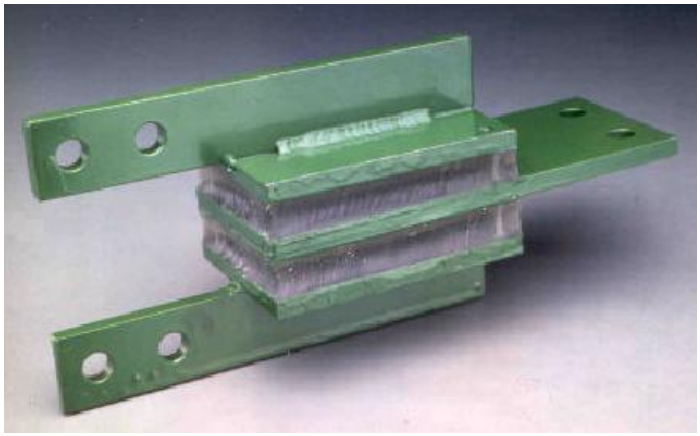


Figura II.8 - Exemplo de um amortecedor viscoelástico (UNIVERSITY AT BUFFALO, 2001).

Os atenuadores histeréticos metálicos são considerados um dos dispositivos de dissipação de energia mais eficientes (PUGLIESE e CASEY, 2012). Os atenuadores do tipo Amortecimento e Rigidez Adicionada - ADAS (*Added Damping and Stiffness*) pertencem a classe dos atenuadores histeréticos. Os ADAS são compostos por várias placas de aço estrutural no formato de X, estes elementos são dimensionados para dissipar energia através do escoamento na flexão. O número de ciclos que estes dispositivos são capazes de suportar é em torno de 100 ciclos até a sua degradação (CASAROTTI, 2004). A histerese neste elemento tem o formato da curva para atenuadores metálicos baseados no escoamento, conforme apresentado na Figura II.1. A Figura II.9 mostra um exemplo de um ADAS.

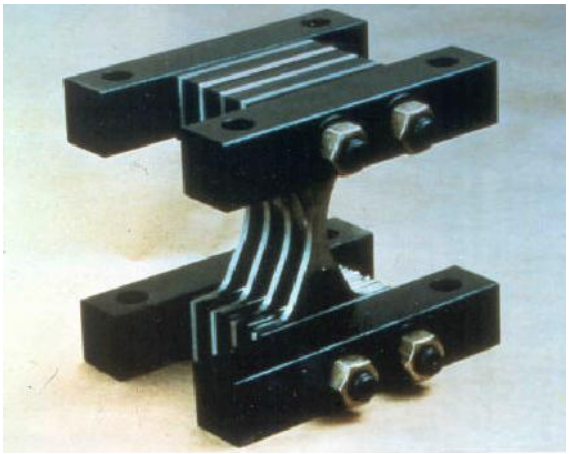


Figura II.9 - Atenuador histerético metálico ADAS (UNIVERSITY AT BUFFALO, 2001).

Os atenuadores do tipo Amortecimento e Rigidez Adicionada Triangular - TADAS (*Triangular Added Damping and Stiffness*) surgiram como uma alternativa para duas desvantagem dos ADAS, a influência da pré-carga nos parafusos na rigidez do dispositivo e a fragilidade na flexão quando sujeito à altas cargas axiais (CASAROTTI, 2004). A histerese do TADAS é semelhante à curva para atenuadores metálicos baseados no escoamento da Figura II.1. O TADAS pode ser observado na Figura II.10 e um exemplo de uma curva força-deslocamento experimental se encontra na Figura II.11.



Figura II.10 - Atenuador histerético metálico TADAS (UNIVERSITY AT BUFFALO, 2001).

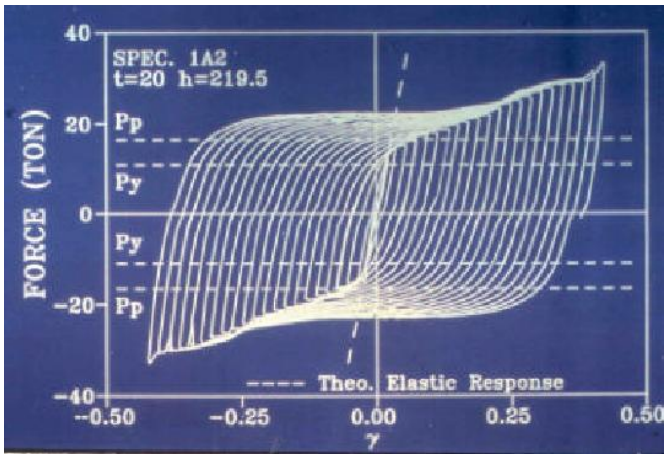


Figura II.11 - Curva *F-u* experimental de um TADAS (UNIVERSITY AT BUFFALO, 2001).

II.2 Atenuadores de Vibrações com Ligas com Memória de Forma

Na seção anterior diversos dispositivos de atenuadores tradicionais foram apresentados. As ligas com memória de forma podem ser utilizadas em atenuadores passivos, ativos ou adaptativos. Segundo FUGAZZA (2003), experimentos recentes e investigações numéricas mostraram a possibilidade do uso de SMA's em dispositivos inovadores, utilizados na atenuação de vibrações sísmicas.

A histerese no comportamento pseudoelástic em SMAs representa a energia mecânica que este material pode dissipar em um ciclo. PUGLIESE e CASEY (2012) afirmam que os atenuadores baseados em histerese metálica são considerados um dos mais eficientes.

O efeito da pseudoelasticidade, conforme apresentado no item I.1 do Capítulo I, é uma das características presentes nas SMAs. A natureza da pseudoelasticidade está baseada na transformação de fase asutenítica (*A*) em martensítica (M^+, Martensita não maclada) induzida por tensão. Quando a tensão crítica é atinginda a transformação de fase inicia, após a liberação do carregamento a fase martensítica retorna para a austenítica. O resultado deste efeito é um laço de histerese na curva σ-ε (Figura II.12).

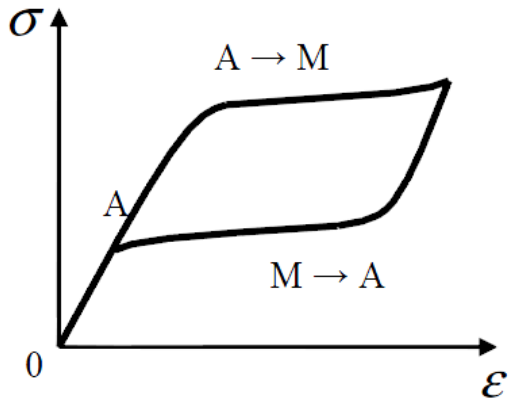


Figura II.12 - Curva σ-ε com detalhes da transformação de fase austenítica para martensítica (A -> M^+) e vice-versa (PAN e CHO, 2007).

O comportamento histerético da pseudoelasticidade em SMAs proporciona uma alta capacidade de absorção de energia, o que pode ser utilizado para atenuar vibrações indesejadas num sitema mecânico ou em uma estrutura (LAGOUDAS, 2008).

A Figura II.13 apresenta uma curva força-deslocamento onde através dela é possível mensurar a energia dissipada nestes dispositivos, esta pode ser quantificada

pela diferença entre a energia gasta até o final do carregamento e a dispendida no descarregamento. Esta curva é analisada para diferentes dispositivos no Capítulo V onde são apresentados os resultados das investigações numéricas.

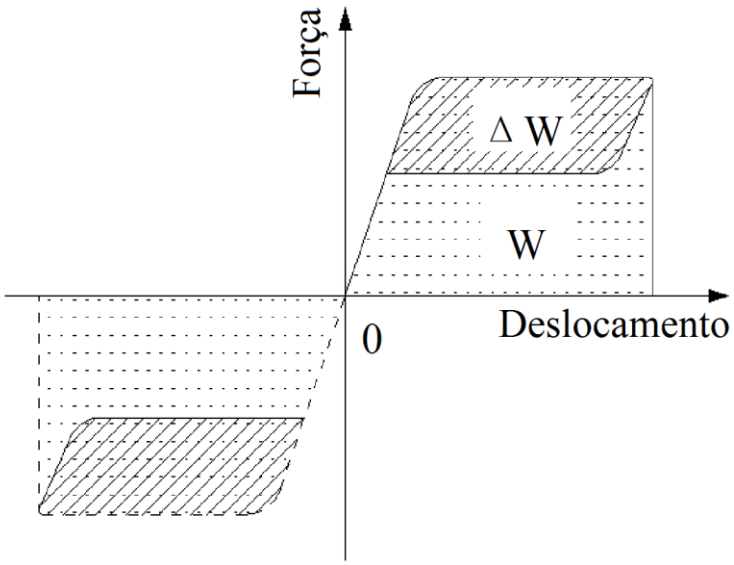


Figura II.13 - Curva *F-u* mostrando a energia total até o final do carregamento (*W*) e a energia líquida absorvida (*ΔW*), adaptado de PAN e CHO (2007).

Uma outra característica interessante das ligas com memória de forma é a sua capacidade de restauração do seu centro, após o deslocamento induzido por uma tensão significativa. PUGLIESE e CASEY (2012) citam como exemplo os contraventamentos de cabos, atenuadores passivos e isoladores de base como dispositivos que fasem uso desta característica.

O estudo de DOLCE e CARDONE (2001) mostra que em aplicações sísmicas, o histórico das deformações é cíclico de amplitude não constante. Estas amplitudes podem ser de valores muito pequenos (deformação elástica da austenita) ou podem ir até valores maiores (deformação elástica da martensita).

Restritores sísmicos de aço estão atualmente sendo utilizados para limitar a abertura de juntas em pontes, entretanto, terremotos no passado mostraram que estes dispositivos de aço possuem limitações quanto a atenuação das vibrações sísmicas. Outro problema detectado foi a manutenção da estabilidade destas pontes (PUGLIESE e CASEY, 2012).

Uma alternativa para superar esta limitação do aço seria a utilização de SMAs nos dispositivos de limitação de movimento das juntas. Além das tensões geradas por atividades sísmicas, existe também a possibilidade de tensões decorrentes de vibrações induzidas por vento em pontes suspenas. A Figura II.14 mostra um exemplo de um atenuador de SMA para pontes estaidas (PUGLIESE e CASEY, 2012), a Figura II.15 apresenta um exemplo de dispositivo restritor com cabos de SMA para pontes proposto por DESROCHES e SMITH (2003).

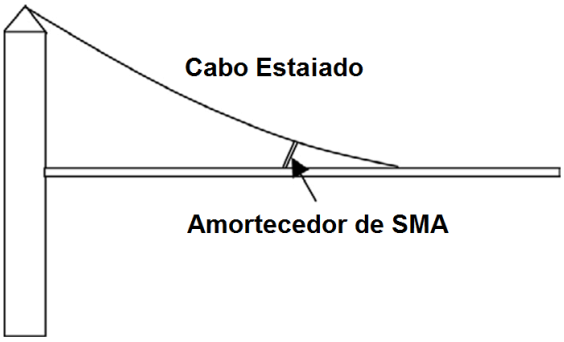


Figura II.14 - Atenuador de SMA para ponte estaiada, adaptado de PUGLIESE e CASEY (2012).

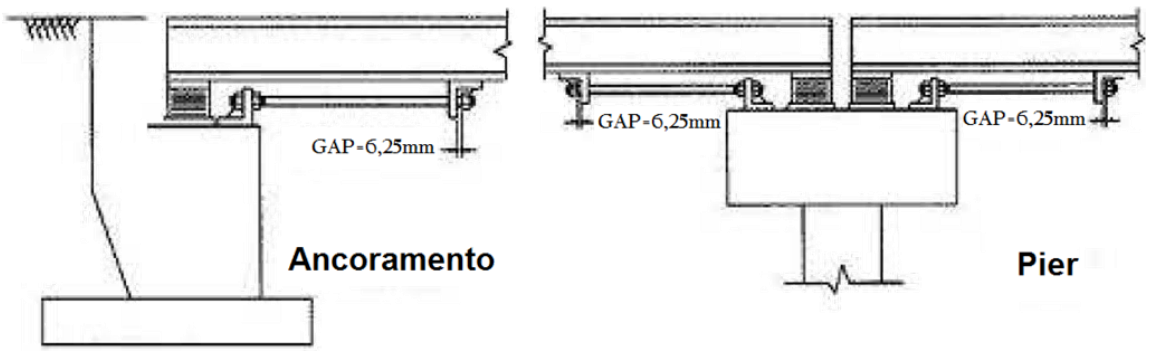


Figura II.15 - Dispositivo com cabos restritores superelásticos de SMA para pontes, adaptado de DESROCHES e SMITH (2003).

O uso das ligas com memória de forma em pequenos dispositivos proporcionam melhorias na resposta sísmica de grandes estruturas, dois exemplos são a torre do sino da igreja de San Giorgio em Trignano e a Basílica de San Francesco em Assisi.

A torre do sino da igreja de San Giorgio em Trignano na Itália, recebeu os dispositivos de SMA após ter sido atingida por um terremoto de 4,8º Richter de magnitude em 1996. Esta aplicação tornou-se a primeira conhecida do uso de SMAs na engenharia civil (INDIRLI, 2000). A idéia proposta neste caso foi unir a base até o topo através de tendões híbridos de aço com dispoditivos de SMA, no total foram instalados quatro tendões, um em cada canto da torre (MOTAVALLI *et al*, 2009). Na Figura II.16 é possível observar uma ilustração dos tendões na torre do sino e um detalhe do dispositivo de SMA localizado em um dos quatro tendões.

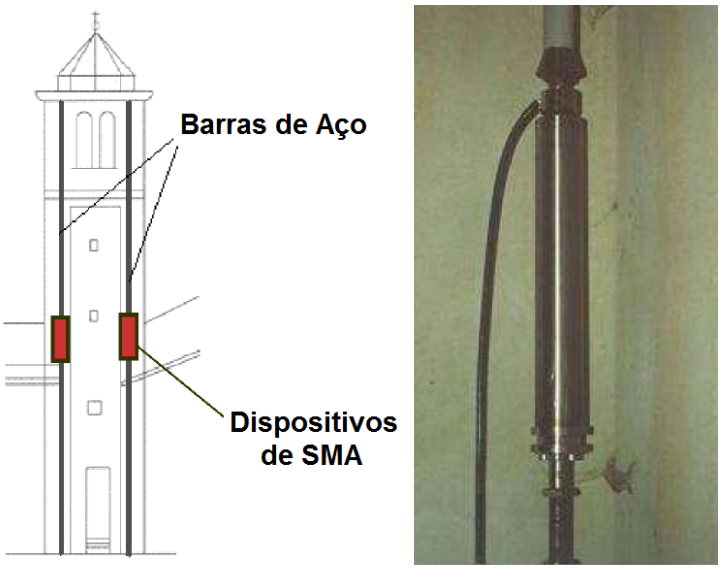


Figura II.16 - Torre do sino na igreja de San Giorgio com tendões híbridos de aço com dispositivos de SMA, adaptado de MOTAVALLI *et al* (2009). Detalhe do dispositivo montado em um tendão (FUGAZZA, 2003).

O dispositivo de SMA utilizado nos tendões é dimensionado para sustentar a tração através de 60 fios de NiTi, onde cada um possui 1 mm de diametro por 30 mm de comprimento (MOTAVALLI *et al*, 2009). A pré-carga dos tendões é ajustada de modo a se atingir um ponto acima da tensão de início de transformação de fase da SMA, consequentemente, o dispositivo atua como limitador de carga caso ocorra algum terremoto, além disso, o dispositivo também é capaz de atuar como atenuador através do comportamento pseudoelástico (MOTAVALLI *et al*, 2009). Uma curva força-deslocamento para este dispositivo é ilustrada na Figura II.17.

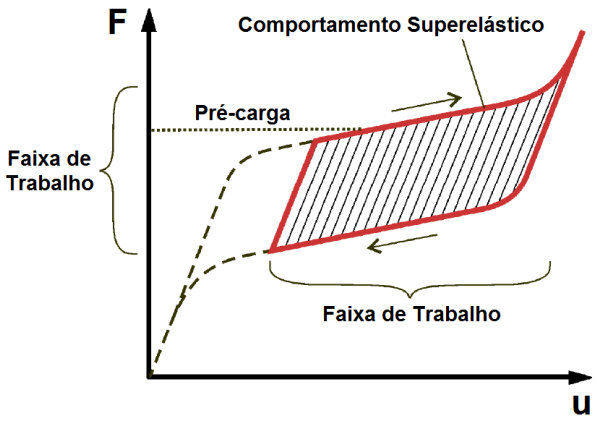


Figura II.17 - Curva *F-u* para o dispositivo de SMA montado em um dos tendões, adaptado de MOTAVALLI *et al* (2009).

Outro caso clássico foi a implementação de dispositivos de SMA da Basílica de San Francesco em Assisi na Itália. Em 1997 houve um terremoto que desconectou parte do telhado, após a restauração dispositivos de SMA foram incorporados a estrutura (CASTELLANO, 2000). Cada dispositivo é dimensionado de modo a suportar as forças de tração e compressão, internamente ele é constituído de fios de NiTi que trabalham sempre em tração no regime superelástico (MOTAVALLI *et al*, 2009). O interessante deste dispositivo é que caso haja um pequeno carregamento horizontal, como provocado pelo vento, por exemplo, o dispositivo apresenta um comportamento linear e pequenos deslocamentos ocorrem, entretanto, casa ocorra um terremoto de magnitude significativa, a tensão crítica dos fios de SMA é excedida induzindo o início de transformação de fase. Os dispositivos utilizados na Basílica de San Francesco se encontram na Figura II.18.



Figura II.18 - Dispositivos utilizados no telhado da Basílica de San Francesco (FIP INDUSTRIALE, 2012).

III. Modelo Constitutivo para a Modelagem de Ligas com Memória de Forma

Os modelos constitutivos têm a função de descrever o comportamento de um material específico. No caso da mecânica dos sólidos, em especial as SMAs, o modelo deve representar o comportamento termo-mecânico do material.

Ao longo da história da investigação da resposta termo-mecânica complexa das ligas com memória de forma, vários pequisadores propuseram uma variedade de modelos constitutivos diferentes com o objetivo de predizer o comportamento deste material (LAGOUDAS, 2008). OLIVEIRA (2008) em seu trabalho afirma que o comportamento termomecânico das SMAs pode ser modelado de vários pontos de vista: 1 - Microscópico (nível molecular); 2 - Mesoscópico (partículas da estrutura cristalina); 3 - Macroscópico. No caso da modelagem termomecânica macroscópica, esta é baseada nas características fenomenológicas, que relacionam a termodinâmica do contínuo com variáveis de estado internas, onde leva-se em consideração as mudanças microestruturais devidas à transformação de fase (POPOV e LAGOUDAS, 2007; BAETA-NEVES *et al*, 2004; PAIVA e SAVI, 2005; PAIVA e SAVI, 2006).

O modelo constitutivo de PAIVA (2004), considera as quatro variantes da microestrutura (austenita, martensita induzida por temperatura, martensita induzida por tensão trativa e martensita induzida por tensão compressiva) bem como diferentes propriedades para cada fase. Este modelo ainda inclui o efeito das deformações induzidas por temperatura, o efeito das deformações plásticas, o acoplamento entre os fenômenos de plasticidade e transformação de fase. Este ainda possui modificações na formulação que permitem o aumento do laço de histerese da curva tensão-deformação.

III.1 Modelo Constitutivo Utilizado no Software de Elementos Finitos ANSYS

O modelo constitutivo utilizado no software ANSYS para representar o efeito da pseudoelasticidade está baseado no modelo proposto por AURICCHIO (2001), onde o material é capaz de suportar grandes deformações sem apresentar deformações irreversíveis, conforme pode ser observado na Figura III.1. Nesta figura é possível observar a não-linearidade do ciclo de carregamento (*ABC*), no momento de descarregamento (*CDA*), a transformação reversa ocorre (martensita em austenita) e no final do processo não existem deformações permanentes. Na versão 14.0 do

software ANSYS, existe a possibilidade da modelagem do efeito da pseudoelasticidade e do efeito da memória de forma (ANSYS, 2012). Para o estudo de materiais com o efeito da memória de forma, o modelo constitutivo é fundamentado em um modelo 3D termo-mecânico para a transformação de fase sólida induzida por tensão, conforme apresentado nos trabalhos de SOUZA *et al* (1998) e AURICCHIO e PETRINI (2005). O foco deste trabalho será apenas a modelagem do efeito pseudoelástico aplicado à atenuadores de vibração. Maiores informações sobre o modelo constitutivo aplicado ao efeito de memória de forma, podem ser encontradas na documentação teórica do software ANSYS.

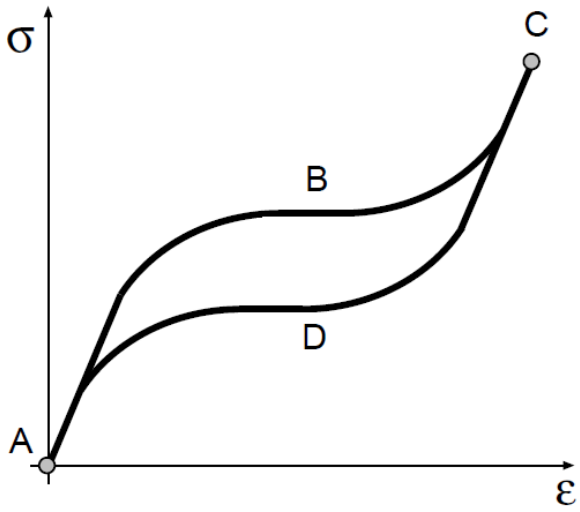


Figura III.1 - Comportamento da pseudoelasticidade (AURICCHIO *et al*, 1997).

O modelo constitutivo pseudoelástico se comporta de forma similar ao modelo hiperelástico ou elástico multilinear, onde grandes deformações são possíveis, sendo o seu diferencial a capacidade de modelar os efeitos da histerese presentes nas SMA's (ANSYS, 2012).

O mecanismo da pseudoelasticidade ou superelasticidade em SMA's que foi discutido no item I.1 do Capítulo I, se desenvolve através dos mecanismos de transformação de fase reversível da austenita em martensita induzida por tensão.

Do ponto de vista macroscópio, os mecanismos de transformação de fase envolvidos no comportamento pseudoelástico são (ANSYS, 2012):

1 – Transformação de fase austenita em martensita (*A* -> *M*);

2 – Transformação de fase martensita em austenita (*M* -> *A*);

3 – Processo de reorientação da martensita maclada para não-maclada.

As hipóteses adotadas para o modelo constitutivo pseudoelástico no software ANSYS são (ANSYS, 2006):

1. A transformação de fase é apenas induzida por tensão;
2. Embora as propriedades do material possam ser definidas como dependentes da temperatura, o efeito da pseudoelasticidade é usualmente considerado no processo isotérmico;
3. O modelo constitutivo considera a transformação de fase austenítica em martensítica (*A* -> *M*) e vice-versa (*M* -> *A*), mas não considera o processo de reorientação (martensita maclada em não-maclada);
4. O modelo pseudoelástico é considerado isotrópico e não depende da taxa de carregamento;
5. O módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e coeficientes de dilatação térmica, são considerados constantes ao longo do processo de transformação de fase.

Embora a transformação de fase no modelo seja considerada completamente reversível, as equações são desenvolvidas de forma similar aos modelos de plasticidade. As deformações de transformação de fase são consideradas separadamente, de forma análoga às deformações inelásticas presentes em plasticidade (ANSYS, 2006).

As fases existentes são a austenita (*A*) e a martensita (*M*), neste modelo as duas transformações de fase (*A* -> *M*) e (*M* -> *A*) são consideradas. Duas variáveis internas são introduzidas para rastrear a fração de martensita (ξ_M) e a fração da austenita (ξ_A). Existem três variáveis independentes que o modelo de material monitora, são elas: ξ_A, $\dot{\xi}_A$ e $\dot{\xi}_M$. A variável dependente escolhida será a fração de

martensita (ξ_M) (ANSYS, 2006, 2012). A soma das frações das fases deve ser sempre 1, ou seja, 100 %:

$$\xi_M + \xi_A = 1 \tag{III.1}$$

A soma das taxas das frações de fase devem ser sempre nulas:

$$\dot{\xi}_M + \dot{\xi}_A = 0 \tag{III.2}$$

Com o rearranjo da Equação III.2, observa-se que a taxa da transformação de uma fase deve ser igual à outra, seja na transformação *A -> M* ou *M -> A*:

$$\dot{\xi}_A^{AM} = -\dot{\xi}_M^{AM} \tag{III.3}$$

$$\dot{\xi}_A^{MA} = -\dot{\xi}_M^{MA} \tag{III.4}$$

A taxa de transformação de cada fase, pode ser relacionada com as suas respectivas taxas de transformação durante o processo *A -> M* ou *M -> A* (ANSYS, 2006):

$$\dot{\xi}_M = \dot{\xi}_M^{AM} + \dot{\xi}_M^{MA} \tag{III.5}$$

$$\dot{\xi}_A = \dot{\xi}_A^{AM} + \dot{\xi}_A^{MA} \tag{III.6}$$

O processo de transformação de fase é modelado utilizando uma superfície de escoamento de Drucker-Prager (ANSYS, 2012). O critério de Drucker-Prager é normalmente utilizado para representar o comportamento elastoplástico, onde o escoamento é controlado através de uma combinação entre a tensão hidrostática e a desviatória. A superfície responsável pela transformação de fase (AURICCHIO e STEFANELLI, 2004) pode ser representada por:

$$F(\boldsymbol{\sigma}) = \|\boldsymbol{s}\| + 3\alpha p \tag{III.7}$$

onde:

$\|\cdot\|$ => Representa a norma Euclidiana no espaço $\boldsymbol{S}$ dos tensores simétricos e desviatórios, ou seja, $\|\boldsymbol{s}\|^2 = \boldsymbol{s}:\boldsymbol{s}$ (AURICCHIO e STEFANELLI, 2004);

$\boldsymbol{s}$ => Componente desviatória da tensão;

α => Constante do material;

p => Componente volumétrica da tensão.

As componentes $\boldsymbol{s}$ e p são definidas como (AURICCHIO e STEFANELLI, 2004):

$$\boldsymbol{s} = \boldsymbol{\sigma} - (\boldsymbol{\sigma} : \mathbf{1}/3)\,\mathbf{1} \tag{III.8}$$

$$p = \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{1}/3 \tag{III.9}$$

de forma que:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{s} + p\mathbf{1} \tag{III.10}$$

onde:

$\mathbf{1}$ => Representa o tensor identidade.

A hipótese de resposta linear elástica isotrópica (AURICCHIO e STEFANELLI, 2004; SOUZA *et al*, 1998) é introduzida de forma que as Equações III.8 e III.9 podem ser escritas conforme:

$$\boldsymbol{s} = 2G(\boldsymbol{e} - \boldsymbol{e}^{tr}) \tag{III.11}$$

$$p = K(\theta - \theta^{tr}) \tag{III.12}$$

$$\theta^{tr} = 3\alpha\varepsilon_L\xi_M \tag{III.13}$$

$$\boldsymbol{e}^{tr} = \varepsilon_L\xi_M(\boldsymbol{s}/\|\boldsymbol{s}\|) \tag{III.14}$$

$$\xi_S = g(\xi_M^0, F(\boldsymbol{\sigma})) \tag{III.15}$$

onde:

K => Módulo de compressibilidade;

G => Módulo de cisalhamento;

ε_L => Máxima deformação residual para a SMA;

θ => Componente volumétrica da deformação ε;

θ^{tr} => Componente volumétrica da deformação de transformação ε^{tr}.

As constantes K e G podem ser obtidas a partir do módulo de elasticidade (E) e do coeficiente de Poisson (υ). A componente volumétrica da deformação ε é definida por $\theta = (\varepsilon : \mathbf{1})$, enquanto que a componente volumétrica da deformação de transformação define-se como $\theta^{tr} = (\varepsilon^{tr} : \mathbf{1})$ (AURICCHIO e STEFANELLI, 2004). Na Equação III.15 nota-se a dependência da fração de transformação de fase anterior (ξ_M^0) e da superfície de escoamento $F(\boldsymbol{\sigma})$. A evolução da fração de martensita (ξ_M) é definida conforme (ANSYS, 2012):

$$\dot{\xi}_M = \begin{cases} -H^{AM}(1-\xi_M)\frac{\dot{F}}{F-R_f^{AM}} & Transformação\ A \rightarrow M \\ H^{MA}(\xi_M)\frac{\dot{F}}{F-R_f^{MA}} & Transformação\ M \rightarrow A \end{cases} \quad \text{(III.16)}$$

onde:

$$R_f^{AM} = \sigma_f^{AM}(1+\alpha) \quad \text{(III.17a)}$$

$$R_f^{MA} = \sigma_f^{MA}(1+\alpha) \quad \text{(III.17b)}$$

$\dot{F}$ => Primeira derivada em relação ao tempo da superfície de escoamento.

As constantes σ_f^{AM}, σ_f^{MA} e α apresentadas nas Equações III.17a e III.17b são propriedades do material (Figura III.2). As quantidades escalares H^{AM} e H^{MA} têm a finalidade de controlar o tipo de transformação de fase (A -> M ou M -> A). H^{AM} e H^{MA} são definidos pelas relações (AURICCHIO, 2001):

$$H^{AM} = \begin{cases} 1 & se \quad \begin{cases} R_s^{AM} < F < R_f^{AM} \\ \dot{F} > 0 \end{cases} \\ 0 & caso\ contrário \end{cases}$$

$$H^{MA} = \begin{cases} 1 & se \quad \begin{cases} R_f^{MA} < F < R_s^{MA} \\ \dot{F} < 0 \end{cases} \\ 0 & caso\ contrário \end{cases}$$

onde:

$R_s^{AM} = \sigma_s^{AM}(1 + \alpha)$ (III.18)

$R_s^{MA} = \sigma_s^{MA}(1 + \alpha)$ (III.19)

σ_s^{AM}, σ_s^{MA} e α => Propriedades do material.

O parâmetro α controla a diferença de resposta da SMA em tração e compressão. Para um ensaio uniaxial tração-compressão, α pode ser relacionado com os valores iniciais de tensão de transformação de fase austenítica em martensítica (σ_s^{AM}) em tração e compressão, indicados respectivamente por $\sigma_s^{AM,+}$ e $\sigma_s^{AM,-}$, conforme mostrado na Equação III.20 (ANSYS, 2012). Dados experimentais apresentados em AURICCHIO *et al* (1997) mostram valores de α em torno de 0,10.

$$\alpha = \frac{\sigma_s^{AM,-} - \sigma_s^{AM,+}}{\sigma_s^{AM,-} + \sigma_s^{AM,+}} \quad \text{(III.20)}$$

Para o caso particular onde o comportamento em tração é o mesmo em compressão, $\alpha = 0$.

A relação tensão-deformação incremental no modelo é dada por (ANSYS, 2012):

$$\{\Delta\sigma\} = [D](\{\Delta\varepsilon\} - \{\Delta\varepsilon^{tr}\}) \quad \text{(III.21)}$$

$$\{\Delta\varepsilon^{tr}\} = \Delta\xi_M \varepsilon_L \frac{dF}{d\{\sigma\}} \quad \text{(III.22)}$$

onde:

$[D]$ => Matriz tensão-deformação elástica;

$\{\Delta\varepsilon^{tr}\}$ => Deformação de transformação incremental;

ε_L => Propriedade do material (Figura III.2).

A Figura III.2 apresenta a curva tensão-deformação idealizada para o comportamento pseudoelástico. A Tabela III.1 apresenta as propriedades mecânicas, necessárias para se caracterizar o comportamento pseudoelástico em uma liga com memória de forma, segundo o modelo apresentado. Todas as tensões, ε_L e α apresentados na Figura III.2 podem ser definidos para diversas temperaturas.

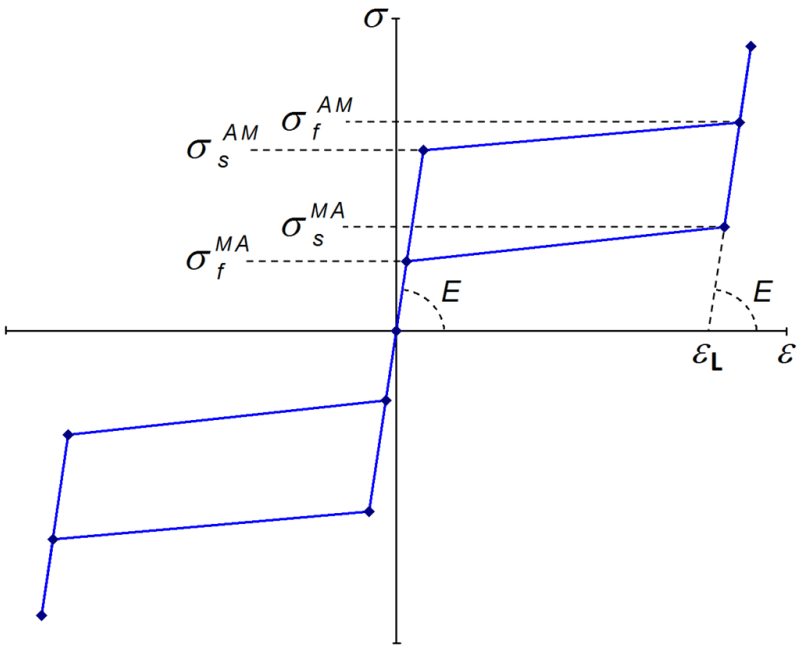


Figura III.2 - Curva *σ-ε* idealizada para o comportamento pseudoelástico.

Tabela III.1 - Descrição das propriedades mecânicas para a pseudoelasticidade de acordo com o modelo de AURICCHIO (2001).

Propriedade Mecânica	Descrição
E	Módulo de elasticidade da austenita e da martensita
υ	Coeficiente de Poisson
σ_s^{AM}	Tensão de início da transformação de fase
σ_f^{AM}	Tensão final da transformação de fase
σ_s^{MA}	Tensão de início da inversão da transformação de fase
σ_f^{MA}	Tensão final da inversão da transformação de fase
ε_L	Máxima deformação residual
α	Parâmetro que mensura a diferença de resposta da SMA em tração e compressão

Para a representação da fase elástica da austenita até a tensão de início de transformação de fase (σ_s^{AM}), é necessário que sejam definidos o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (υ). O modelo considera que estas propriedades são as mesmas para a fase elástica da martensita e devem ser definidas por comandos ***MP*** do ANSYS.

As propriedades mecânicas para o comportamento pseudoelástico devem ser definidas por comandos ***TB*** e ***TBDATA*** no software ANSYS. O modelo constitutivo existente para SMAs pode ser utilizado com os seguintes elementos: PLANE182, PLANE183, SOLID185, SOLID186, SOLID187, e SOLSH190 (ANSYS, 2012).

Algumas recomendações quanto à utilização deste modelo devem ser seguidas (ANSYS, 2006): 1 - A análise de modelos com SMA devem possuir a não-linearidade geométrica ativada; 2 - As deformações de transformação são armazenadas como deformações plásticas; 3 - O percentual de martensita é armazenado como deformação plástica equivalente acumulada (***NL,EPEQ***); 4 - O modelo de material de SMA não pode ser combinado com nenhum outro tipo de material.

IV. Modelos Numéricos

Este capítulo apresenta uma breve descrição do Método de Elementos Finitos e a implementação dos modelos desenvolvidos para estudar o comportamento pseudoelástico em dispositivos com ligas com memória de forma. Três geometrias foram estudadas para avaliar a capacidade de absorção de energia: mola Belleville, barra de seção circular e mola helicoidal. As simulações numéricas foram realizadas utilizando-se o software comercial de Elementos Finitos ANSYS 14.0 (ANSYS, 2012).

IV.1 O Método de Elementos Finitos

Os problemas de engenharia podem ser estudados através de modelos baseados nos princípios da Mecânica do Contínuo (MALVERN, 1969; LAI *et al*, 1993). Esta área da mecânica considera a matéria como um meio contínuo, sem levar em consideração sua estrutura molecular (RIBEIRO, 2004). A idéia do "continuum" permite que se defina o ponto geométrico tendendo a um volume nulo. Na Mecânica do Contínuo os princípios físicos são modelados sob a forma de equações diferenciais (LAI *et al*, 1993) e os efeitos relacionados ao comportamento dos materiais são levados em consideração de forma macroscópica através do modelo constitutivo (RIBEIRO, 2004). Soluções para o sistema de equações associado ao modelo podem ser obtidas através de métodos numéricos como o Método de Elementos Finitos (MEF). A Figura IV.1 apresenta as etapas para a aplicação do MEF e um breve resumo de cada etapa.

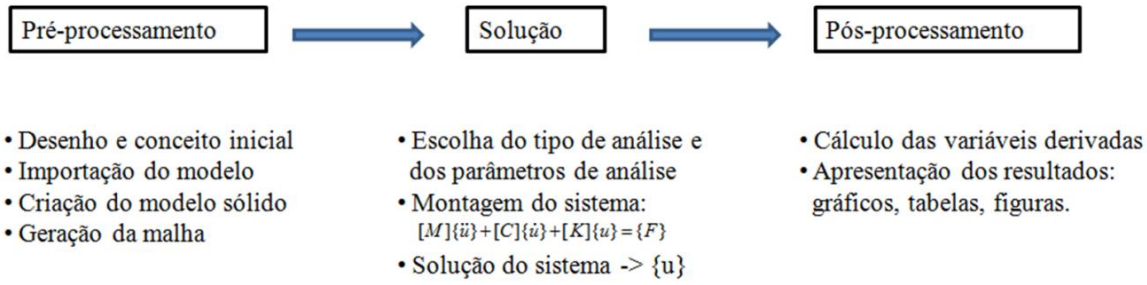


Figura IV.1 - Etapas para a aplicação do M.E.F. (ALMEIDA, 2011).

A aplicação do Método de Elementos Finitos a um sistema mecânico dinâmico resulta em uma equação de movimento conforme a Equação IV.1.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad \text{(IV.1)}$$

onde:

$[M]$ => Matriz de massa;

$[C]$ => Matriz de amortecimento;

$[K]$ => Matriz de rigidez;

$\{\ddot{u}\}$ => Vetor de aceleração;

$\{\dot{u}\}$ => Vetor de velocidade;

$\{u\}$ => Vetor de deslocamento;

$\{F\}$ => Vetor de força aplicada.

Após a escolha de um modelo constitutivo para modelar o comportamento do material, conforme discutido no Capítulo III, a próxima etapa consiste na escolha do tipo de análise a ser executada. Dentre os possíveis tipos de análises estruturais existentes pode-se citar: estática estrutural, transiente estrutural, modal e harmônica. Neste estudo as análises são estáticas estruturais, possuindo não-linearidades geométricas e de material (curva σ-ε não-linear). A análise estática estrutural considera que $\{\ddot{u}\}$ e $\{\dot{u}\}$ na equação IV.1 são nulas e portanto, tem-se o seguinte problema discreto:

$$[K_t]\{\Delta u_t\} = \{\Delta F_t\} \quad \text{(IV.2)}$$

Este sistema pode ser resolvido a partir de um método de solução iterativo. Para análises estáticas no software ANSYS (ANSYS, 2012) existem dois métodos de solução possíveis: Direto (*Sparse*) ou Iterativo (*Preconditioned Conjugate Gradient – PCG*). O solver direto é mais robusto e recomendado para modelos com não-linearidades e também quando existem elementos de casca ou viga descontínuos. Este solver foi utilizado na solução de todos os modelos numéricos estudados devido a sua robustez na aquisição da convergência.

IV.2 Tipos de Elementos Utilizados no Software de Elementos Finitos ANSYS

Um dos fatores mais importantes na solução do modelo de Elementos Finitos é a escolha do tipo de elemento adequado (BEAM, PIPE, PLANE, SHELL, SOLID, CONTA, FLUID, etc.). Para cada tipo de elemento estudado adotaram-se diferentes tipos de elementos.

A modelagem da mola Belleville é realizada utilizando-se elementos bidimensionais com comportamento axissimétrico no ANSYS. O elemento PLANE183 é um elemento bidimensional (2D) de segunda ordem e tem 8 nós (forma quadrilátera) ou 6 nós (triangular). Este elemento também possui a capacidade de deslocamento quadrática e possui em cada nó dois graus de liberdade translacionais e a formulação de elemento plano pode ser de tensão plana, deformação plana ou axissimétrico (ANSYS, 2012). A mola Belleville apresenta um comportamento cíclico em relação a um eixo central, o que justifica a hipótese de axissimetria adotada para esta mola. Além da modelagem da SMA, este elemento também suporta plasticidade, hiperelasticidade, fluência, grandes deflexões e deformações. A Figura IV.2 apresenta o elemento PLANE183 e suas formas possíveis.

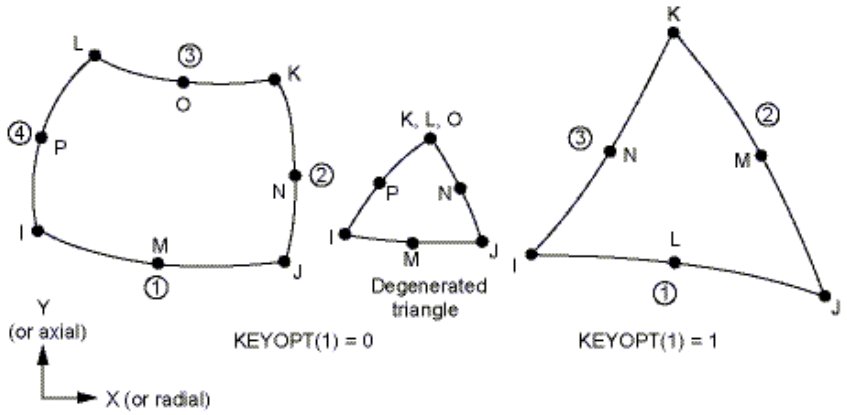


Figura IV.2 - Elemento PLANE183 e as formas possíveis (ANSYS, 2012).

No estudo da mola Belleville existem duas regiões de contato que precisam ser modeladas, são elas: 1 - Arestas inferiores da mola com a aresta do componente que limita o movimento da mola. 2 - Arestas superiores da mola com a aresta do componente cujo movimento é prescrito. Para representar estas interfaces de contato 2D, foram utilizados elementos CONTA172 e TARGE169, a Figura IV.3 mostra estes dois elementos utilizados.

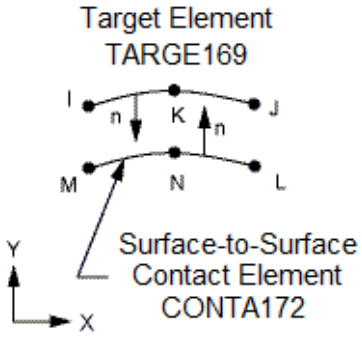


Figura IV.3 - Elementos CONTA172 e TARGE169 utilizados (ANSYS, 2012).

A geometria da barra de seção circular e da mola helicoidal em SMA é modelada utilizando-se elementos do tipo sólido no ANSYS. A modelagem através de elementos de viga (BEAM) ou por elementos de tubo (PIPE), não está disponível na versão 14.0 do ANSYS. O elemento SOLID186 é um elemento tridimensional (3D) de segunda ordem e tem 20 nós com a capacidade de deslocamento quadrática. Este elemento possui em cada nó três graus de liberdade translacional e suporta o modelo de material de SMA, plasticidade, hiperelasticidade, fluência, grandes deflexões e deformações (ANSYS, 2012). Uma ilustração do elemento SOLID186 e suas variantes é apresentada na Figura IV.4.

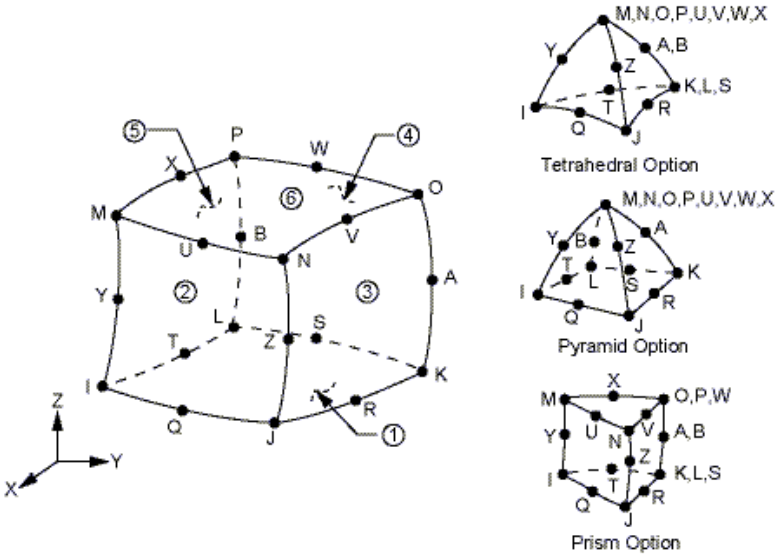


Figura IV.4 - Elemento SOLID186 e suas formas possíveis (ANSYS, 2012).

IV.3 Geometrias Utilizadas nos Modelos de Elementos Finitos

As geometrias 2D e 3D estudadas foram desenvolvidas através do módulo de CAD (*Computer Aided Design*) do ANSYS, o ANSYS Design Modeler.

IV.3.1 Geometria da Mola Belleville

Neste trabalho adotou-se a geometria das molas Belleville apresentadas no estudo de SPEICHER *et al* (2009). Estas molas possuem 55 mm de diâmetro externo, 6,4 mm de altura e 3,05 mm de espessura. O formato cônico foi obtido através de uma matriz cônica com 30º, resultando em molas Bellevile com angulos de 26º a 27º (SPEICHER *et al*, 2009). A Figura IV.5 apresenta o dispositivo com as molas Belleville utilizadas no experimento deste autor. As dimensões estão dispostas conforme a Figura IV.6. A descrição das dimensões se encontra na Tabela IV.1.



Figura IV.5 - Dispositivo com as molas Belleville ensaiadas no trabalho de SPEICHER *et al* (2009).

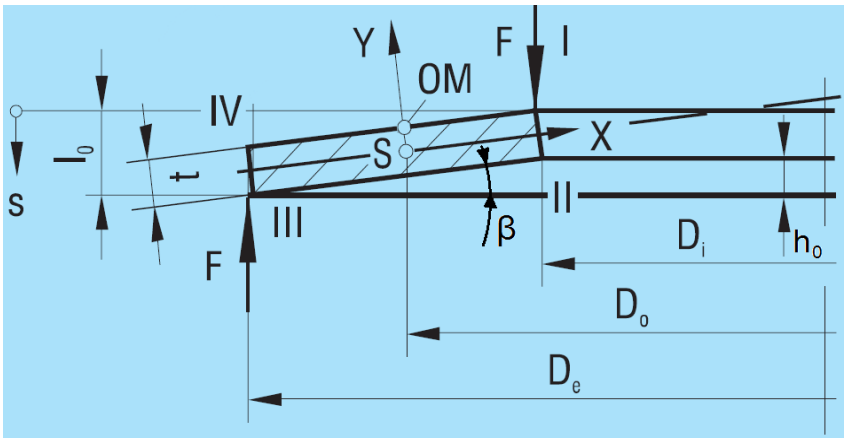


Figura IV.6 - Dimensões da mola Belleville conforme handbook da SCHNORR (2003).

Tabela IV.1 - Descrição das dimensões da mola Belleville (SCHNORR, 2003).

Dimensão	Descrição
D_e	Diâmetro externo da mola
D_0	Diâmetro do centro de rotação da mola
D_i	Diâmetro interno da mola
t	Espessura da mola
l_0	Altura da mola
β	Ângulo do cone da mola
h_0	Altura do cone da mola descarregada: - Pequenas espessuras (t < 2mm): $h_0 = l_0 - t$ - Espessuras consideráveis: $h_0 = l_0 - tcos\beta$
s	Deslocamento aplicado na mola
I	Ponto de contato da mola com o disco superior
II	Ponto na seção da mola sem contato e próximo ao D_i
III	Ponto de contato da mola com o disco inferior
IV	Ponto na seção da mola sem contato e próximo ao D_e

As dimensões do estudo de SPEICHER *et al* (2009) da mola Belleville podem ser observadas na Tabela IV.2. O ângulo do cone adotado foi de 26,5º.

Tabela IV.2 - Dimensões da mola Belleville (SPEICHER *et al*, 2009).

Dimensão	Valor
D_e	55,00 mm
D_i	26,61 mm
t	3,05 mm
l_0	9,13 mm
β	26,50º
h_0	6,40 mm

A Figura IV.7 apresenta a geometria 2D da mola Belleville. A geometria da mola com expansão cíclica é mostrada na Figura IV.8, nesta observa-se também os discos inferior e superior, que servem para a aplicação de carregamento e condição de contorno no modelo numérico.

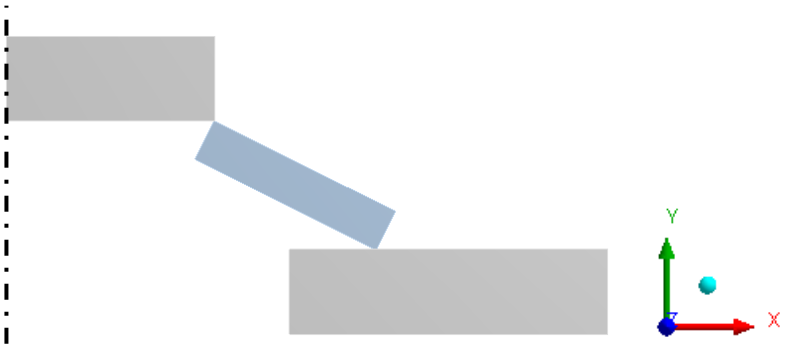


Figura IV.7 - Geometria 2D da mola Belleville estudada.

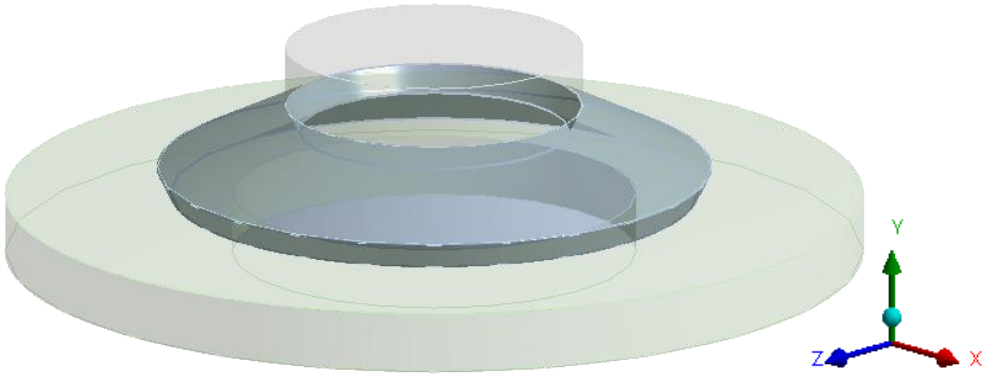


Figura IV.8 - Geometria 2D da mola Belleville com expansão cíclica de 360º.

IV.3.2 Geometria da Barra Cilíndrica

A geometria 3D da barra cilíndrica estudada possui o diâmetro e o comprimento parametrizados, visando facilitar a análise de diversos modelos com combinações de diâmetro e comprimento. A Figura IV.9 mostra a geometria de uma das barras analisadas (D = 6,35 mm e L = 70 mm). Nesta figura observa-se a existência de diversas divisões na barra. Este procedimento geométrico tem o objetivo de isolar os resultados dos efeitos de borda gerados pelo carregamento e condições de contorno, sendo que o corte mediano permite o pós-processamento de resultados nesta seção da barra.

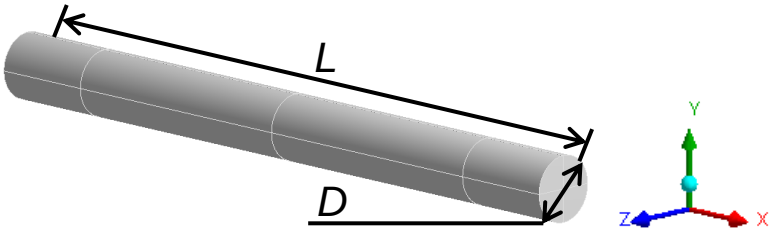


Figura IV.9 - Geometria 3D da barra, exemplo com *D* = 6,35 mm e *L* = 70 mm.

IV.3.3 Geometria da Mola Helicoidal

A geometria da mola helicoidal desenvolvida possui todas as suas dimensões parametrizadas, otimizando assim a análise de diferentes modelos numéricos. Na Figura IV.10 é possível observar o diâmetro da mola (*D*), o diâmetro do fio (*d*) e o passo da mola (*p*). Neste estudo também se fez o uso de cortes na geometria, semelhante ao estudo da barra cilíndrica.

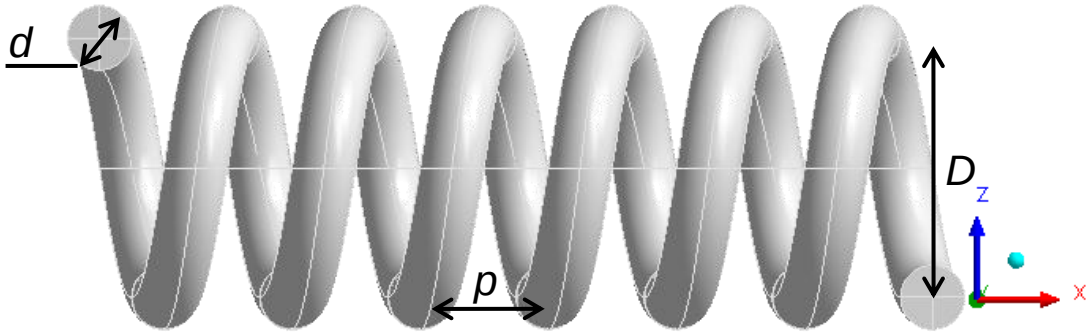


Figura IV.10 - Geometria 3D da mola helicoidal, *D* = 51,30 mm, *d* = 12,70 mm, passo de 25,4 mm e 6,5 espiras.

IV.4 Malhas Utilizadas nos Modelos de Elementos Finitos

As malhas dos modelos de elementos finitos foram desenvolvidas através do módulo estrutural do ANSYS, o ANSYS Mechanical.

IV.4.1 Malha de Elementos Finitos da Mola Belleville

O modelo 2D da mola Belleville utiliza elementos do tipo PLANE183. Uma das malhas 2D utilizadas no estudo da mola Belleville pode ser visualizada na Figura IV.11. A malha com expansão cíclica de 360º se encontra na Figura IV.12. Esta possui 3233 nós e 1044 elementos. Os elementos de contato (CONTA e TARGE) estão localizados nas arestas do contato da mola Belleville com os discos inferior e superior.

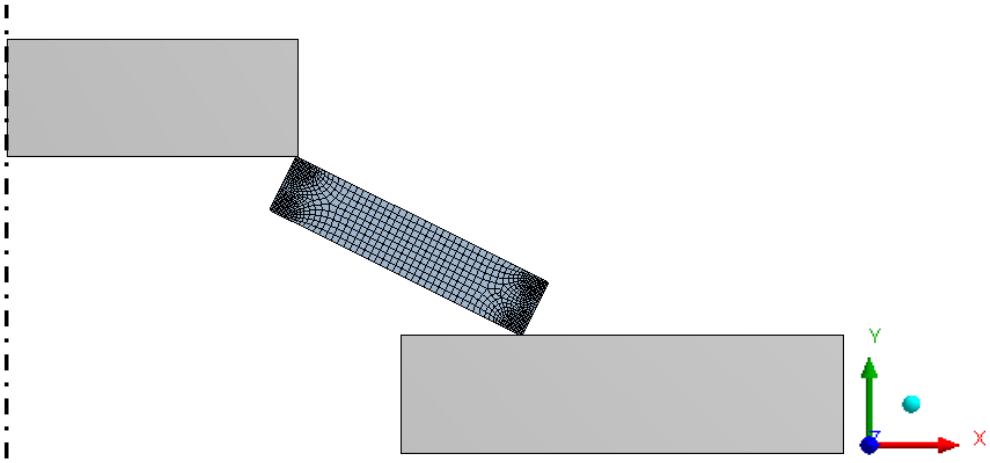


Figura IV.11 - Malha do modelo 2D da mola Belleville.

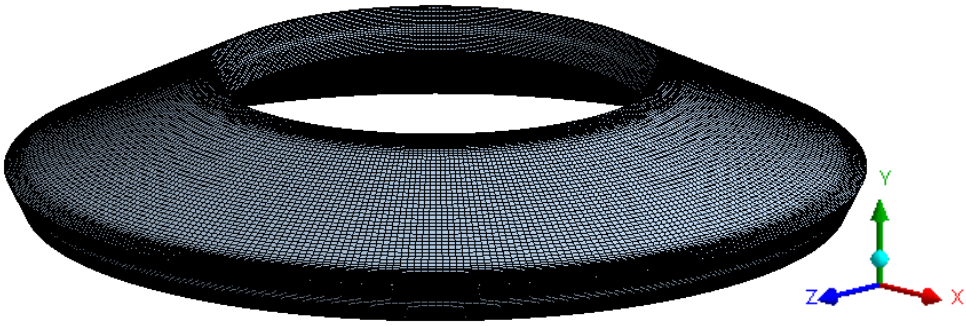


Figura IV.12 - Malha 2D da mola Belleville com expansão cíclica de 360º.

IV.4.2 Malha de Elementos Finitos da Barra Cilíndrica

Os modelos 3D das barras de seção circular utilizam elementos do tipo SOLID186. Comandos de tamanho de elemento controlam o refino do modelo. O número de nós e elementos resultantes dependem da geometria da barra estudada. A malha 3D da barra com D = 6,35 mm e L = 70 mm é apresentada na Figura IV.13. Esta possui 12633 nós e 2640 elementos.

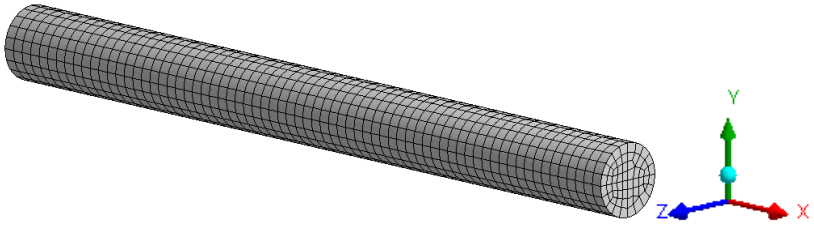


Figura IV.13 - Exemplo da malha 3D de uma barra (D = 6,35 mm e L = 70 mm).

IV.4.3 Malha de Elementos Finitos da Mola Helicoidal

O modelagem das molas helicoidais é feito com elementos do tipo SOLID186 e a discretização é controlada pelo tamanho dos elementos na mola. A malha resultante desta também depende dos parâmetros geométricos, a Figura IV.14 mostra a malha de uma mola helicoidal com D = 51,30 mm, d = 12,70 mm, passo de 25,4 mm e 6,5 espiras, onde existem 174977 nós e 38592 elementos.

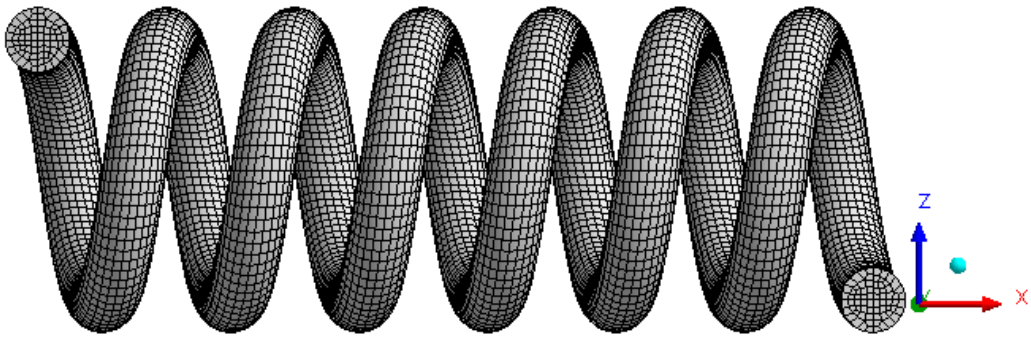


Figura IV.14 - Exemplo de malha da mola helicoidal (D = 51,30 mm, d = 12,70 mm, passo de 25,4 mm e 6,5 espiras).

IV.5 Hipóteses Adotadas para os Modelos de Elementos Finitos

Os modelos numéricos elaborados neste estudo necessitam de condições de contorno e carregamentos. Esta seção apresenta todas as hipóteses adotadas para os modelos da mola Belleville, barra cilíndrica e mola helicoidal.

IV.5.1 Hipóteses Adotadas na Mola Belleville

Os modelos elaborados para a análise da mola Belleville, utilizam elementos do tipo 2D (PLANE183) com axissimetria. A construção de geometrias 2D axissimétricas deve ser realizada no plano *XY*, onde o *Y* é o eixo de rotação (ANSYS, 2012). As duas interfaces de contato da mola com os discos, são modeladas utilizando-se elementos de contato (CONTA172 e TARGE169) nas arestas da geometria. As linhas em vermelho na Figura IV.15 representam os elementos CONTA172, as linhas azuis representam os elementos TARGE169.

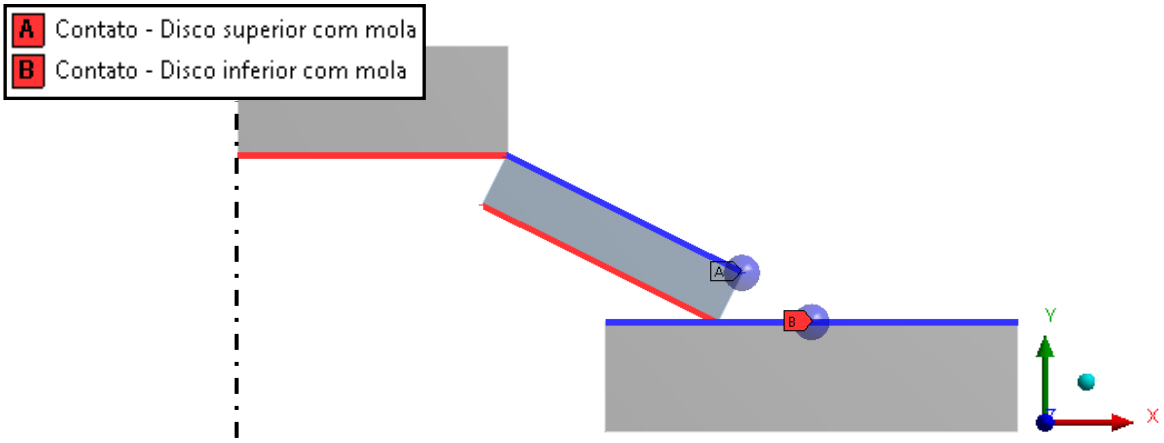


Figura IV.15 - Interfaces de contato na mola Belleville.

Um coeficiente de atrito μ = 0,15 (BUDYNAS−NISBETT, 2006) foi adotado nos dois pares de contato (A e B da Figura IV.15). A Tabela IV.3 mostra duas faixas de valores de coeficiente de atrito para a interface aço/aço.

Tabela IV.3 - Coeficientes de atrito aço/aço, adaptado de BUDYNAS−NISBETT (2006).

Condição	Coeficiente de Atrito (μ)
Seco	0,15 ~ 0,25
Com óleo de máquina	0,11 ~ 0,17

Os contatos utilizados possuem comportamento simétrico, formulação Lagrangiana aumentada, interface de tratamento de ajuste ao toque e raio de detecção de 1mm (círculo azul da Figura IV.15).

Para representar o engaste do disco inferior, restringiu-se todos os graus de liberdade, conforme apresenta a Figura IV.16.

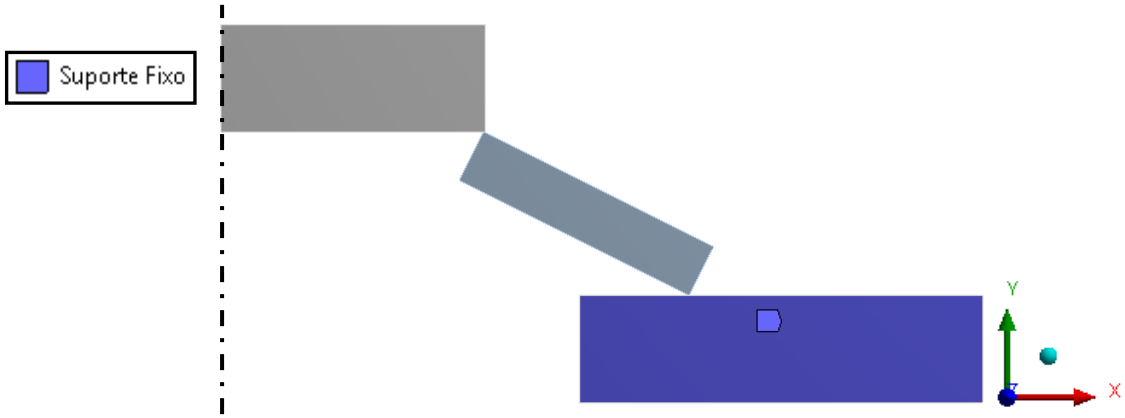


Figura IV.16 - Condição de contorno de suporte fixo aplicada no disco inferior.

Um deslocamento foi utilizado para restringir o movimento no eixo *X* do disco superior, atuando desta forma como condição de contorno. Este mesmo também aplica o carregamento de -5,89 mm no eixo *Y* (SPEICHER *et al*, 2009), conforme mostra Figura IV.18. O valor do deslocamento no eixo *Y* é negativo devido ao movimento de descida do disco superior.

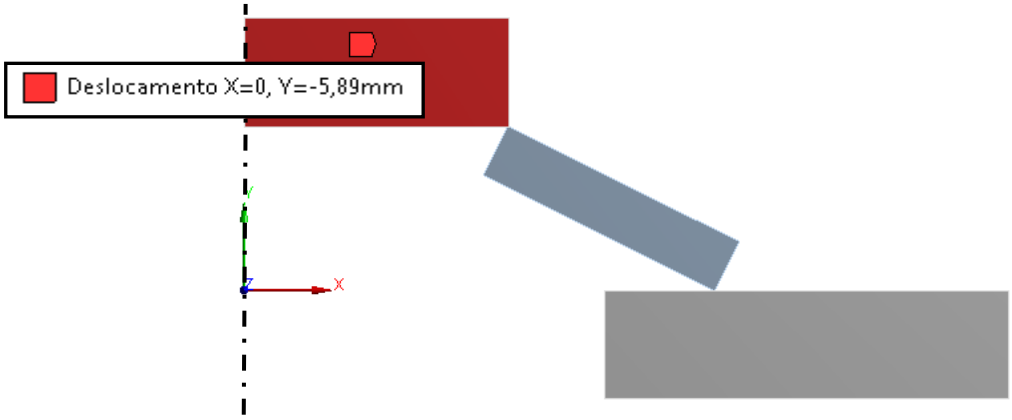


Figura IV.17 - Condição de contorno/carregamento aplicados no disco superior.

.

O carregamento de deslocamento é aplicado no disco superior em 4 passos, após alcançar o valor máximo de -5,89 mm, este é descarregado em mais 4 passos seguintes. O histórico dos deslocamentos (condição de contorno e carregamento) aplicado no disco superior pode ser visto na Figura IV.18.

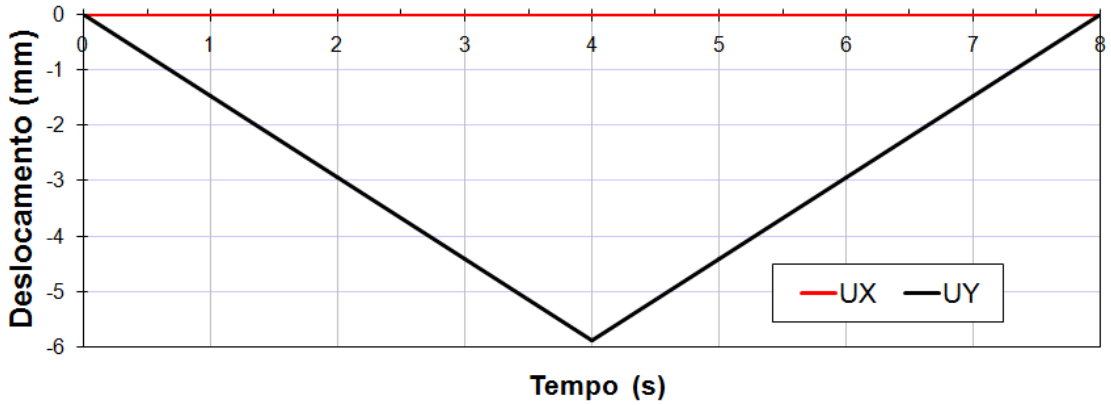


Figura IV.18 - Histórico do deslocamento aplicado no disco superior.

Para obter os valores positivos em compressão utilizados na curva *F-u*, um sistema de coordenadas local (Figura IV.19) foi criado para a extração destes deslocamentos.

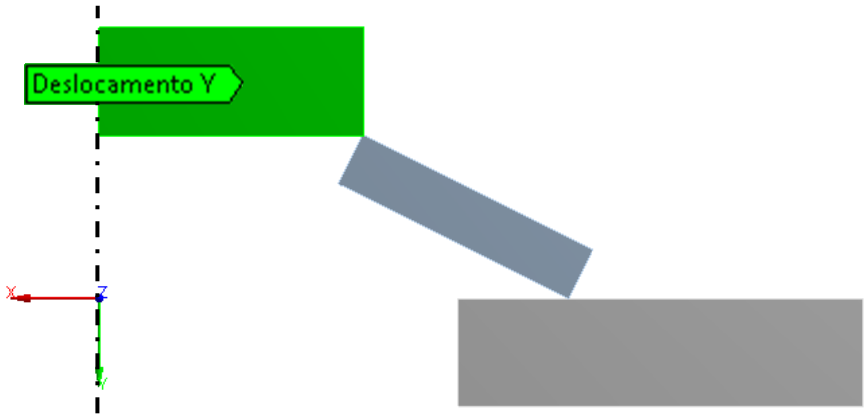


Figura IV.19 - Sistema de coordenadas local para extração da curva *F-u*.

IV.5.2 Hipóteses Adotadas na Barra Cilíndrica

As barras de seção circular desenvolvidas para estudar a absorção de energia, foram modeladas com elementos sólidos 3D (SOLID186). Uma condição de contorno que fixasse todos os graus de liberdade, afetaria os resultados na extremidade da barra. Uma forma de contornar este problema é a restrição apenas na direção axial desta extremidade, permitindo assim os deslocamentos na direção transversal. Isto pode ser realizado com a aplicação de uma condição de contorno $X = 0$ (Figura IV.20).

Para evitar rotações no eixo da barra, uma condição de contorno fixa o movimento tangencial na face cilíndrica (Figura IV.21). Entretanto, este deixa a barra livre na direção radial.

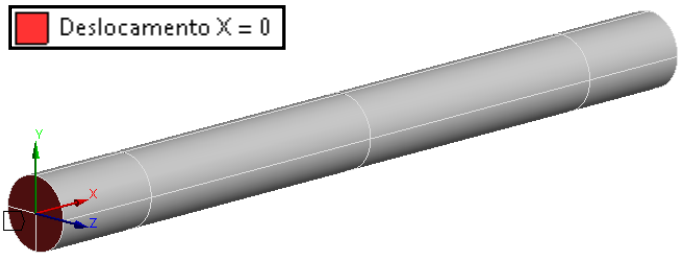


Figura IV.20 - Condição de contorno de deslocamento na barra.

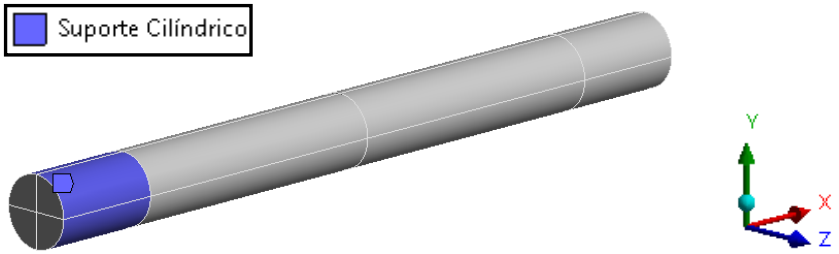


Figura IV.21 - Condição de contorno de rotação na barra.

O carregamento de deslocamento é aplicado na outra extremidade da barra, conforme visualizado na Figura IV.22. O histórico deste carregamento é semelhante ao aplicado no disco superior da mola Bellevile (carregamento de rampa), sendo as diferenças: 1 - Carregamento máximo aplicado em 1 passo, com o descarregamento total no passo seguinte; 2 - O valor do deslocamento é positivo pois a direção trativa está alinhada com o *X*+.

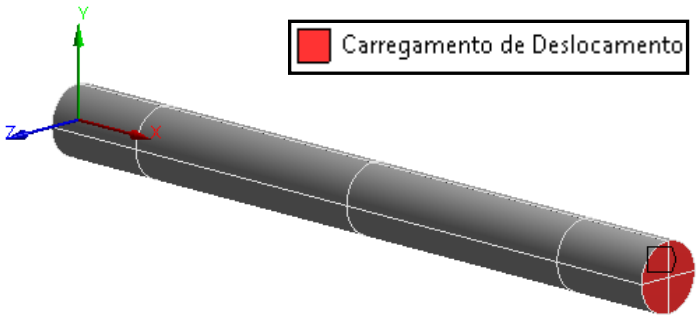


Figura IV.22 - Carregamento de deslocamento aplicado na barra.

Os modelos de barra mostraram-se satisfatórios com a divisão do carregamento em 2 passos (um para o carregamento e o seguinte para o descarregamento) com 50 divisões cada um. Nas configurações da análise da barra o solver direto também foi utilizado, assim como a não-linearidade geométrica.

É importante destacar que o elemento de barra apresenta um estado uniaxial de tensões homogêneo. A representação através de elementos 3D se justifica para efeitos de visualização e pelo fato de que pela simplicidade da geometria, o processamento numérico necessário não é intensivo.

IV.5.3 Hipóteses Adotadas na Mola Helicoidal

As molas helicoidais desenvolvidas neste estudo utilizam elementos sólidos 3D (SOLID186) na sua discretização. O engaste da mola é realizado através da fixação de todos os graus de liberdade, em uma das extremidades da mola conforme apresenta a Figura IV.23. O carregamento de deslocamento é aplicado na outra extremidade da mola helicoidal, como mostra a Figura IV.24. Este deslocamento é permitido apenas na direção *X*, não é admitido deslocamentos nos eixos *Y* e *Z*. O histórico do carregamento é semelhante ao da barra cilíndrica (rampa), onde o valor máximo ocorre no final do passo 1 da simulação, descarregando completamente no final do passo 2.

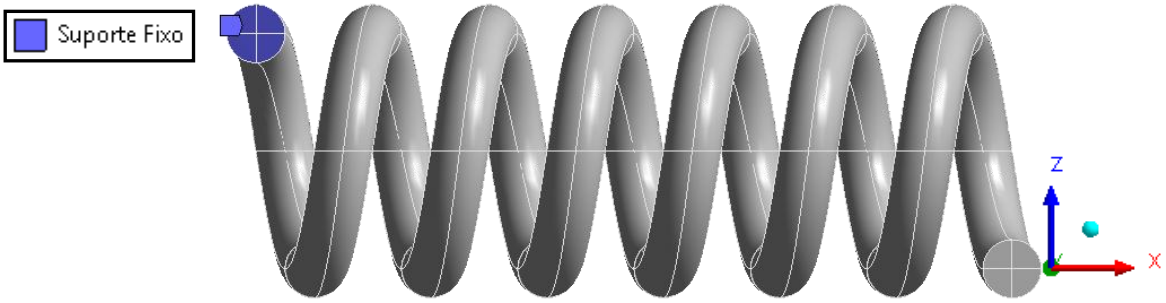


Figura IV.23 - Condição de contorno aplicada na mola helicoidal.

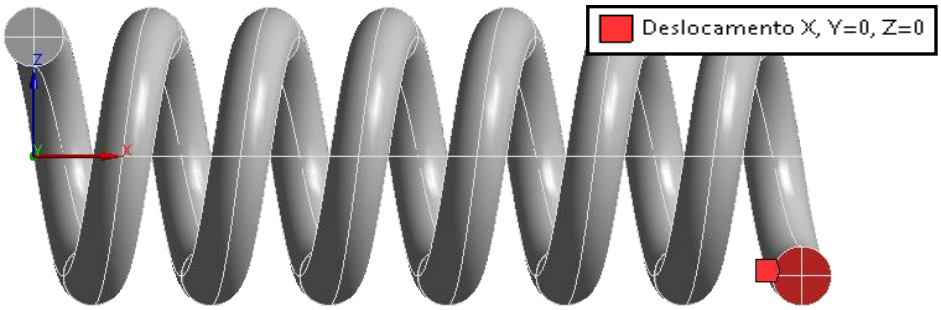


Figura IV.24 - Carregamento de deslocamento aplicada na mola helicoidal.

Os modelos de teste com as molas helicoidais mostraram que 2 passos de carregamento (um para o carregamento e outro para o descarregamento) com 50 subpassos cada, são suficientes para representar corretamente o fenômeno. Nesta análise utilizou-se o solver direto e a não-linearidade geométrica também foi ativada.

IV.6 Calibração das Propriedades Mecânicas Através de Dados Experimentais

Para que as simulações numéricas da avaliação da dissipação de energia em dispositivos com SMA, devido ao efeito pseudoelástico utilizando os modelos numéricos baseados no modelo proposto por AURICCHIO (2001) possam ser desenvolvidas, é necessário ter disponível as propriedades mecânicas listadas na Tabela III.1. Neste trabalho as propriedades do modelo foram estimadas através de um processo de calibração utilizando dados experimentais para uma mola prato (mola Belleville) do trabalho de SPEICHER *et al* (2009). Estes autores analisaram um dispositivo capaz de absorver vibrações tanto em compressão como em tração, utilizando molas helicoidais ou molas Belleville. A Figura IV.25 apresenta o dispositivo desenvolvido por SPEICHER *et al* (2009), onde é possível observar que, indepententemente do dispositivo estar em compressão ou tração, o elemento interno (mola helicoidal ou Belleville) sempre estará em compressão.

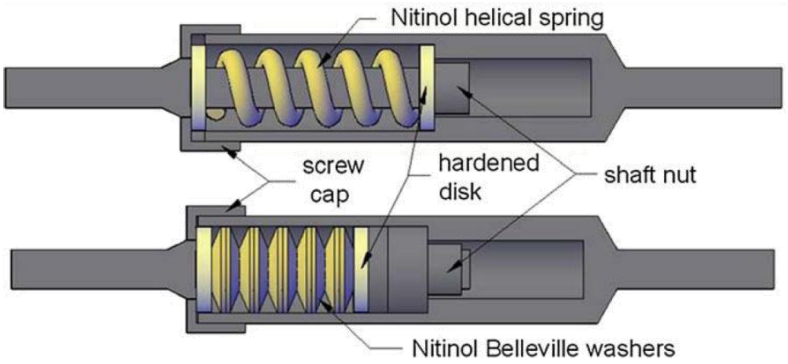


Figura IV.25 - Ilustração do dispositivo atenuador de vibração em tração/compressão proposto por SPEICHER *et al* (2009).

No experimento realizado por SPEICHER *et al* (2009) duas molas helicoidais diferentes foram ensaiadas, onde uma possui a seção vazada com diâmetro externo de 12,5 mm e interno de 9,5 mm, enquanto que a outra mola helicoidal possui a seção sólida com diâmetro externo de 12,5 mm. Ambas as molas possuem o diâmetro de 38,1 mm (SPEICHER *et al*, 2009). As molas helicoidias (Figura IV.26) utilizadas nos ensaios são feitas de barras de Nitinol 508 (Anexo I) que foram aquecidas com maçarico seção por seção até o ponto de início de amolecimento (aprox. 650 a 700ºC), para então serem então moldadas no eixo do dispositivo. Estas molas também sofreram tratamento térmico para uniformizar as propriedades mecânicas (SPEICHER *et al*, 2009).

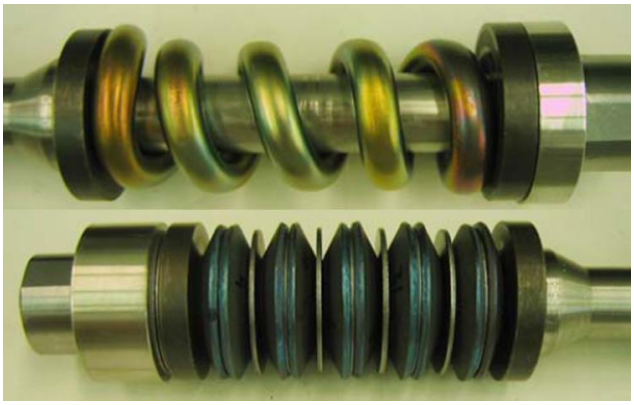


Figura IV.26 - Molas helicoidal e Belleville ensaiadas no trabalho de SPEICHER *et al* (2009).

As molas Belleville foram fabricadas através do corte a jato de água em folhas de Nitinol 508 (Anexo I). Uma das molas Belleville (mola 3) teve um tratamento térmico diferenciado, o que proporcionou uma maior temperatura de transformação, resultando em menor pseudoelasticidade (SPEICHER *et al*, 2009).

Os seis ensaios realizados no trabalho de SPEICHER *et al* (2009) foram: 1 - Carregamento cíclico no dispositivo com a mola helicoidal de seção vazada; 2 - Carregamento cíclico no dispositivo com a mola helicoidal de seção sólida; 3 - Carregamento monotônico de compressão, de forma individual, em três molas Belleville; 4 - Carregamento cíclico no dispositivo com molas Belleville (10 molas) na configuração de empilhamento simples (dispositivo com 10 molas Belleville da Figura IV.26); 5 - Carregamento cíclico no dispositivo com molas Belleville na configuração de empilhamento duplo (12 molas); 6 - Carregamento cíclico no dispositivo com molas Belleville na configuração de empilhamento triplo (12 molas).

Dentre todos os ensaios realizados por SPEICHER *et al* (2009), o que apresenta a melhor curva *F-u* e menor dificuldade na modelagem numérica é o ensaio 3 (carregamento monotônico de compressão individual, para 3 molas Belleville das 10 apresentadas na Figura IV.26). Esta geometria pode ser modelada através de modelos 2D axissimétricos, sendo desta forma, o que possui o menor tempo de solução numérica dentre as geometrias apresentadas.

As três curvas *F-u* experimentais (ensaio 3) disponíveis no trabalho de SPEICHER *et al* (2009) são apresentadas na Figura IV.27. Importante mencionar que os valores de deslocamento são apresentados em relação a um sistema de coordenadas local, situado na mesma direção e sentido da compressão do dispositivo,

resultando em valores positivos com o dispositivo em compressão. O gráfico da Figura IV.27 foi obtido através da extração dos pontos, existentes na imagem da curva *F-u* do experimento.

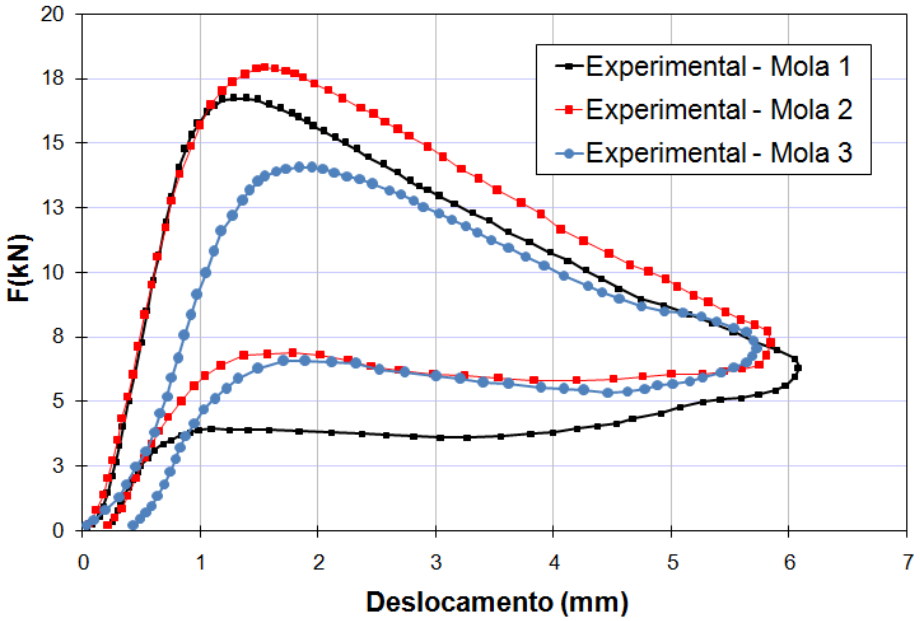


Figura IV.27 - Curvas *F-u* experimentais para três molas Belleville em compressão. A mola 3 sofreu um tratamento térmico difereciado. Adaptado de SPEICHER *et al* (2009).

As dimensões apresentadas na Tabela IV.2 consideram a seção da mola como retangular com seus vértices sem curvaturas, o que do ponto de vista numérico, é prejudicial para as regiões de contato. A solução adotada foi a utilização de um pequeno raio de adoçamento (*r* = 0,1 mm), nos quatro vértices da seção retangular da mola Belleville, resultando desta forma, em novos valores para a altura da mola (l_0) e altura do cone da mola descarregada (h_0): l_0 = 9,06 mm e h_0 = 6,33 mm. O deslocamento máximo admissível geométrico com estas novas dimensões, corresponde à $l_0 - t$ = 6,01 mm. Entretanto, na etapa de calibração, um valor mediano entre os máximos de deslocamento obtido para as molas 1 (5,7230 mm) e 3 (6,048 mm) é utilizado: 5,89 mm.

Antes da etapa de calibração do modelo numérico com resultados experimentais, é necessário verificar a consistência do modelo numérico, através de um estudo de convergência de malha. No estudo de convergência foram utilizadas

diferentes malhas, onde estas foram constituídas de 188 nós e 47 elementos na malha mais grosseira (modelo 1), indo até 13688 nós e 4443 elementos na malha mais refinada (modelo 9).

Nesta etapa de calibração da malha utilizou-se um material com comportamento linear elástico com características próximas às encontradas no regime linear do elemento de SMA (E = 45 GPa e ν = 0,3). Estes valores foram adotados com base nas informações do Anexo I. As malhas deste estudo se encontram no Apêndice I. SCHNORR (2003) recomenda que o deslocamento aplicado na mola seja de 75 % de h_0, o que resulta em um deslocamento máximo de 4,75 mm para o estudo de convergência com material linear elástico. A Figura IV.28 mostra a tensão principal máxima, localizada no ponto de contato com o disco inferior (ponto III da Figura IV.6), em função do número de elementos nas malhas do estudo.

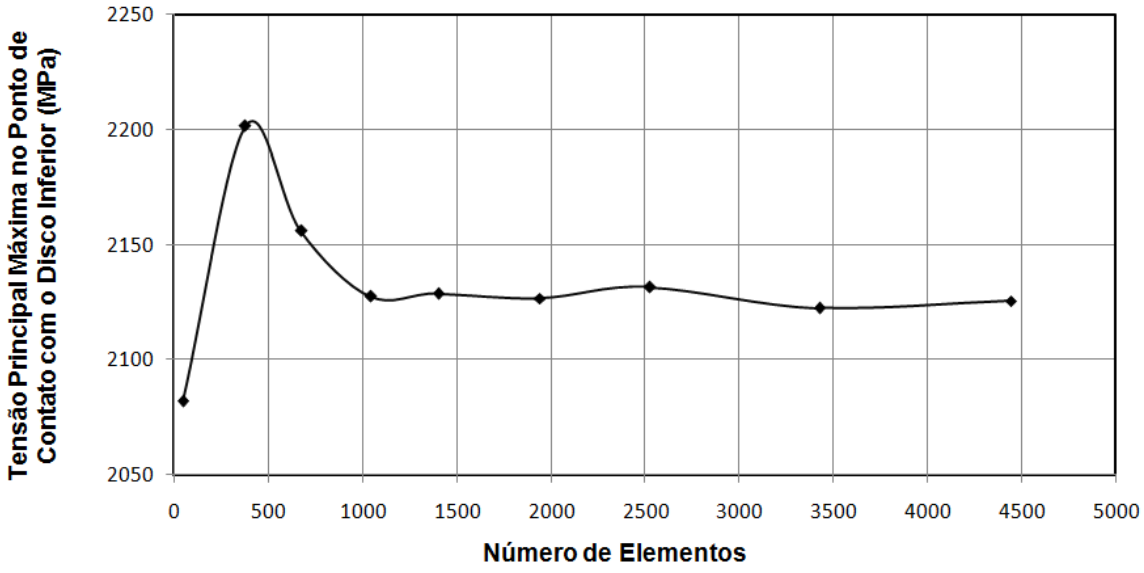


Figura IV.28 - Estudo de convergência de malha para a mola Belleville com modelo de material linear elástico.

Após o estudo de sensibilidade de malha com o modelo de material linear elástico, procurou-se otimizar o modelo 5 (4418 nós e 1403 elementos) antes da etapa de calibração. Os critérios para definir a melhor configuração do modelo foram: 1 - Estabilidade nos pares de contato; 2 - Boa discretização da curva *F-u* obtida numericamente; 3 - Menor tempo de solução.

Diversos modelos envolvendo diferentes tamanhos de passo de carregamento, subpassos de carregamento e formulações de contato também foram experimentadas. O modelo que apresentou o melhor desempenho possui o carregamento dividido em 4 passos, com divisão de 100 subpassos em cada passo. Esta configuração será utilizada nos modelos de calibração.

A mola Belleville apresenta um comportamento não-linear na curva *F-u*, mesmo quando estas são constituídas de um material linear elástico, na Figura IV.29 é possível observar esta característica. Esta figura apresenta a característica da mola em função da razão h_0/t (relação entre a altura do cone da mola descarregada com sua espessura), s/h_0 (relação entre o deslocamento aplicado com a altura do cone da mola descarregada) e F/F_c (relação entre a força na mola com a força para deixar a mola plana).

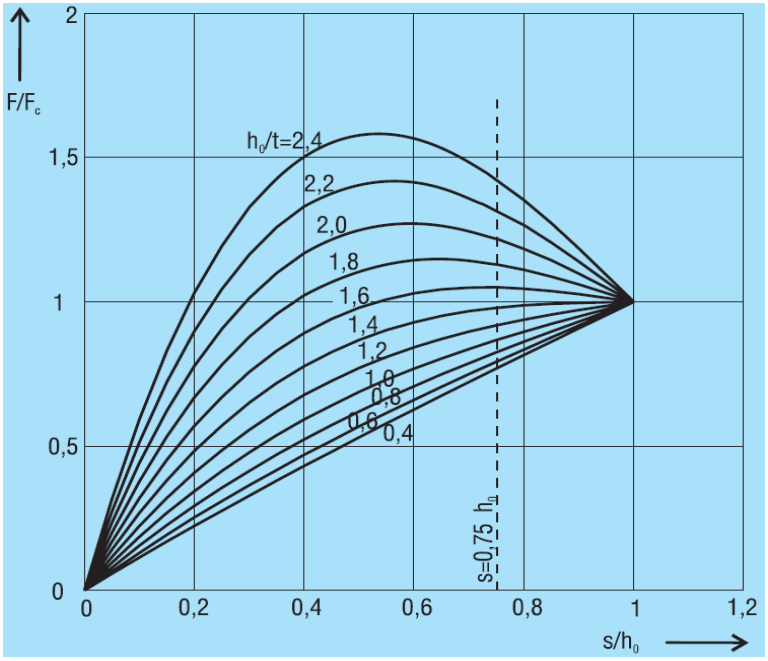


Figura IV.29 - Exemplo da curva característica de uma mola Belleville (SCHNORR, 2003).

Algumas verificações com modelos empíricos são possíveis, pois estes estão disponíveis em literatura de catálogos de fabricantes, como, por exemplo, o apresentado em SCHNORR (2003). Estes modelos podem ser utilizados na comparação dos valores obtidos com os modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho.

Com as dimensões da mola é possível calcular a razão de diâmetro δ na Equação IV.3 (SCHNORR, 2003) e as constantes K_1, K_2 e K_3 da mola, nas Equações IV.4, IV.5 e IV.6 (SCHNORR, 2003) respectivamente.

$$\delta = D_e/D_i = 2{,}06689 \tag{IV.3}$$

$$K_1 = \left({}^{1}/_{\pi}\right)\left(\left(\frac{\delta-1}{\delta}\right)^2 \Big/ \left(\frac{\delta+1}{\delta-1}\right) - \frac{2}{ln\delta}\right) = 0{,}70701 \tag{IV.4}$$

$$K_2 = \left({}^{6}/_{\pi}\right)\left(\left(\frac{\delta-1}{ln\delta} - 1\right) \Big/ ln\delta\right) = 1{,}23490 \tag{IV.5}$$

$$K_3 = \left({}^{3}/_{\pi}\right)\left(\frac{\delta-1}{ln\delta}\right) = 1{,}40323 \tag{IV.6}$$

A constante K_4 na Equação IV.7 assume o valor unitário conforme indicado no catálogo da SCHNORR (2003), este valor se justifica pelo tipo de processo de fabricação da mola Belleville, que foram conformadas à frio conforme descrito no trabalho de SPEICHER *et al* (2009).

$$K_4 = 1 \tag{IV.7}$$

As constantes K_1, K_2, K_3 e K_4 e as propriedades do material (*E* = 45 GPa e ν = 0,3), possibilitam o cálculo da tensão no ponto de contato da mola com o disco inferior através da Equação IV.8 (SCHNORR, 2003). O dimensionamento da força na mola devido ao deslocamento aplicado pode ser feito pela Equação IV.9 (SCHNORR, 2003), o trabalho da mola é determinado pela Equação IV.10 (SCHNORR, 2003).

$$\sigma_{III} = -\frac{4E}{1-\nu^2}\frac{t^2}{K_1 D_e^2} K_4 \left(\frac{1}{\delta}\right)\left(\frac{s}{t}\right)\left[K_4(K_2 - 2K_3)\left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t}\right) - K_3\right] \quad \text{(IV.8)}$$

$$\sigma_{III} = 2231{,}40MPa$$

$$F = \left(\frac{4E}{1-\nu^2}\right)\left(\frac{t^4}{K_1 D_e^2}\right)\left(\frac{s}{t}\right)\left[\left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{t}\right)\left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t}\right) + 1\right] = 20851{,}76N \quad \text{(IV.9)}$$

$$W = \int_0^S Fds = \left(\frac{2E}{1-\nu^2}\right)\left(\frac{t^5}{K_1 D_e^2}\right) {K_4}^2 \left(\frac{s}{t}\right)^2 \left[{K_4}^2\left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t}\right) + 1\right] \quad \text{(IV.10)}$$

$$W = 79{,}43J$$

A comparação entre os resultados dos modelos empíricos e os resultados numéricos para modelo 5, está apresentada na Tabela IV.4, mostrando uma boa concordância entre os resultados. As tensões elevadas de σ_{III} devem ser analisadas com cautela pois nesta região, ocorre o contato com deslizamento da aresta da mola com o disco inferior, além disso, o modelo empírico não leva em consideração nenhum efeito de plastificação localizada ou encruamento do material. O trabalho realizado pela mola no modelo numérico, foi obtido através da integração numérica da curva *F-u*, implementada em planilha eletrônica. Uma avaliação prévia quanto a eficiência do método de integração foi realizada, onde dois métodos foram considerados: 1 - Método do trapézio múltiplo; 2 - Método de Simpson (1/3 Múltiplo). Os dois métodos se mostraram eficientes devido a alta discretização da curva *F-u*, obtida dos modelos numéricos. As discrepâncias da Tabela IV.4 podem ser explicadas de uma forma geral, pelas simplificações existentes no modelo empírico.

Tabela IV.4 - Comparação entre os valores empíricos e numéricos (modelo 5).

	Resultado do Modelo Empírico	**Resultado do Modelo Numérico**	**Diferença % em Relação ao Empírico**
σ_{III} (MPa)	2231,4	2128,7	-4,6
F (N)	20851,8	23491,0	12,7
W (J)	79,4	89,1	12,2

Após o estudo de sensibilidade de malha e algumas verificações com modelos empíricos, a próxima etapa consiste na realização da calibração do modelo numérico, com os dados experimentais apresentados no estudo de SPEICHER *et al* (2009) (Figura IV.27). O processo de calibração consiste em se estimar inicialmente algumas constantes, como as tensões de início e fim da transformação de fase e a máxima deformação residual (ε_L), conforme exemplos de propriedades mecânicas disponíveis no Anexo I e no estudo de FUGAZZA (2003). O processo de verificação é realizado através da comparação da curva *F-u* obtida, com as três curvas *F-u* experimentais (Figura IV.27). As propriedades mecânicas para o modelo constitutivo de SMAs, devem ser inseridas através de linhas de comando no módulo ANSYS Mechanical.

O modelo 5 apresentou-se o mais adequado, para ser utilizado no início da calibração das propriedades mecânicas da SMA. Nesta etapa, o deslocamento aplicado foi de 5,89 mm (valor mediano entre os máximos da curva *F-u* experimental). Após diversas tentativas, obteve-se um conjunto de propriedades que geraram um comportamento similar às curvas experimentais da Figura IV.27. No entanto, é necessário que seja realizado um novo estudo de convergência de malha, considerando o modelo de material para SMA. A Figura IV.30 apresenta a tensão principal máxima, localizada no ponto de contato com o disco inferior da mola Belleville de SMA. Nesta figura é possível notar que o modelo 5, encontra-se em uma faixa de tensões, localizada antes do início do patamar de tensões que ocorre nos modelos 7, 8 e 9. O modelo escolhido para a calibração numérica foi o modelo 8 (10606 nós e 3429 elementos).

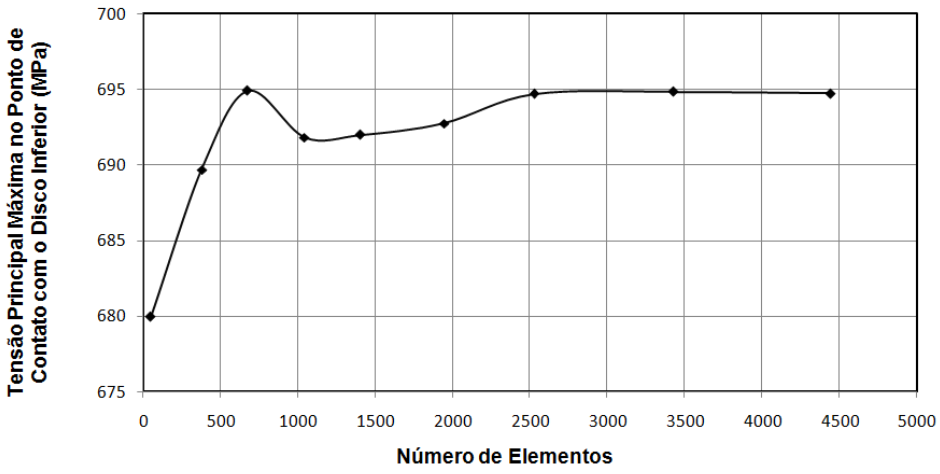


Figura IV.30 - Estudo de convergência de malha para a mola Belleville com modelo de material de SMA.

A curva *F-u* obtida com o modelo 8, utilizando as propriedades da calibração inicial, pode ser observada na Figura IV.31. A lista das propriedades mecânicas obtidas se encontra na Tabela IV.5.

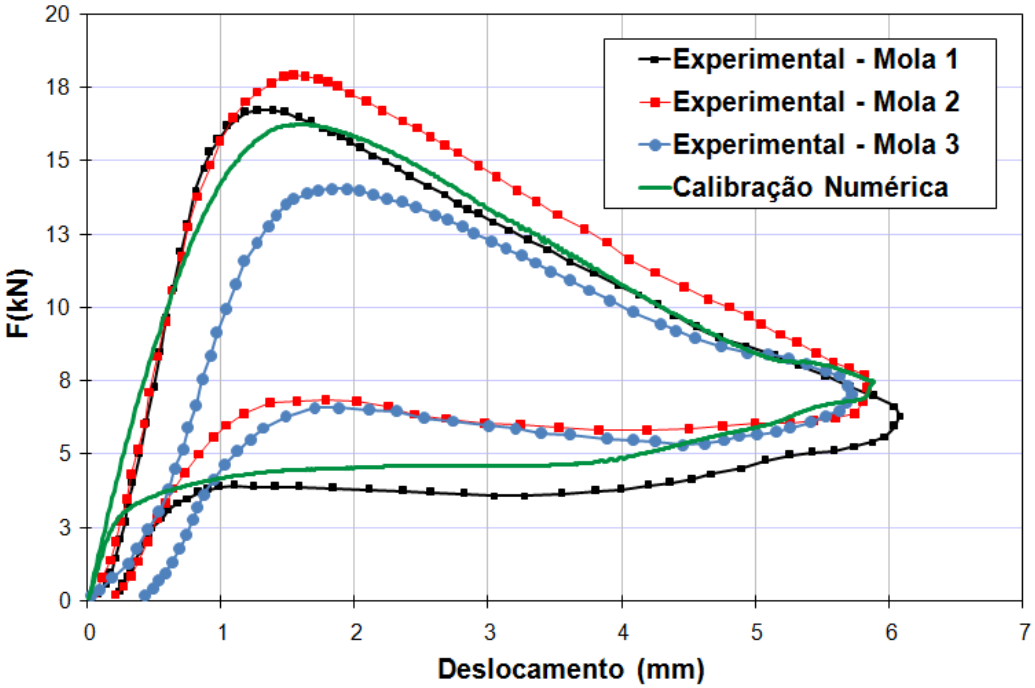


Figura IV.31 - Resultado final da calibração numérica.

Tabela IV.5 - Propriedades mecânicas obtidas na calibração numérica.

Propriedade Mecânica	Valor
E	45 GPa
υ	0,30
σ_s^{AM}	620 MPa
σ_f^{AM}	750 MPa
σ_s^{MA}	200 MPa
σ_f^{MA}	100 MPa
ε_L	0,07 mm/mm
α	0

O gráfico da Figura IV.32 foi elaborado com as propriedades da Tabela IV.5, sendo possível observar o efeito da pseudoelasticidade. O ponto de maior tensão deste gráfico (1100 MPa) representa o limite de resistência (Anexo I) da SMA, entretanto, o modelo constitutivo atualmente disponível no ANSYS, não contempla os efeitos para tensões acima deste valor em ligas com memória de forma. Para uma condição de carregamento na SMA representada pela curva σ-ε da Figura IV.32, onde nesta existem valores de tensão acima de σ_f^{AM}, esta se comporta de forma linear elástica conforme o incremento do carregamento.

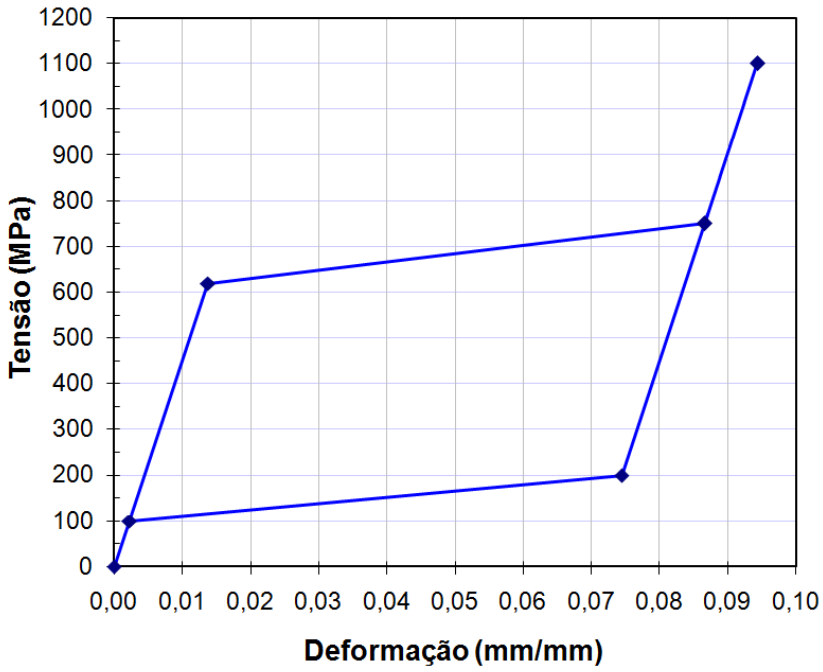


Figura IV.32 - Curva pseudoelástica com as constantes da calibração numérica.

V. Resultados dos Modelos Numéricos

Este capítulo apresenta os resultados das simulações numéricas, obtidos com os modelos desenvolvidos neste estudo. Os efeitos da absorção de energia para três geometrias distintas (mola Belleville, barra de seção circular, mola helicoidal) com modelo de material para SMA são analisados. Os valores calculados da absorção de energia foram obtidos através da integração numérica, implementada em planilhas eletrônicas (Apêndice II) utilizando as curvas *F-u* dos modelos numéricos.

V.1 Resultados para o Modelo da Mola Belleville

Estes resultados pertencem ao modelo resultante da calibração numérica realizada, conforme as propriedades mecânicas da Tabela IV.5. O deslocamento na direção *Y* pode ser visualizado na Figura V.1, sendo que o valor máximo encontra-se na região interna da mola. A tensão principal máxima (Figura V.2) apresenta o maior valor trativo na região de contato entre o disco inferior e a mola, sendo que o maior valor compressivo situa-se no contato entre o disco superior e a mola. Todos os resultados são apresentados na escala real e o tempo nos resultados (t = 4 s) indica o instante final do carregamento e início do descarregamento do modelo. Todos os resultados possuem a expansão cíclica do modelo axisimétrico para melhor visualização.

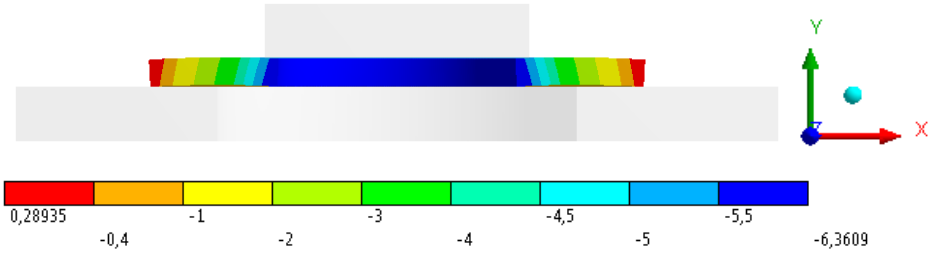


Figura V.1 - Deslocamento na direção *Y* (t = 4 s) na mola Belleville.

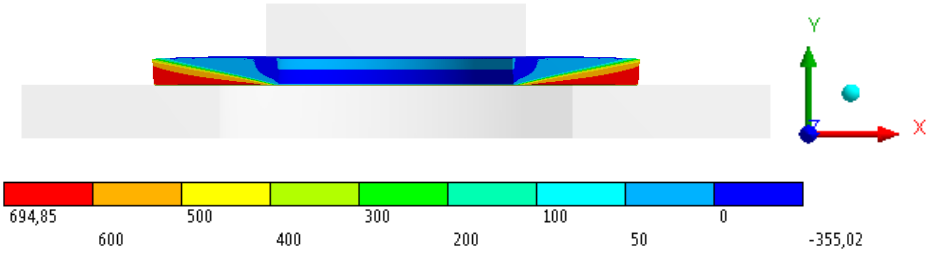


Figura V.2 - Tensão principal máxima (t = 4 s) na mola Belleville.

A evolução da tensão principal máxima é mostrada na Figura V.3.

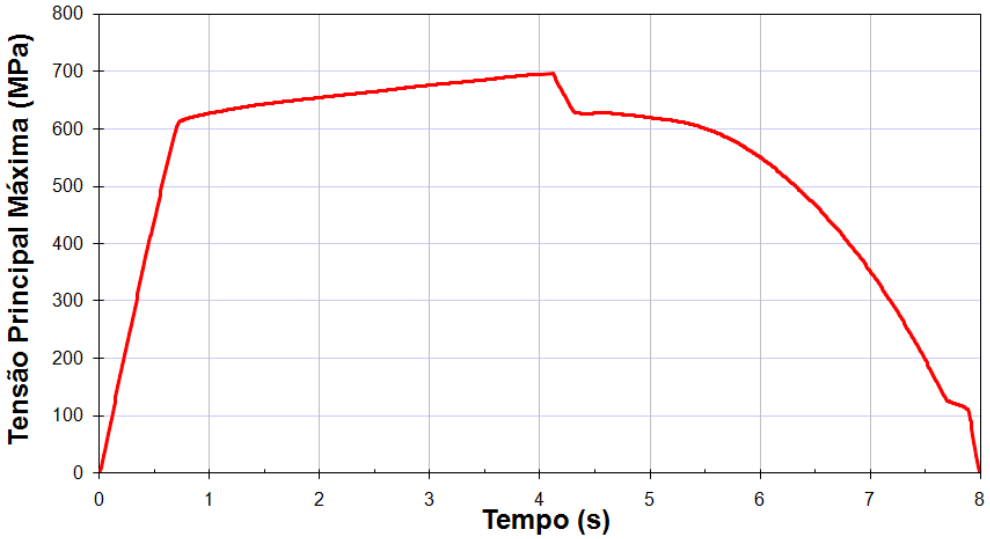


Figura V.3 - Evolução da tensão principal máxima na mola Belleville.

A tensão equivalente de *von Mises* é apresentada na Figura V.4. O seu maior valor localiza-se na região de contato entre o disco superior e a mola, enquanto que o menor valor está próximo do ponto II conforme a nomenclatura da Figura IV.6. A evolução da tensão equivalente de *von Mises* na mola Belleville é mostrada na Figura V.5.

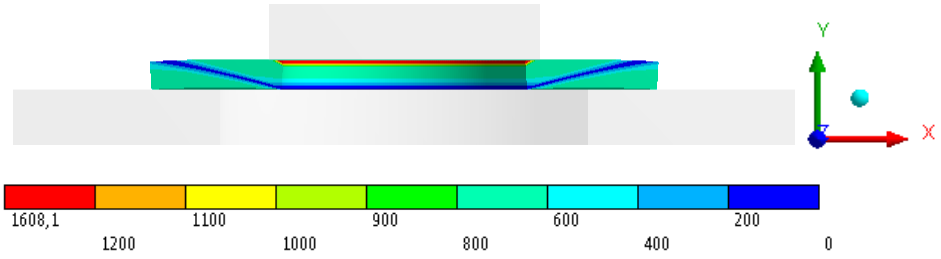


Figura V.4 - Tensão equivalente de *von Mises* (t = 4 s) na mola Belleville.

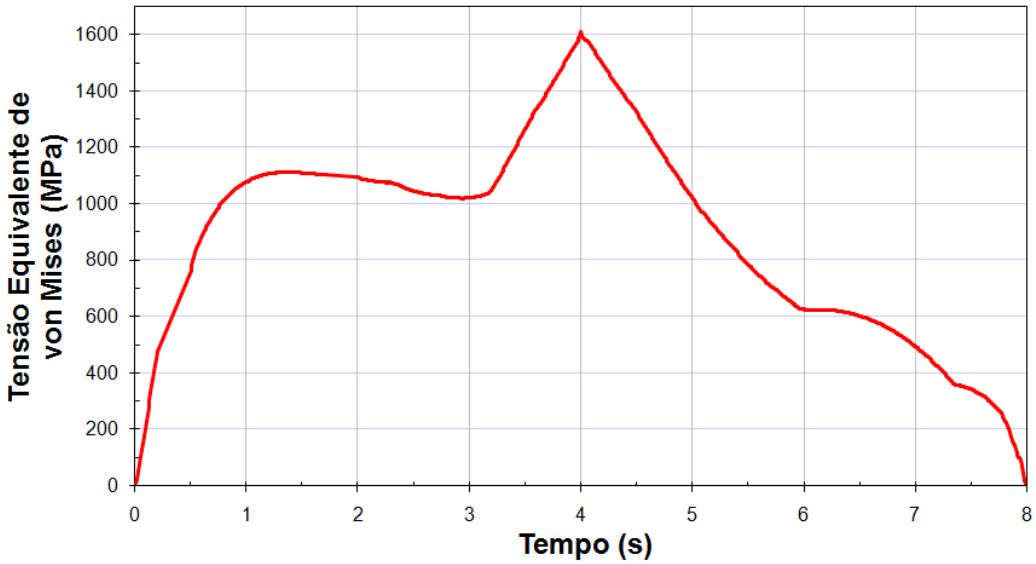


Figura V.5 - Evolução da tensão equivalente de *von Mises* na mola Belleville.

As distribuições das frações de martensita e austenita são mostradas nas Figura V.6 e Figura V.7 respectivamente para o momento de maior carregamento (t = 4 s). A evolução temporal das frações de martensita/austenita na mola Belleville é apresentada na Figura V.8, sendo que neste gráfico a fração de 1 significa 100 % de transformação de fase. O início da transformação de fase martensítica ocorre em 0,21 s, 100 % de martensita é obtido em 0,68 s, o retorno à fase austenítica começa em 7,80 s. As curvas da Figura V.8 seguem as leis de evolução de transformação da Equação III.16.

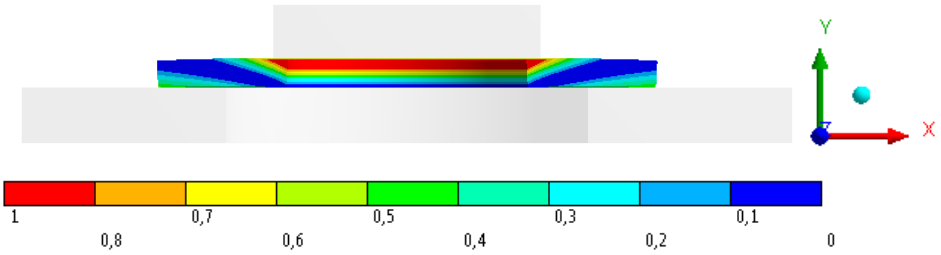


Figura V.6 - Fração de martensita (t = 4 s) na mola Belleville.

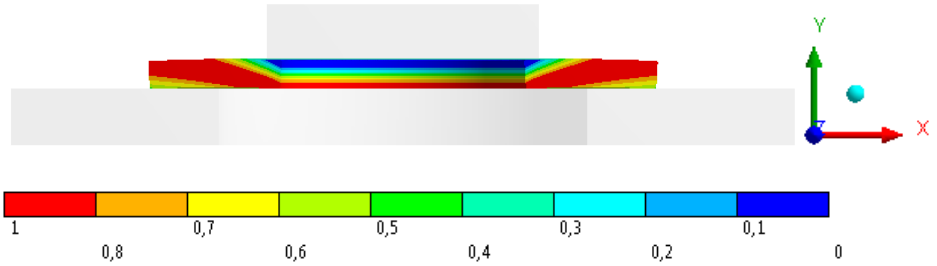


Figura V.7 - Fração de austenita (*t* = 4 s) na mola Belleville.

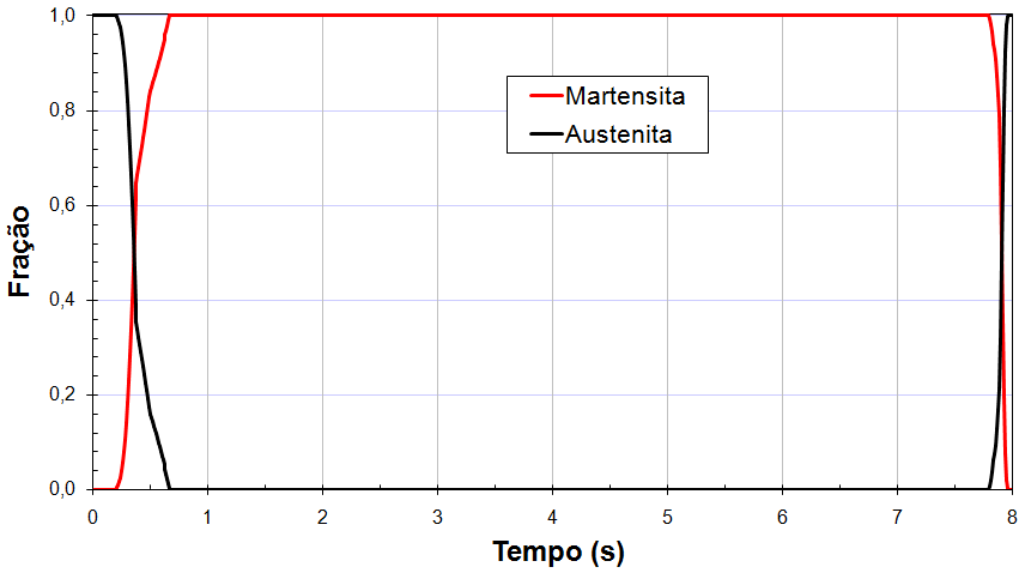


Figura V.8 - Evolução das frações de martensita/austenita globais na mola Belleville.

As frações de martensita e austenita em função da deformação total equivalente na mola Belleville, são mostradas na Figura V.9 e Figura V.10. Para a martensita, o início da transformação de fase acontece com uma deformação de 1,243 % e a transformação é completada quando a deformação alcança 9,610 %. O carregamento continua mesmo após 100 % de transformação de fase até a deformação de 10,574 %, quando começa o descarregamento. No ciclo de descarregamento o início da reversão da fase martensítica ocorre na deformação de 7,423 % e o final da reversão acontece na deformação de 0,172 %. A fração de austenita da Figura V.10 segue as razões da Equação III.16. Todas estas deformações são compatíveis com a curva pseudoelástica da Figura IV.32.

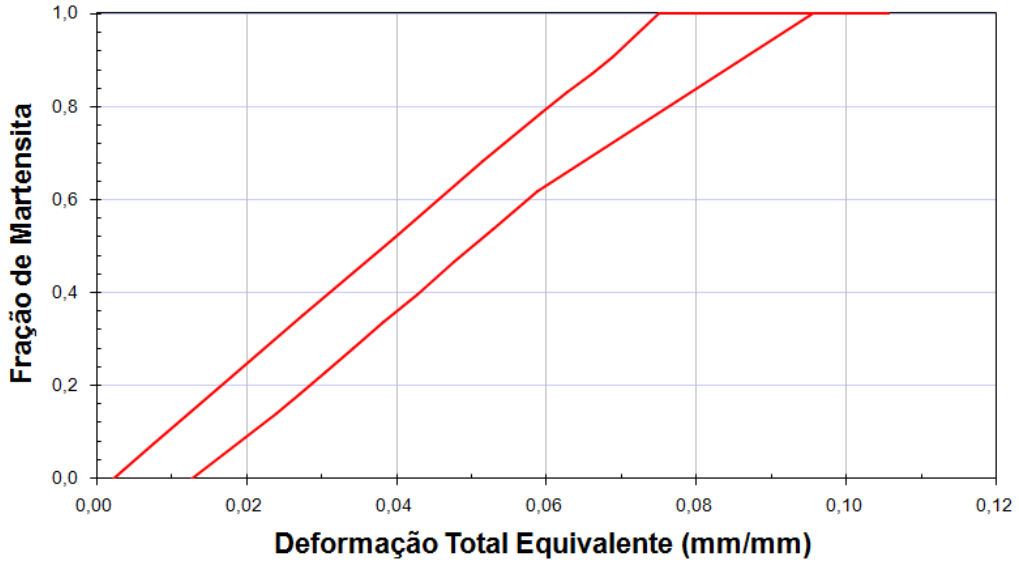


Figura V.9 - Fração da martensita em função da deformação total equivalente.

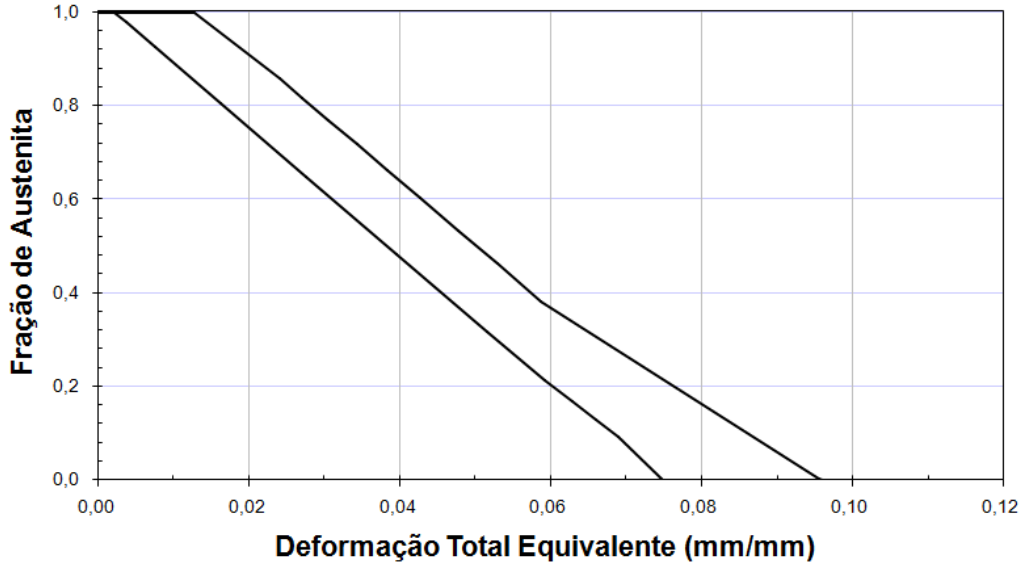


Figura V.10 - Fração da austenita em função da deformação total equivalente.

As curvas *F-u* possuem a componente de deslocamento medidas no disco superior do dispositivo, conforme mostra a Figura V.11. Para a obtenção de valores positivos no deslocamento em *Y*, um sistema de coordenadas foi criado onde o eixo *Y* está alinhado com o movimento de descida do disco superior do dispositivo. O carregamento imposto de deslocamento pode ser visualizado na Figura V.12. O ponto de medição da força de reação é o disco inferior conforme pode ser visto na Figura V.13.

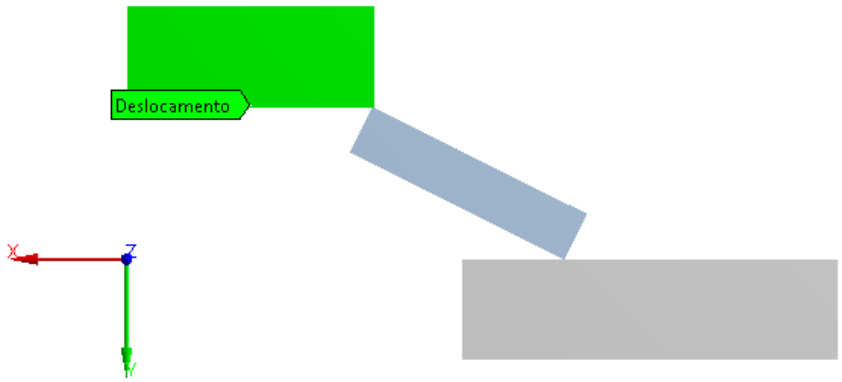


Figura V.11 - Localização do ponto de medição do deslocamento (eixo *Y*) no disco superior da mola Belleville.

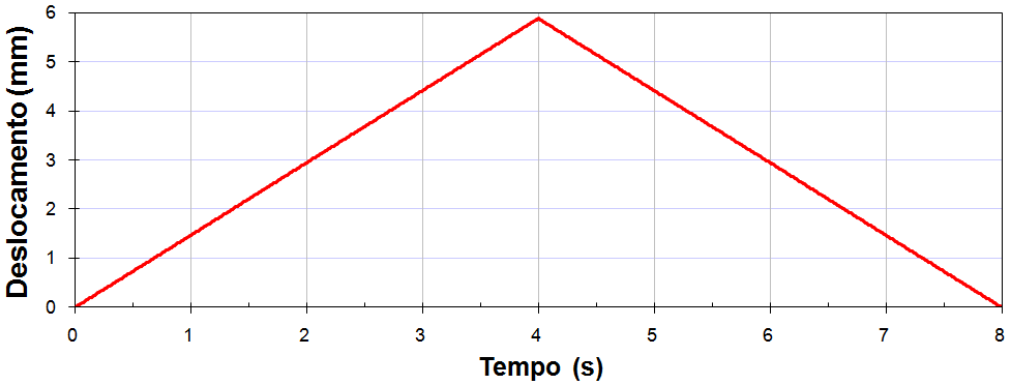


Figura V.12 - Evolução do deslocamento no ponto de medição.

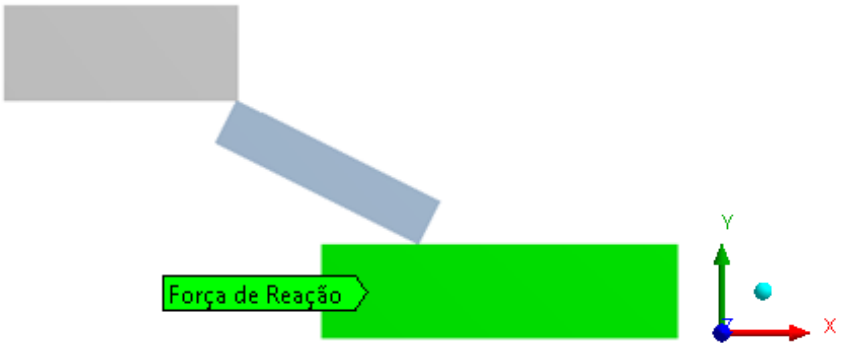


Figura V.13 - Localização do ponto de medição da força de reação.

A evolução da componente *Y* da força de reação no disco inferior é apresentada na Figura V.14, onde se observa um valor máximo de 16,2 kN em 1,09 s com um decréscimo suave até o final do descarregamento (t = 8 s). A Figura V.15 mostra a

curva *F-u* para o dispositivo com a mola Belleville de SMA, apresentando a força máxima de 16,2 kN para um deslocamento de 1,60 mm. A energia dissipada pela curva *F-u* na Figura V.15 pode ser calculada através da integração numérica da área dentro do loop de histerese associado ao efeito pseudoelástico. Este processo foi implementado com o auxilio das planilhas eletrônicas mostradas no Apêndice II, resultando em um valor de 38,85 J para este dispositvo.

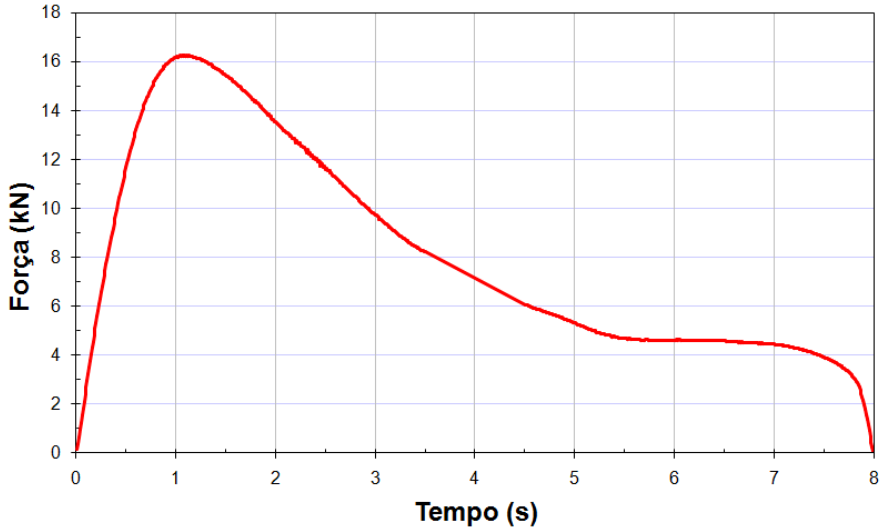


Figura V.14 - Evolução da componente *Y* da força de reação no disco inferior.

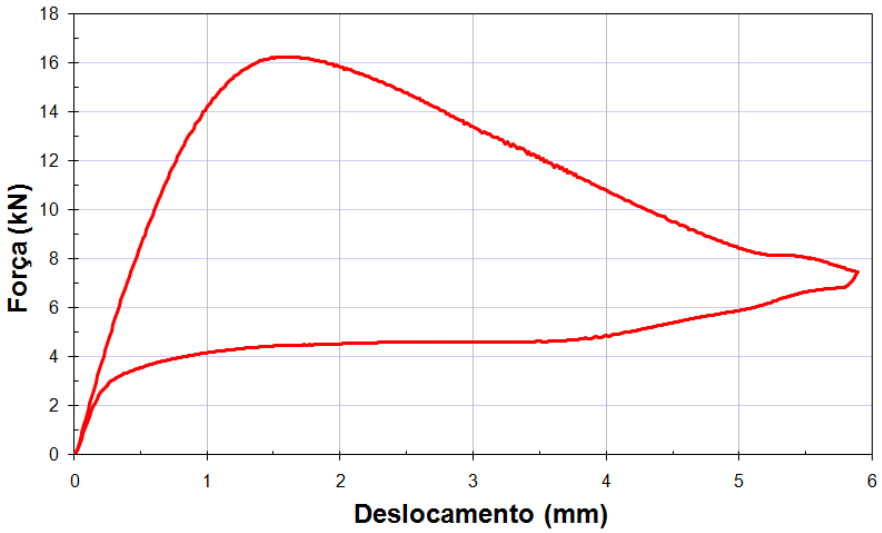


Figura V.15 - Curva *F-u* para o dispositivo com mola Belleville de SMA.

V.2 Resultados para os Modelos de Barra Cilíndrica

Os resultados desta etapa objetivam encontrar geometrias equivalentes, na forma de barras cilíndricas, capazes de absorverem a mesma energia (mesma área da histerese pseudoelástica) da mola Belleville constituída de SMA, para a mesma amplitude de deslocamento aplicada (5,89 mm). Assim, adotou-se como primeira hipótese considerar uma geometria para a barra com o mesmo volume de material e a mesma limitação de espaço físico.

O volume da mola Belleville foi avaliado através de uma operação de revolução da geometria plana elaborada, através do módulo de CAD do ANSYS, obtendo-se um valor de 5606,7 mm^3. Considerando-se a massa específica para a liga com memória de forma listada na Tabela I.1, obtém-se uma massa de 36,16 g para a mola Belleville. Dessa forma, é possível obter-se o diâmetro da barra de seção circular considerando que a barra deve possuir o volume de 5606,7 mm^3 e um espaço físico de 9,06 mm (h_0). O volume do cilindro é expresso pela Equação V.1 abaixo, isolando-se o r desta equação, obtem-se a Equação V.2.

$$V = \mathrm{A_b} h = \pi r^2 h \tag{V.1}$$

$$r = \sqrt{\frac{V}{\pi h}} = \sqrt{\frac{5606,7}{\pi\ 9,06}} = \sqrt{196,98} = 14,04mm \tag{V.2}$$

Logo, o diâmetro resultante para a primeira hipótese é de 28,08 mm (Figura V.16).

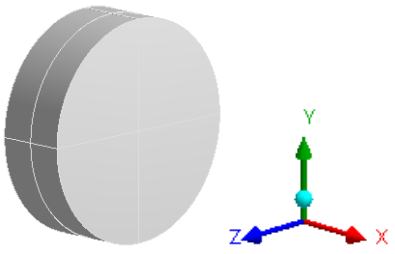


Figura V.16 - Primeira hipótese de geometria equivalente (ϕ28,08 mm, *L* = 9,06 mm).

No momento de pós-processamento do modelo numérico da primeira hipótese, verificou-se uma tensão longitudinal de 19,4 GPa, sendo este um valor muito acima do limite de resistência característico deste material (Tabela I.1 e Anexo I). A curva *F-u* deste modelo apresentou uma histerese pequena em comparação ao máximo valor da força de reação. Além do falor limitante da tensão no dispositivo, este tipo de geometria é incompatível com as soluções atualmente existentes no mercado. O dispositivo utilizado na Basílica de San Francesco (Figura II.18), por exemplo, apresenta a capacidade de desenvolver deslocamentos de 8 a 25 mm (trativo ou compressivo) (FIP INDUSTRIALE, 2012).

Com a inviabilidade da primeira hipótese de geometria equivalente, tentou-se uma segunda hipótese onde o volume seria o mesmo da mola Belleville, mas desta vez com um diâmetro de barra comercial (1/2") e um comprimeto de barra livre a ser determinado. Para um volume de 5606,7 mm^3 e um diâmetro de 12,70 mm (1/2"), pode-se utilizar a Equação V.1 para obter-se o valor de *h* da barra:

$$h = \frac{V}{\pi r^2} = \frac{5606,7}{\pi(12,7/2)^2} = 44,26mm \qquad \text{(V.3)}$$

A geometria obtida com o diâmetro de 12,70 mm e comprimento de 44,26 mm pode ser vizualizada na Figura V.17.

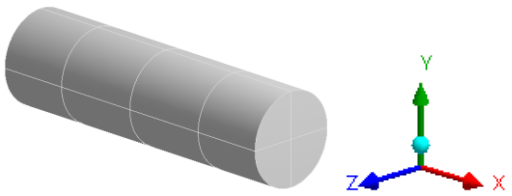


Figura V.17 - Segunda hipótese de geometria equivalente (ϕ12,70 mm, *L* = 44,26 mm).

Na etapa de verificação dos resultados deste modelo numérico, a tensão longitudinal foi de 2,5 GPa, o qual ultrapassa o limite de resistência característico das SMAs (Tabela I.1 e Anexo I). A curva *F-u* deste modelo possui uma histerese considerável quando comparada ao máximo valor da força de reação. A energia absorvida no segundo modelo foi de 211,50 J, valor muito acima dos 38,85 J obtidos na mola Belleville.

As duas hipóteses inicialmente estudadas não apresentaram resultados satisfatórios. Uma vez que o modelo desenvolvido é parametrizado em termos dos parâmetros geométricos associados ao diâmetro e ao comprimento, desenvolveu-se um estudo de sensibilidade considerando dois diâmetros comerciais: 1/2" (12,70 mm) e 1/4" (6,35mm).

Inicialmente desenvolveu-se um estudo de convergência de malha (Apêndice I) para cada diâmetro (ϕ12,70 mm e ϕ6,35 mm). A Figura V.18 apresenta a convergência da força de reação da barra de SMA com ϕ12,70 mm, em função do número de elementos. A convergência da força de reação para a barra de ϕ6,35 mm é mostrada na Figura V.19. Nestas figuras é possível notar que, o modelo 4 para ϕ12,70 mm (14919 nós e 3132 elementos) e ϕ6,35 mm (18041 nós e 3784 elementos), apresentam convergência mantendo-se em um patamar da força de reação. O modelo 4 selecionado possui 8 elementos ao longo do diâmetro na seção transversal da barra.

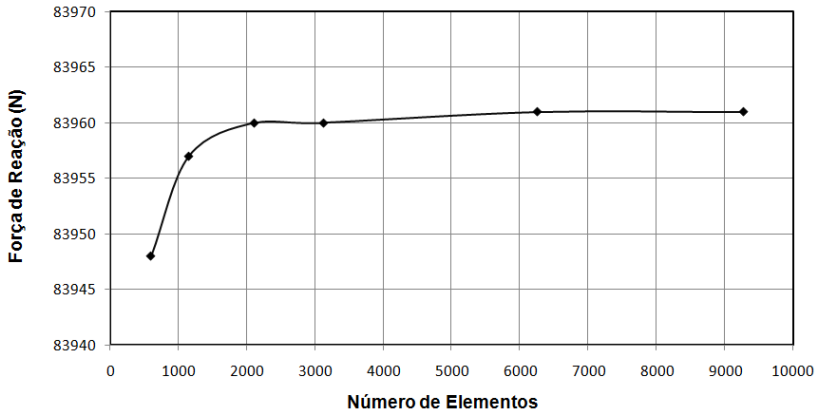


Figura V.18 - Convergência de malha para a barra de SMA com ϕ12,70 mm.

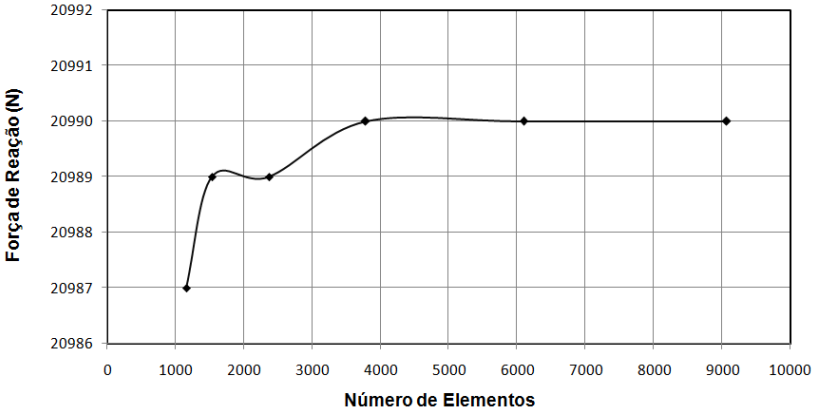


Figura V.19 - Convergência de malha para a barra de SMA com ϕ6,35 mm.

Após o estudo de convergência de malha, a sensibilidade foi analisada através da variação do comprimento das barras para cada um dos dois diâmetros. O gráfico de sensibilidade é apresentado na Figura V.20. A energia absorvida pela mola Belleville (38,85 J) é refernciada na figura através da linha tracejada, para facilitar a visualização dos pontos comuns com as outras duas curvas.

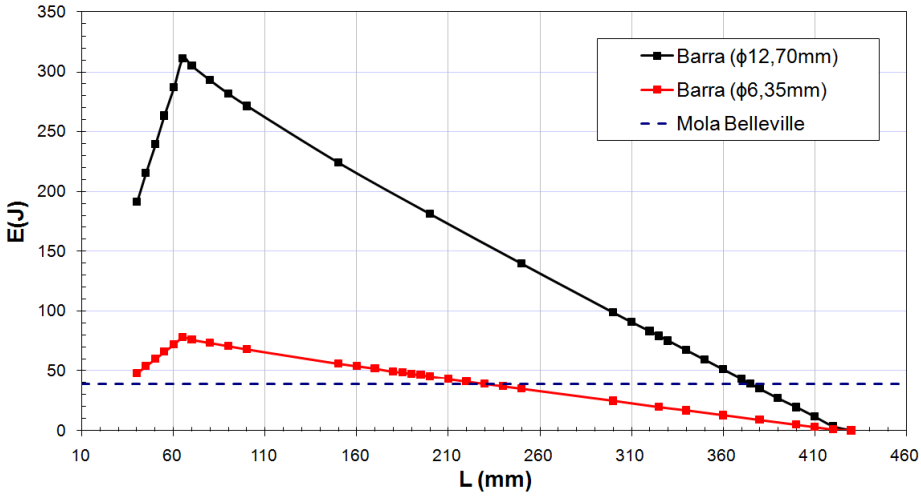


Figura V.20 - Energia absorvida para os diversos comprimentos de barra.

No gráfico da Figura V.20 é possível notar a existência de duas configurações de barras que atendem ao critério de energia absorvida (38,85 J): para 1/2" (12,70mm) L = 375 mm e para 1/4" (6,35mm) L = 230 mm. Estas duas geometrias apresentam tensões longitudinais de 623,2 MPa e 640,5 MPa, respectivamente. A Figura V.21 mostra a tensão longitudinal presente nas barras (tempo t = 1 s) para os diversos comprimentos estudados, para os dois diâmetros escolhidos.

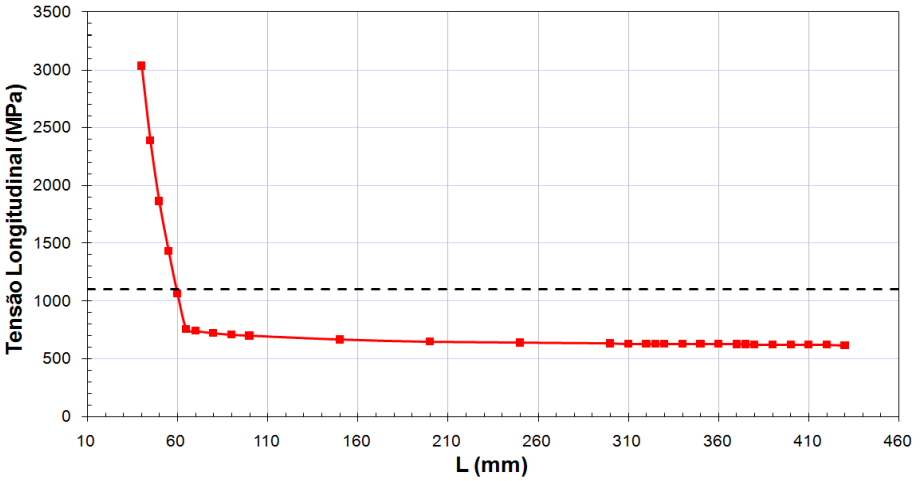


Figura V.21 - Tensão longitudinal para os diversos comprimentos de barras.

A Figura V.21 é a mesma para qualquer diâmetro de barra. Em função da distribuição de tensão homogênea e uniaxial que se desenvolve nas barras, os valores de tensão são idênticos para os dois diâmetros analisados (e para qualquer outro), de modo que as curvas se sobrepõem. Em seguida outras curvas também são apresentadas desta forma para outras variáveis: deformação total equivalente, densidade de energia e frações de martensita/austenita.

A evolução temporal das tensões longitudinais para as barras de ϕ12,70mm com L = 375 mm e ϕ6,35mm com L = 230 mm é apresentada na Figura V.22 e Figura V.23, respectivamente. A Figura V.22 mostra que no instante t = 0,88 s, ocorre o início da transformação de fase na barra, a reversão começa em t = 1,60 s e termina em 1,86 s. Para a barra de ϕ6,35mm (L = 230 mm), a Figura V.23 apresenta o início da transformção de fase em 0,54 s, a reversão inicia em t = 1,4 s, terminando em t = 1,9 s.

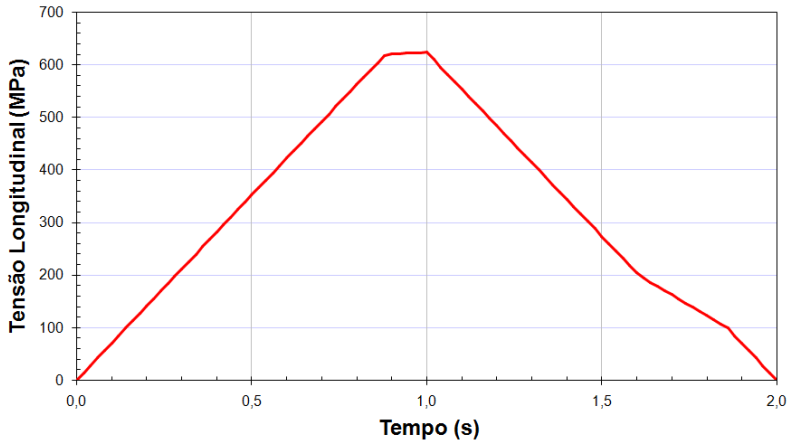


Figura V.22 - Evolução da tensão longitudinal (ϕ12,70 mm, L = 375 mm).

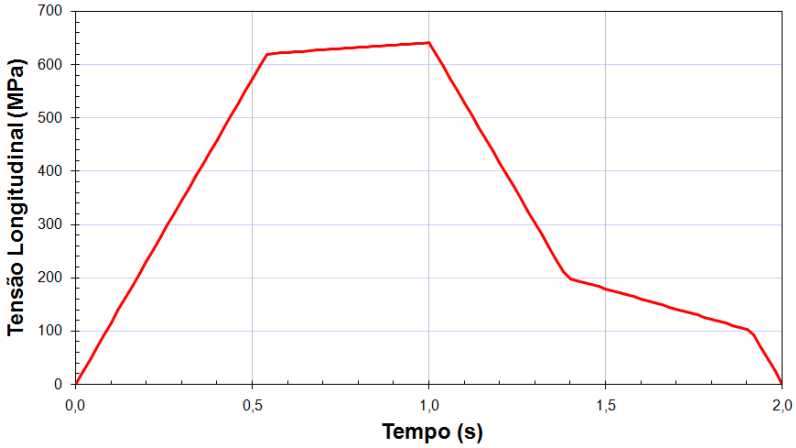


Figura V.23 - Evolução da tensão longitudinal (ϕ6,35 mm, L = 230 mm).

A deformação total equivalente em função dos comprimentos de barras é mostrada na Figura V.24.

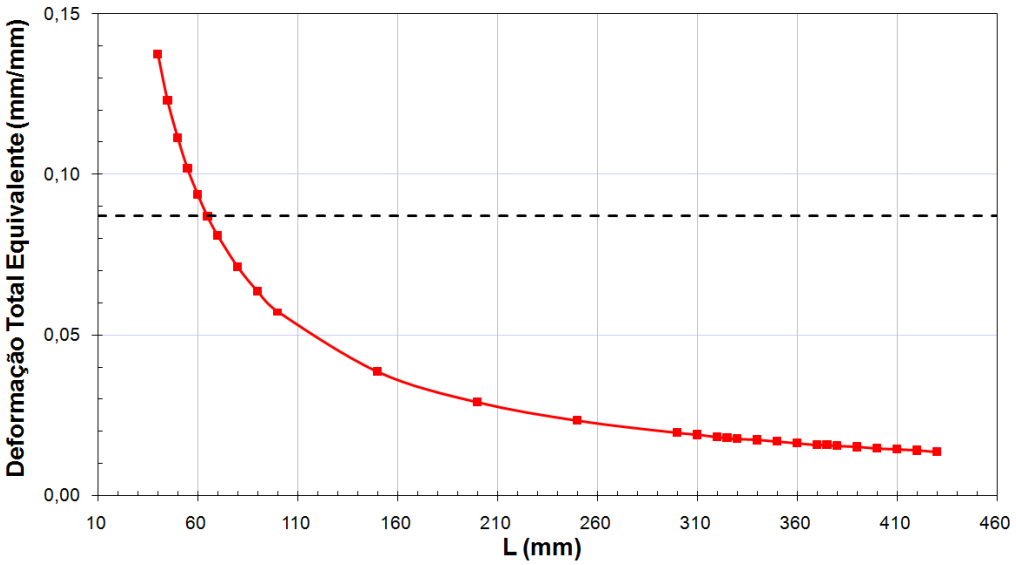


Figura V.24 - Deformação total equivalente para os comprimentos de barras.

A linha tracejada na Figura V.24 representa o valor da deformação para a tensão final da transformação de fase (σ_f^{AM}), onde este valor é de 8,7 % para a tensão de 750 MPa (Figura IV.32). A densidade de energia para os diversos comprimentos de barras é apresentada na Figura V.25.

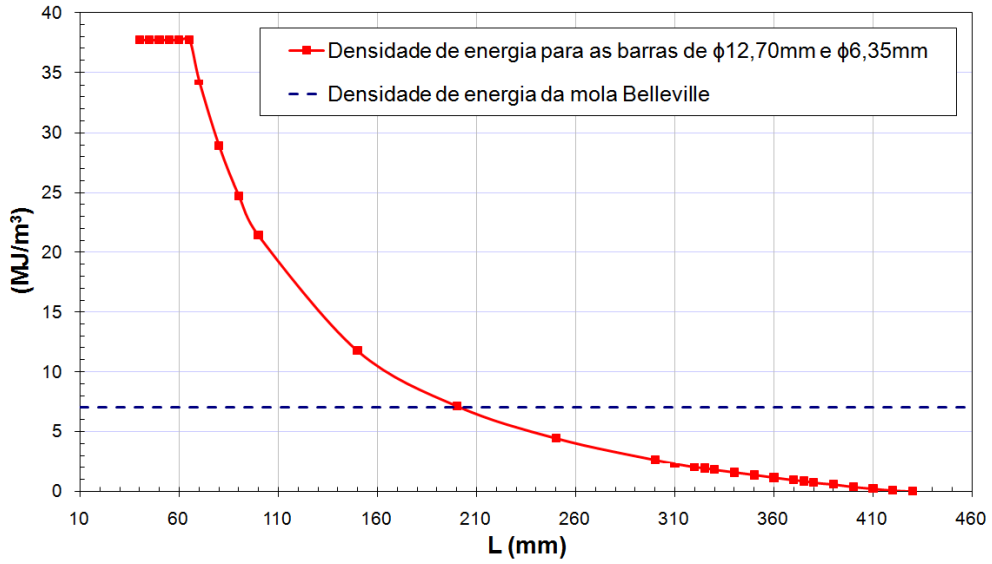


Figura V.25 - Densidade de energia para os diversos comprimentos de barras.

O valor do patamar de 37,72 MJ/m^3 na Figura V.25 para comprimentos inferiores a 65 mm, pode ser considerado como a densidade de energia máxima do material. Para diâmetros inferiores a 65 mm, ocorre um decréscimo da energia absorvida (Figura V.20), adicionalmente existe o decréscimo de volume das barras. Por ser uma característica do material, o gráfico de densidade de energia é apresentado em apenas uma curva para os dois diâmetros. Segundo ROYLANCE (2001), a área delimitada por uma curva σ-ε para uma dada deformação, corresponde à energia mecânica total por unidade de volume, consumida pelo material na deformação aplicada, podendo ser expressada conforme a Equação V.4. A unidade para a energia mecânica por volume originada de uma curva σ-ε pode ser N.m/m^3 ou N/m^2 (Pa), para o caso da curva pseudoelástica da Figura IV.32, a unidade seria N/mm^2 (MPa) ou MJ/m^3.

$$W = \frac{1}{V}\int P dL = \int_0^L \frac{P}{A_0}\frac{dL}{L_0} = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \qquad \text{(V.4)}$$

A aplicação da Equação V.4 à curva pseudoelástica resultante da calibração numérica (Figura IV.32), resulta em um valor de densidade de energia máxima de 37,27 MJ/m^3.

As frações de martensita/austenita para os diversos comprimentos de barras são mostradas na Figura V.26. O valor máximo da fração de fase martensítica ocorre no final do passo de carregamento (t = 1 s).

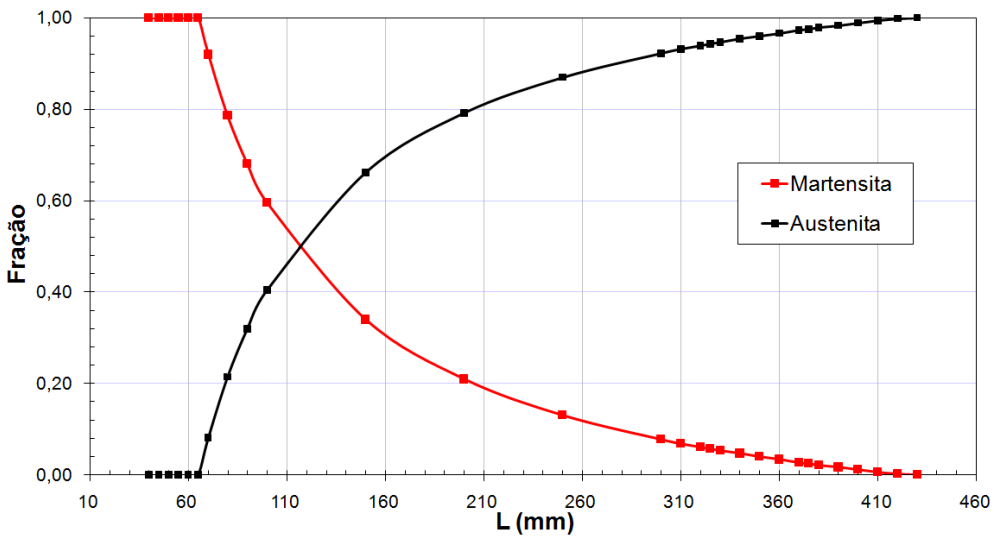


Figura V.26 - Frações de martensita/austenita para os diversos comprimentos.

A fração de martensita para a barra de ϕ12,70 mm com L = 375 mm que atende ao critério de energia foi de 2,48 %, a de austenita foi de 97,52 %. O valor máximo da fração de fase martensítica ocorreu em t = 1 s, conforme pode ser observado na Figura V.27.

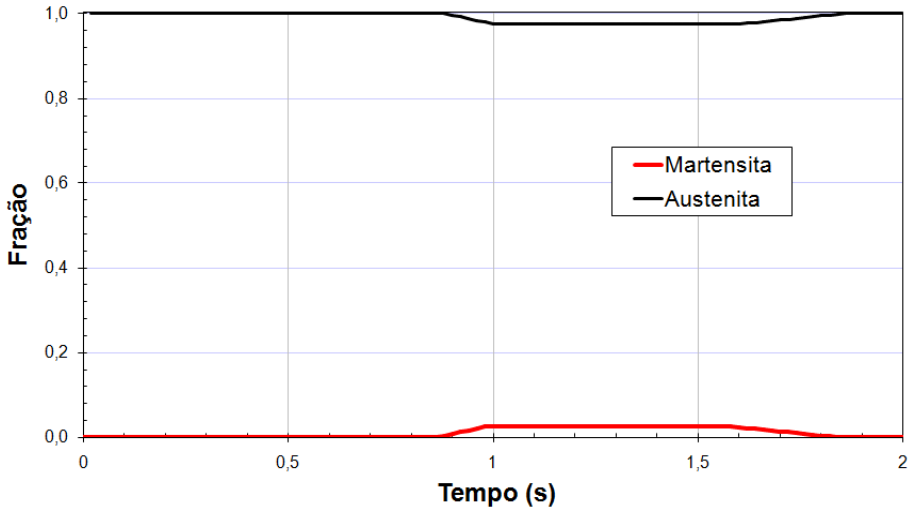


Figura V.27 - Frações de martensita/austenita (ϕ12,70 mm com L = 375 mm).

A outra barra que atende ao critério de energia (ϕ6,35 mm com L = 230 mm) alcançou uma fração de martensita de 15,79 %, a fração de austenita foi de 84,21 %. A Figura V.30 apresenta as frações de martensita e austenita, onde a fração máxima de martensita ocorre em t = 1 s.

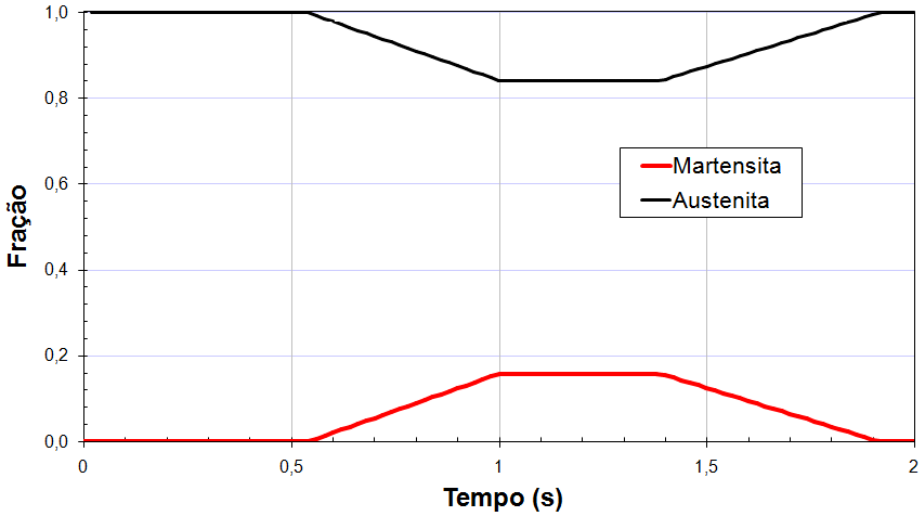


Figura V.28 - Frações de martensita/austenita (ϕ6,35 mm com L = 230 mm).

As frações de martensita e austenita em função da deformação total equivalente para a barra de ϕ12,70 mm (L = 375 mm), são mostradas na Figura V.29 e Figura V.30 respectivamente. Para a martensita, o início da transformação de fase ocorre na deformação de 1,373 %, no fim do carregamento (t = 1 s) a deformação é de 1,559 % e existe 2,48 % de martensita. O início da reversão da fase martensítica ocorre na deformação de 0,626 %, terminando o processo em 0,2197 %.

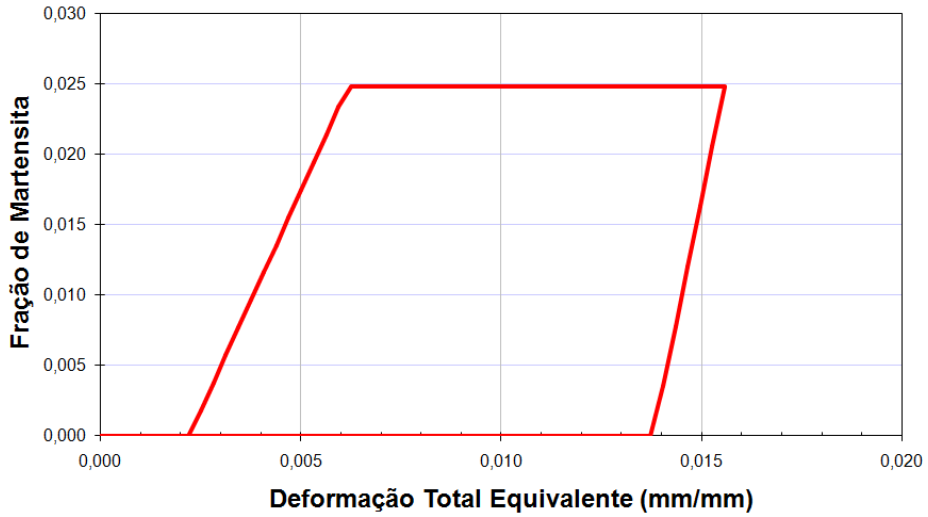


Figura V.29 - Fração de martensita em função da deformação total equivalente (ϕ12,70 mm e L = 375 mm).

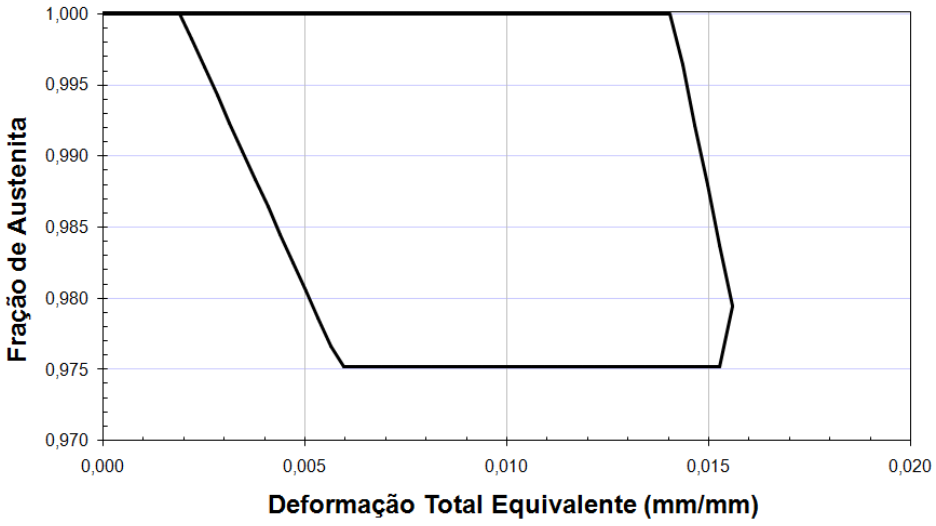


Figura V.30 - Fração de austenita em função da deformação total equivalente (ϕ12,70 mm e L = 375 mm).

Para a barra de ϕ6,35 mm (L = 230 mm), as frações de martensita e austenita em função da deformação total equivalente, são apresentadas na Figura V.31 e Figura V.32. O início da transformação de fase martensítica ocorre na deformação de 1,373 %, no fim do carregamento a deformação alcança 2,529 % e existe 15,79 % de martensita. O início da reversão da martensita ocorre quando a deformação chega em 1,575 %, o processo termina em 0,0205 %.

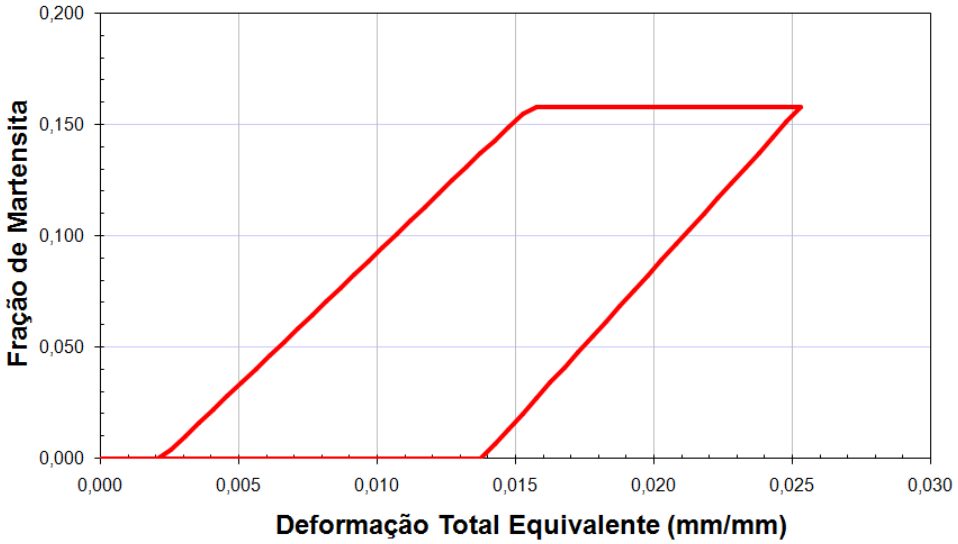


Figura V.31 - Fração de martensita em função da deformação total equivalente (ϕ6,35 mm e L = 230 mm).

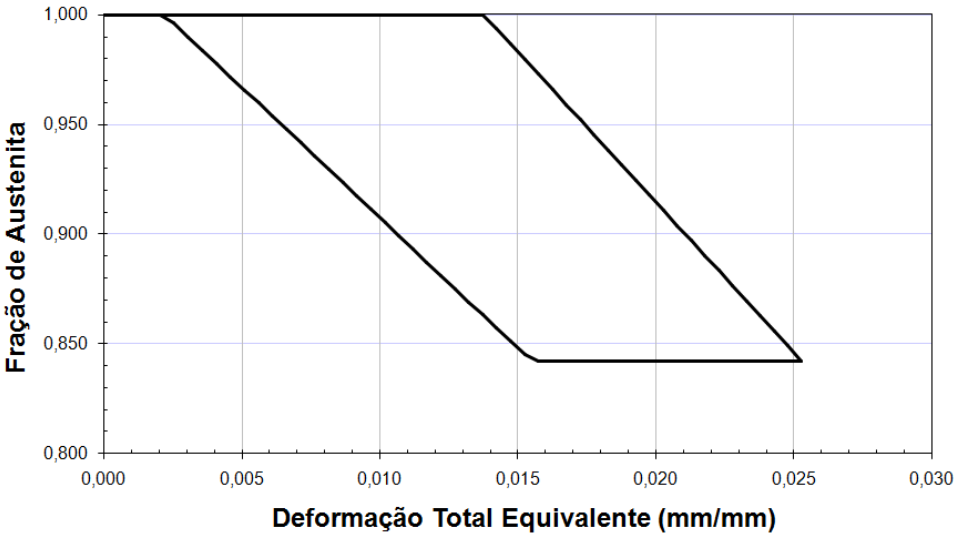


Figura V.32 - Fração de austenita em função da deformação total equivalente (ϕ6,35 mm e L = 230 mm).

A evolução temporal da força de reação se encontra na Figura V.33 para a barra de ϕ12,7 mm com L = 375 mm, onde um valor máximo de 78,2 kN é observado em t = 1 s. A Figura V.34 mostra a evolução temporal da força para a barra de ϕ6,35 mm com L = 230 mm, nesta nota-se o valor máximo de 19,9 kN em t = 1 s.

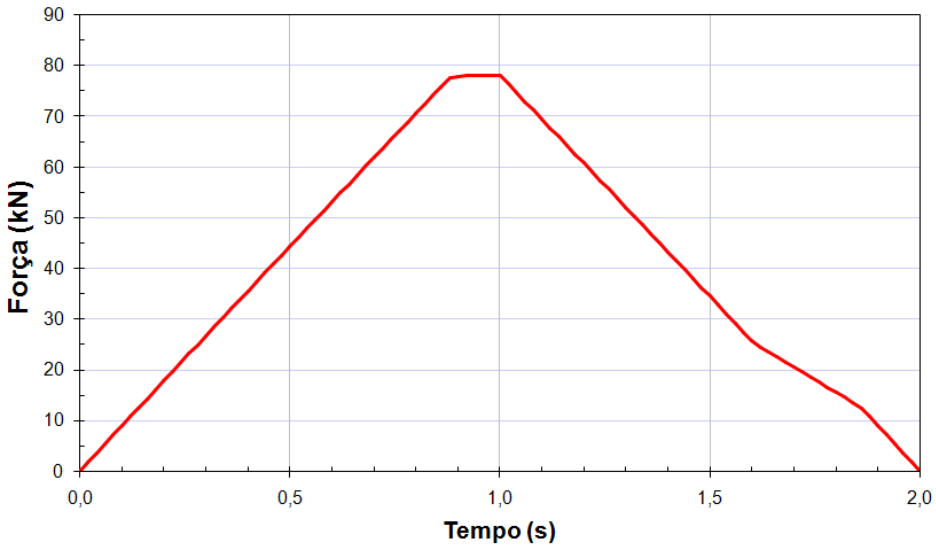


Figura V.33 - Evolução da força de reação na barra de ϕ12,7 mm com L = 375 mm.

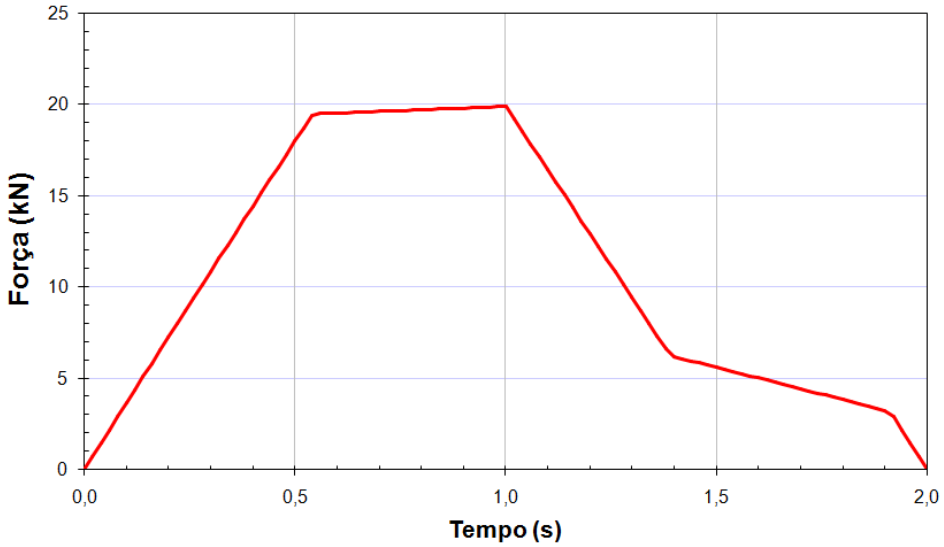


Figura V.34 - Evolução da força de reação na barra de ϕ6,35mm com L = 230 mm.

A Figura V.35 apresenta a curva *F-u* para a barra de ϕ12,7 mm com *L* = 375 mm, a Figura V.36 mostra a curva *F-u* para a barra de ϕ6,35 mm com *L* = 230 mm, as energias absorvidas foram 39,12 J e 38,93 J respectivamente.

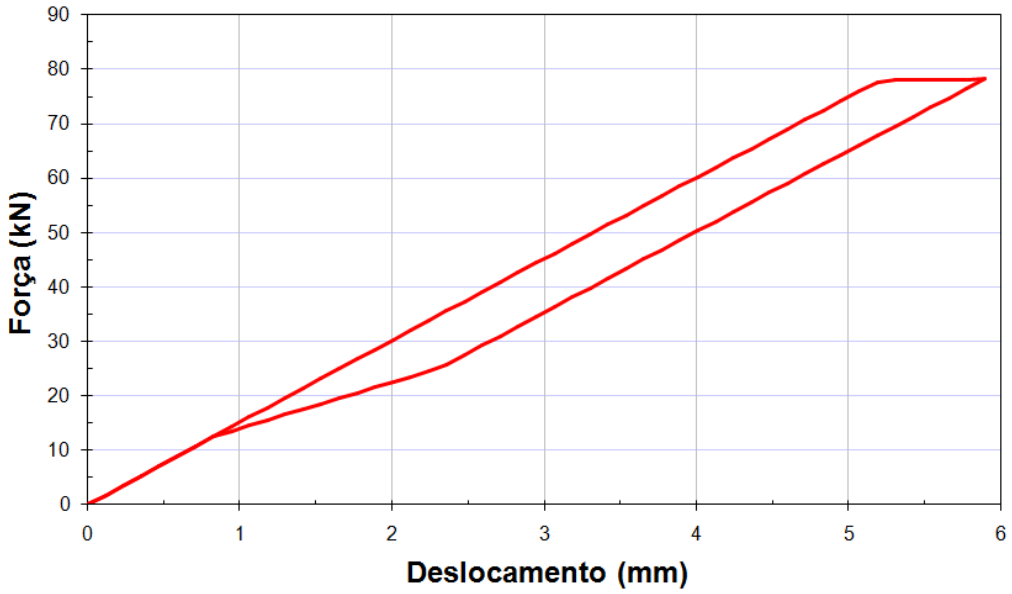


Figura V.35 - Curva *F-u* para a barra de SMA (ϕ12,7 mm com *L* = 375 mm).

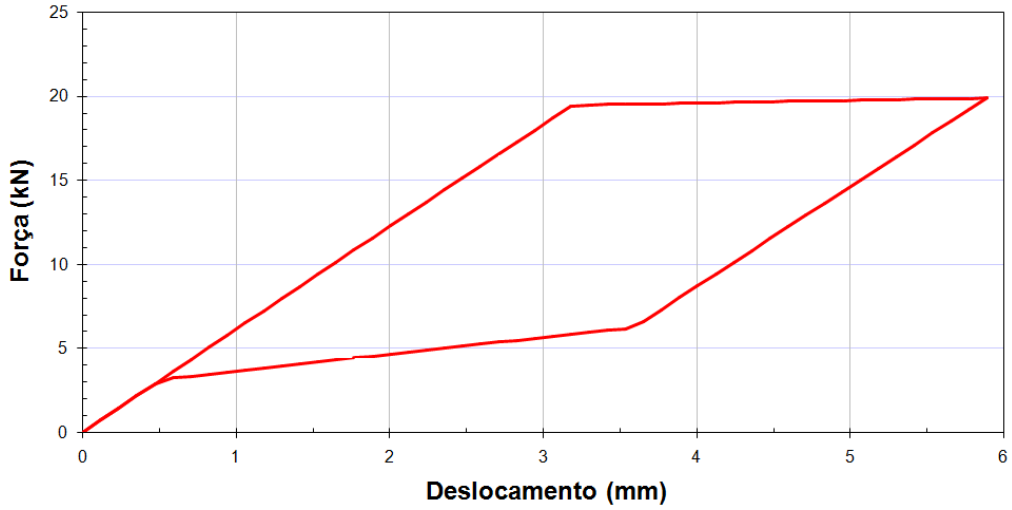


Figura V.36 - Curva *F-u* para a barra de SMA (ϕ6,35mm com *L* = 230 mm).

V.3 Resultados para o Modelo da Mola Helicoidal

Inicialmente foi realizado um estudo baseado em modelos analíticos apresentados em BUDYNAS−NISBETT (2006) para estabelecer a geometria da mola helicoidal. Um fator limitante do dispositivo que deve ser considerado na análise é o espaço físico. A mola Belleville estudada (SPEICHER *et al*, 2009) apresenta um diâmetro externo de 64 mm. Para a mola helicoidal considerou-se um mesmo espaço externo de 64 mm e um diâmetro do fio (*d*) de media comercial igual 1/2" (12,70 mm). Isto resulta em um diâmetro (*D*) da mola helicoidal de 51,30 mm (*D* = 64 - 12,70 = 51,30 mm). No projeto de molas helicoidais, BUDYNAS−NISBETT (2006) recomendam que o índice da mola não deve ser inferior a 4. Dessa forma, a geometria escolhida para a mola helicoidal atende a este critério, uma vez que:

$$C = \frac{D}{d} = \frac{51{,}30}{12{,}70} = 4{,}04 \qquad \text{(V.5)}$$

Em seguida adotou-se um passo (*p*) de 1” (25,40 mm) para a mola e número de espiras (*N*) de 6,5, resultando em um comprimento de 165,10 mm. O valor fracionado para o número de espiras tem a função de anular a flexão, que é gerada pelo carregamento na extremidade da mola helicoidal. A Figura IV.10 na seção 3.3 do Capítulo IV apresenta a geometria da mola helicoidal utilizada neste estudo.

Segundo as estimativas obtidas através de modelos analíticos, para um mesmo deslocamento aplicado às barras e à mola Belleville (*u* = 5,89 mm), a geometria proposta apresenta baixas tensões cisalhantes ($\tau_{máx}$ = 33,25 MPa) na seção transversal da mola, que não são suficietes para promover transformação de fase. As molas helicoidais costumam apresentar uma elevada capacidade de suportar deslocamentos. Dessa forma, para avaliar o desempenho da mola foi desenvolvido um estudo da influência do deslocamento aplicado na energia dissipada através da histerese peseudoelástica. Antes foi desenvolvida uma análise de convergência de malha. Inicialmente considerou-se o material como sendo linear elástico (*E* = 45 GPa e ν = 0,3). Estes valores foram adotados com base nas informações do Anexo I. As malhas deste estudo se encontram no Apêndice I. A Figura V.37 mostra a tensão cisalhante máxima, em função do número de elementos nas malhas do estudo.

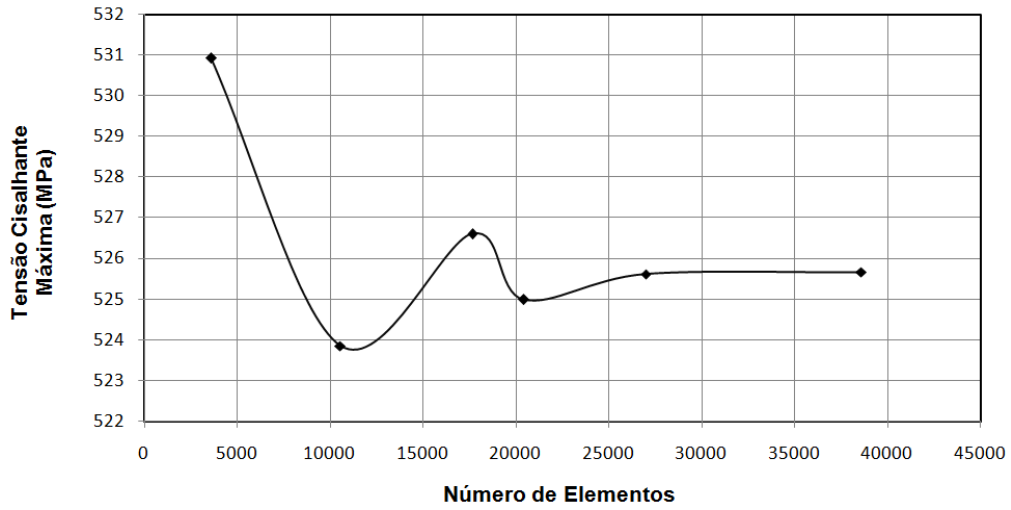


Figura V.37 - Estudo de convergência de malha para a mola helicoidal com modelo de material linear elástico.

Na Figura V.37 é possível notar que o modelo 5 (121359 nós e 26988 elementos apresenta convergência. Este modelo é utilizado no estudo da energia dissipada em função do deslocamento aplicado considerando uma faixa de deslocamentos que varia de 90 a 104 mm. A Figura V.38 apresenta os resultados e o valor de 38,85 J associado à mola Belleville está indicado através da linha tracejada para facilitar a comparação.

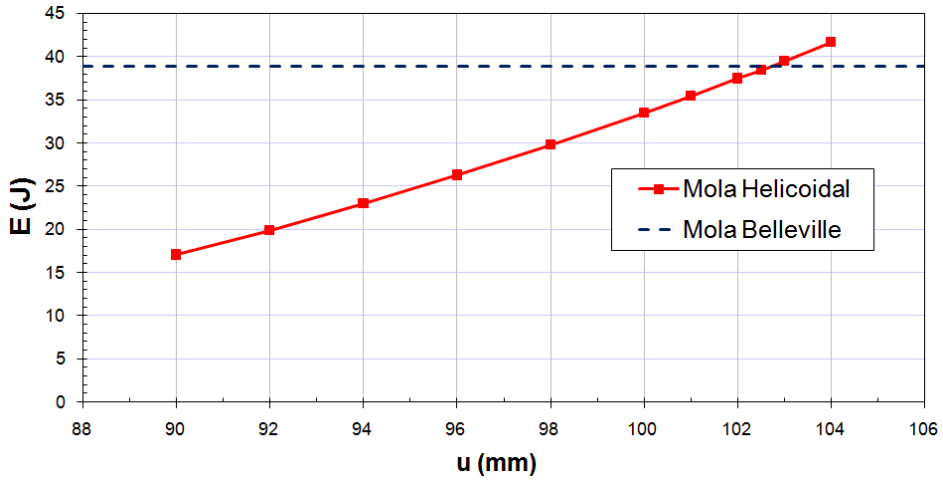


Figura V.38 - Estudo de sensibilidade ao deslocamento aplicado na mola helicoidal.

O deslocamento aplicado de 102,50 mm resulta em uma energia absorvida de 38,48 J. O modelo constitutivo utilizado para a modelagem da SMA na mola helicoidal, requer um novo estudo de convergência de malha. Na Figura V.39 é possível notar que o modelo 5 com a mesma a discretização obtida para o caso elástico é adequado.

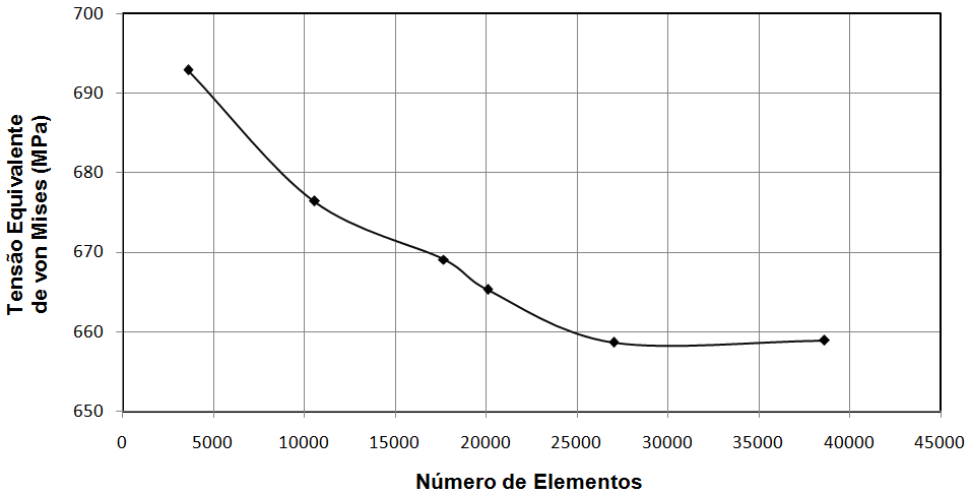


Figura V.39 - Estudo de convergência de malha para a mola helicoidal com modelo de material de SMA.

Os resultados apresentados a seguir estão em escala real e são referentes ao instante final do carregamento e início do descarregamento na mola helicoidal (t = 1 s). O resultado de deslocamento na direção X pode ser visualizado na Figura V.40, onde o valor máximo (102,67 mm) se encontra no ponto de aplicação do carregamento.

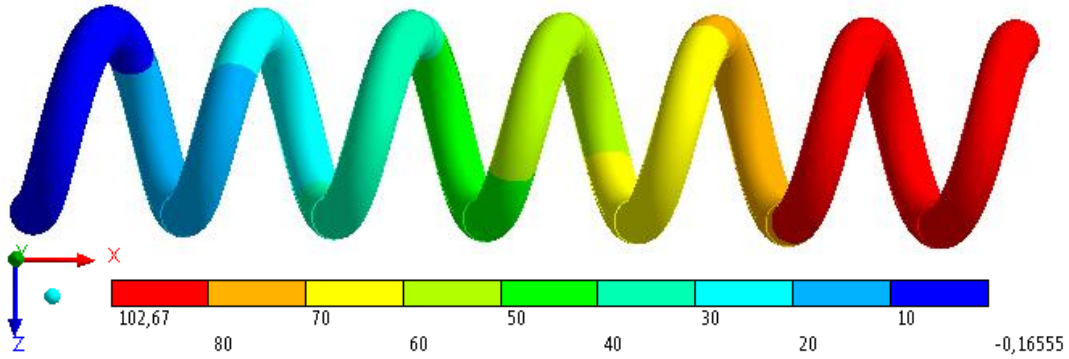


Figura V.40 - Deslocamento na direção X (t = 1 s) na mola helicoidal.

A Figura V.41 apresenta o resultado de tensão principal máxima, onde o valor máximo (467,02 MPa) se encontra próximo a superfície externa do fio, na região mais interna da espira da mola helicoidal.

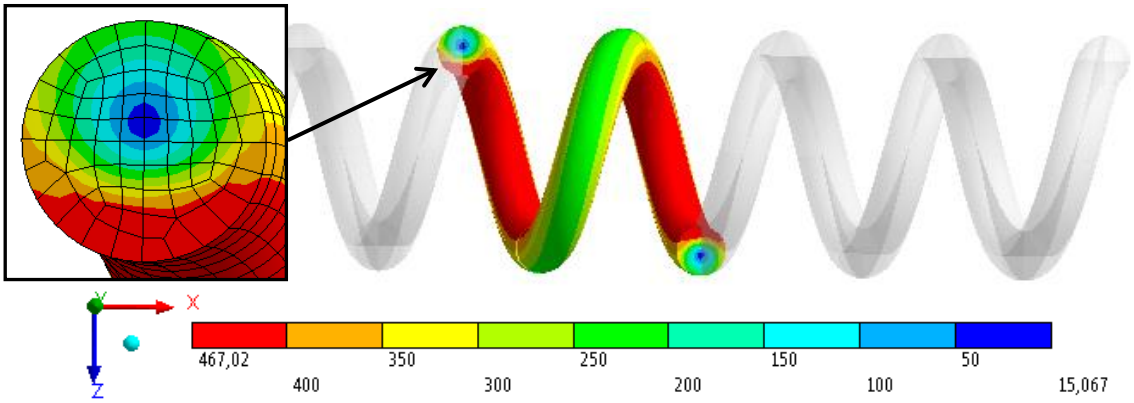


Figura V.41 - Tensão principal máxima (t = 1 s) na mola helicoidal.

O valor da tensão principal máxima varia ao longo dos passos de carregamento do modelo, como pode ser visto na Figura V.42.

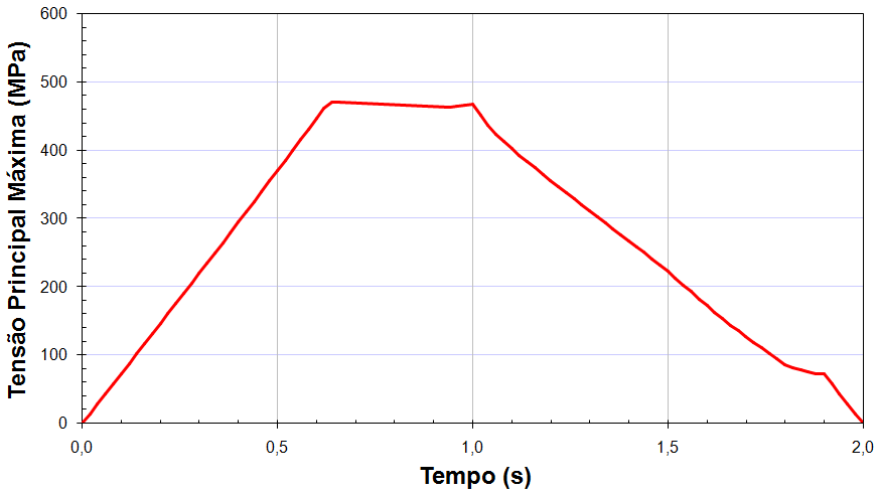


Figura V.42 - Evolução da tensão principal máxima na mola helicoidal.

A tensão cisalhante máxima é mostrada na Figura V.43. O maior valor (380,19 MPa) também se encontra na região mais externa do fio da mola helicoidal, enquanto que o menor valor, localiza-se próximo ao núcleo do fio. A evolução temporal da tensão cisalhante máxima pode ser observada na Figura V.44.

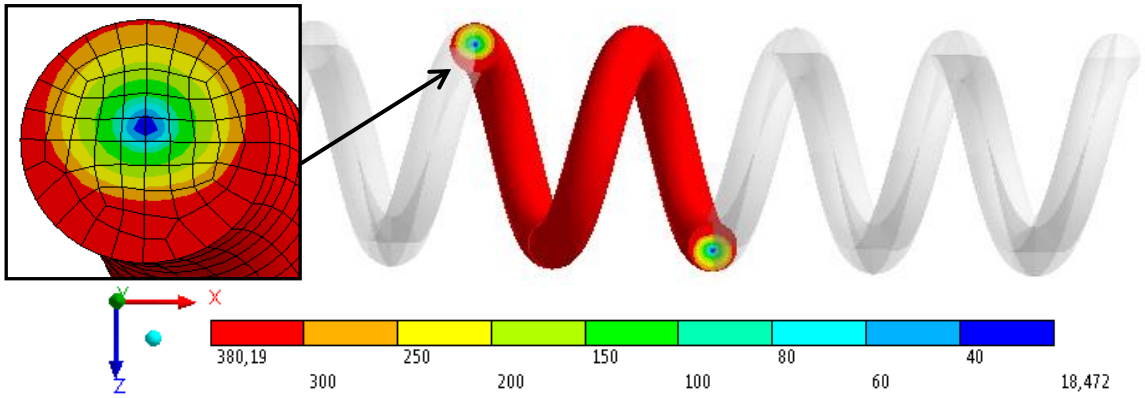


Figura V.43 - Tensão cisalhante máxima (*t* = 1 s) na mola helicoidal.

As tensões cisalhamento presentes na seção transversal da mola helicoidal, mostradas na Figura V.43 são resultado da combinação dos esforços de cortante e torção. Enquanto que as tensões de cisalhamento promovidas pelo esforço de cortante têm direção circunferencial, as tensões de cisalhamento promovidas pelo esforço de cortante têm direção horizontal (mesma direção e sentido da força exercida nas extremidade da mola). Esta combinação é responsável pela presença de valores maiores na região inferior do que na região superior, uma vez que as duas se somam em módulo na região inferior (mesmo sentido) e se subtraem na região superior (sentidos contrários).

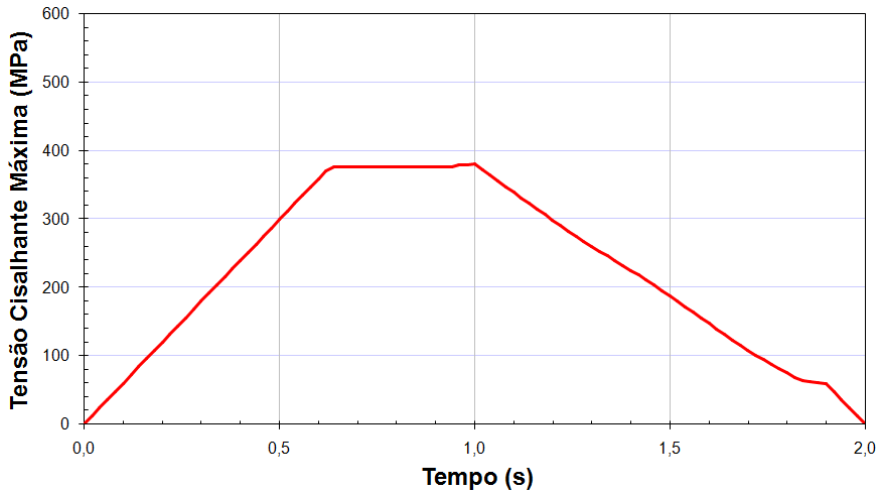


Figura V.44 - Evolução da tensão cisalhante máxima na mola helicoidal.

Na Figura V.45 é possível observar a tensão equivalente de *von Mises*, onde o valor máximo igual a 658,65 MPa localiza-se na região mais interna do fio da mola helicoidal.

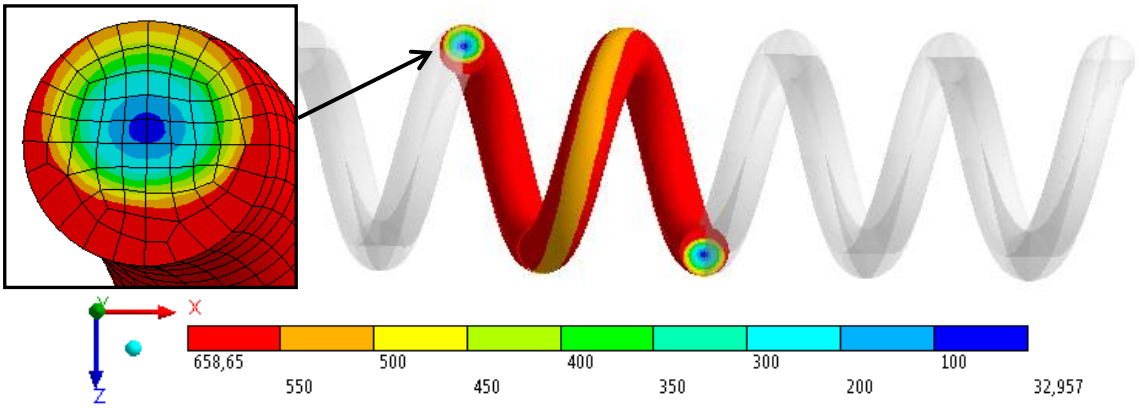


Figura V.45 - Tensão equivalente de *von Mises* (t = 1 s) na mola helicoidal.

A tensão equivalente de *von Mises* varia conforme o carregamento de deslocamento é aplicado no modelo, como pode ser visto na Figura V.46.

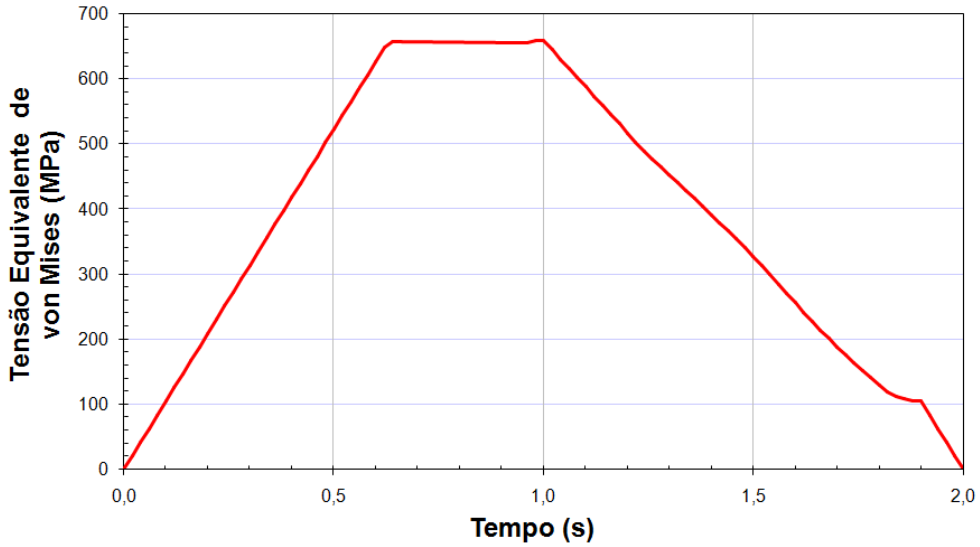


Figura V.46 - Evolução da tensão equivalente de *von Mises* na mola helicoidal.

As frações de martensita e austenita são apresentadas nas Figura V.47 e Figura V.48 respectivamente. Estes resultados referem-se ao instante de maior carregamento (t = 1 s). Nestas figuras nota-se que a região de maior fração de martensita ocorre na região de maior tensão.

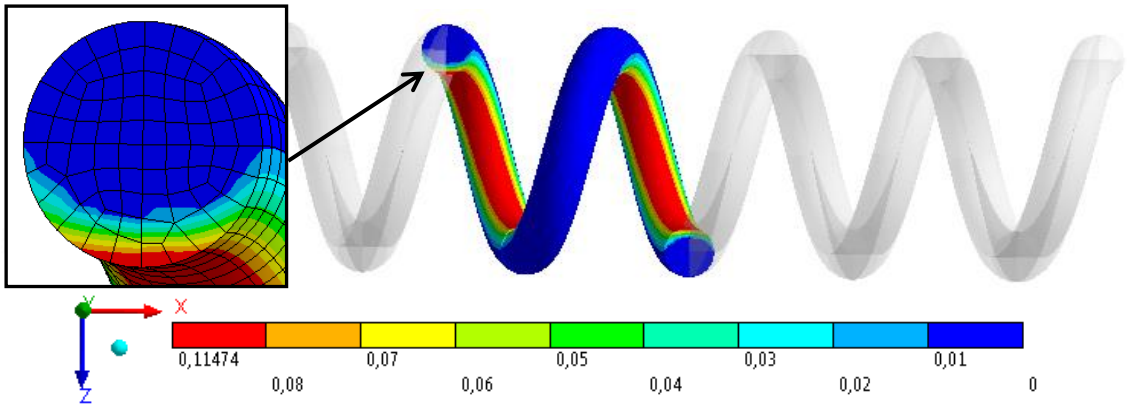


Figura V.47 - Fração de martensita (t = 1 s) na mola helicoidal.

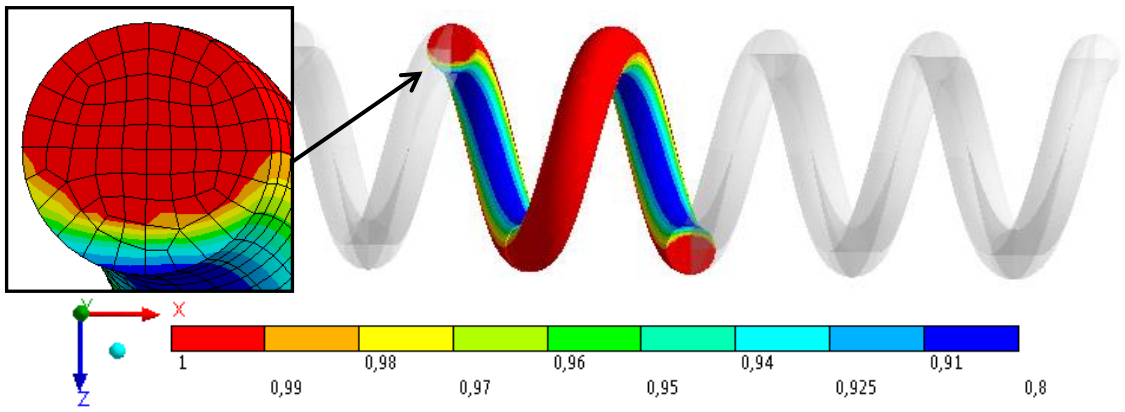


Figura V.48 - Fração de austenita (t = 1 s) na mola helicoidal.

A evolução temporal das frações de martensita e austenita na mola helicoidal é apresentada na Figura V.49. O início da transformação de fase martensítica ocorre em 0,62 s e observa-se um valor de 11,47 % de fração de martensita em 1,00 s. O retorno à fase austenítica começa em 1,44 s e termina em 1,90 s. A evolução das frações de martensita/austenita da Figura V.49 seguem as razões de transformação da Equação III.16.

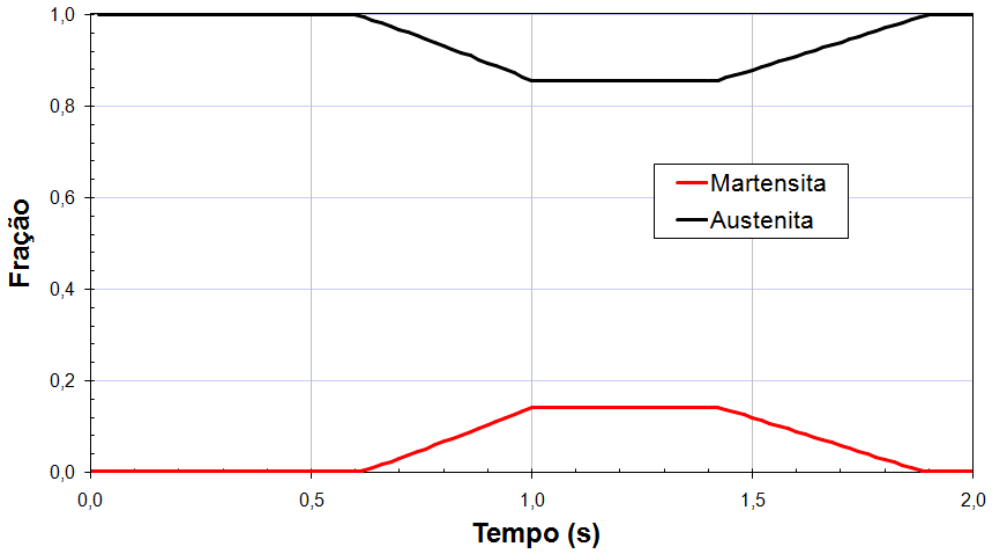


Figura V.49 - Evolução das frações de martensita/austenita na mola helicoidal.

As frações de martensita e austenita em função da deformação total equivalente na mola helicoidal são apresentadas na Figura V.50 e Figura V.51. Para a martensita o início da transformação de fase acontece com uma deformação de 1,465 %, quando esta alcança 2,143 % observa-se a presença de 11,47 % de fração de fase martensítica. No ciclo de descarregamento o início da reversão da fase martensítica ocorre na deformação de 1,450 % e o final da reversão acontece na deformação de 0,235 %.

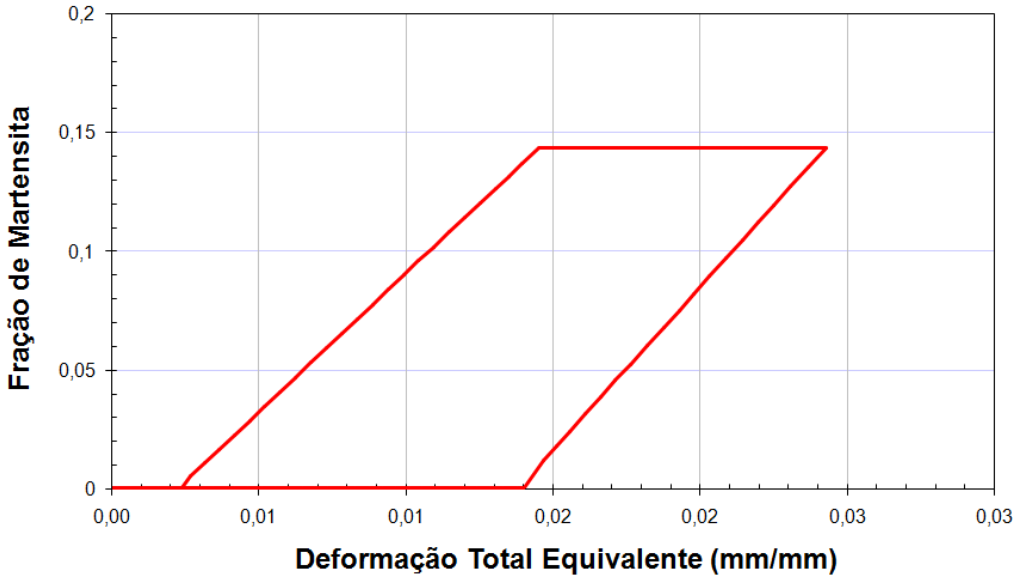


Figura V.50 - Fração da martensita em função da deformação total equivalente.

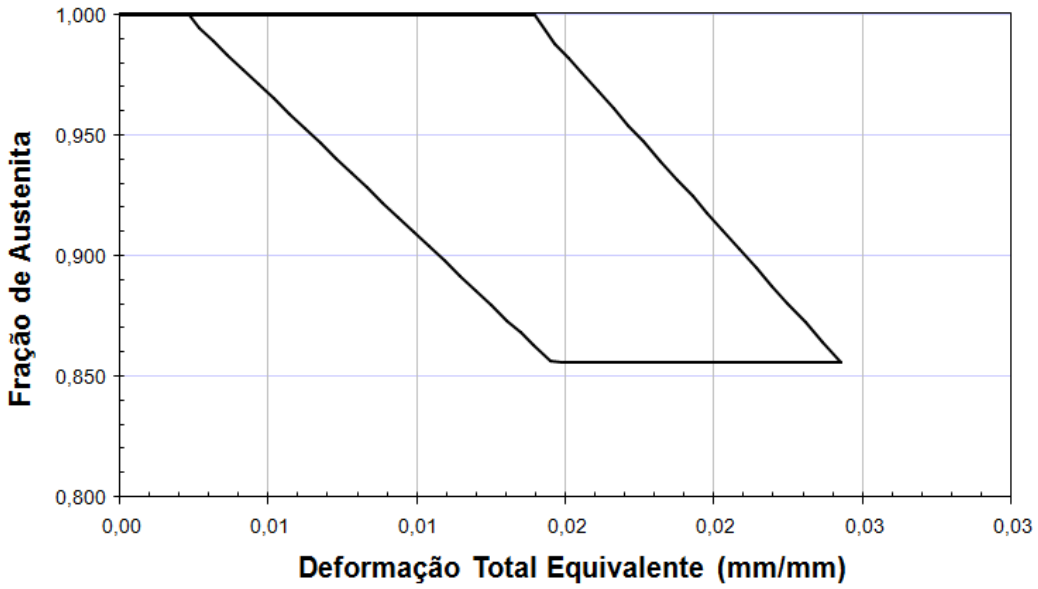


Figura V.51 - Fração da austenita em função da deformação total equivalente.

A evolução da componente *X* da força de reação na condição de contorno na mola helicoidal é apresentada na Figura V.52, onde se observa um valor máximo de 6,076 kN em 1,0 s. A Figura V.53 apresenta a curva F-u para o dispositivo com a mola helicoidal de SMA, apresentando a força máxima de 6,076 kN para um deslocamento de 102,5 mm. A energia dissipada pela curva *F-u* na Figura V.53 é calculada através da integração numérica, resultando em um valor igual a 38,48 J para este dispositvo.

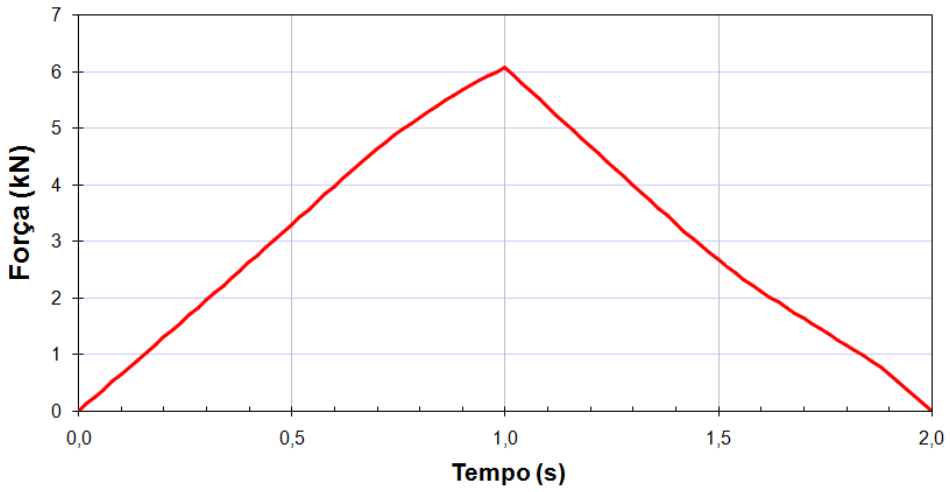


Figura V.52 - Evolução da força de reação na mola helicoidal.

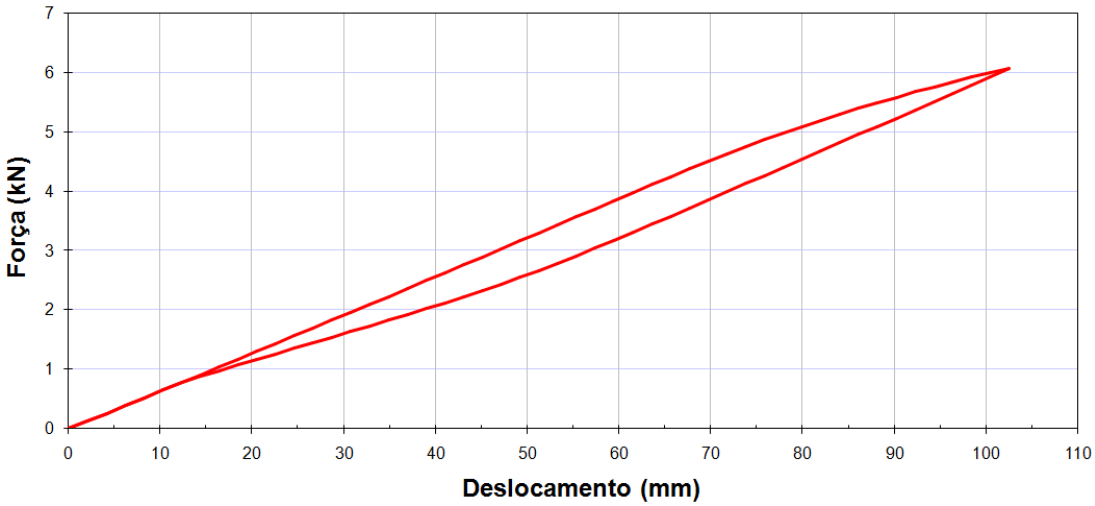


Figura V.53 - Curva *F-u* para a mola helicoidal de SMA.

V.4 Comparação dos Resultados

A Figura V.54 apresenta as quatro curvas *F-u* normalizadas para a mola Belleville, barras (ϕ12,7 mm com *L* = 375 mm e ϕ6,35 mm com *L* = 230 mm) e a mola helicoidal. A normalização é feita considerando-se para cada elemento a carga máxima e o deslocamento máximo. É possível notar que os três tipos de elemento apresentam formas diferentes para o laço de histerese. Apesar de apresentares valores de energia de dissipação próximos, a barra com ϕ12,7 mm e *L* = 375 mm, apresenta a maior força de reação (78,2 kN). Em seguida a barra com ϕ6,35 mm e *L* = 230 mm possui uma força de reação de 19,9 kN. Finalmente a barra com ϕ6,35 mm (*L* = 230 mm) apresenta uma força máxima próxima da obtida para a mola Belleville (16,2 kN). A energia absorvida na mola Belleville foi de 38,85 J, a barra de ϕ12,7 mm absorveu 39,12 J, a barra com ϕ6,35 mm dissipou 38,93 J e a mola helicoidal, dissipou 38,48 J. Na Tabela V.1 é possível observar um resumo dos resultados obtidos para cada dispositivo estudado. É possível identificar que a configuração da mola Bellevile estudada é a mais eficiente entre os elementos analisados, uma vez que é aquele que apresenta a maior densidade de dissipação de energia.

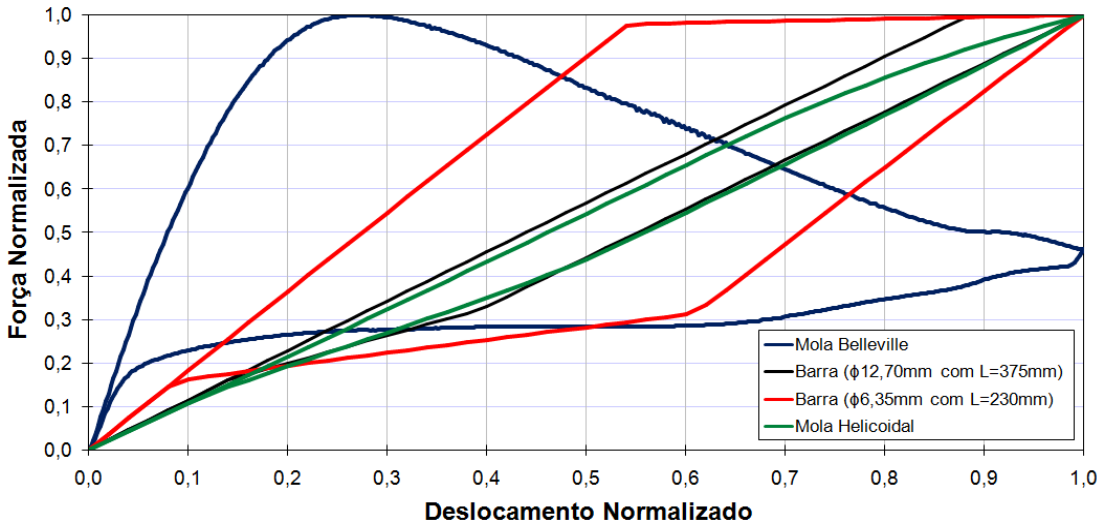


Figura V.54 - Curvas *F-u* normalizadas para a mola Belleville, barras (ϕ12,70 mm e ϕ6,35 mm) e mola helicoidal.

Tabela V.1 - Comparação dos resultados.

Dispositivo	**Energia Dissipada (J)**	**Densidade de Energia Dissipada (MJ/m^3)**	**Volume (mm^3)**	**Massa (g)**	**Força de Reação Máxima (kN)**	**% de Fase Martensítica**
Mola Belleville	38,85	7,00	5606,70	36,16	16,25	100 % de forma não-homogênea na região de contato da mola com o disco superior
Barra ϕ12,70 mm, L = 375 mm)	39,12	0,82	47503,83	306,40	78,16	2,48 % de forma homogênea em toda a seção da barra
Barra (ϕ6,35 mm, L = 230 mm)	38,93	5,34	7283,92	46,98	19,89	15,79 % de forma homogênea em toda a seção da barra
Mola Helicoidal (d = 12,70 mm)	38,48	1,44	132690	855,85	6,08	11,47 % de forma não-homogênea no fio da mola. As maiores concentrações na seção do fio ocorrem na região mais interna da espiral

* Valor teórico máximo de densidade de energia do material: 37,27MJ/m^3.

Conclusão

O efeito pseudoelástico característico das ligas com memória de forma austeníticas caracteriza-se pela presença de um laço de histerese, na curva tensão-deformação do material durante o processo de transformação de fase. Este comportamento está associado a um processo de dissipação de energia e permite que elementos de SMA possam ser utilizados como atenuadores de vibrações. A capacidade de absorver energia está associada às características da liga e da geometria do elemento do absorvedor de vibrações. Neste trabalho apresenta-se um modelo não linear baseado no Método de Elementos Finitos para avaliar a capacidade de elementos pseudoelásticos de SMA dissiparem energia. O modelo proposto foi calibrado utilizando dados experimentais disponíveis na literatura para molas Belleville. Os resultados numéricos obtidos mostraram que o modelo proposto apresenta uma boa concordância com os dados experimentais.

A aplicação do modelo desenvolvido para três geometrias para elementos de SMA (molas Belleville, barras cilíndricas e molas helicoidais) possibilitou avaliar o efeito da geometria na capacidade de dissipar energia. Para permitir uma comparação direta entre as três geometrias analisadas, a análise desenvolvida considerou a energia dissipada de cada elemento por unidade de volume.

Os resultados mostram que, entre os elementos estudados, a mola Bellevile é a configuração que apresenta o maior valor de densidade de dissipação de energia, podendo, dessa forma, ser considerado o elemento mais eficiente neste aspecto.

Com excessão das barras que apresentam estados uniformes de tensão e de fração volumétrica em todo o seu volume, as molas helicoidal e de Belleville apresentam uma distribuição de fração de fase martensítica parcial ao longo do volume. Este comportamento indica que otimizações na sua geometria podem ser efetuadas para aumentar a sua eficiência como elementos de dissipação de energia.

A metodologia proposta utiliza um pacote computacional comercial de elementos finitos que permite modelar geometrias complexas e incluir diversos efeitos como a presença de interações dos elementos pseudoelásticos com outros elementos do dispositivo. Através da metodologia é possível modelar um dispositivo completo composto de elementos de SMA e de outros componentes como hastes, suportes, molas e incluir capacidades específicas como o contato entre os componentes. Dessa forma, a metodologia proposta pode ser utilizada como uma ferramenta completa para

auxiliar no projeto e dimensionamento de elementos com memória de forma em atenuadores de vibração.

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se indicar:

1) Análise do comportamento dinâmico dos elementos de SMA como atenuadores de vibração, envolvendo a análise transiente e incluindo efeitos de inércia;

2) Incorporação da temperatura no modelo para uma análise termomecânica;

3) Estabelecimento de um programa experimental para analisar o comportamento de dispositivos completos, com a avaliação da interação entre os diversos componentes do dispositivo.

Referências Bibliográficas

AGOM METAL RUBBER ENGINEERING, Via Mesero 12 - 20010 - Ossona - (MI) - Italy, 2012. Disponível em: <http://www.fip-group.it/fip_ind_eng/prodotti.html>. Acessado em: 21 jul. 2012.

AGUIAR, R.A.A.; PACHECO, P.M.C.L.; SAVI, M.A., "Absorvedores de Vibração Utilizando Ligas com Memória de Forma - Resultados Experimentais", *VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM*, 2010.

ALMEIDA, H.B.D.G., Análise via Método dos Elementos Finitos de Falhas em Placas Compósitas Utilizando Materiais Piezoelétricos, Projeto Final, DEM/POLI/UFRJ, 2011.

AMARIEI, D.; GILLICH, G.; NEGRU, I., "Researches Regarding the Effect of Nitinol Vibration Damper Applied to Infrastructures", *RJAV* vol VI issue 1, 2009.

ANSYS CORE DEVELOPMENT GROUP / ANSYS TECHNICAL SUPPORT, "Advanced Material Models", *2006 International ANSYS Conference*, Pittsburgh - PA - USA, 2006.

ANSYS INC., "Documentation for Ansys Workbench", Release 14, 2012.

ANSYS INC., "Structural Analysis Guide", Release 14, 2012.

AURICCHIO, F.; TAYLOR, R.L.; LUBLINER, J., "Shape-Memory Alloys: Macromodeling and Numerical Simulations of the Superelastic Behavior", *Computational Methods in Applied Mechanical Engineering*, 146 1: 281-312, 1997.

AURICCHIO, F., "A Robust Integration-Algorithm for a Finite-Strain Shape-Memory-Alloy", *International Journal of Plasticity*, 17 971-990, 2001.

AURICCHIO, F.; STEFANELLI, U., "Numerical analysis of a three-dimensional super-elastic constitutive model", *Journal for Numerical methods in engineering*, 61:142–155 (DOI: 10.1002/nme.1062), 2004.

AURICCHIO, F.; PETRINI, L., "Improvements and Algorithmical Considerations on a Recent Three-Dimensional Model Describing Stress-Induced Solid Phase Transformations", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 55: 1255-1284, 2005.

BAÊTA-NEVES, A.P.; SAVI, M.A.; PACHECO, P.M.C.L., “On the Fremond’s Constitutive Model for Shape Memory Alloys”, *Mechanics Research Communication*, 31 677-688, 2004.

BANDEIRA, E.L., Análise de Treliças Adaptativas com Memória de Forma e Não-Linearidades Geométricas Através do Método dos Elementos Finitos, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2005.

BIRMAN, V., “Review of mechanics of shape memory alloy structures”, *Applied Mechanics Reviews*, 50 (11) 629–645, 1997.

BORN, R.M., Aplicação de Ligas de Memória de Forma Magnéticas em Atuadores Lineares, Dissertação de Mestrado, *COPPE/UFRJ*, 2007.

BUDYNAS−NISBETT, *Shigley’s Mechanical Engineering Design*, Eighth Edition, McGraw-Hill, ISBN: 0−390−76487−6, 2006.

CASAROTTI, C., Bridge Isolation and Dissipation Devices: state of the art review of seismic response and modelling of modern seismic isolation and dissipation devices, Master degree thesis, Università degli Studi di Pavia, 2004.

CASTELLANO, M.G., “Innovative Technologies for Earthquake Protection of Architectural Heritage”, *International ICOMOS Congress*, Bethlehem - Palestine, 2000.

DARJAN, C., “Shape Memory Alloys”, Seminar Log, *University of Ljubljana*, 2007.

DESROCHES, R.; SMITH, B., “Shape Memory Alloys in Seimsic Resistant Design and Retrofit: A Critical Review of heir Potential and Limitations”, *Journal of Earthquake Engineering*, 7(3): 1-15, 2003.

DOLCE, M.; CARDONE, D., “Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications - 1 Martensite and austenite NiTi bars subjected to torsion”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001.

DOLCE, M.; CARDONE, D., “Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications - 2 Austenite NiTi wires subjected to tension”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001.

DU, Y., Internal Resonances in Vibration Isolators and Their Control Using Passive and Hybrid Dynamic Vibration Absorbers, Doctor of Philosophy Dissertation, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.

DUERIG, T.W.; PELTON, A.R.; STÖECKEL, D., “The Use of Superelasticity in Medicine”, *EUROFLEX GmbH*, 1996.

DYNALLOY INC., 14762 Bentley Circle - Tustin, California 92780 - USA, 2012. Disponível em: <http://www.dynalloy.com/TechDataWire.php>. Acessado em: 22 jul. 2012.

FIP INDUSTRIALE S.p.A., Via Scapacchio 41 - Selvazzano Dentro, 35030 Padova - Itália, 2012. Disponível em: <http://www.fip-group.it/fip_ind_eng/prodotti.html>. Acessado em: 22 jul. 2012.

FUGAZZA, D., Shape-Memory Alloy Devices in Earthquake Engineering: Mechanical Properties, Constitutive Modeling and Numerical Simulations, Master degree thesis, Università degli Studi di Pavia, 2003.

GEROLDO, A.C.B., Estudo do Efeito de Memória de Forma de Fios Ortodônticos da Liga Ni-Ti nas Condições Comercial e Após Tratamentos Térmicos, Dissertação de Mestrado, PUCRS, 2009.

GONG, X.; PELTON, A.R., "Finite Element Analysis on NiTiNOL Medical Applications", *Proceedings of IMECE*, 2002.

HAN, Y.; XING, D.; XIAO, E.; LI, A., "NiTi-wire Shape Memory Alloy Dampers to Simultaneously Damp Tension, Compression, and Torsion", *Journal of Vibration and Control* DOI: 10.1177/1077546305055773, 2005.

HU, J., *Shape Memory Polymers and Textiles*, Woodhead Publishing, 2007.

HWANG, J.S., "Seismic Design of Structures with Viscous Dampers", *International Training Programs for Seismic Design of Building Structures* - Taiwan, 2002.

INDIRLI, M., "The Demo-Intervention of the ISTECH Project: The Bell-Tower of S. Giorgio in Trignano (Italy)", *Final Workshop of ISTECH Project*, Ispra - Italy, 2000.

LA CAVA, C.A.P.; MACHADO, L.G.; SILVA, E.P., Modelagem de Dispositivos Mecânicos Fabricados com Ligas de Memória de Forma, Projeto Final, DEPMC/CEFET-RJ, 1999.

LAGOUDAS, D.C., ASM, *Shape Memory Alloy – Modeling and Engineering Applications*, Springer, 2008.

LAI, W.M.; RUBIN, D.; KREMPL E., *Introduction to continuum mechanics*, Butterworth-Heinemann, 1993.

LU, Z.K.; WENG, G.J., "A Micromechanical Theory for the Thermally Induced Phase Transformation in Shape Memory Alloys", *Smart Materials and Structures*, 2000.

MALVERN, L.E., *Introduction to the Mechanics of a Continuous Media*, Prentice-Hall, 1969.

MARQUES, R.F.A., Estudo Teórico e Numérico de Absorvedores Dinâmicos de Vibrações Ativos e Adaptativos, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, 2000.

MEIROVITCH, L., *Dynamics and Control of Structure*, Wiley-Interscience, New York USA, 1990.

MELZER, A.; STÖECKEL, D., "Function and Performance of Nitinol Vascular Implants", *The Open Medical Devices Journal*, 2010.

MONTEIRO JR, P.C.C., Análise do Acoplamento Termomecânico em Ligas com Memória de Forma, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2007.

MOTAVALLI, M.; CZADERSKI, C.; BERGAMINI, A.; JANKE, L., "Application of Shape Memory Alloys in Civil Engineering: Past, Present and Future", *The Seventeenth Annual International Conference on Composites/Nano Engineering* - ICCE-17, Hawaii - USA, 2009.

NITINOL DEVICES & COMPONENTS), 47533 Westinghouse Drive - Fremont - California 94539 - USA, 2012. Disponível em: < http://www.nitinol.com/products-services/overview>. Acessado em: 22 jul. 2012.

OLIVEIRA, S.A., Um Modelo Constitutivo Tridimensional para Descrever os Efeitos de Memória de Forma e Pseudoelástico em Ligas com Memória de Forma, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2008.

PAIVA, A., Modelagem do Comportamento Termomecânico das Ligas com Memória de Forma, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2004.

PAIVA, A.; SAVI, M.A.; BRAGA, A.M.B.; PACHECO, P.M.C.L., "A Constitutive Model for Shape Memory Alloys Considering Tensile-Compressive Asymmetry and Plasticity", *International Journal of Solids and Structures*, 42 (11-12) pp.3439-3457, 2005.

PAIVA, A.; SAVI, M.A., "An Overview of Constitutive Models for Shape Memory Alloys", *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID56876 v. 2006 p. 1-30, 2006.

PAN, Q.; CHO, C., "The Investigation of a Shape Memory Alloy Micro-Damper for MEMS Applications", *MDPI - Open Access Publishing*, p 1887-1900, 2007.

POPOV, P.; LAGOUDAS, D.C., "A 3-D Constitutive Model for Shape Memory Alloys Incorporating Pseudoelasticity and Detwinning of Self-accommodated Martensite", *International Journal of Plasticity*, 23 pp.1679–1720, 2007.

PUGLIESE, G.; CASEY, D., “Analysis of Shape Memory Alloy and Their Application for Reducing Damage Due to Seismic Activity”, University of Pittsburgh - *Swanson School of Engineering*, 2012.

RED, J.N., *An Introduction to Finite Element Method*. McGraw - Hill, 1985.

RIBEIRO, F.L.B., *Introdução ao método dos elementos finitos*, COPPE/UFRJ, 2004.

ROYLANCE, D., “Stress-Strain Curves”, *Department of Materials Science and Engineering*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139 - USA, 2001.

RUSTIGHI, E.; BRENNAN, M.J.; MACE, B.R., “Design of an adaptive vibration absorbers using shape memory alloy”, *ISVR Technical Memorandum* No. 920, 2003.

RYHÄNEN, J., Biocompatibility Evolution of Nickel-Titanium Shape Memory Alloy, Academic Dissertation, University of Oulu, 1999.

SANTOS, E.F., Atenuadores Visco-Elásticos para Redução de Oscilações Aeroelásticas de Edifícios Altos, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ , 2003.

SCHILLER, E.H., Heat Engine Driven by Shape Memory Alloys: Prototyping and Design, Master degree thesis, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.

SCHNORR CORPORATION), Handbook for Disc Springs, 4355 Varsity Drive Suite A - Ann Arbor - MI 48108 - USA, 2003. Disponível em: <http://schnorr.com/docs/Handbook.pdf>. Acessado em: 22 jul. 2012.

SHAO, D.; PALL, A.; SOLI, B., “Friction Dampers for Seismic Upgrade of a 14-Story Patient Tower with A 36-Foot Tall Soft-Story”, Technical Paper #90, *Pall Dynamics Limited*, 2012.

SOLTANE, S.; MEKKI, O.B.; MONTASSAR, S.; AURICCHIO, F., “Damping stay-cable transverse vibration using shape memory alloys and magneto rheological dampers”, *Advances in Geomaterials and Structures*, 2010.

SOUZA, A.C.; MAMIYA, E.N.; ZOUAIN, N., “Three-Dimensional Model for Solids Undergoing Stress-Induced Phase Transformations”, *European Journal of Mechanics* – A/Solids, 17 789-806, 1998.

SPEICHER, M.; HODGSON, D.E.; DESROCHES, R.; LEON, R.T., “Shape Memory Alloy Tension/Compression Device for Seismic Retrofit of Buildings”, *ASM International*, 2009.

TORRA, V.; ISALGUE, A.; CARRERAS, G.; LOVEY, F.C.; SOUL, H.; TERRIAULT, P.; ZAPICO, B., “The SMA properties in civil engineering applications. The SMARTeR project: Use of SMA in damping of stayed cables for bridges”, *ESOMAT*, 2009.

UNIVERSITY AT BUFFALO - *Civil, Structural and Environmental Engineering (CSEE), New Technologies in Earthquake Engineering* - A Summary, New York USA, 2001.

WILLIAMS, K.; CHIU, G.; BERNHARD, R., “Adaptive-Passive Absorbers Using Shape Memory Alloys”, *Journal of Sound and Vibration*, 249 (5): pp. 835-848, 2002.

WU, S.K.; LIN, H.C., “Recent development of Ni-Ti based shape memory alloys in twain”, *Materials Chemistry and Physics*, pp.81-92, 2000.

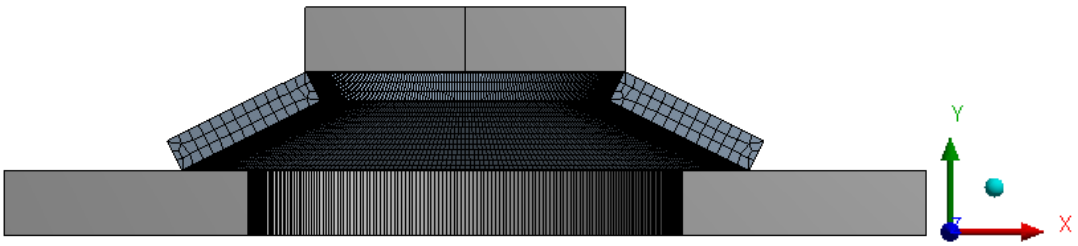
ZIENKIEWICZ, O.C.; TAYLOR, R. L., *The finite element method*. McGraw - Hill, 1989.

Apêndice I

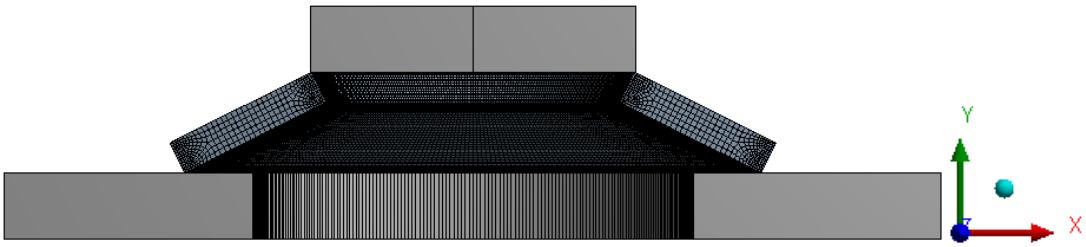
A tabela abaixo resume os modelos utilizados no estudo de convergência para a mola Belleville. As malhas possuem a expansão cíclica do modelo axisimétrico para melhor visualização.

Número do Modelo	Número de Elementos	Número de Nós
1	47	188
2	380	1259
3	675	2176
4	1044	3323
5	1403	4418
6	1945	6082
7	2526	7861
8	3429	10606
9	4443	13688

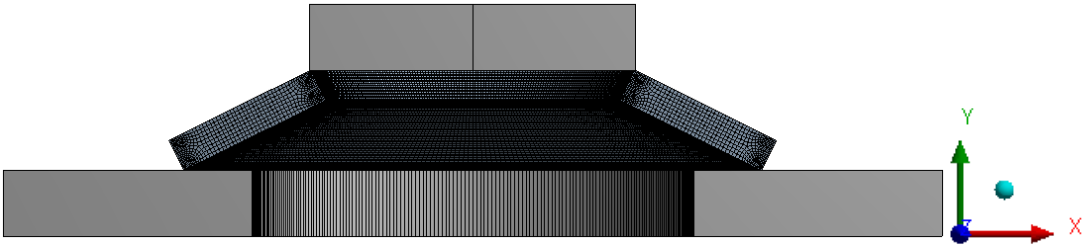
Malha do modelo 1



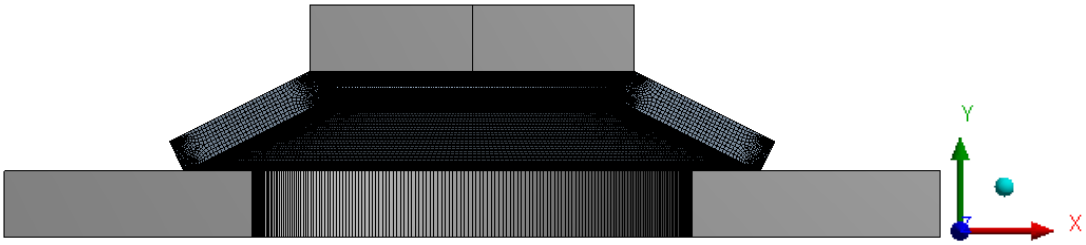
Malha do modelo 2



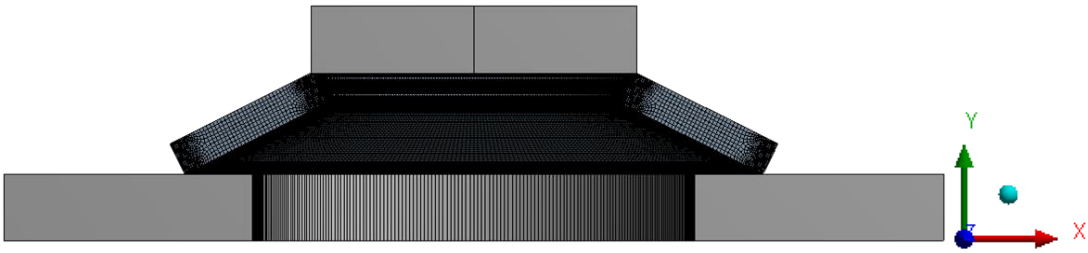
Malha do modelo 3



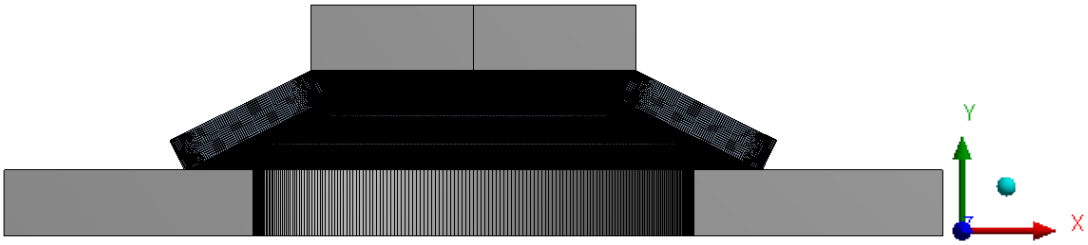
Malha do modelo 4



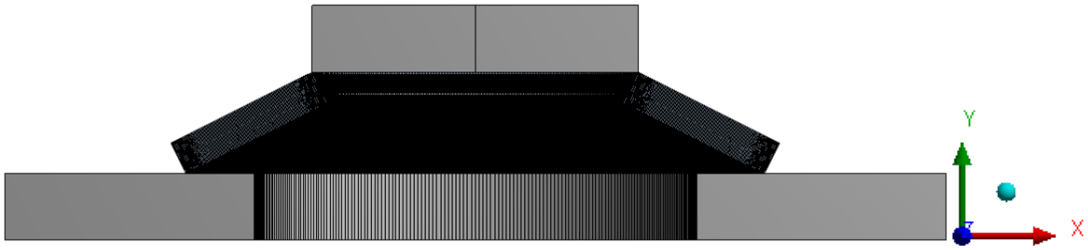
Malha do modelo 5



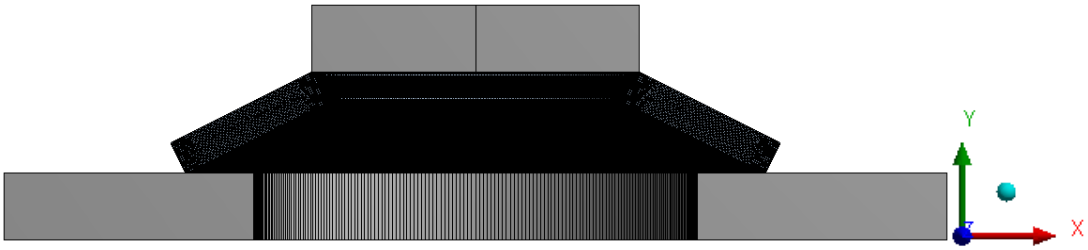
Malha do modelo 6



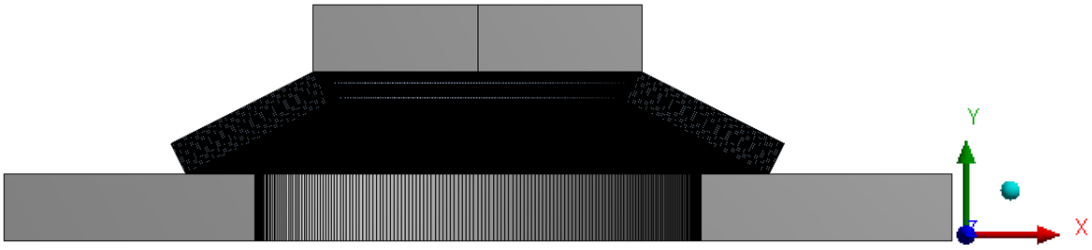
Malha do modelo 7



Malha do modelo 8



Malha do modelo 9

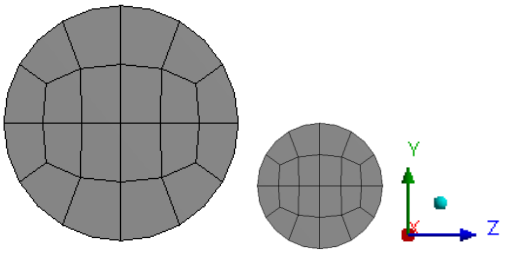


As tabelas abaixo resumem os modelos utilizados no estudo de convergência das barras de ϕ12,70 mm (L = 100 mm) e ϕ6,35 mm (L = 100 mm). A discretização na seção transversal é mostrada em detalhe nas malhas.

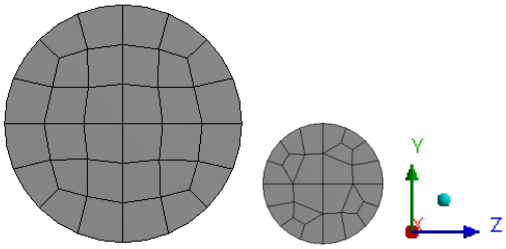
Número do Modelo para ϕ12,70 mm	**Número de Elementos**	**Número de Nós**
1	600	3073
2	1152	5657
3	2112	10137
4	3132	14919
5	6256	28321
6	9280	41501

Número do Modelo para ϕ6,35 mm	**Número de Elementos**	**Número de Nós**
1	1160	5873
2	1536	7897
3	2368	11509
4	3784	18041
5	6100	27502
6	9072	42077

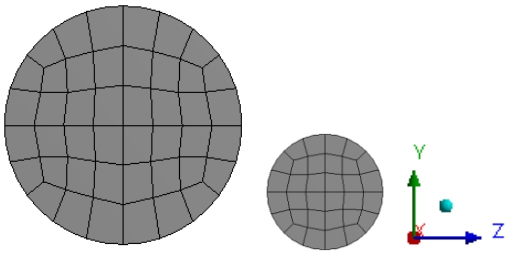
Malha do modelo 1 para ϕ12,70 mm e ϕ6,35 mm



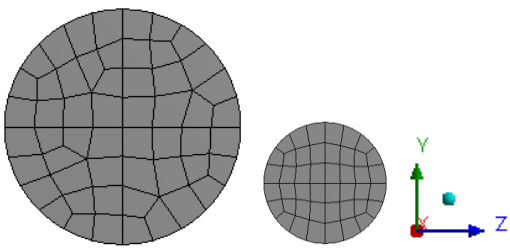
Malha do modelo 2 para ϕ12,70 mm e ϕ6,35 mm



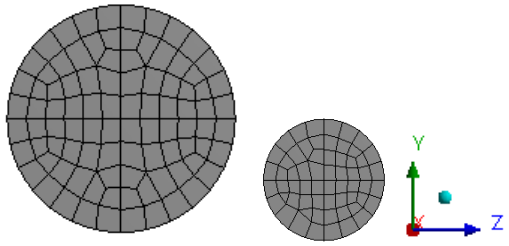
Malha do modelo 3 para ϕ12,70 mm e ϕ6,35 mm



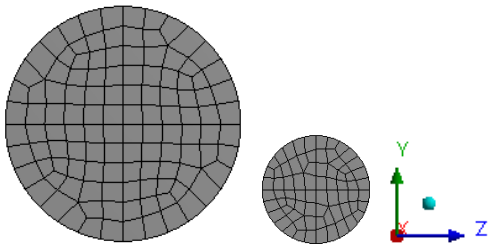
Malha do modelo 4 para ϕ12,70 mm e ϕ6,35 mm



Malha do modelo 5 para ϕ12,70 mm e ϕ6,35 mm



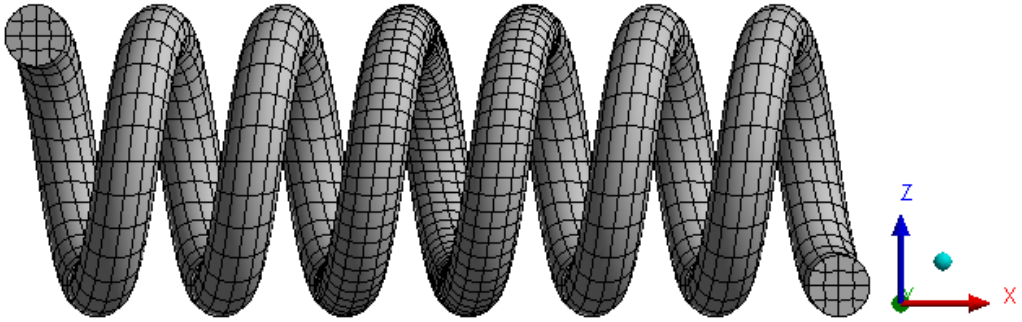
Malha do modelo 6 para ϕ12,70 mm e ϕ6,35 mm



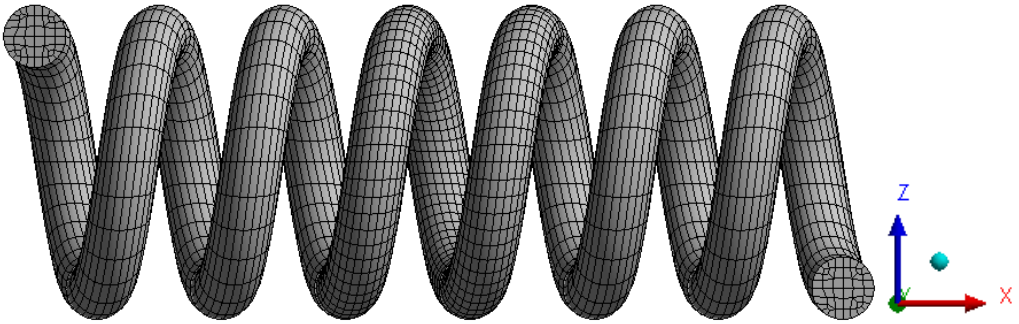
Os modelos utilizados no estudo de convergência da mola helicoidal se encontram resumidos na tabela abaixo.

Número do Modelo	Número de Elementos	Número de Nós
1	3584	17529
2	10528	50790
3	17646	79750
4	20414	95006
5	26988	121359
6	38592	174977

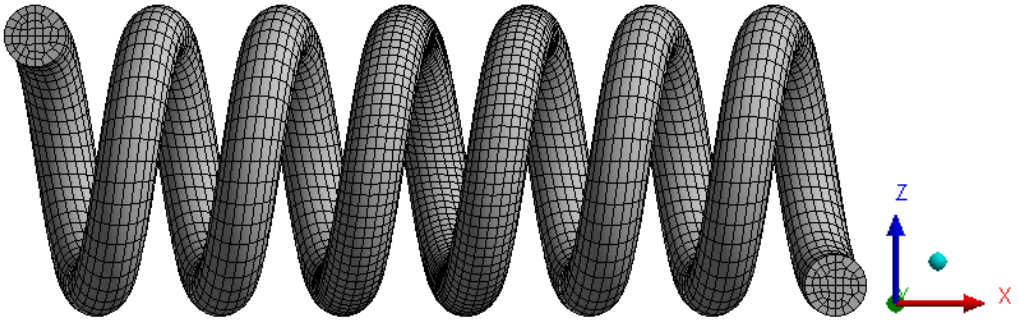
Malha do modelo 1



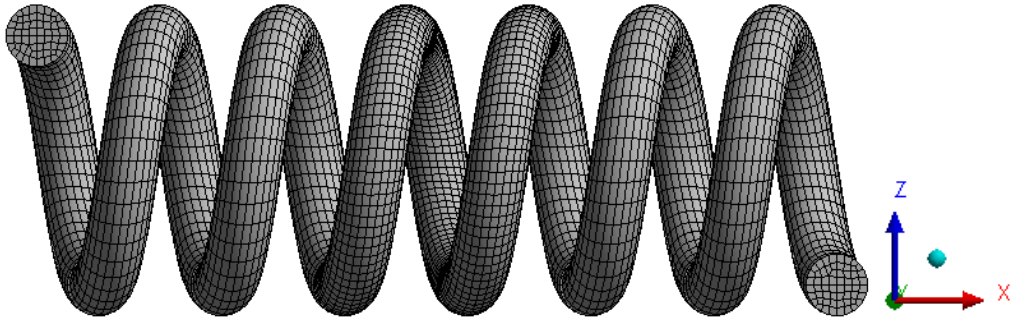
Malha do modelo 2



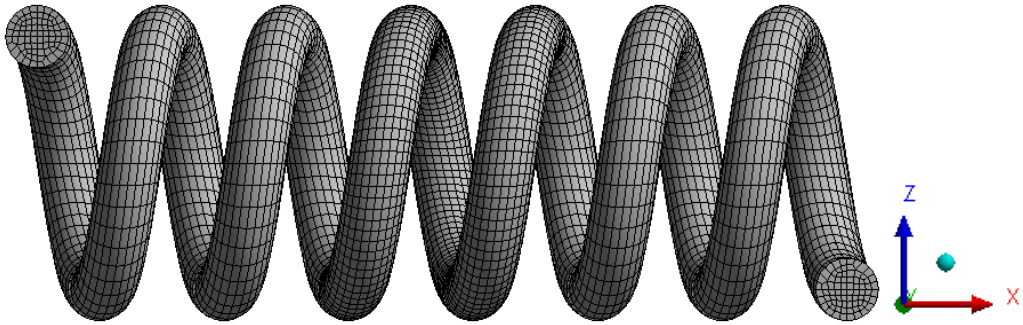
Malha do modelo 3



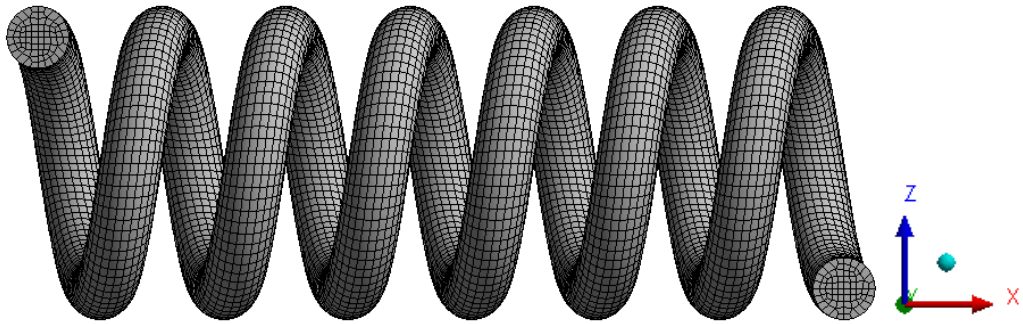
Malha do modelo 4



Malha do modelo 5

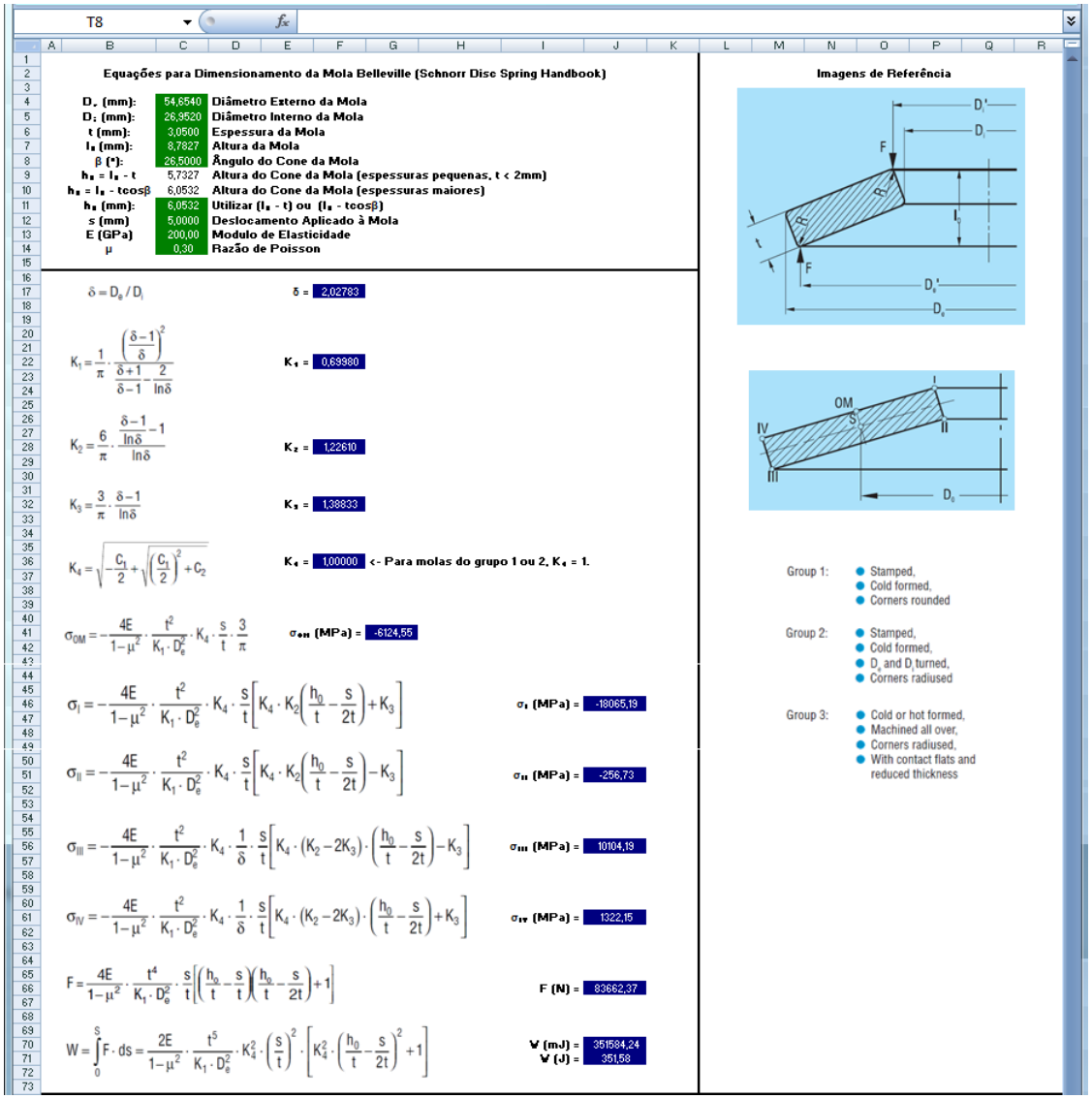


Malha do modelo 6



Apêndice II

As imagens a seguir apresentam três exemplos de planilhas eletrônicas desenvolvidas. A primeira planilha foi utilizada para os cálculos empíricos da mola Belleville conforme proposto por SCHNORR (2003), a segunda contabiliza a energia absorvida pela mola Belleville constituída de SMA, a última tem a finalidade de calcular as energias para diferentes geometrias das barras de SMA. Os métodos numéricos de integração implementados foram o método do trapézio múltiplo e o método de Simpson 1/3 Múltiplo.



Equações para Dimensionamento da Mola Belleville (Schnorr Disc Spring Handbook)

D_e (mm):	54,6540	Diâmetro Externo da Mola
D_i (mm):	26,9520	Diâmetro Interno da Mola
t (mm):	3,0500	Espessura da Mola
l_0 (mm):	8,7827	Altura da Mola
β (°):	26,5000	Ângulo do Cone da Mola
$h_0 = l_0 - t$	5,7327	Altura do Cone da Mola (espessuras pequenas, t < 2mm)
$h_0 = l_0 - t\cos\beta$	6,0532	Altura do Cone da Mola (espessuras maiores)
h_0 (mm):	6,0532	Utilizar (l_0 - t) ou (l_0 - tcosβ)
s (mm)	5,0000	Deslocamento Aplicado à Mola
E (GPa)	200,00	Modulo de Elasticidade
μ	0,30	Razão de Poisson

$\delta = D_e / D_i$ — δ = 2,02783

$K_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\left(\frac{\delta-1}{\delta}\right)^2}{\frac{\delta+1}{\delta-1} - \frac{2}{\ln\delta}}$ — K_1 = 0,69980

$K_2 = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{\frac{\delta-1}{\ln\delta} - 1}{\ln\delta}$ — K_2 = 1,22610

$K_3 = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{\delta-1}{\ln\delta}$ — K_3 = 1,38833

$K_4 = \sqrt{-\frac{C_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{C_1}{2}\right)^2 + C_2}}$ — K_4 = 1,00000 <- Para molas do grupo 1 ou 2, K_4 = 1.

$\sigma_{OM} = -\frac{4E}{1-\mu^2} \cdot \frac{t^2}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot K_4 \cdot \frac{s}{t} \cdot \frac{3}{\pi}$ — σ_{OM} (MPa) = -6124,55

$\sigma_I = -\frac{4E}{1-\mu^2} \cdot \frac{t^2}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot K_4 \cdot \frac{s}{t}\left[K_4 \cdot K_2\left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t}\right) + K_3\right]$ — σ_I (MPa) = -18065,19

$\sigma_{II} = -\frac{4E}{1-\mu^2} \cdot \frac{t^2}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot K_4 \cdot \frac{s}{t}\left[K_4 \cdot K_2\left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t}\right) - K_3\right]$ — σ_{II} (MPa) = -256,73

$\sigma_{III} = -\frac{4E}{1-\mu^2} \cdot \frac{t^2}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot K_4 \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \frac{s}{t}\left[K_4 \cdot (K_2 - 2K_3) \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t}\right) - K_3\right]$ — σ_{III} (MPa) = 10104,19

$\sigma_{IV} = -\frac{4E}{1-\mu^2} \cdot \frac{t^2}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot K_4 \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \frac{s}{t}\left[K_4 \cdot (K_2 - 2K_3) \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t}\right) + K_3\right]$ — σ_{IV} (MPa) = 1322,15

$F = \frac{4E}{1-\mu^2} \cdot \frac{t^4}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot \frac{s}{t}\left[\left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{t}\right)\left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t}\right) + 1\right]$ — F (N) = 83662,37

$W = \int_0^S F \cdot ds = \frac{2E}{1-\mu^2} \cdot \frac{t^5}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot K_4^2 \cdot \left(\frac{s}{t}\right)^2 \cdot \left[K_4^2 \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t}\right)^2 + 1\right]$ — W (mJ) = 351584,24; W (J) = 351,58

Imagens de Referência

Group 1:
- Stamped,
- Cold formed,
- Corners rounded

Group 2:
- Stamped,
- Cold formed,
- D_e and D_i turned,
- Corners radiused

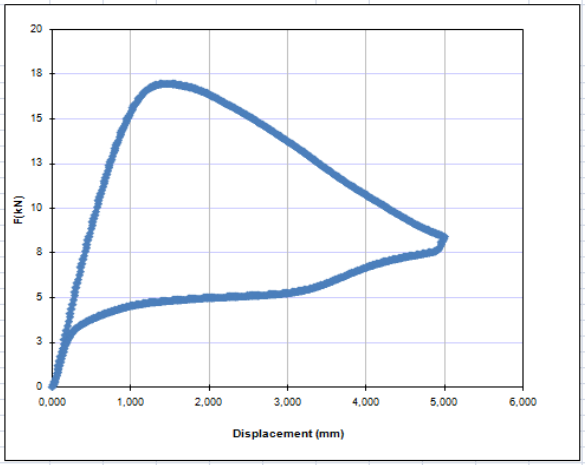
Group 3:
- Cold or hot formed,
- Machined all over,
- Corners radiused,
- With contact flats and reduced thickness

Chart 1

Cálculo da Energia Absorvida no Laço de Histerese.

Energia em Joule (1J = 1kN * 1mm)

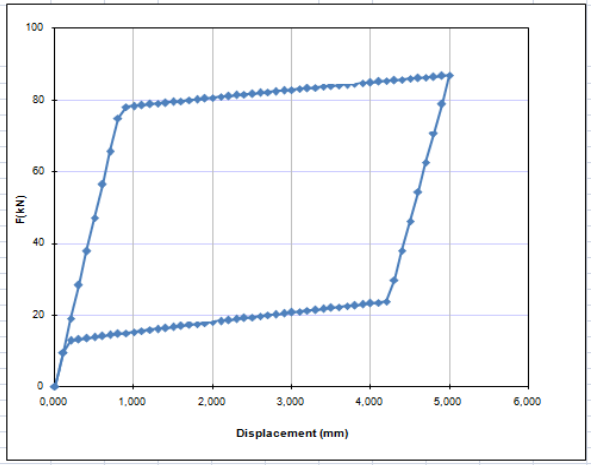
	Curva F(N) x u(mm)			Integração Numérica pelo Método do Trapézio Múltiplo:		Integração Numérica pelo Método de Simpson 1/3 Múltiplo	
	u(mm)	F(N)	F(kN)	35,49703134	J	35,49708564	J
PT1	0,0000	0,00	0,00				
PT2	0,0125	138,68	0,14	0,00086675	S1		
PT3	0,0250	313,46	0,31	0,00282588	S2		
PT4	0,0375	519,42	0,52	0,00520550	S3	0,00361742	
PT5	0,0500	735,08	0,74	0,00784063	S4		
PT6	0,0625	952,32	0,95	0,01054625	S5	0,01302592	
PT7	0,0750	1191,90	1,19	0,01340138	S6		
PT8	0,0875	1435,60	1,44	0,01642188	S7	0,02390108	
PT9	0,1000	1680,40	1,68	0,01947500	S8		
PT10	0,1125	1925,90	1,93	0,02253938	S9	0,03589458	
PT11	0,1250	2171,90	2,17	0,02561125	S10		
PT12	0,1375	2417,30	2,42	0,02868250	S11	0,04814958	
PT13	0,1500	2662,60	2,66	0,03174938	S12		
PT14	0,1625	2906,00	2,91	0,03480375	S13	0,06043208	
PT15	0,1750	3154,60	3,15	0,03787875	S14		
PT16	0,1875	3404,10	3,40	0,04099188	S15	0,07267167	
PT17	0,2000	3646,90	3,65	0,04406875	S16		
PT18	0,2125	3890,70	3,89	0,04711000	S17	0,08507458	
PT19	0,2250	4132,80	4,13	0,05014688	S18		
PT20	0,2375	4373,00	4,37	0,05316125	S19	0,09726042	
PT21	0,2500	4611,70	4,61	0,05615438	S20		
PT22	0,2625	4848,60	4,85	0,05912688	S21	0,10931875	
PT23	0,2750	5083,80	5,08	0,06207750	S22		
PT24	0,2875	5317,40	5,32	0,06500750	S23	0,12120792	
PT25	0,3000	5549,00	5,55	0,06791500	S24		
PT26	0,3125	5778,90	5,78	0,07079938	S25	0,13292667	



Cálculo da Energia Absorvida no Laço de Histerese da barra SMA - Diam=12,7mm, Comp=60,0mm.

Energia em Joule (1J = 1kN * 1mm)

	Curva F(N) x u(mm)			Integração Numérica pelo Método do Trapézio Múltiplo:		Integração Numérica pelo Método de Simpson 1/3 Múltiplo	
	u(mm)	F(N)	F(kN)	257,73471000	J	257,71808000	J
PT1	0,0000	0,00	0,00				
PT2	0,1000	9483,30	9,48	0,47416500	S1		
PT3	0,2000	18932,00	18,93	1,42076500	S2		
PT4	0,3000	28346,00	28,35	2,36390000	S3	1,89550667	S1
PT5	0,4000	37726,00	37,73	3,30360000	S4		
PT6	0,5000	47072,00	47,07	4,23990000	S5	5,66806667	S2
PT7	0,6000	56384,00	56,38	5,17280000	S6		
PT8	0,7000	65661,00	65,66	6,10225000	S7	9,41326667	S3
PT9	0,8000	74906,00	74,91	7,02835000	S8		
PT10	0,9000	78056,00	78,06	7,64810000	S9	13,13113333	S4
PT11	1,0000	78237,00	78,30	7,81765000	S10		
PT12	1,1000	78536,00	78,54	7,84165000	S11	15,51423333	S5
PT13	1,2000	78774,00	78,77	7,86550000	S12		
PT14	1,3000	79011,00	79,01	7,88925000	S13	15,70716667	S6
PT15	1,4000	79246,00	79,25	7,91285000	S14		
PT16	1,5000	79480,00	79,48	7,93630000	S15	15,80213333	S7
PT17	1,6000	79713,00	79,71	7,95965000	S16		
PT18	1,7000	79944,00	79,94	7,98285000	S17	15,89596667	S8
PT19	1,8000	80174,00	80,17	8,00590000	S18		
PT20	1,9000	80403,00	80,40	8,02885000	S19	15,98876667	S9
PT21	2,0000	80630,00	80,63	8,05165000	S20		
PT22	2,1000	80856,00	80,86	8,07430000	S21	16,08053333	S10
PT23	2,2000	81081,00	81,08	8,09685000	S22		
PT24	2,3000	81304,00	81,30	8,11925000	S23	16,17116667	S11
PT25	2,4000	81527,00	81,53	8,14155000	S24		
PT26	2,5000	81748,00	81,75	8,16375000	S25	16,26080000	S12



ϕ12,7mm; L60,0mm | ϕ12,7mm, L70,0mm | ϕ12,7mm, L80,0mm | ϕ12,7mm, L90,0mm | ϕ12,7mm, L100,0mm | ϕ12,7mm, L150,0mm | ϕ12,7mm, L200,0mm | ϕ12,7mm, L250,0mm

Anexo I

Material Data Sheet

Nitinol SE508 Tubing*

PHYSICAL PROPERTIES

Melting Point:	2390°F	1310°C
Density:	0.234 lb/in^3	6.5 g/cm^3
Electrical Resistivity:	32 µohm-in	82 µohm-cm
Modulus of Elasticity:	6-11 x 10^6 psi	41-75 x 10^3 MPa
Coefficient of Thermal Expansion:	6.1 x 10^{-6}/°F	11 x 10^{-6}/°C

MECHANICAL PROPERTIES

Ultimate Tensile Strength (min. UTS):	155 x 10^3 psi	1070 MPa
Total Elongation (min):	10%	10%

SUPERELASTIC PROPERTIES

Loading Plateau Stress @ 3% strain (min):	55 x 10^3 psi	380 MPa
Permanent Set (after 6% strain) (max):	0.3%	0.3%
Transformation Temperature (A_f):	<59° F	<15° C

COMPOSITION (Meets ASTM F2063 requirements)

Nickel (nominal):	55.8 wt.%
Titanium:	Balance
Oxygen (max):	0.05 wt.%
Carbon (max):	0.02 wt.%

COMMENTS

These values should only be used as guidelines for developing material specifications. Properties of Nitinol Alloys are strongly dependent on processing history and ambient temperature. The mechanical and superelastic properties shown here are typical for standard superelastic straight tube at room temperature tested in uniaxial tension. Bending properties differ, and depend on specific geometries and applications. Modulus is dependent on temperature and strain. Larger tubes (≥ 4.0mm OD) may require custom specifications.

**All values are typical, at room temperature. SE508 is a binary alloy suitable for superelastic applications at room and/or body temperature.*

Nitinol Devices & Components • 47533 Westinghouse Drive • Fremont, California 94539
(510) 683-2000 • Fax: (510) 683-2100 • sales@nitinol.com • www.nitinol.com

NDC 02/2002

Material Data Sheet

Nitinol SE508 Wire*

PHYSICAL PROPERTIES

Melting Point:	2390°F	1310°C
Density:	0.234 lb/in^3	6.5 g/cm^3
Electrical Resistivity:	32 µohm-in	82 µohm-cm
Modulus of Elasticity:	6-11 x 10^6 psi	41-75 x 10^3 MPa
Coefficient of Thermal Expansion:	6.1 x 10^{-6}/°F	11 x 10^{-6}/°C

MECHANICAL PROPERTIES

Ultimate Tensile Strength (UTS):	160-200 x 10^3 psi	1100-1150 MPa
Total Elongation (min):	10%	10%

SUPERELASTIC PROPERTIES

Loading Plateau Stress @ 3% strain (min):	65 x 10^3 psi	450 MPa
Permanent Set (after 6% strain) (max):	0.2%	0.2%
Transformation Temperature (A_f):	41 to 64° F	5 to 18° C

COMPOSITION (Meets ASTM F2063 requirements)

Nickel (nominal):	55.8 wt.%
Titanium:	Balance
Oxygen (max):	0.05 wt.%
Carbon (max):	0.02 wt.%

COMMENTS

These values should only be used as guidelines for developing material specifications. Properties of Nitinol Alloys are strongly dependent on processing history and ambient temperature. The mechanical and superelastic properties shown here are typical for standard superelastic straight wire at room temperature tested in uniaxial tension. Bending properties differ, and depend on specific geometries and applications. Modulus is dependent on temperature and strain. Certain shapes or product configurations may require custom specifications. Materials are also available in the cold-worked or annealed conditions.

**All values are typical, at room temperature. SE508 is a binary alloy suitable for superelastic applications at room and/or body temperature.*

ndc

Nitinol Devices & Components • 47533 Westinghouse Drive • Fremont, California 94539
(510) 683-2000 • Fax: (510) 683-2100 • sales@nitinol.com • www.nitinol.com

NDC: 02/2002

Properties	Flexinol Name	025	037	050	075	100	125	150	200	250	300	375
Physical	Wire Diameter (µm)	25	37	50	75	100	125	150	200	250	300	375
	Minimum Ben Radius (mm)	1.3	1.85	2.5	3.75	5.0	6.25	7.5	10.0	12.50	15.0	18.75
	Cross-sectional Area (µm²)	490	1,075	1,960	4,420	7,850	12,270	17,700	31,420	49,100	70,700	110,450
Electrical	Linear Resistance (Ω/m)	1,770	860	510	200	150	70	50	31	20	13	8
	Recommended Current† (mA)	20	30	50	100	180	250	400	610	1,000	1,750	2,750
	Recommended Power† (W/m)	0.71	0.78	1.28	2.0	4.86	4.4	8.00	12.0	20.0	39.8	60.5
Strength*	Max. Recovery Weight @ 600 MPa (g)	29	65	117	250	469	736	1,056	1,860	2,933	4,240	6,630
	Rec. Recovery Weight @ 190 MPa (g)	7	20	35	80	150	230	330	590	930	1,250	2,000
	Rec. Deformation Weight @ 35 MPa (g)	2	4	8	815	28	43	62	110	172	245	393
Speed	Typical Contraction Speed†† (sec)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	LT Relaxation Speed†† (sec)	0.16	0.25	0.3	0.5	0.8	1.6	2.0	3.5	5.5	8.0	13.0
	LT Alloy Thermal Cycle Rate (cyc/min)	52	48	46	40	33	23	20	13	9	7	4
	HT Relaxation Speed†† (sec)	n.a.	0.09	0.1	0.2	0.4	0.9	1.2	2.2	3.5	6	10
	HT Alloy Thermal Cycle Rate (cyc/min)	n.a.	55	55	50	43	32	27	19	13	9	5

Thermal	LT Alloy	HT Alloy
Activation Start Temp. (°C)	68	88
Activation Finish Temp. (°C)	78	98
Relaxation Start Temp. (°C)	52	72
Relaxation Finish Temp. (°C)	42	62
Annealing Temp. (°C)	300	300
Melting Temp. (°C)	1,300	1,300
Specific Heat (cal/g°C)	0.077	0.077
Heat Capacity (Joule/g°C)	0.32	0.32
Latent Heat (Joule/g)	24.2	24.2

Material		
Density (g/cc)	6.45	
Maximum Recovery Force (MPa)	600	(~43 ton / in²)
Recommended Deformation Force (MPa)	35	(~2.5 ton / in²)
Breaking Strength (MPa)	1,000	(~71 ton / in²)
Poisson's Ratio	0.33	
Work Output (Joule/g)	1	
Energy Conversion Efficiency (%)	5	
Maximum Deformation Ratio (%)	8	
Recommended Deformation Ratio (%)	3-5	

Phase Related	Martensite	Austenite
Phase		
Resistivity (µΩcm)	76	82
Young's Modulus (GPa)	28	75
Magnetic Susceptibility (µemu/g)	2.5	3.8
Thermal Conductivity (W/cm°C)	0.08	0.18

† *In still air, at* 20°C.

* *To obtain force in Newtons, multiply mass in grams by 0.0098.*

†† *Depends greatly on local heating and cooling conditions. See text.*

Figure 2.8 Flexinol Muscle Wire Properties
This table shows values for various sizes of Flexinol Muscle Wires that have a transition temperature of 70°C.

Poisson's Ratio *— Describes how much a material narrows when pulled at each end (i.e. the cross-sectional shrinkage in a material under strain). For nitinol it is about 0.33 (the same as aluminum). Like Young's Modulus, this ratio varies widely, and depends greatly on the alloy's composition, training and temperature.*

Magnetic Fields & Susceptibility *Nitinol is virtually non magnetic. Also a straight wire carrying a current generates a much smaller magnetic field than does a coil of wire (as in motors and solenoids).*

Electrical Properties

Voltage, current, and resistance of a Muscle Wire follow the basic equation of electricity, Ohm's Law:

$$V = i \times R$$

voltage (in volts) equals current (in amps) times resistance (in ohms)

So if you know a wire's resistance (which varies directly with its length) and the recommended current level to activate it, you can calculate the required voltage by using Ohm's Law. For example, a 10 cm