

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM ISOLADOR DE VIBRAÇÃO
PSEUDOELÁSTICO**

BRUNO ALVES DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: EDSON PAULO DA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.

PUBLICAÇÃO: ENM - DM - 123A/08

BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO – 2008

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM ISOLADOR DE VIBRAÇÃO
PSEUDOELÁSTICO**

BRUNO ALVES DE OLIVEIRA

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

APROVADA POR:

**Prof. Edson Paulo da Silva, Dr.-Ing. (ENM-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Flaminio Levy Neto, PhD. (ENM-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Alexandre Luiz Amarante Mesquista, Dr. (UFPA)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 28 DE NOVEMBRO DE 2008

FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, BRUNO ALVES DE	
Desenvolvimento de um Isolador de Vibração Pseudoelástico [Distrito Federal] 2008. xvii, 95p., 210 x 297mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2008).	
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.	
Departamento de Engenharia Mecânica.	
1. Ligas com memória de forma	2. Isolação de vibração
3. Pseudoelasticidade	4. Isolação passivo-adaptativa
I. ENM/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, B. A. (2008). Desenvolvimento de um Isolador de Vibração Pseudoelástico. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM-DM-123A/08, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 95p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Bruno Alves de Oliveira.

TÍTULO: Desenvolvimento de um Isolador de Vibração Pseudoelástico.

GRAU: Mestre ANO: 2008

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

Bruno Alves de Oliveira
Quadra 55 lote 01 Ap. 412, Setor Central.
72.405-550 Gama – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus por ter me dado forças e oportunidades para o alcance de meus objetivos.
- À minha família, em especial à minha mãe, Maria Alves, por todo o esforço, carinho e dedicação durante toda minha vida, sempre me apoiando e incentivando aos estudos.
- Aos professores Dr.-Ing. Edson Paulo da Silva e PhD. Flávio Levy Neto, pela orientação, compreensão e dedicação para a realização deste trabalho.
- Aos amigos Weimar Castilho, Vailton Alves, Peter Faluhelyi, Thiago Elias e Edson Lucas que muito contribuíram para a conclusão deste trabalho.
- A todos os professores, técnicos, funcionários e colegas do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB, pelo apoio e amizade durante todo curso.
- À CAPES, FINATEC e ELETRONORTE pelo suporte financeiro.

RESUMO

Desenvolvimento de um Isolador de Vibração Pseudoelástico.

Autor: Bruno Alves de Oliveira

Orientador: Edson Paulo da Silva

Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas

Brasília, novembro de 2008

A pseudoelasticidade é o comportamento termomecânico da ligas com memória de forma (SMA – *Shape Memory Alloys*) observado na fase austenítica. Este comportamento está fortemente associado a uma transformação de fase martensítica induzida por tensão, e pode envolver deformações recuperáveis de até 10% em algumas ligas, conferindo a estes materiais uma grande capacidade de absorver energia mecânica. O objetivo do presente trabalho é conceber, projetar, construir e avaliar experimentalmente um isolador de vibração baseado no comportamento pseudoelástico das SMA. O isolador de vibração desenvolvido consiste de um cilindro ao qual são fixados internamente até oito fios de NiTi de até 5mm de diâmetro. Um protótipo do isolador foi construído e testado mecanicamente. Os resultados teóricos e experimentais obtidos ilustram o potencial destes materiais para isolação de vibração, e que o protótipo construído apresenta um comportamento pseudoelástico.

Palavras chave: Ligas com memória de forma; Isolação de vibração; Pseudoelasticidade; Isolação passivo-adaptativa.

ABSTRACT

Development of a Pseudoelastic Vibration Isolator

Author: Bruno Alves de Oliveira

Supervisor: Edson Paulo da Silva

Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas

Brasília, november of 2008

The pseudoelasticity is the thermomechanical behavior of the Shape Memory Alloys (SMA) observed in the austenite phase. This behavior is strongly associated with a stress induced martensite phase transformation, which can involve recoverable deformations up to 10% in some materials alloys, giving these alloys a great capacity to absorb mechanical energy. The purpose of this work is to concept, design, construct and evaluate experimentally a vibration isolator based on the pseudoelastic behaviour of SMA. The proposed isolator consists basically of a metallic cylinder with internally fixed SMA wires of up to 5mm in diameter. A prototype of the isolator was built and mechanically tested. The numerical and experimental results illustrate the potential of these materials for vibration isolation, and that the built prototype has a pseudoelastic behavior.

Key Words: Shape Memory Alloys; Vibration Isolation; Pseudoelasticity; Passive-adaptive isolation.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 – CONTEXTO E MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 – OBJETIVOS E METODOLOGIA.....	2
1.3 - ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 - ESTRUTURAS ADAPTATIVAS.....	7
2.2 - MATERIAIS FUNCIONAIS	8
2.2.1 - Materiais Piezoelétricos	8
2.2.2 - Fluidos Eletroreológicos	9
2.2.3 - Fluidos Magnetoreológicos.....	10
2.3 - LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	11
2.3.1 – Comportamento termomecânico das SMA	12
2.3.2 - Modelagem Matemática do Comportamento Termomecânico das SMA.....	14
2.3.3 - Aplicações de SMA	20
2.3.3.1 - Aplicações Convencionais.....	20
2.3.3.2 - Aplicações Potenciais	22
2.4 – CONTROLE DE VIBRAÇÃO	24
2.5 – ISOLAÇÃO DE VIBRAÇÃO	24
2.5.1 - Isoladores de Vibração Passivos.....	25
2.5.2 - Isoladores de Vibração Ativos	26
2.5.3 - Isoladores de Vibração Adaptativos	26
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 – TRATAMENTOS TÉRMICOS DA SMA	27
3.2 - ADAPTAÇÃO DA MÁQUINA MTS PARA OS ENSAIOS.....	28
3.3 – CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	30
4 – CONCEPÇÃO, PROJETO E CONSTRUÇÃO DO ISOLADOR	41
4.1 – CONCEPÇÃO	41
4.2 – PROJETO	42
4.3 – CONSTRUÇÃO.....	43
5 – MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ISOLADOR	44
5.1 - MODELAGEM MATEMÁTICA VIA LAGOUDAS.....	44
5.1.1 - Simulação para diferentes frequências.....	47

5.1.2 - Simulação para diferentes amplitudes	50
5.1.3 - Simulação para diferentes massas.....	53
5.2 - MODELAGEM MATEMÁTICA VIA DA SILVA	56
5.2.1 - Simulação para diferentes frequências de excitação.....	58
5.2.2 - Simulação para diferentes massas.....	61
6 – COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PROTÓTIPO 1.0	65
7 – CONCLUSÃO	68
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
APÊNDICES	
APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DO PROTÓTIPO 1.0	75
APÊNDICE B – DESENHOS TÉCNICOS DO PROTÓTIPO 1.0	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades da SMA (Memory Metalle, 2008).....	27
Tabela 2. Módulos de elasticidade do Fio 1 nas fases austenita (E_A) e martensita (E_M).....	33
Tabela 3. Módulos de elasticidade do Fio 2, recozido, nas fases austenita (E_A) e martensita (E_M).....	37
Tabela 4. Parâmetros da simulação via Lagoudas (2001).....	45
Tabela 5. Propriedades da SMA para Lagoudas (2001).....	46
Tabela 6. Parâmetros característicos da SMA (Da Silva, 1995).....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Diagrama esquemático de uma estrutura adaptativa.....	8
Figura 2.2. Efeito piezoelétrico. a) Direto. b) Inverso.	9
Figura 2.2. (a) Amortecedor baseado em fluido eletroreológico, (b) Embreagem baseada em fluido eletroreológico (Yang, 2001).....	9
Figura 2.3. Amortecedor a base de fluido magnetoreológico (Janocha, 1999).....	10
Figura 2.4. Gráfico esquemático da temperatura pela fração volumétrica de martensita.	11
Figura 2.5. Curva Tensão-Deformação Quasiplástica - esquemático.	12
Figura 2.6. Curva tensão-deformação Pseudoelástica- esquemático.	13
Figura 2.7. Ilustração do efeito memória de forma - esquemático.....	14
Figura 2.8. Concepção do modelo de Lagoudas - Curva tensão-deformação - Esquemático..	15
Figura 2.9. Curva tensão-deformação para carregamentos e descarregamentos parciais – Esquemático.	16
Figura 2.10. a) História de deformação prescrita – Carregamentos completos. b) Resposta Tensão-Deformação.	17
Figura 2.11. a) História de deformação prescrita – Carregamentos parciais. b) Resposta Tensão-Deformação.	18
Figura 2.12. Curvas tensão-deformação para o modelo de Da Silva - Esquemático. a) Carregamento e descarregamento completos e a linha de equilíbrio. b) Carregamento e descarregamento incompletos (Da Silva, 1995).....	18
Figura 2.13. a) História de deformação prescrita – Carregamentos completos. b) Resposta Tensão-Deformação.	20
Figura 2.14. Desenho esquemático do filtro com sua forma pré-estabelecida no interior da veia (Stoeckel <i>et al.</i> , 2002).....	21
Figura 2.15. União de tubulações via luva de SMA – esquemático (Ghandi, 1992).	21
Figura 2.16. Bordo de fuga de uma asa de avião com fios de SMA para controle de forma - esquemático.	22
Figura 3.1. Desenho esquemático do aparato experimental para caracterização mecânica do isolador.....	28
Figura 3.2. Desenho esquemático do aparato experimental para caracterização dinâmica do isolador.....	29
Figura 3.3. Curva de operação da máquina MTS 810 (Manual MTS, 2001).....	30
Figura 3.4. Curva Tensão-Deformação – Fio 1.....	31

Figura 3.5. Curva Tensão-Deformação – Fio 1.....	31
Figura 3.6. Curva Tensão-Deformação – Fio 1.....	32
Figura 3.7. Curva Tensão-Deformação – Fio2.....	33
Figura 3.8. Curva Tensão-Deformação – Fio2.....	34
Figura 3.9. Curva Tensão-Deformação – Fio2.....	35
Figura 3.10. Curva Tensão-Deformação – Fio2.....	35
Figura 3.11. Curva Tensão-Deformação – Fio2.....	36
Figura 3.12. Curva Tensão-Deformação – Fio2.....	36
Figura 3.13. Curva Tensão-Deformação cíclico para $\varepsilon_{max} = 3,25\%$ – Fio 1.	38
Figura 3.14. Curva Tensão-Deformação cíclico para $\varepsilon_{max} = 3,5\%$ – Fio 1.	38
Figura 3.15. Curva Tensão-Deformação cíclico para $\varepsilon_{max} = 4,25\%$ – Fio 1.	39
Figura 3.16. Curva Tensão-Deformação cíclico para $\varepsilon_{max} = 5\%$ – Fio 1.	39
Figura 3.17. Curva Tensão-Deformação cíclico para $\varepsilon_{max} = 7\%$ – Fio 1.	39
Figura 4.1. Desenho esquemático da seção longitudinal do Protótipo 1.0.....	41
Figura 4.2. (a) Desenho ilustrativo do Protótipo 1.0. (b) Visão da composição interna do Protótipo 1.0.....	42
Figura 4.3. Desenho esquemático da cunha.	43
Figura 5.1. Princípio de funcionamento do isolador de vibração pseudoelástico - esquemático.	44
Figura 5.2. Deslocamentos da base e da massa para os dados iniciais (Tab. (4) e (5)), $\omega =$ 50Hz.	46
Figura 5.3. Curva tensão-deformação resultante, $\omega = 50\text{Hz}$	47
Figura 5.4. Deslocamentos da base e da massa para $\omega = 25\text{Hz}$	48
Figura 5.6. Deslocamentos da base e da massa para $\omega = 80\text{Hz}$	49
Figura 5.7. Curva tensão-deformação resultante para $\omega = 80\text{Hz}$	49
Figura 5.8. Curva transmissibilidade-freqüência para $1 \leq \omega \leq 100\text{Hz}$	50
Figura 5.9. Comportamento dinâmico do sistema para $y(t) = 0,005\text{m}$	51
Figura 5.10. Curva tensão-deformação resultante para $y(t) = 0,005\text{m}$	51
Figura 5.11. Comportamento dinâmico do sistema para $y(t) = 0,05\text{m}$	52
Figura 5.12. Curva tensão-deformação resultante para $y(t) = 0,05\text{m}$	52
Figura 5.13. Deslocamentos da base e da massa para $m = 100\text{Kg}$	53
Figura 5.14. Curva tensão-deformação resultante para $m = 100\text{Kg}$	53
Figura 5.15. Deslocamentos da base e da massa para $m = 800\text{Kg}$	54

Figura 5.16. Curva tensão-deformação resultante para $m = 800\text{Kg}$	54
Figura 5.17. Deslocamentos da base e da massa para $m = 5\text{Kg}$	55
Figura 5.18. Curva tensão-deformação resultante para $m = 5\text{Kg}$	55
Figura 5.19. Deslocamentos da base e da massa para os dados iniciais (Tab. (4) e (6)), $\omega = 50\text{Hz}$	57
Figura 5.20. Curva tensão-deformação resultante para os dados iniciais (Tab. (4) e (6)), $\omega = 50\text{Hz}$	58
Figura 5.21. Deslocamentos da base e da massa para $\omega = 25\text{hz}$	59
Figura 5.22. Curva tensão-deformação resultante para $\omega = 25\text{hz}$	59
Figura 5.23. Deslocamentos da base e da massa para $\omega = 80\text{hz}$	60
Figura 5.24. Curva tensão-deformação resultante para $\omega = 80\text{hz}$	60
Figura 5.25. Deslocamentos da base e da massa para $m = 100\text{Kg}$	61
Figura 5.26. Curva tensão-deformação resultante para $m = 100\text{Kg}$	61
Figura 5.27. Deslocamentos da base e da massa para $m = 800\text{Kg}$	62
Figura 5.28. Curva tensão-deformação resultante para $m = 800\text{Kg}$	62
Figura 5.29. Deslocamentos da base e da massa para $m = 5\text{Kg}$	63
Figura 5.30. Curva tensão-deformação resultante para $m = 5\text{Kg}$	63
Figura 6.1. Ilustração dos esforços sobre o Protótipo e sobre os fios de NiTi durante os ensaios.....	65
Figura 6.3. Montagem do Protótipo 1.0 na máquina de ensaios universal MTS 810.....	65
Figura 6.4. Curva Tensão-Deformação do Protótipo 1.0 para $\epsilon_{max} = 4,5\%$	66
Figura 6.5. Curva Tensão-Deformação do Protótipo 1.0 para $\epsilon_{max} = 5\%$	66
Figura 6.6. Curva Tensão-Deformação do Protótipo 1.0 para $\epsilon_{max} = 7\%$	67
Figura 6.7. Curva Tensão-Deformação do Protótipo 1.0 para $\epsilon_{max} = 8\%$	67

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES.

A_s	Temperatura inicial de formação da austenita	[K]
A_f	Temperatura final de formação da austenita	[K]
M_s	Temperatura inicial de formação da martensita	[K]
M_f	Temperatura final de formação da martensita	[K]
A_{s0}	Temperatura inicial de formação da austenita para estado livre de tensões	[K]
A_{f0}	Temperatura final de formação da austenita para estado livre de tensões	[K]
M_{f0}	Temperatura final de formação da martensita para estado livre de tensões	[K]
M_{s0}	Temperatura inicial de formação da martensita para estado livre de tensões	[K]
d	Diâmetro	[m]
$y(t)$	Amplitude de excitação	[m]
E_A	Módulo de elasticidade da fase austenita	[GPa]
E_M	Módulo de elasticidade da fase martensita	[GPa]
F	Força	[N]
L	Comprimento	[m]
m	Massa	[Kg]
r	Raio	[m]
t	Tempo	[s]
T	Temperatura	[K]
T_0	Temperatura de referência	[K]
E_R	Módulo de elasticidade na região de descarregamento parcial	[GPa]
C	Coefficiente tensão-temperatura	[MPa/K]
H	Entalpia de transformação	[kJ/kg.K]
T_f	Temperatura de fusão	[K]
C_M	Condutividade térmica na Martensita	[W/m.K]
C_A	Condutividade térmica na Austenita	[W/m.K]
K	Módulo de encruamento	
A	Área transversal	[m ²]
R	Resistência Elétrica	[μ . Ω .cm]

$\frac{|X(t)|}{|y(t)|}$ Transmissibilidade

SÍMBOLOS GREGOS

ε	Deformação.	
σ	Tensor de tensão	[MPa]
σ_{Mf}	Tensão de formação final da Martensita	[MPa]
σ_{Ms}	Tensão de formação inicial da Martensita	[MPa]
σ_{Af}	Tensão de formação final da Austenita	[MPa]
σ_{As}	Tensão de formação inicial da Austenita	[MPa]
ε_{Af}	Deformação de formação final da Austenita	[MPa]
ε_{As}	Deformação de formação inicial da Austenita	[MPa]
ε_{Mf}	Deformação de formação final da Martensita	
ε_{Ms}	Deformação de formação inicial da Martensita	
ε_0	Deformação inelástica	
Λ	Deformação de transformação máxima.	
ε^t	Deformação de transformação	
ε_{\min}^t	Deformação de transformação mínima	
ε_{\max}^t	Deformação de transformação máxima	
σ_{\max}	Tensão máxima	[MPa]
σ_{\min}	Tensão mínima	[MPa]
ξ	Fração volumétrica de Martensita	
σ_H	Tensão para transformação de fase austenita-martensita	[MPa]
σ_{H0}	Tensão inicial para transformação de fase austenita-martensita	[MPa]
σ_L	Tensão para transformação de fase martensita-austenita	[MPa]
σ_{L0}	Tensão inicial para transformação de fase martensita-austenita	[MPa]
ε_L	Deformação para transformação de fase martensita-austenita	

ε_H	Tensão para transformação de fase austenita-martensita	
θ	Temperatura	[K]
α	Coefficiente tensão/temperatura	[MPa/K]
ε_{\max}	Deformação máxima prescrita	
ε_{\min}	Deformação mínima prescrita	
ρ	Densidade	[Kg/dm ³]
ω	Frequência de excitação	[Hz]
ω_n	Frequência natural	[Hz]

1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo destina-se a apresentar a contextualização deste trabalho, as motivações para o seu desenvolvimento, os objetivos e a metodologia utilizada.

1.1 – CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

No atual estágio do desenvolvimento científico e tecnológico na área de estruturas adaptativas para controle de forma e controle de vibração pode-se identificar a necessidade de aplicação de atuadores e sensores considerados avançados, em lugar dos convencionais (Shahin *et al.*, 1997). Os atuadores ditos avançados são baseados no emprego de materiais funcionais, que são materiais capazes de sofrer alterações de propriedades quando submetidos a determinados estímulos externos, e essas alterações podem ser exploradas de forma a permitir o emprego destes materiais como atuadores e/ou sensores (Giurgiutiu e Rogers, 1997; Ayres *et al.*, 1996). Como exemplos de materiais funcionais têm-se os materiais piezoelétricos, os fluidos eletroreológicos e magnetoreológicos e as ligas com memória de forma (SMA - *Shape Memory Alloys*), foco deste trabalho. Na indústria aeronáutica, por exemplo, o desenvolvimento de estruturas capazes de se adaptar a diferentes condições de voo tem ganhado destaque em pesquisas (Schetky, 1979).

As estruturas adaptativas são estruturas capazes de se adaptar ao meio ambiente em resposta a estímulos externos ou sinais de controle, alterando sua forma, posição, rigidez e outras propriedades, sendo compostas por sensores, atuadores e sistema de controle (Janocha, 1999). Os sensores são responsáveis pela percepção do comportamento real da variável de controle e sua transmissão aos controladores, que por sua vez tem como função comparar o valor real da variável de controle, ao valor desejado para esta variável e determinar a ação a ser executada pelo atuador, de forma a minimizar a diferença entre o comportamento real e o desejado. A função dos atuadores é realizar as intervenções no sistema de forma que a variável de controle responda adequadamente aos estímulos externos ou aos sinais de controle. (Janocha, 1999).

Devido às necessidades impostas pelas mais variadas aplicações, o emprego de materiais funcionais como atuadores e/ou sensores para o desenvolvimento de estruturas adaptativas tem sido intensamente pesquisado (Wang e Kang, 1998; Park e Shrouf, 1997; Cao e Cross, 1991; Moulson e Herbert, 1990).

Nesse contexto, identificam-se diversas aplicações potencialmente viáveis das SMA para o controle de vibração em máquinas e estruturas. O efeito memória de forma, a pseudoelasticidade e a variação de propriedades com a temperatura são características excepcionais das SMA, que permitem se vislumbrar inúmeras aplicações das SMA nas mais diversas áreas do conhecimento, mais cientificamente desafiador são aquelas aplicações em estruturas adaptativas para controle de forma e controle de vibração. Entretanto, a grande maioria das propostas de utilização da SMA nesta área carece de demonstrações experimentais de sua viabilidade técnica, e esta é a principal motivação deste trabalho.

1.2 – OBJETIVOS E METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho é desenvolver um isolador de vibração que explore o comportamento pseudoelástico das ligas com memória de forma, visando o seu emprego em máquinas e estruturas. Especificamente, os principais objetivos desse trabalho são:

- Conceber um mecanismo de isolamento de vibração que explore o comportamento pseudoelástico da ligas com memória de forma;
- Projetar e construir o isolador. Isso inclui a caracterização termomecânica da liga com memória de forma a ser utilizada, nesse caso uma liga de NiTi;
- Caracterizar mecanicamente o isolador proposto. Neste trabalho a caracterização mecânica consiste do levantamento de curvas tensão-deformação do isolador;
- Modelar e simular numericamente, em ambiente Matlab®, o comportamento dinâmico do isolador de vibração pseudoelástico.

Do ponto de vista metodológico, o sistema inspirador deste trabalho é um sistema massa-mola no qual o papel da mola é desempenhado por um elemento SMA pseudoelástico, e este sistema é suportado por uma base vibratória. O objetivo da aplicação do elemento SMA entre a base vibratória e a massa neste sistema, assim como entre uma máquina vibratória e pisos sensíveis, é explorar a sua capacidade de absorver energia na fase pseudoelástica, para reduzir a transmissibilidade do sistema. O desafio inicial foi então conceber, projetar, construir e testar este elemento SMA pseudoelástico que será então posteriormente testado dinamicamente, para se avaliar a sua capacidade de minimizar a transmissibilidade do sistema.

A partir do fenômeno da pseudoelasticidade foi concebido inicialmente um isolador de vibração cujo princípio de funcionamento está baseado no comportamento termomecânico de fios de SMA. Na Versão 1.0 o isolador tem uma configuração tal que ele trabalha apenas sob cargas compressivas, enquanto os fios de SMA seriam submetidos apenas a cargas trativas.

Uma vez concebido o princípio de funcionamento do isolador, foram selecionados e caracterizados dois fios de NiTi de diâmetros de 1,185 e 3,81mm. Com as propriedades termomecânicas do fio de 1,185 mm foi então projetado o mecanismo do isolador, que consiste basicamente de um cilindro metálico que suporta internamente um determinado número de fios de SMA, os quais estão ligados a uma haste na qual são então aplicadas solicitações mecânica compressivas. Para averiguar se o isolador concebido se comportava pseudoelasticamente foram então realizados testes de compressão no isolador e levantadas curvas tensão-deformação cíclicas.

Paralelamente ao desenvolvimento experimental, foram implementados numericamente dois modelos matemáticos para ligas com memória de forma: o modelo de Lagoudas (2001) e o modelo de Da Silva (1995). Uma vez implementados numericamente, verificou-se sua capacidade de reproduzir o comportamento termomecânico das SMA quando submetido a um ensaio de tração. Posteriormente, modelou-se o sistema massa-mola pseudoelástico utilizando os dois modelos, e simulou-se o seu comportamento para diferentes condições de operação em termos de frequência de excitação da base vibratória e de massa. Os modelos foram implementado em ambiente Matlab®. As simulações numéricas ilustram o potencial das SMA para este tipo de aplicação.

1.3 - ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi dividido em sete capítulos. O capítulo 1 apresenta a revisão contextualização do problema, as motivações para o desenvolvimento do trabalho, os objetivos e a metodologia aplicada. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre ligas com memória de forma, seu comportamento termomecânico e suas aplicações. Aborda também as estruturas adaptativas e os materiais funcionais. Os materiais e métodos são apresentados no capítulo 3. O capítulo 4 destina-se à concepção, projeto e construção do isolador de vibração pseudoelástico. No capítulo 5 são apresentados a modelagem numérica e os resultados obtidos nas simulações realizadas. No capítulo 6 são apresentadas a análise experimental do comportamento mecânico do isolador. Por fim, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões sobre o trabalho.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os materiais funcionais são materiais que possuem a capacidade de alterar alguma de suas propriedades físicas em resposta a um estímulo externo (Ghandi e Thompson, 1994). Este estímulo pode ser uma corrente elétrica, um campo magnético, tensão mecânica, variação de temperatura e outros que, quando aplicados corretamente dentro de uma faixa de trabalho útil, modificarão uma ou mais propriedades físico-químicas do material (Ghandi e Thompson, 1994).

Devido a essa capacidade de resposta a um estímulo externo, os materiais funcionais apresentam vantagens em relação aos materiais convencionais, podendo ser aplicados como sensores, atuadores e em alguns casos podem exercer as duas funções simultaneamente. Como exemplo desses materiais pode-se citar os materiais piezelétricos, os fluidos eletro e magnetoreológicos, os materiais eletro e magnetorestritivos e as ligas com memória de forma (Shape Memory Alloys – SMA) (Ghandi e Thompson, 1994).

Dentre os materiais funcionais, as SMA apresentam grande potencial de aplicação no controle de vibração em máquinas e estruturas explorando-se o efeito pseudoelástico, e para controle de forma em estruturas explorando-se o efeito memória de forma (Janocha, 1999).

Baz *et al.* (1990) desenvolveram uma análise teórico-experimental onde demonstram a possibilidade de se explorar o efeito memória de forma para o controle de vibrações em vigas engastadas. Eles analisaram o comportamento do sistema de controle sob diferentes condições de operação submetida a um degrau de deslocamento. Os resultados obtidos demonstram a potencialidade das SMA como um meio de amortecimento de vibração de sistemas flexíveis.

Clark *et al.* (1995) conceberam um dispositivo de amortecimento passivo baseado no comportamento pseudoelástico de fios de NiTi. Avaliaram o comportamento deste dispositivo através de uma série de experimentos sob diferentes i) amplitudes de deformação, ii) temperaturas ambiente e iii) frequências de carregamento. Os resultados mostram que os amortecedores baseados em NiTi apresentam uma histerese estável para pequenas variações da frequência de carregamento. Desta forma, mostraram ser possível o emprego de NiTi para projeto de dispositivos passivos de amortecimento.

Thomson *et al.* (1996) desenvolveram um trabalho teórico-experimental para análise da resposta dinâmica de uma estrutura espacial treliçada flexível com fios de NiTi. Concluíram que em algumas situações os fios de SMA podem contribuir fortemente para o amortecimento da estrutura.

Birman (1997) elaborou uma análise da influência de amortecedores pseudoelásticos de NiTi no comportamento vibratório de estruturas elásticas. Em sua análise ele considerou que os elementos com memória de forma agiam somente como dissipadores de energia, não afetando o movimento da estrutura. Os resultados demonstram que os fios de SMA na fase austenítica são muito atrativos para aumentar o amortecimento estrutural. Contudo, pôde-se identificar duas limitações das SMA para este tipo de aplicação. O primeiro está relacionado à deformação relativamente grande que é necessária para induzir a transformação de fase. O segundo é a degradação das propriedades termomecânicas da liga quando submetida a carregamentos cíclicos.

Nagaya e Takeda (1997) analisaram experimentalmente o comportamento dinâmico de um eixo suportado por mancais com memória de forma. Os resultados mostraram que as SMA podem ser aplicadas para se interferir na frequência natural da máquina afastando-a da frequência de excitação, evitando-se a ressonância.

Gotthard e Bidaux (1998) desenvolveram um trabalho onde empregaram atuadores com memória de forma para o controle de vibração de placas compósitas. Analisaram os efeitos da interação entre os atuadores de NiTi com matriz no comportamento do atuador, e a possibilidade de emprego de fios de NiTi embebidos para o controle da placa compósita. A análise lhes permitiram concluir que fios de NiTi poderiam ser empregados para o controle do comportamento vibratório de vigas compósitas e mostraram isso usando fibras de SMA para modificar ativamente as frequências de vibração de um viga polimérica. Outros trabalhos que foram desenvolvidos nesta mesma linha de pesquisa são apresentados por Willians et al. (2000), Kuang e Cantwell (2003), Roh et al. (2005), Balapgol et al. (2006) entre outros.

Eaton (1999) comprovou o benefício de se empregar elementos pseudoelásticos de NiTi para desenvolver um dispositivo passivo absorvedor de energia. Em seu estudo mostrou que um amortecedor pseudoelástico de NiTi pode ser usado com eficiência para alterar a resposta dinâmica de um sistema secundário, e que para grandes deformações o amortecedor de NiTi pode dissipar mais energia que um amortecedor viscoso.

Lau *et al.* (2002) desenvolveram um modelo analítico para a avaliação de frequências naturais de lâminas compósitas com fibra de vidro e fios de SMA. As lâminas foram fixadas em ambas as extremidades e foram feitas variações na quantidade de fios de SMA. As mudanças do módulo elástico, esforço e tensão interna da recuperação, e esforços devido à expansão térmica das lâminas e dos fios foram considerados no estudo. As frequências naturais avaliadas do modelo analítico foram consistentes com as obtidas experimentalmente. Elas diminuíram com aumento da fração volumétrica de SMA para temperaturas abaixo da

temperatura final de formação da martensita (M_f). A diminuição das frequências naturais era devido ao aumento da densidade total do compósito. Entretanto, em temperaturas acima da temperatura final da austenita, A_f , as frequências naturais diminuíram mesmo com a baixa fração de SMA.

Saadat *et al.* (2002) apresentaram um trabalho de investigação das possibilidades de utilização de SMA para prevenção de danos em telhados, focando o desenvolvimento de mecanismos mais eficazes para as conexões entre as paredes e os telhados. Foram analisadas oito configurações diferentes de sistemas de apoio, divididas em duas categorias, sendo exploradas em um único grau de liberdade. Na primeira categoria os fios de NiTi não foram pré-deformados, já na segunda categoria foram pré-deformados. Em cada categoria, foram realizadas quatro combinações diferentes de comprimento dos fios. Um modelo bi linear da tensão-deformação foram utilizados para representar o comportamento pseudoelástico dos fios de NiTi, capaz de simular o desempenho e a recuperação interna. Com os resultados verificou-se que, quando a amplitude da excitação é pequena, os fios atuam como dispositivo de aumento de rigidez. Já para amplitudes de excitação maiores, capazes de iniciar transformações de fase por tensão induzida, os fios de SMA atuam como dispositivos de isolamento de energia.

Gandhi e Chapuis (2002) analisaram o emprego de SMA para o controle passivo de vibrações de uma barra livre suportando uma massa. As simulações numéricas indicaram que o amortecimento introduzido pelos fios de SMA aumentava para amplitudes de excitação mais elevadas, pois produziam níveis mais elevados de tensão nos fios de SMA. O aumento da área de seção transversal do fio favorece o amortecimento em baixas amplitudes.

Williams *et al.* (2002) analisaram o comportamento dinâmico de um eixo suportado por mancais com memória de forma. Os experimentos realizados mostram que as SMA podem ser efetivas para se interferir na frequência natural da máquina afastando-a da frequência de excitação e evitando-se assim a ressonância.

Zak *et al.* (2003) desenvolveram uma simulação numérica de um rotor com mancal de rigidez variável utilizando método de elementos finitos. Para isso, ao mancal do rotor era adicionada uma luva de material compósito híbrido com memória de forma. Utilizaram como compósito fibra de vidro/epóxi e grafite/epóxi. Variaram a fração volumétrica de SMA na luva compósita e a quantidade de compósito. Basicamente, simularam o comportamento do sistema para duas configurações, o rotor com duas luvas, uma em cada extremidade e o rotor com apenas uma luva em uma das extremidades. Observou-se uma redução nos níveis de vibração para o sistema suportado em ambas as extremidades com ativação dos componentes

de SMA integrados. A maior redução da vibração foi obtida com o componente mais flexível, isto é, feito de poucas camadas de vidro/epóxi. Quando grafite/epóxi foi usado observou-se menor redução dos níveis de vibração, assim como para uma maior quantidade de camadas.

Yan e Nie (2003) desenvolveram uma pesquisa para explorar a pseudoelasticidade no controle de vibração. Projetaram um isolador de vibração baseado em anéis de SMA. Tal dispositivo era colocado sob a estrutura ou equipamento e, devido à força compressiva exercida pelo mesmo sobre o dispositivo, provocava uma deformação. Devido às características da SMA, o ciclo de carregamento provoca uma histerese que é utilizada para dissipação da energia proveniente de movimentos vibratórios. Foram realizados testes com duas ligas diferentes, uma pseudoelástica e outra com memória de forma. Os resultados mostraram que o isolador apresentava capacidade de amortecimento de vibração em casos com amplitudes de vibrações aleatórias.

He *et al.* (2007) propuseram o emprego de molas com memória de forma incorporadas a mancais para o controle ativo de vibração em máquinas rotativas. Em cada mola tem-se uma barra na qual circula corrente elétrica, responsável por seu aquecimento e conseqüentemente das molas de SMA.

2.1 - ESTRUTURAS ADAPTATIVAS

Estruturas adaptativas são estruturas capazes de se adaptar ao meio ambiente em resposta a estímulos externos ou sinais de controle, alterando sua forma, posição, rigidez e outras propriedades, sendo compostas por sensores, atuadores e sistema de controle (Janocha, 1999). Os atuadores são elementos que produzem movimento, atendendo a comandos que podem ser manuais ou automáticos (Janocha, 1999). Os sensores são dispositivos que recebem e respondem a um estímulo ou um sinal. Um sensor é composto por um transdutor, dispositivo que converte um tipo de energia em outra não necessariamente em um sinal elétrico, e por uma parte que converte a energia resultante em um sinal elétrico. Podem ser de indicação direta ou em par com um indicador (Ghandi, 1999). Já o sistema de controle é uma interconexão de componentes relacionados de modo a comandar, controlar ou ajustar a si mesmo ou outro sistema (Ghandi, 1999). Eles recebem as informações enviadas pelos sensores para saber qual é a atual situação do processo, enviam esta informação para o processador que executa uma lógica pré-definida e só então tem-se uma resposta para os atuadores de modo que a situação atual se iguale ou se aproxime da situação desejada (Ghandi, 1999).

A Figura (2.1) ilustra os três elementos básicos de uma estrutura adaptativa.



Figura 2.1. Diagrama esquemático de uma estrutura adaptativa.

2.2 - MATERIAIS FUNCIONAIS

Os materiais funcionais são materiais que, quando estimulados externamente, tem, pelo menos, uma propriedade significativamente alterada, como a viscosidade, volume, e rigidez, por exemplo. Estes materiais podem atuar como sensores e/ou atuadores (Ghandi, 1999).

2.2.1 - Materiais Piezoelétricos

Basicamente o efeito piezoelétrico pode ser definido como a conversão de energia mecânica em energia elétrica (direto), Figura 2.1a, ou a conversão de energia elétrica em energia mecânica (inverso), Figura 2.1b (Ikeda, 1990). O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 em cristais de quartzo pelos irmãos Pierre e Jacques Curie. Desde então tem motivado inúmeras investigações para o desenvolvimento de sistemas transdutores eletromecânicos, tendo sido a primeira aplicação tecnológica de um elemento piezoelétrico atribuída a Langevin, que desenvolveu um sonar utilizando o quartzo como elemento piezoelétrico. Na mesma época, descobriu-se que cerâmicas ferroelétricas de titanato de bário (BaTiO_3) polarizadas apresentam o efeito piezoelétrico. Isso marcou o início da geração das piezocerâmicas (Janocha, 1999).

Atualmente, os materiais piezoelétricos são utilizados como elementos sensores e/ou atuadores em aplicações tecnológicas desde baixas (na faixa de Hz) até frequências da ordem de 10^9 Hz. As baixas frequências são cobertas principalmente pelos materiais policristalinos

(cerâmicos, polímeros ou compósitos). Cristais e filmes finos, por sua vez, são os mais utilizados em aplicações de altas frequências.

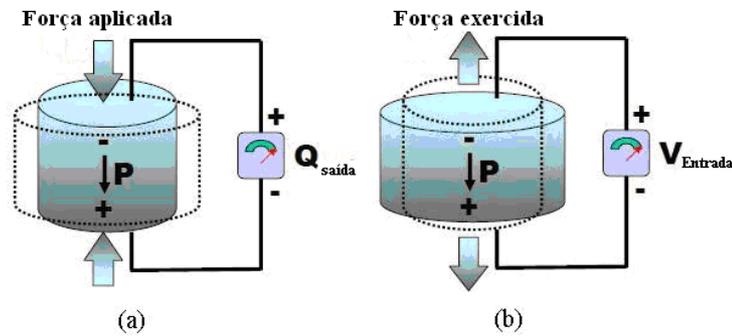


Figura 2.2. Efeito piezoelétrico. a) Direto. b) Inverso.

2.2.2 - Fluidos Eletroreológicos

Os fluidos eletroreológicos são dispersões coloidais de partículas sólidas em um meio fluido isolante, sendo as dimensões das partículas sólidas muito superiores às dimensões características das partículas do solvente (Ghandi, 1999). Quando submetidos a um campo elétrico, apresentam alterações em suas propriedades reológicas (viscosidade, por exemplo) Essas alterações permanecem até que seja aplicada uma tensão de escoamento maior que a tensão de cisalhamento do fluido ou com a retirada do campo elétrico externo (Ghandi, 1999). Podem ser aplicados como atuadores devido à possibilidade de se alterar a tensão limite de cisalhamento e a viscosidade mediante a aplicação do campo elétrico externo (Ghandi, 1999). As aplicações de fluidos eletroreológicos estão voltadas para o desenvolvimento de sistemas de transmissão e suspensão veicular (Yang, 2001). A Figura (2.2a) ilustra um esquema de um amortecedor que fornece um controle ativo de vibrações no automóvel.

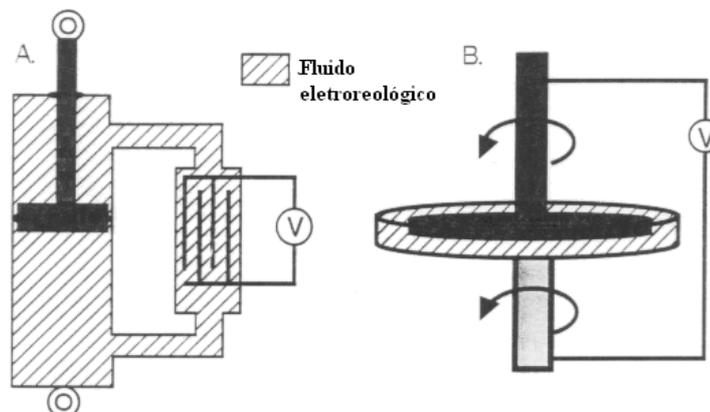


Figura 2.2. (a) Amortecedor baseado em fluido eletroreológico, (b) Embreagem baseada em fluido eletroreológico (Yang, 2001).

O amortecedor, mostrado na Figura (2.2a) transmite vibrações pelo movimento do pistão através de um líquido compressível. Variando a voltagem, varia o fluxo do fluido eletreológico, amortecendo o choque. Na Figura (2.2b), uma embreagem, une mecanicamente duas partes móveis. Variando a voltagem, ocorre variação da viscosidade do fluido, conectando um prato a outro ou deixando-o girar livremente (Yang, 2001).

2.2.3 - Fluidos Magnetoreológicos

Os fluidos magnetoreológicos são dispersões de partículas ferromagnéticas, de formato esférico ou elipsoidal, com diâmetro em torno de 1 a 5 μ m, distribuídas aleatoriamente em um líquido orgânico ou aquoso isolante que, quando submetidos a um campo magnético, sofrem alterações em suas propriedades reológicas como viscosidade, plasticidade e elasticidade (Ashour *et al.*, 1996). Por exemplo, quando o fluido é mantido entre dois pólos magnéticos, as correntes de partículas restringem o movimento do fluido, perpendicular à direção do fluxo, aumentando sua viscosidade (Ashour *et al.*, 1996). As principais aplicações são no controle ativo de vibrações e para transmissão de torque (Ashour *et al.*, 1996).

Na Figura (2.3) pode-se visualizar o esquema de um amortecedor baseado em fluido magnetoreológico.

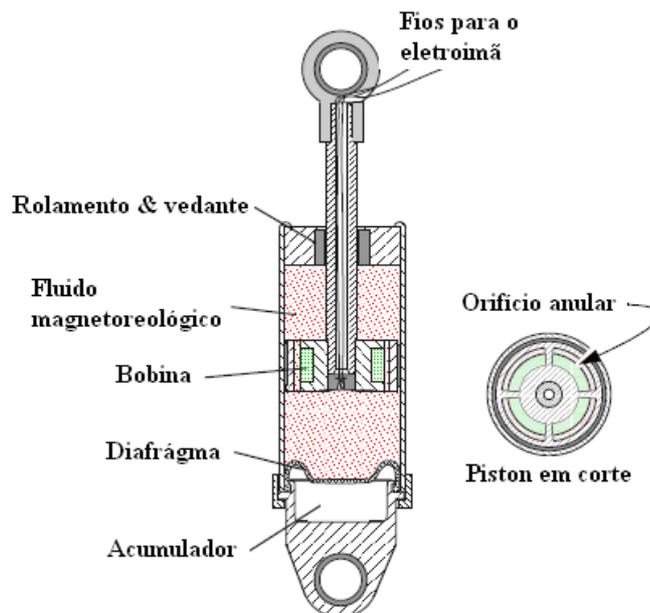


Figura 2.3. Amortecedor a base de fluido magnetoreológico (Janocha, 1999).

Outras aplicações desta natureza são freios e embreagens (Janocha, 1999).

2.3 - LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

As ligas com memória de forma (SMA - *Shape Memory Alloys*) são materiais que apresentam como característica principal a capacidade de readquirir uma forma previamente definida, quando sujeitos a uma variação de temperatura ou uma tensão mecânica. Basicamente, seu comportamento termomecânico é influenciado pela temperatura a qual se encontram. Três fenômenos podem ocorrer: quasiplasticidade, devido à variação de temperatura a certos níveis, com grande deformação residual, pseudoelasticidade, devido a tensões induzidas que provocam transformações martensíticas, ocasionando recuperação das deformações e o efeito memória de forma que consiste da recuperação, com o aumento da temperatura, da deformação quasiplástica (Delaey *et al.*, 1974).

O comportamento termomecânico das SMA é fortemente dependente da temperatura. Em função da temperatura o material assume uma fase cristalina diferente (martensita ou austenita), e os intervalos de temperatura onde essas fases existem são determinados pelas temperaturas características de transformação de fase da liga. A Figura (2.4) apresenta o gráfico esquemático da temperatura-fração volumétrica de martensita (ξ) típico para as SMA. As temperaturas de transformação de fase são denominadas por M_s (*martensite start*), M_f (*martensite finish*), A_s (*austenite start*) e A_f (*austenite finish*). Estas temperaturas de transformação de fase variam com a composição química e os tratamentos térmicos feitos na liga (Delaey *et al.*, 1974).

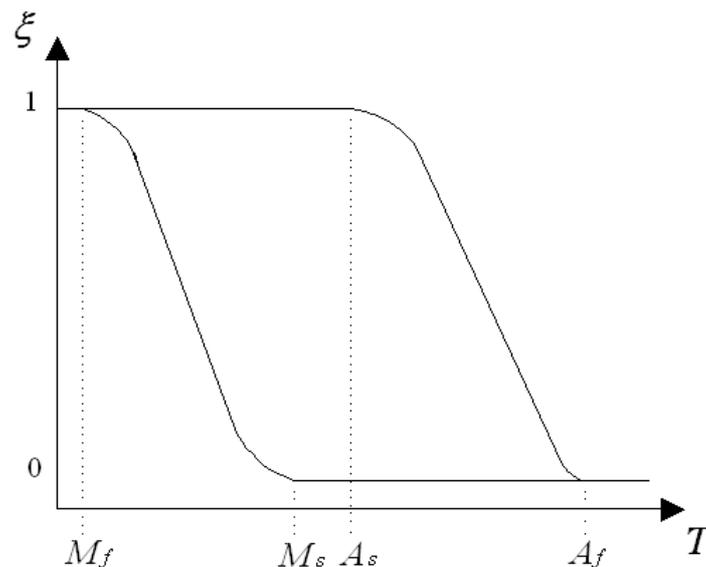


Figura 2.4. Gráfico esquemático da temperatura pela fração volumétrica de martensita.

Assim, com o resfriamento, inicia-se a formação da fase martensita em M_s , e termina em M_f , onde a liga metálica estará na fase martensita. Com o aquecimento, o material começará a mudar de fase quando a temperatura A_s for alcançada, e mantendo o aumento de temperatura até A_f a liga estará completamente na fase austenita (Delaey *et al.*, 1974).

Com a mudança de fase, outras propriedades como o módulo de elasticidade e a resistência elétrica variam. Em ambos os casos se observa um comportamento também histerético em relação à temperatura (Delaey *et al.*, 1974). A variação de módulo com a temperatura é um fenômeno no qual se baseiam algumas aplicações de SMA para o controle adaptativo de vibração (Zak *et al.*, 2003; Choi e Hwang, 2000; Willians *et al.*, 2002).

2.3.1 – Comportamento termomecânico das SMA

As transformações de fase são responsáveis por três fenômenos básicos característicos das SMA: quasiplasticidade, pseudoelasticidade e efeito memória de forma.

O fenômeno de quasiplasticidade é caracterizada por uma grande deformação residual, oriunda de uma reorientação da martensítica induzida termicamente.. Abaixo de M_f , o material submetido a uma tensão característica, sofrerá uma deformação com tensão aproximadamente constante, com comportamento elástico inicial. Assim, o material sofrerá deformação considerável, podendo chegar a até 10%, para algumas ligas. Com o descarregamento observa-se uma deformação residual denominada quasiplástica. A Figura (2.5) mostra a curva tensão-deformação quasiplástica esquemática.

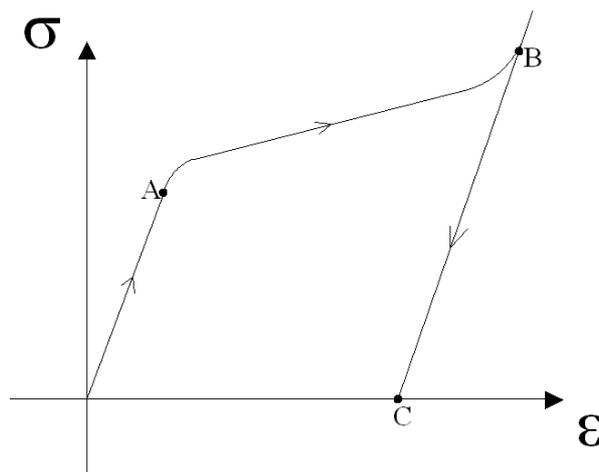


Figura 2.5. Curva Tensão-Deformação Quasiplástica - esquemático.

Na Figura (2.5), o ponto A indica o início da reorientação da martensita, o ponto B indica o fim da reorientação da martensita e o ponto C indica a deformação residual.

Já a pseudoelasticidade é caracterizada por uma recuperação de deformação, oriunda de transformações martensíticas induzidas por tensão e por reorientação da estrutura cristalina, após a retirada da carga aplicada sobre a SMA, a temperaturas acima de A_f . (Dealey *et al.*, 1974). Essas deformações podem chegar a 10% em certas ligas, sendo 8% um valor típico para as ligas NiTi (Dealey *et al.*, 1974). Ao submeter o material a uma tensão trativa, observa-se um comportamento elástico até um determinado nível de tensão $\sigma_{A \rightarrow M}$ (Figura 2.6). A partir daí observa-se uma deformação relativamente grande com pequena variação da tensão. Ao retirar a carga, a liga retorna ao seu estado inicial, descrevendo um ciclo de histerese em tensão. A área delimitada por este ciclo tensão-deformação expressa a energia absorvida durante o processo. (Dealey *et al.*, 1974).

Assim, com a temperatura da SMA superior à temperatura A_f , durante o carregamento, a austenita é estável, e o material comporta-se elasticamente até uma dada tensão crítica, quando será então iniciada a transformação de fase austenita-martensita. Dessa forma, ocorrerá a formação de uma variante martensítica que se completa quando alcançada uma deformação característica, a partir da qual o material voltará a se comportar elasticamente. Então, ao retirar-se a tensão aplicada, a liga sofre uma transformação inversa, martensita-austenita, visto que para temperatura superior à A_f , a fase martensítica é instável na ausência de tensão. Considerando a curva tensão-deformação mostrada na Figura (2.6), surgirá, devido a esse comportamento, um laço de histerese, responsável pela dissipação de energia (Dealey *et al.*, 1974).

Na Figura (2.6) pode ser visto visualizar esse comportamento através de uma curva tensão –deformação esquemática.

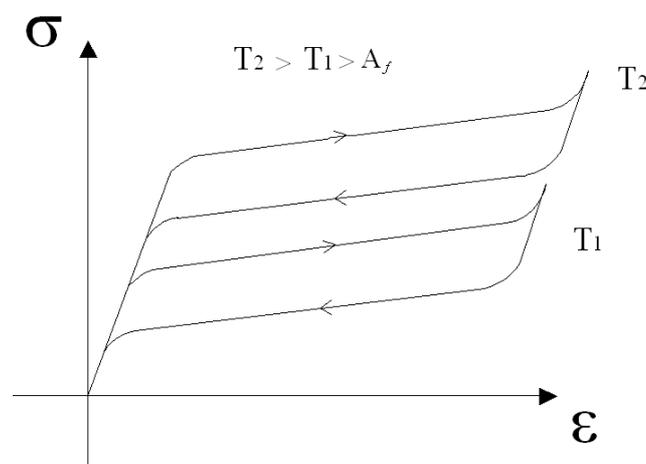


Figura 2.6. Curva tensão-deformação Pseudoelástica- esquemático.

Por fim, o efeito memória de forma consiste da recuperação da deformação quasiplástica, por meio do aquecimento acima de A_f (Dealey *et al.*, 1974). Para uma SMA, resfriada a uma temperatura inferior à M_f , tem-se uma estrutura martensítica. Com aplicação de uma tensão mecânica, obtém-se uma resposta elástica até uma dada tensão crítica, onde será iniciado um processo de reorientação da martensita, dando origem a uma variante associada à tração. Assim, durante esse processo, a tensão permanece praticamente constante até uma deformação característica, a partir da qual a SMA retorna a apresentar comportamento elástico. Com a retirada da tensão mecânica, observa-se uma deformação residual, que poderá ser recuperada com o aquecimento da SMA acima de A_f . Dessa forma, o material retornará à sua forma geométrica inicial, daí a denominação de efeito memória de forma (Dealey *et al.*, 1974).

A Figura (2.7) ilustra esquematicamente o efeito memória de forma.

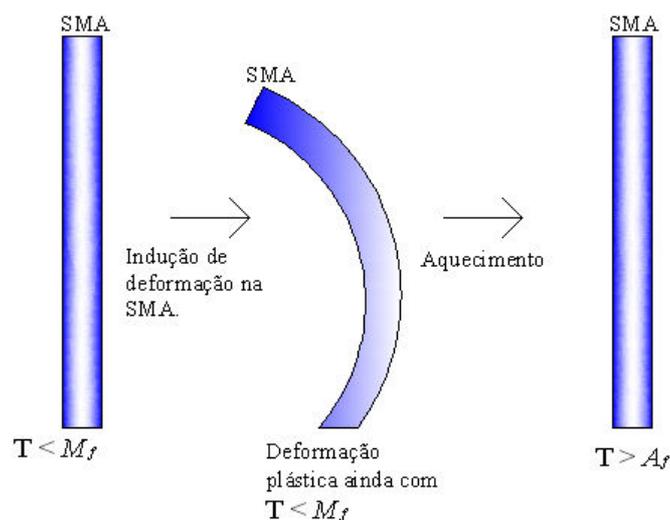


Figura 2.7. Ilustração do efeito memória de forma - esquemático.

A seguir é apresentada a modelagem matemática do comportamento termomecânico das SMA.

2.3.2 - Modelagem Matemática do Comportamento Termomecânico das SMA

Neste tópico são apresentados os dois modelos matemáticos utilizados para simular o comportamento termomecânico do fio NiTi utilizado e o comportamento mecânico do isolador de vibração.

2.3.2.1 - Modelo simplificado de Lagoudas

A Figura (2.8) ilustra a concepção do modelo simplificado de Lagoudas (Lagoudas, 2001) em um diagrama tensão-deformação. Utilizado para estimar o comportamento pseudoelástico das SMA, este modelo considera um histórico de carregamentos e descarregamentos completos, ou seja, carregamentos que permitem transformações de fase austenita - martensita completas nos dois sentidos.

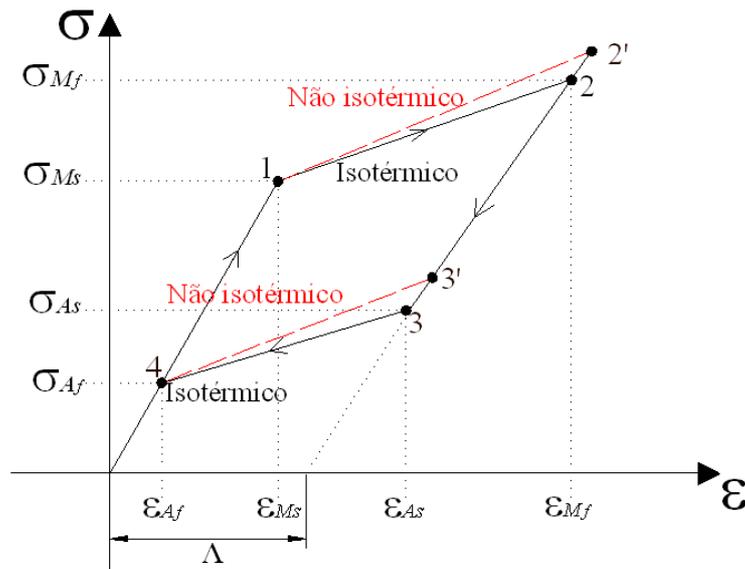


Figura 2.8. Concepção do modelo de Lagoudas - Curva tensão-deformação - Esquemático.

Assim, os valores das deformações e tensões correspondentes aos pontos 1, 2, 3 e 4 especificados no diagrama da Figura (2.8) são determinados por:

$$\sigma_{Ms} = C(T - M_{s0}), \quad (1)$$

$$\varepsilon_{Ms} = \frac{C(T - M_{s0})}{E_A}, \quad (2)$$

$$\sigma_{Mf} = C(T - M_{f0}), \quad (3)$$

$$\varepsilon_{Mf} = \Lambda + \frac{C(T - M_{f0})}{E_M}, \quad (4)$$

$$\sigma_{As} = C(T - A_{s0}), \quad (5)$$

$$\varepsilon_{As} = \Lambda + \frac{(T - A_{s0})}{E_M} , \quad (6)$$

$$\sigma_{Af} = C(T - A_{f0}) , \quad (7)$$

$$\varepsilon_{Ms} = \frac{C(T - A_{f0})}{E_M} . \quad (8)$$

onde M_{S0} , M_{f0} , A_{S0} , e A_{f0} são as temperaturas de início e fim de transformação de cada fase num estado livre de tensões e deformações, C o coeficiente tensão-temperatura, E_A o módulo de elasticidade da fase austenita, E_M o módulo de elasticidade da fase martensita e T a temperatura. Com esses valores críticos, é possível então construir a curva tensão-deformação, dado um carregamento prescrito. Por exemplo, para a fase elástica e sendo ε^t a deformação de transformação, tem-se que:

$$\varepsilon^t = 0 , \quad (9)$$

$$\sigma = E_A(\varepsilon) . \quad (10)$$

Para que o modelo mostrado na Figura (2.8) possa descrever carregamentos e descarregamentos parciais, modificam-se as equações que determinam a deformação de transformação e a tensão para cada fase. Obtem-se então a curva tensão-deformação mostrada na Figura (2.9).

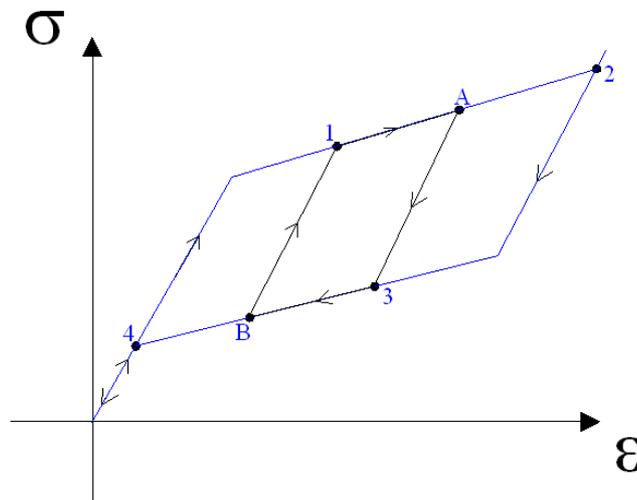


Figura 2.9. Curva tensão-deformação para carregamentos e descarregamentos parciais – Esquemático.

Os valores de deformação e tensão dos pontos A e B são armazenados ($\varepsilon_{\max}, \sigma_{\max}, \varepsilon_{\min}$ e σ_{\min} , respectivamente). Calcula-se então a deformação de transformação em A e B (ε_{\max}^t e ε_{\min}^t , respectivamente). Sendo Λ a deformação de transformação máxima, E_R o módulo de elasticidade da SMA para a região de descarregamento parcial e σ a tensão nessa mesma região, tem-se:

$$\varepsilon_{\max}^t = \frac{\Lambda(\varepsilon - \varepsilon_{Ms})}{(\varepsilon_{Mf} - \varepsilon_{Ms})}, \quad (11)$$

$$\varepsilon_{\min}^t = \Lambda - \frac{\Lambda(\varepsilon - \varepsilon_{As})}{(\varepsilon_{As} - \varepsilon_{Af})}, \quad (12)$$

$$E_R = \frac{E_M E_A}{\frac{\varepsilon_{\max}^t}{\Lambda}(E_A - E_M) + E_M}, \quad (13)$$

$$\sigma = \sigma_{\max} + E_R(\varepsilon - \varepsilon_{\max}). \quad (14)$$

As equações (1) a (14) foram utilizadas para simular o comportamento pseudoelástico de uma SMA para carregamentos completos e parciais, e, posteriormente, para simular o comportamento dinâmico de um isolador de vibração pseudoelástico.

As Figuras (2.10) e (2.11) apresentam a resposta numérica do modelo para um ensaio de tração-compressão de um corpo de prova pseudoelástico. Na Figura (2.10(a)) apresenta-se a história de deformação imposta e na Figura (2.10(b)) a resposta do corpo de prova para carregamento completo. Já nas Figuras (2.11(a)) e (2.11(b)) tem-se a resposta do material para carregamentos parciais. Os resultados mostram que o modelo é capaz de reproduzir as principais características do comportamento termomecânico das SMA.

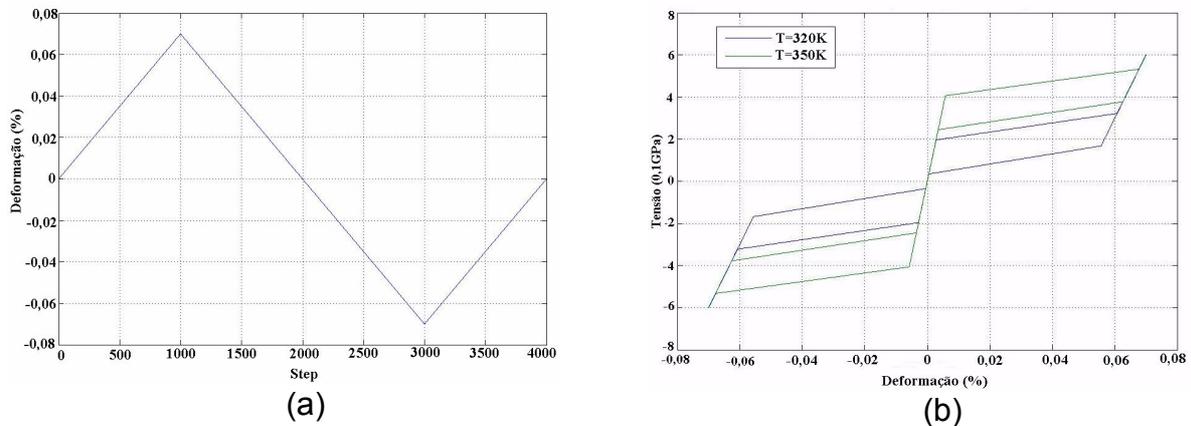


Figura 2.10. a) História de deformação prescrita – Carregamentos completos. b) Resposta Tensão-Deformação.

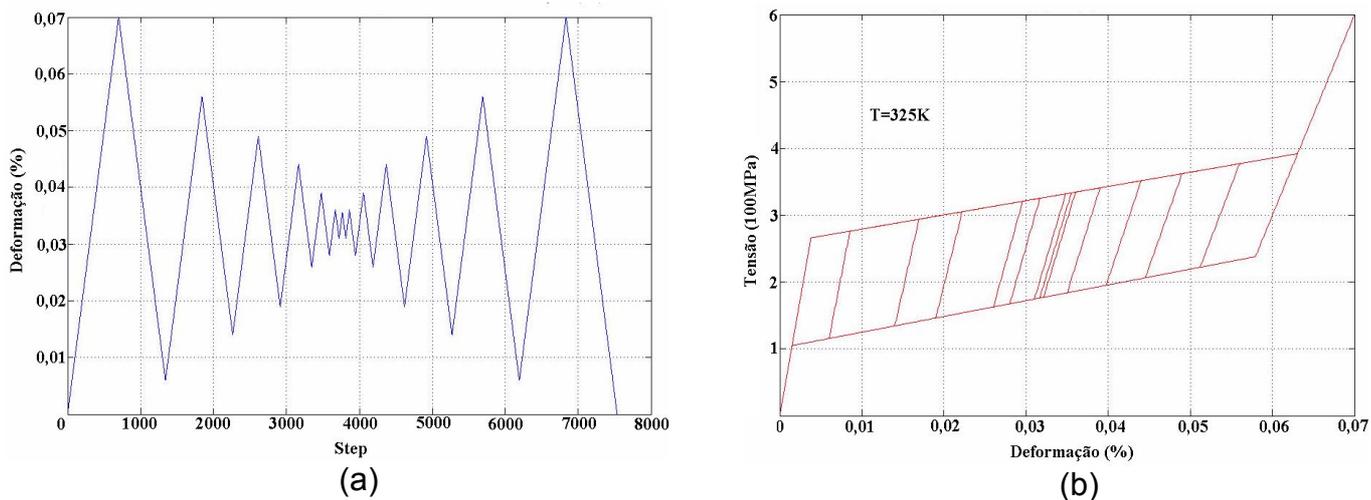


Figura 2.11. a) História de deformação prescrita – Carregamentos parciais. b) Resposta Tensão-Deformação.

2.3.2.2 – Modelo de Da Silva

O modelo de Da Silva (Da Silva, 1995) considera a existência de uma linha de equilíbrio na região de transformação de fase dentro do loop histerético, como mostrado na Figura (2.12(a)). A Figura (2.12(a)) apresenta o comportamento pseudoelástico de acordo com o modelo de Da Silva (1995), quando a SMA é submetida a uma história de carregamento e descarregamento completos. Na Figura (2.12(b)), tem-se a curva tensão-deformação para carregamentos e descarregamentos parciais.

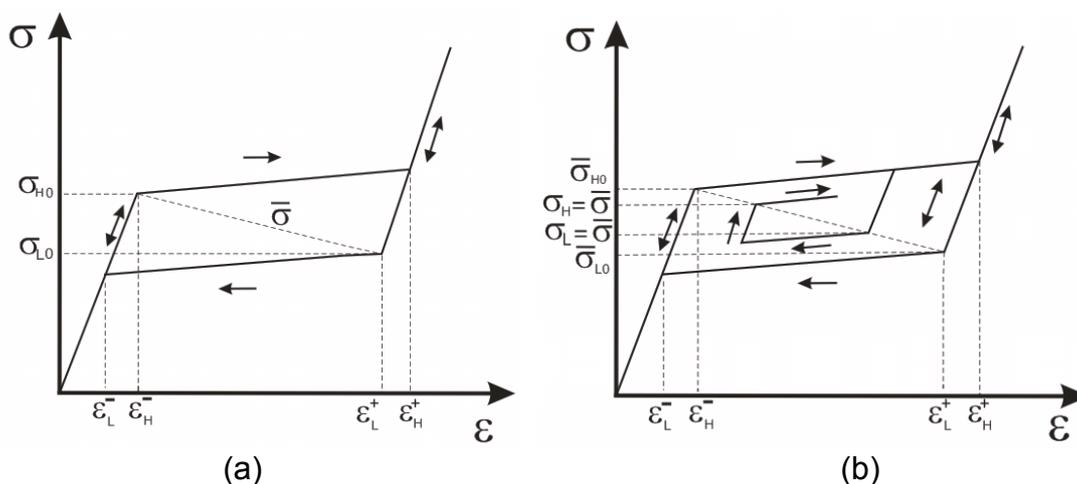


Figura 2.12. Curvas tensão-deformação para o modelo de Da Silva - Esquemático. a) Carregamento e descarregamento completos e a linha de equilíbrio. b) Carregamento e descarregamento incompletos (Da Silva, 1995).

Para a fase elástica, tem-se:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (15)$$

onde σ é a tensão, ε a deformação e E é o módulo de elasticidade.

Se uma tensão acima de σ_{H0} é atingida, o material experimenta uma transformação para a fase martensítica. Essa transformação é caracterizada pelo aparecimento de uma deformação inelástica. Na região elástica, após a transformação de fase a tensão é dada por:

$$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_0), \quad (16)$$

onde ε_0 é a deformação inelástica.

Da mesma forma, quando a tensão atinge σ_L , a martensita sofre uma transformação para a fase austenítica. Para transformações de fase incompletas, a relação tensão-deformação para a mistura de fases é expressa por:

$$\sigma = E(\varepsilon - \xi\varepsilon_0), \quad (17)$$

onde ξ é a fração volumétrica de martensita.

Considere que a tensão σ_H associada à transformação da austenita em martensita é uma função linear tanto da temperatura quanto da deformação ε . A mesma hipótese é considerada para σ_L que corresponde à transformação reversa. Tem-se então que:

$$\sigma_H(\theta, \varepsilon) = \sigma_{H0} + \alpha(\theta - \theta_0) + K(\varepsilon - \varepsilon_H^-(\theta)), \quad (18)$$

$$\sigma_L(\theta, \varepsilon) = \sigma_{L0} + \alpha(\theta - \theta_0) - K(\varepsilon_L^+(\theta) - \varepsilon), \quad (19)$$

$$\varepsilon_H^-(\theta) = \frac{1}{E}[\sigma_{H0} + \alpha(\theta - \theta_0)], \quad (20)$$

$$\varepsilon_L^+(\theta) = \frac{1}{E}[\sigma_{L0} + \alpha(\theta - \theta_0)], \quad (21)$$

onde θ é a temperatura, θ_0 é a temperatura de referência, α é o coeficiente de tensão/temperatura e K é o módulo de encruamento. Para a linha de equilíbrio tem-se:

$$\bar{\varepsilon}(\xi) = \frac{\varepsilon_L^+(E\xi\varepsilon_0 + \sigma_{H0}) - \varepsilon_H^+(E\xi\varepsilon_0 + \sigma_{L0})}{E(\varepsilon_L^+ - \varepsilon_H^+) + (\sigma_{H0} - \sigma_{L0})}, \quad (22)$$

$$\bar{\sigma}(\xi) = \frac{E(\sigma_{H0}(\varepsilon_L^+ - \xi\varepsilon_0) + \sigma_{L0}(\xi\varepsilon_0 - \varepsilon_H^+))}{E(\varepsilon_L^+ - \varepsilon_H^+) + (\sigma_{H0} - \sigma_{L0})} \quad (23)$$

A Figura(2.13) apresenta a resposta numérica do modelo para um ensaio de tração-compressão de um corpo de prova pseudoelástico, com $E = 70\text{GPa}$, $\varepsilon_0 = 0,06$, $\sigma_{H0} = 0,45\text{GPa}$, $\sigma_{L0} = 0,3\text{GPa}$, $\alpha = 1\text{MPa}/^\circ\text{K}$ e $K = 0,8\text{GPa}$.

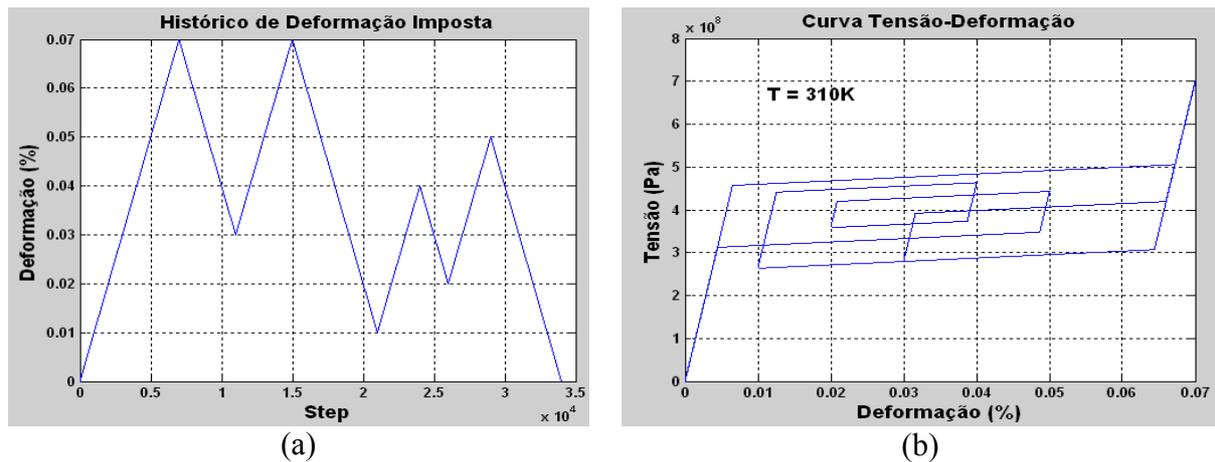


Figura 2.13. a) História de deformação prescrita – Carregamentos completos. b) Resposta Tensão-Deformação.

2.3.3 - Aplicações de SMA

As SMA têm um grande potencial de aplicação em diversas áreas do conhecimento tais como engenharia, medicina, odontologia e outras. Neste item serão apresentadas algumas das aplicações de SMA, as quais serão divididas em: i) aplicações convencionais e ii) potenciais. Considera-se aqui aplicações convencionais aquelas cuja viabilidade técnica e comercial já foram de alguma forma demonstradas. E aplicações potenciais aquelas que são vislumbradas com base no comportamento termomecânico das SMA, mas que ainda carecem de demonstração de sua viabilidade técnica e/ou comercial. E neste segundo grupo que se concentram as pesquisas em SMA.

2.3.3.1 - Aplicações Convencionais

Devido ao efeito memória de forma, as SMA têm sido utilizadas na fabricação de filtros para retirada de coágulos sanguíneos (Stoeckel *et al.*, 2002). Nessa aplicação o fio de SMA sofre tratamentos termomecânicos para assumir uma determinada forma, a qual permitirá sua fixação às paredes internas das veias. Esse filtro é deformado a baixa temperatura e inserido

na veia obstruída. Com o aquecimento devido ao calor do corpo humano ele retoma à forma pré-definida. Na Figura (2.14) pode-se visualizar um desenho esquemático desse filtro no interior da veia (Stoeckel *et al.*, 2002).

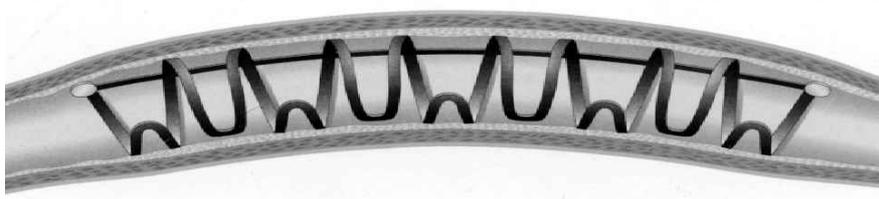


Figura 2.14. Desenho esquemático do filtro com sua forma pré-estabelecida no interior da veia (Stoeckel *et al.*, 2002).

A pseudoelasticidade pode se explorada para de luvas para união para fabricação de acoplamentos de tubulações. Estas luvas têm a forma de anéis cilíndricos de diâmetro ligeiramente inferior ao dos tubos que devem ser unidos. À baixa temperatura, na fase martensítica, elas são expandidas, posteriormente são aquecidos até A_f , sofrendo uma contração que permite estabelecer uma ligação rígida entre as extremidades dos tubos em que foram montadas. Na Figura (2.15) pode-se visualizar essa aplicação (Ghandi, 1992).

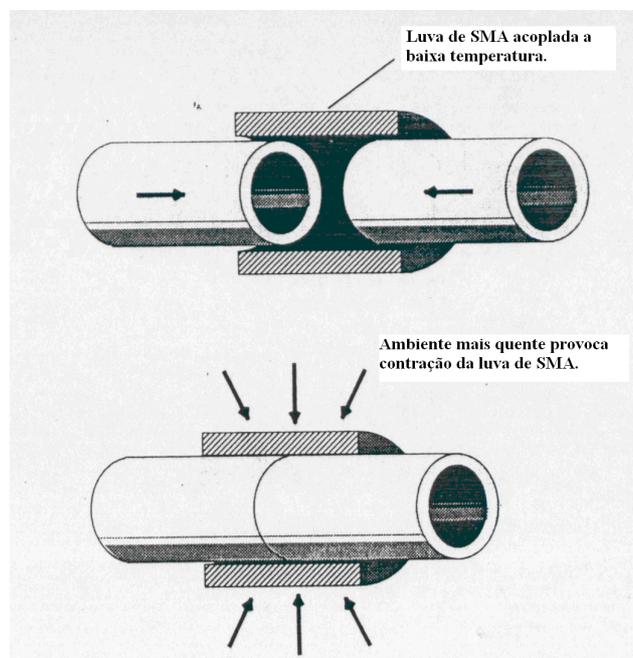


Figura 2.15. União de tubulações via luva de SMA – esquemático (Ghandi, 1992).

Em outras aplicações o componente com memória de forma exerce uma força significativa ao longo de um dado percurso, em alguns casos por um grande número de ciclos. Nesse caso,

utilizam-se os elementos com memória de forma como atuadores, por exemplo, conectores de placas de circuitos impressos. Nesse processo, o conector é aquecido, força a abertura de uma mola, o que permite inserir ou retirar placas sem aplicação de esforço. Com o resfriamento, o atuador de SMA é facilmente deformado, permitindo o ajuste do conector. Outro exemplo seriam as válvulas de segurança contra incêndio que incorpora um atuador projetado para cortar o fluxo de gases tóxicos ou inflamáveis em caso de incêndio em um edifício (Bush *et al.*, 1992).

Outras aplicações comerciais foram desenvolvidas explorando o fenômeno da pseudoelasticidade, tais como: fios para direcionamento de cateteres, arcos ortodônticos usados em ortodontia para correção do posicionamento dentário, entre outras (Stoeckel *et al.*, 2002).

As ligas NiTi são as mais utilizadas na bioengenharia. Esse fato se deve a excelente resistência à corrosão e excelente biocompatibilidade (Stoeckel *et al.*, 2002).

2.3.3.2 - Aplicações Potenciais

Baseando-se no comportamento termomecânico das SMA diversas aplicações têm sido propostas. Entre essas, destacam-se aqui as aplicações para controle de forma e controle de vibração.

Controle de Forma

As SMA apresentam grande potencial de aplicação em controle de forma. Diversos trabalhos exploram principalmente o efeito memora de forma aplicando SMA como atuadores (Zhang *et al.*, 1994; Rogers e Liang, 1997; Zak, *et al.*, 2003). Aqui pode-se destacar a proposta e aplicação das SMA para controle de forma de aerofólio (Schetky, 1979). A Figura 2.16 ilustra um princípio aplicação das SMA para controle de forma, onde a geometria da estrutura é controlada por meio da ativação de fios de SMA (Schetky, 1979).

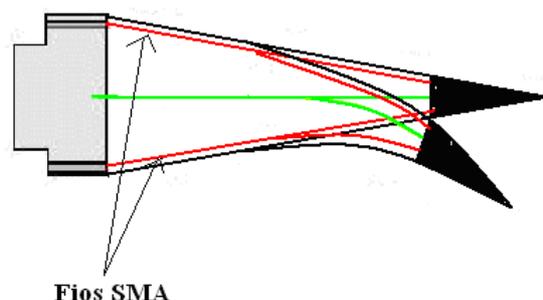


Figura 2.16. Bordo de fuga de uma asa de avião com fios de SMA para controle de forma - esquemático.

Controle de Vibração

Diversos trabalhos apresentam propostas de aplicação das SMA para controle de vibração, tais como Clark *et al.* (1995), Nagaya *et al.* (1997), Gandhi e Chapius (2002), entre outros.

Uma aplicação potencial desta categoria é o desenvolvimento de mancais com rigidez variável para controle de vibração em máquinas rotativas. Williams *et al.* (2002), analisaram o comportamento dinâmico de um eixo suportado por mancais com memória de forma. Seus experimentos mostram que as SMA podem ser efetivas para se interferir na frequência natural da máquina afastando-a da frequência de excitação e evitando-se assim a ressonância. Gotthard e Bidaux (1998) exploraram o emprego de atuadores com memória de forma (NiTi) para o controle de vibração de placas compósitas (estruturas SMAHC). Analisaram os efeitos da interação entre os atuadores de NiTi e a matriz no comportamento do atuador, e a possibilidade de emprego de fios de NiTi embebidos para o controle de vibração da placa compósita. A análise permitiu concluir que fios de NiTi podem ser empregados para o controle do comportamento vibratório de vigas compósitas.

Entre as propostas de aplicação das SMA para controle de vibração podem-se identificar aplicações em controle de vibração ativo, passivo e adaptativo (Meirovitch, 1990).

No controle de vibração ativo utiliza-se energia externa para absorver a energia vibratória. Já no controle passivo de vibrações a energia vibratória é absorvida sem a necessidade de energia externa. Por fim, o controle adaptativo de vibração envolve a incorporação de um material com comportamento conhecido e controlável ao sistema para controlar a vibração (Meirovitch, 1990).

As propostas de aplicação das SMA para o controle ativo de vibrações exploram o efeito memória de forma. Nesta linha de pesquisa vale destacar os trabalhos de Gotthard e Bidaux (1998) e Baz *et al.* (1990) entre outros.

Já as propostas para o desenvolvimento de sistemas de controle passivo de vibração via SMA exploram basicamente seu comportamento pseudoelástico. Nesta linha destacam-se os trabalhos de Clark *et al.* (1995), Thomson *et al.* (1996) e Eaton (1999), entre outros.

Existem também propostas para aplicação das SMA para controle de vibração adaptativo outra linha de pesquisa muito promissora que busca explorar exclusivamente a variação de elasticidade das SMA por aquecimento, para desenvolver elementos de máquinas com rigidez variável. Nesta linha de pesquisa destacam-se os trabalhos de Williams *et al.* (2002), Zak *et al.* (2003) e He *et al.* (2006), entre outros.

2.4 – CONTROLE DE VIBRAÇÃO

Máquinas e equipamentos quando submetidos a carregamentos dinâmicos estão sujeitos a vibrações mecânicas que, dependendo da intensidade podem ser prejudiciais à estrutura dos mesmos (Rao, 2004). Para evitar esse tipo de problema, existem três tipos principais de controle de vibração: ativo, passivo e adaptativo (Meirovitch, 1990).

No controle de vibração ativo utiliza-se energia externa para absorver a energia vibratória. Já no controle passivo de vibrações a energia vibratória é absorvida sem a necessidade de energia externa. Por fim, o controle adaptativo de vibração envolve a incorporação de um material com comportamento controlável ao sistema para controlar a vibração (Meirovitch, 1990).

2.5 – ISOLAÇÃO DE VIBRAÇÃO

Qualquer tipo de máquina, quando em operação, transmite vibração à superfície sobre a qual está apoiada, resultante dos esforços de seus componentes internos (massas em rotação) ou de choques inerentes à máquina gerados durante sua operação (esforços ligados ao mecanismo ou processo não balanceados). Conforme o tipo de máquina, esta vibração se manifesta em maior ou menor grau.

A isolação de vibração pode ser definida como o processo pelo qual os efeitos da vibração são minimizados (Meirovitch, 1990). Os isoladores de vibração são dispositivos capazes de reduzir as interações entre uma fonte de vibração e um equipamento ou estrutura, através da absorção das vibrações mecânicas (Meirovitch, 1990). Basicamente, insere-se o isolador entre a fonte de vibração e a estrutura ou equipamento, de modo a evitar ou reduzir a transmissibilidade do movimento vibratório. Essa transmissibilidade é definida como a relação entre a magnitude do deslocamento ou força transmitida à estrutura ou equipamento e a magnitude da fonte de vibração (Meirovitch, 1990). Os isoladores de vibração podem ser classificados em isoladores passivos, quando sua capacidade de amortecimento é constante, determinada pelas propriedades dos seus materiais e sua estrutura de construção, e isoladores ativos, nos quais sua capacidade de amortecimento pode ser controlada (Meirovitch, 1990). Os isoladores de vibração podem ser classificados em isoladores passivos, ativos e adaptativos (Meirovitch, 1990).

2.5.1 - Isoladores de Vibração Passivos

Os isoladores passivos possuem capacidade de amortecimento constante, determinada basicamente pelas características de rigidez e amortecimento estabelecidas quando do projeto. (Meirovitch, 1990). São assim classificados os isoladores viscosos, os viscoelásticos, os baseados em atrito, em histerese, os isoladores baseados em SMA, entre outros (Meirovitch, 1990).

Os isoladores viscosos são dispositivos a base de fluido com comportamento aproximadamente linear a baixas frequências de vibração, e comportamento não-linear a altas frequências. Os isoladores viscosos lineares têm sido aplicados com êxito em automóveis, além de pontes e edifícios de grande altura para controle dos efeitos do vento e das vibrações sísmicas (Weber *et al.*, 2006).

Os isoladores viscoelásticos são baseados em materiais que apresentam comportamento viscoelástico, podendo resistir a deformações constantes. Esses materiais apresentam capacidade de absorção de vibração que depende da temperatura ambiente e do próprio material, da frequência de excitação e da carga aplicada. Suas principais aplicações são em máquinas, base de isolamento de sistemas, amortecimento de vibrações de edifícios e pontes (Weber *et al.*, 2006).

Os isoladores de vibração baseados em atrito operam através da utilização de um material de atrito interno para transformar a energia proveniente da vibração estrutural em calor. São frequentemente utilizados para redução de vibração dentro torres e pontes. Particularmente, eles são utilizados em bases de isolamento de sistemas, peças ou perfis ocos como amortecimento material, e aplicações automotivas (Weber *et al.*, 2006).

Outro tipo de isolador de vibração é o que se baseia na capacidade de dissipação de energia devido às deformações inelásticas de materiais metálicos. Esse tipo de isolador é conhecido como "histerético", sendo aplicado para controle estrutural, em especial, no desenvolvimento de sistemas de dissipação passivos de energia devido movimentos sísmicos e como base de sistemas de isolação e fundação de superestruturas (Weber *et al.*, 2006).

Existe ainda outro modelo de isolador de vibração passivo conhecido como isolador de vibração harmônico ou TMD (*Tuned Mass Damper*), um dispositivo que consiste, em sua forma mais simples, de uma massa sólida anexada a uma estrutura (sistema primário) com mola e amortecedor. Esse dispositivo possibilita a dissipação de energia em uma pequena faixa de frequências. Como a alta transferência de energia ocorre sempre que a frequência natural do TDM está harmonizada com a frequência natural da estrutura primária, o

dispositivo atenuará apenas um modo vibração específico. Os TMD têm sido utilizados com sucesso, para controle de vibrações em pontes e escadas rolantes, além de torres, chaminés e estruturas que sofrem oscilações devido ao vento (Weber *et al.*, 2006).

Existem ainda os isoladores harmônicos de líquido (TLD – *Tuned Liquid Damper*) cujo princípio básico é semelhante à de um TMD diferenciando apenas na massa que nesse caso é um líquido e, os isoladores de vibração baseados nas propriedades das SMA (Weber *et al.*, 2006).

2.5.2 - Isoladores de Vibração Ativos

Os isoladores de vibração ativos são aqueles que podem ter sua capacidade de dissipação de energia modificada por algum estímulo externo. A quantidade de dissipação da energia pelo dispositivo é ajustada através de um sistema de controle. (Meirovitch, 1990). São classificados como isoladores de vibração ativos alguns isoladores baseados em fluidos magnetoreológicos e eletroreológicos dentre outros (Meirovitch, 1990).

2.5.3 - Isoladores de Vibração Adaptativos

Os isoladores de vibração adaptativos são aqueles que permitem o controle de sua capacidade de dissipação de energia, através de um sistema de controle, possibilitando uma rápida readaptação das características do isolador através da aquisição e análise constante dos dados de entrada e saída. Isoladores baseados em fluidos magneto e eletroreológicos, SMA e outros, podem ser classificados também como isoladores de vibração adaptativos (Meirovitch, 1990).

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

3.1 – TRATAMENTOS TÉRMICOS DA SMA

Neste trabalho foram utilizados fios de liga de NiTi pseudoelástico, com 55.91% de Ni e 44.08% de Ti em peso, com diâmetros de 1,185mm e 3,81mm. Trata-se de uma liga austenítica à temperatura ambiente.

Devido ao seu processo de fabricação (trefilação a frio), os fios de SMA sofrem indução de tensões, as quais devem ser eliminadas para que o material apresente suas propriedades características. Dessa forma, os fios de SMA devem ser submetidos a um tratamento térmico de recozimento. Os fios com 3,81mm de diâmetro foram recozidos à temperatura de 415°C durante 20 minutos, em um forno *Laboratory Muffle Furnace* LM 312.06 SO 1063, da fabricante *Linn Elekytro Therm* GMBH, e resfriado ao ar ambiente após retirar do forno, para eliminar as tensões residuais, permitindo, assim, que toda sua capacidade de deformação possa ser alcançada. Já os fios com 1,185mm de diâmetro foram tratados termicamente pelo fabricante e usados nos ensaios diretamente, sem nenhum tratamento adicional.

As propriedades dos fios de SMA pseudoelástico usados neste trabalho são apresentadas na Tab. (1), através de dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 1. Propriedades da SMA (Memory Metalle, 2008).

Símbolo	Valor
A_s	-10,5°C
A_f	-3,5.°C
H	0,47-0,62 kJ/Kg.K
T_f	1.310°C
C_M	9W/m.K
C_A	8W/m.K
R	50-110 $\mu\Omega$ cm
ρ	6,45 g/cm ³

3.2 - ADAPTAÇÃO DA MÁQUINA MTS PARA OS ENSAIOS

Os testes de caracterização mecânica da SMA e do isolador de vibração realizados neste trabalho foram obtidos por ensaios de tração-compressão estáticos e cíclicos. Para isso, foi utilizada uma máquina de ensaios universal MTS 810 (*Material Test System- 810*). A máquina permite ser operada com controle de força ou de deslocamento, que se dá através de um dispositivo hidráulico. A MTS 810 propicia uma ampla capacidade de testes de tração e compressão, estáticos e cíclicos. É controlada por programa específico fornecido pelo fabricante, e através deste é que se ativa a bomba e o atuador hidráulico, para que se efetue o teste. As garras de fixação dos corpos de prova também são acionadas hidráulicamente, de maneira que se pode variar a pressão nas mesmas, utilizando um controlador na base da própria máquina. Possui uma célula de carga, que mede a força aplicada aos corpos de prova, com erro inferior a 1%, em uma faixa de 1KN a 100KN.

O aparato experimental utilizado para a realização dos testes de caracterização mecânica do isolador pode ser visualizado esquematicamente na Figura (3.1).

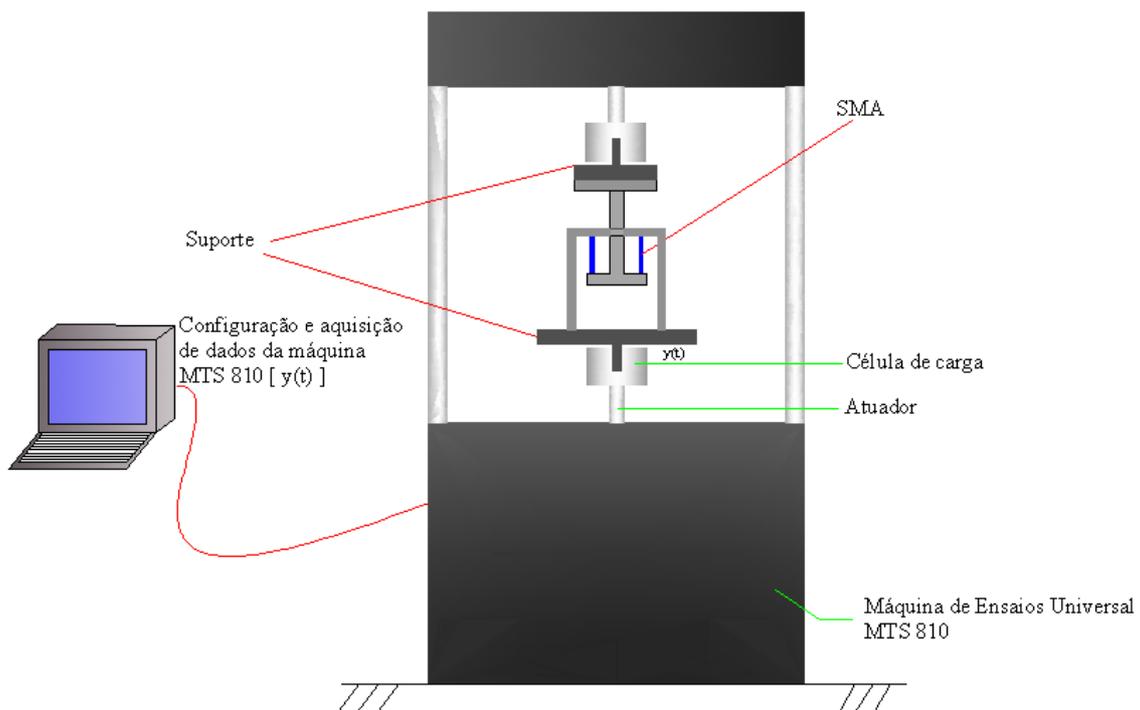


Figura 3.1. Desenho esquemático do aparato experimental para caracterização mecânica do isolador.

Para a realização dos ensaios de caracterização mecânica do isolador de vibração, foram necessárias algumas adaptações na máquina tanto para a aquisição dos dados quanto para a fixação do isolador na máquina. Foi fixada, na garra inferior, uma base metálica plana para

apoio do isolador (suporte). Na garra superior fixou-se um punção para aplicação da carga sem danificar a estrutura da máquina MTS 810.

Pretendia-se ainda realizar ensaios de caracterização dinâmica do isolador para determinação de sua capacidade de absorção. Para isso, seriam necessárias mais algumas adaptações em relação aos testes anteriores. Neste caso, uma estrutura de apoio para a massa, composta por barras de aço e rolamentos, deveria ser fixada na base inferior da máquina. Sobre a massa seria fixado um acelerômetro para aferição de seu deslocamento durante os testes dinâmicos e como a central única de processamento (CPU) da máquina MTS 810 apenas armazena os dados de força e deslocamento aplicados pelo atuador hidráulico, para a medição da deformação sofrida pelos fios de SMA faz-se necessário incorporar um “chip” acelerômetro ADXL78, modelo AD22279 da fabricante Analog Devices, fixado no suporte interno de fixação dos fios no isolador para a aferição do deslocamento sofrido pelos fios de SMA ligado a um aquisitor de dados Lynx e, com esses dados, determinar a deformação sofrida pelos mesmos. Na Figura (3.2), pode-se visualizar, esquematicamente, o aparato experimental que seria utilizado nos testes de caracterização dinâmica do isolador de vibração.

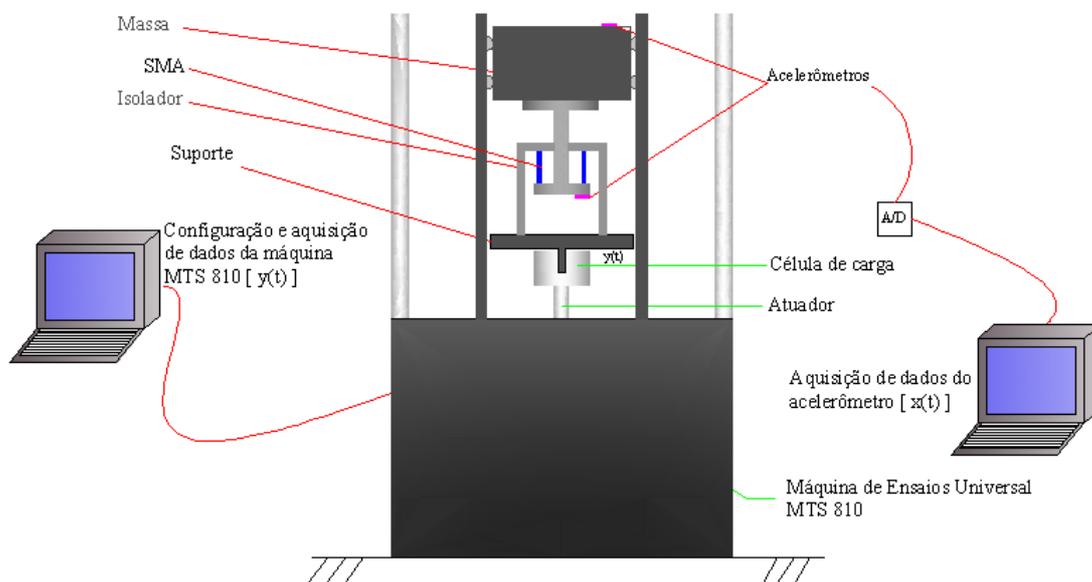


Figura 3.2. Desenho esquemático do aparato experimental para caracterização dinâmica do isolador.

Os testes estáticos de tração realizados com os fios de SMA foram realizados controlando-se a taxa de deslocamento do atuador em 5 milímetros por minuto. Já nos testes cíclicos controlava-se a amplitude de deslocamento do atuador e a frequência de excitação.

Na Figura (3.3) é apresentada a curva de trabalho da máquina MTS 810, curva essa

determinada pelo fabricante através de testes mecânicos padronizados, com diferentes carregamentos e um espectro de frequências variando de 0.1 a 100Hz.



Sinusoidal Performance Report

Customer:
Prepared By: ###
Date Created: 1/30/2007 10:08:19 AM

MTS SPOOL: 1.4 Build 106
Report Generator: PM20060807

Piston Rod Displacement vs. Frequency

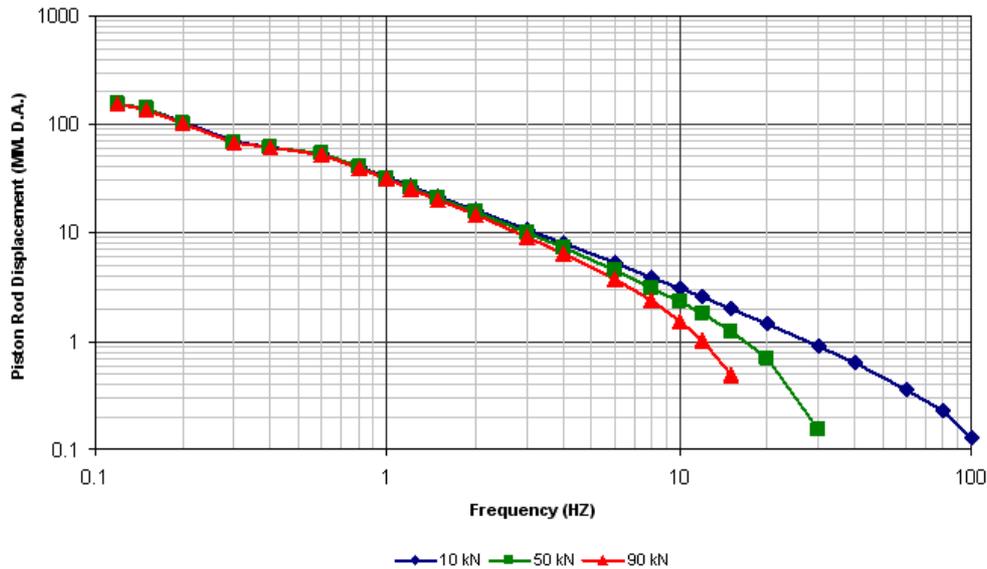


Figura 3.3. Curva de operação da máquina MTS 810 (Manual MTS, 2001).

A partir da curva apresentada na Figura (3.3), pode-se determinar como limite máximo de frequência aplicável a esse trabalho em torno de 50Hz.

3.3 – CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Os fios utilizados na concepção do isolador foram a ensaios de tração estáticos e também ensaios cíclicos. Os fios de SMA de diâmetro $\Phi=1,185\text{mm}$ foram fornecidos na forma recozida, pelo fabricante. Já os fios com diâmetro $\Phi=3,81\text{mm}$ foram recozidos durante este trabalho.

As curvas de tensão-deformação de três dos fios de NiTi com 1,185mm de diâmetro (Fio 1) podem ser visualizadas nas Figuras (3.4) a (3.6). Em todos os ensaios de tração a temperatura foi de 24°C e a taxa de deformação de 5mm/min.

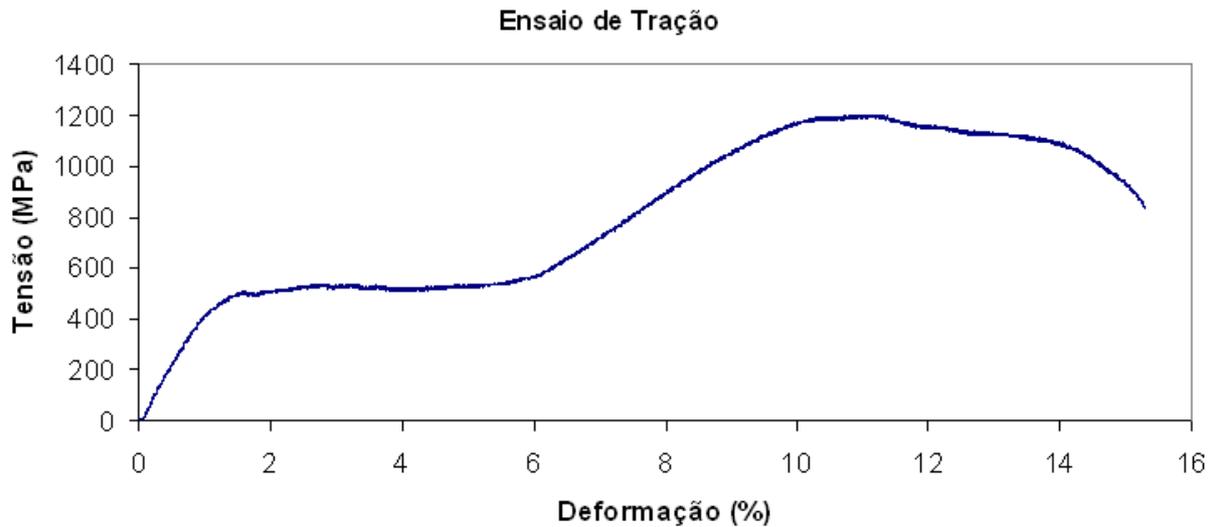


Figura 3.4. Curva Tensão-Deformação – Fio 1.

A curva apresentada na Figura (3.4) permite que seja calculado o módulo de elasticidade na fase austenita (E_A) pela inclinação da reta no trecho linear $0 \leq \sigma \leq 400 \text{ MPa}$. Utilizando o mesmo conceito, determina-se o módulo de elasticidade na fase martensita (E_M) pela inclinação no trecho linear $650 \leq \sigma \leq 850 \text{ MPa}$. A tensão necessária para completar a transformação de fase austenita-martensita ficou em torno de $\sigma = 600 \text{ MPa}$ com deformação de aproximadamente $\varepsilon = 6\%$.

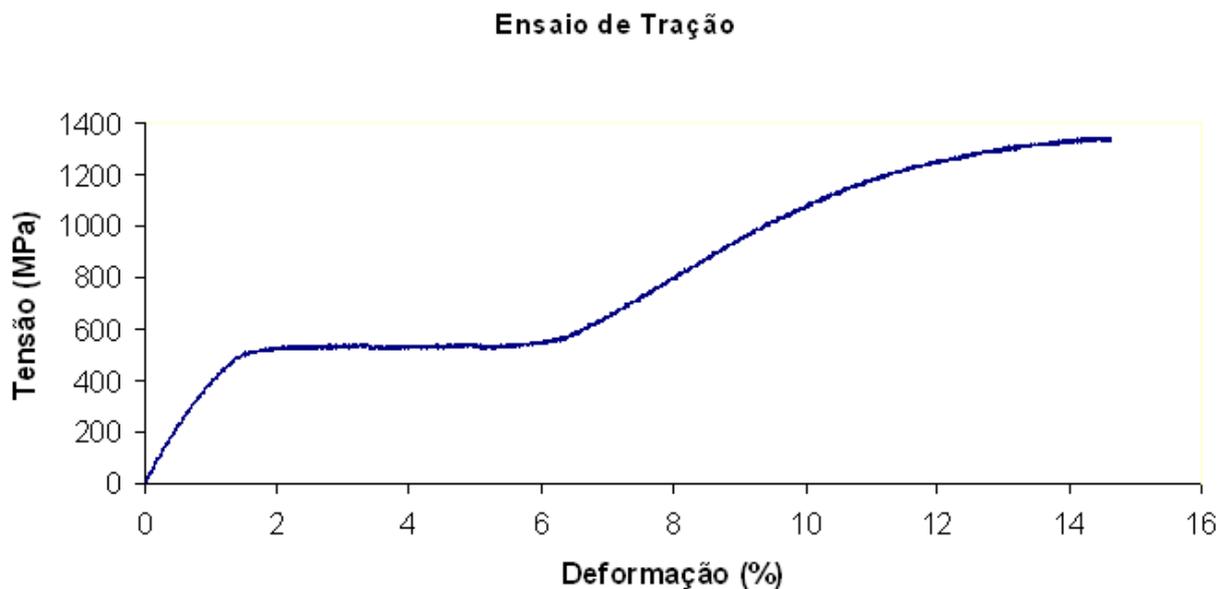


Figura 3.5. Curva Tensão-Deformação – Fio 1.

Na curva apresentada na Figura (3.5) o módulo de elasticidade na fase austenita (E_A) foi calculado pela inclinação da reta no trecho linear para $0 \leq \sigma \leq 300 \text{ MPa}$ e o módulo de

elasticidade na fase martensita (E_M) no trecho linear $600 \leq \sigma \leq 800 \text{MPa}$. Da mesma forma que na curva anterior (Figura 3.4), a tensão necessária para completar a transformação de fase austenita-martensita ficou em torno de $\sigma=600 \text{MPa}$ com deformação de aproximadamente $\varepsilon=6\%$.

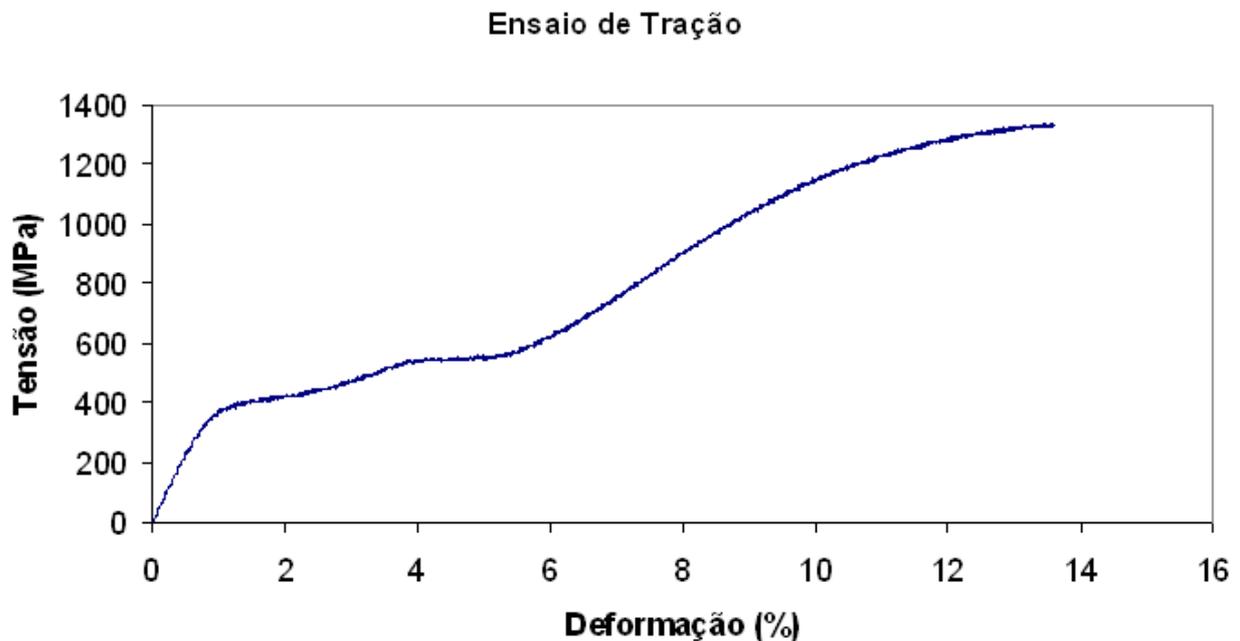


Figura 3.6. Curva Tensão-Deformação – Fio 1.

Por fim, na curva apresentada na Figura (3.6) o módulo de elasticidade na fase austenita (E_A) foi calculado como sendo a inclinação do trecho linear para $0 \leq \sigma \leq 300 \text{MPa}$ e o módulo de elasticidade na fase martensita (E_M) pela inclinação do trecho $650 \leq \sigma \leq 800 \text{MPa}$. De forma semelhante às curvas anteriores, Figuras (3.4) e (3.5), a tensão necessária para completar a transformação de fase austenita-martensita ficou em torno de $\sigma=600 \text{MPa}$ com deformação $\varepsilon=6\%$, aproximadamente.

A partir das curvas apresentadas nas Figuras (3.4), (3.5) e (3.6) permitiu-se que fossem calculados os módulos de elasticidade da fase austenita (E_A) e da fase martensita induzida por tensão (E_M) com fios de 1,185mm de diâmetro. Esses dados podem ser visualizados na Tabela (2).

Os dados apresentados na Tabela (2) evidenciam que o módulo de elasticidade na fase austenita (E_A) é aproximadamente quatro vezes maior que o módulo de elasticidade da fase martensita induzida por tensão (E_M) para este material.

Tabela 2. Módulos de elasticidade do Fio 1 nas fases austenita (E_A) e martensita (E_M).

Teste	E_A (GPa)	E_M (GPa)
Teste 01	43,22	11,06
Teste 02	43,18	10,10
Teste 03	43,89	10,73
	Média	
	43,43	10,63
	Desvio Padrão	
	0,39	0,49
	Variância	
	0,16	0,24
	Coefficiente de variação	
	0,92%	4,59%

Foram realizados também ensaios de tração com seis fios de NiTi com 3,81mm de diâmetro (Fio 2), com as mesmas condições dos ensaios anteriores, ou seja, temperatura ambiente de 24°C e taxa de deformação de 5mm/min. As curvas obtidas são apresentadas nas Figuras (3.7) a (3.12).

Ensaio de Tração

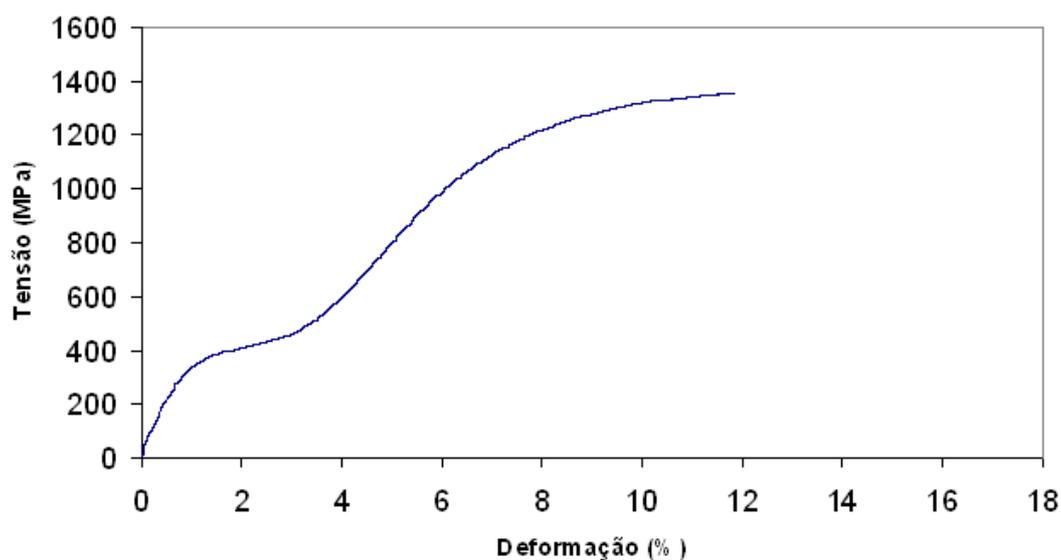


Figura 3.7. Curva Tensão-Deformação – Fio2.

A curva apresentada na Figura (3.7) permite que seja calculado o módulo de elasticidade na fase austenita (E_A) pela inclinação da reta no trecho linear $0 \leq \sigma \leq 300 \text{MPa}$. Utilizando o mesmo conceito, determina-se o módulo de elasticidade na fase martensita (E_M) pela inclinação no trecho linear $550 \leq \sigma \leq 800 \text{MPa}$. A tensão necessária para completar a transformação de fase austenita-martensita ficou em torno de $\sigma = 500 \text{MPa}$ com deformação de aproximadamente $\varepsilon = 4\%$.

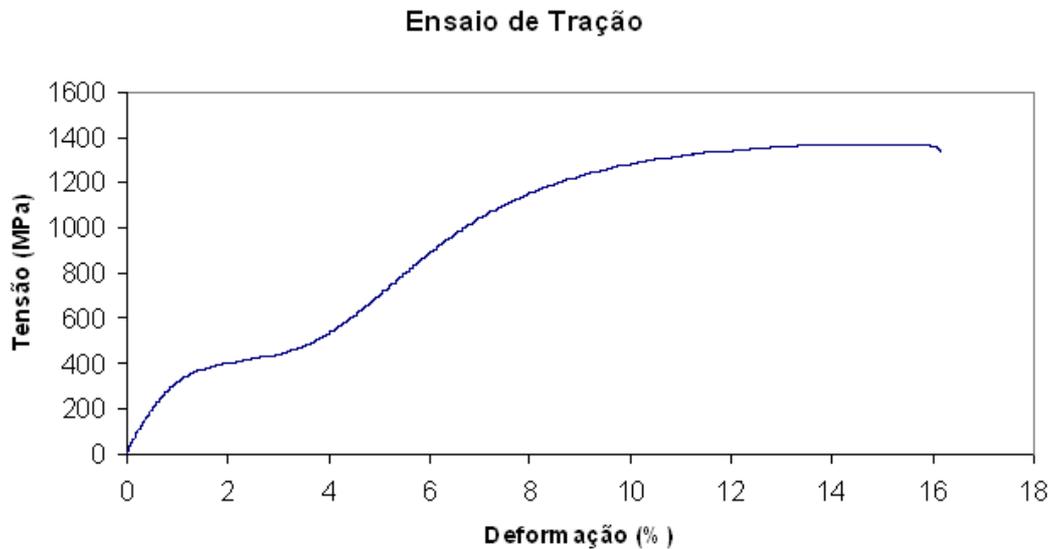


Figura 3.8. Curva Tensão-Deformação – Fio2.

A partir da curva apresentada na Figura (3.8) calculou-se o módulo de elasticidade na fase austenita (E_A) pela inclinação da reta no trecho linear $0 \leq \sigma \leq 300 \text{MPa}$. Utilizando o mesmo conceito, determinou-se o módulo de elasticidade na fase martensita (E_M) pela inclinação no trecho linear $550 \leq \sigma \leq 900 \text{MPa}$. A tensão necessária para completar a transformação de fase austenita-martensita ficou em torno de $\sigma = 480 \text{MPa}$ com deformação de aproximadamente $\varepsilon = 4\%$.

Com os dados da curva apresentada na Figura (3.9) calculou-se o módulo de elasticidade na fase austenita (E_A) pela inclinação da reta no trecho linear $0 \leq \sigma \leq 300 \text{MPa}$. Utilizando o mesmo conceito, determinou-se o módulo de elasticidade na fase martensita (E_M) pela inclinação no trecho linear $550 \leq \sigma \leq 800 \text{MPa}$. A tensão necessária para completar a transformação de fase austenita-martensita ficou em torno de $\sigma = 450 \text{MPa}$ com deformação de aproximadamente $\varepsilon = 4\%$.

Ensaio de Tração

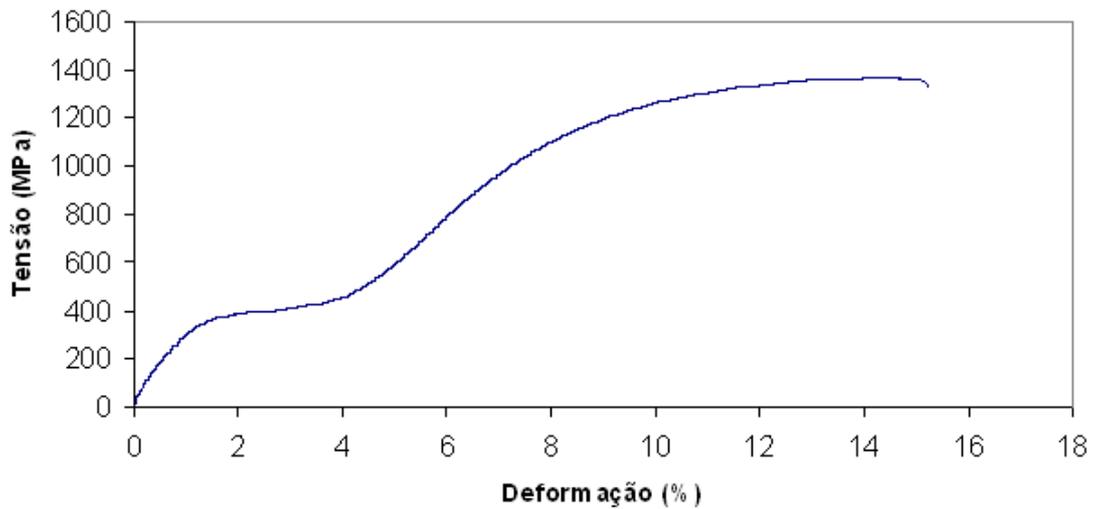


Figura 3.9. Curva Tensão-Deformação – Fio2.

Ensaio de Tração

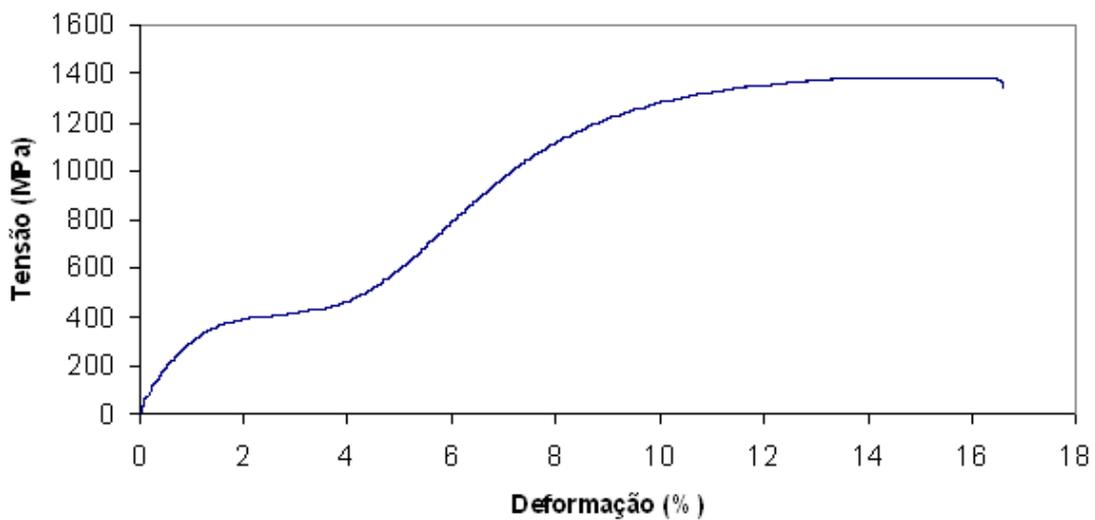


Figura 3.10. Curva Tensão-Deformação – Fio2.

A partir da curva apresentada na Figura (3.10) calculou-se o módulo de elasticidade na fase austenita (E_A) pela inclinação da reta no trecho linear $0 \leq \sigma \leq 300 \text{ MPa}$. Utilizando o mesmo conceito, determinou-se o módulo de elasticidade na fase martensita (E_M) pela inclinação no trecho linear $550 \leq \sigma \leq 900 \text{ MPa}$. A tensão necessária para completar a

transformação de fase austenita-martensita ficou em torno de $\sigma=450\text{MPa}$ com deformação de aproximadamente $\varepsilon=4\%$.

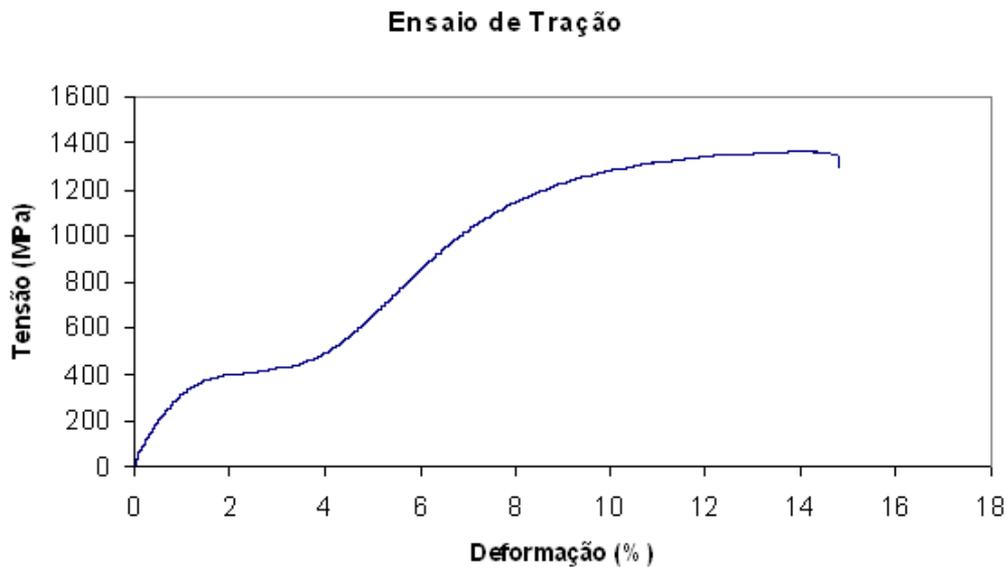


Figura 3.11. Curva Tensão-Deformação – Fio2.

A curva apresentada na Figura (3.4) permitiu cálculo do módulo de elasticidade na fase austenita (E_A) pela inclinação da reta no trecho linear $0 \leq \sigma \leq 300\text{MPa}$. Utilizando o mesmo conceito, determinou-se o módulo de elasticidade na fase martensita (E_M) pela inclinação no trecho linear $550 \leq \sigma \leq 900\text{MPa}$. A tensão necessária para completar a transformação de fase austenita-martensita ficou em torno de $\sigma=500\text{MPa}$ com deformação de aproximadamente $\varepsilon=4\%$.

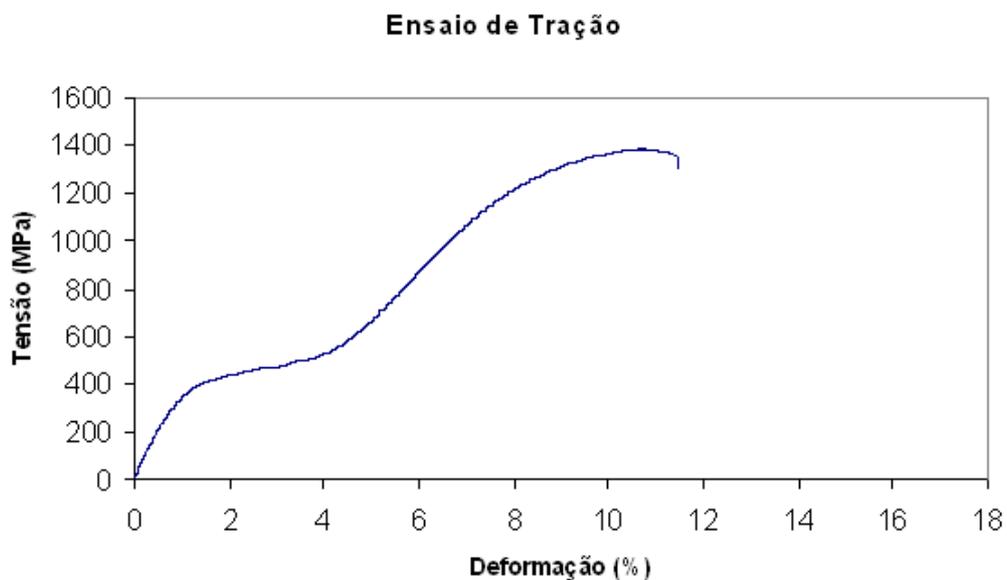


Figura 3.12. Curva Tensão-Deformação – Fio2.

Com os dados da curva apresentada na Figura (3.9) calculou-se o módulo de elasticidade na fase austenita (E_A) pela inclinação da reta no trecho linear $0 \leq \sigma \leq 300 \text{MPa}$. Utilizando o mesmo conceito, determinou-se o módulo de elasticidade na fase martensita (E_M) pela inclinação no trecho linear $550 \leq \sigma \leq 800 \text{MPa}$. A tensão necessária para completar a transformação de fase austenita-martensita ficou em torno de $\sigma = 550 \text{MPa}$ com deformação de aproximadamente $\varepsilon = 4\%$.

A partir das curvas apresentadas nas figuras (3.7) a (3.12) foram determinados os módulos de elasticidade da fase austenita (E_A) e da fase martensita (E_M) induzida por tensão com fios de 3,81mm de diâmetro (Fio 2), os quais passaram por um tratamento de recozimento a 415°C por 20 minutos e resfriados em ar ambiente, fora do forno. Esses dados podem ser visualizados na Tabela (3).

Tabela 3. Módulos de elasticidade do Fio 2, recozido, nas fases austenita (E_A) e martensita (E_M).

Teste	E_A (GPa)	E_M (GPa)
Teste 01 [Figura(3.7)]	43,33	14,58
Teste 02 [Figura(3.8)]	43,22	14,52
Teste 03 [Figura(3.9)]	41,33	13,01
Teste 04 [Figura(3.10)]	42,68	13,19
Teste 05 [Figura(3.11)]	42,39	13,83
Teste 06 [Figura(3.12)]	45,23	14,27
	Média	
	42,63	14,04
	Desvio Padrão	
	1,12	0,89
	Variância	
	1,26	0,79
	Coefficiente de variação	
	2,64%	6,34%

Com os dados apresentados nas Tab. (2) e (3) percebe-se que existe uma variação de mais de 3 vezes, em alguns testes, entre os módulos de elasticidade das fases austenita (E_A) e martensita induzida por tensão (E_M). Desta forma, as curvas de caracterização apresentadas

anteriormente, permitem a visualização do comportamento mecânico da liga NiTi utilizada neste trabalho.

Tomando como base os valores de tensão e deformação obtidos nos ensaios de tração com os fios de SMA, foram realizados ensaios de carregamento cíclicos para determinar se a SMA comporta-se pseudoelásticamente.

A seguir serão apresentadas as curvas obtidas nos testes realizados com o fio de 1,185mm de diâmetro (Fio 1), que, por motivos operacionais, serão utilizados no isolador de vibração pseudoelástico. Nestes ensaios, a temperatura ambiente foi de 23°C, a frequência de excitação foi mantida constante em $\omega=1\text{Hz}$ e todos submetidos a 200 ciclos, sendo que cada teste durou aproximadamente 3 minutos. Além disso, a deformação foi sendo gradativamente aumentada.

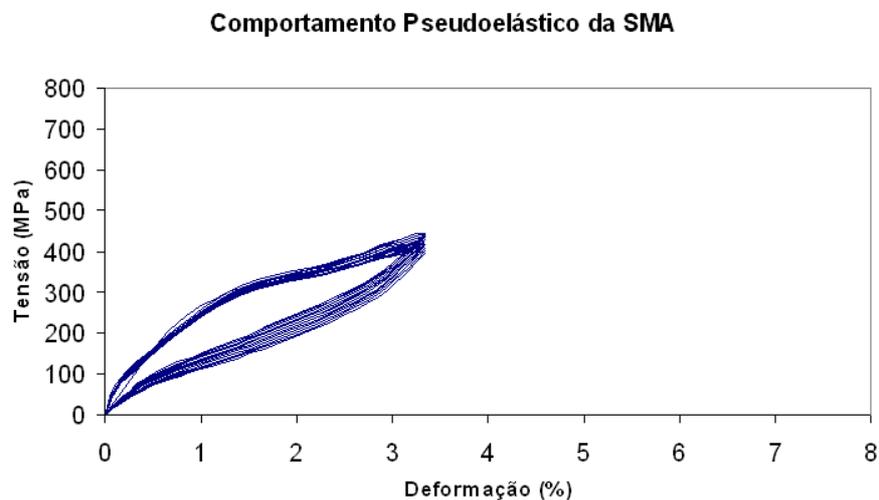


Figura 3.13. Curva Tensão-Deformação cíclico para $\epsilon_{max} = 3,25\%$ – Fio 1.

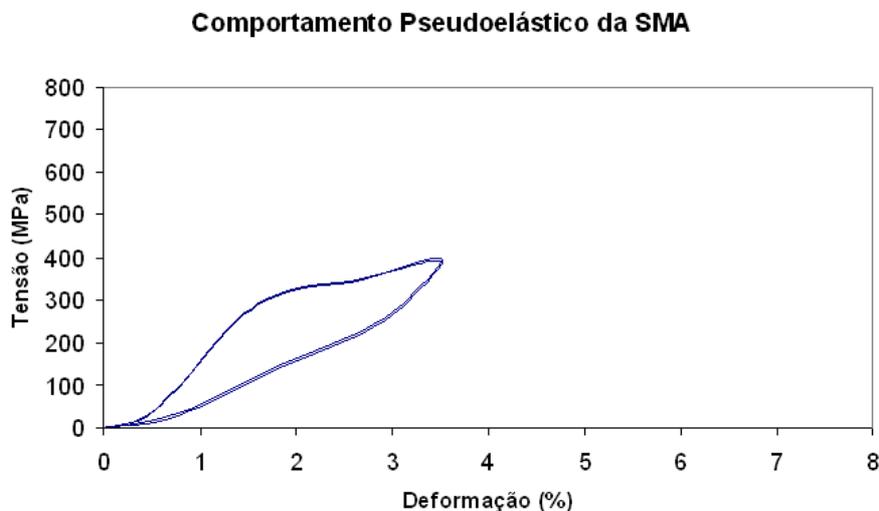


Figura 3.14. Curva Tensão-Deformação cíclico para $\epsilon_{max} = 3,5\%$ – Fio 1.

Comportamento Pseudoelástico da SMA

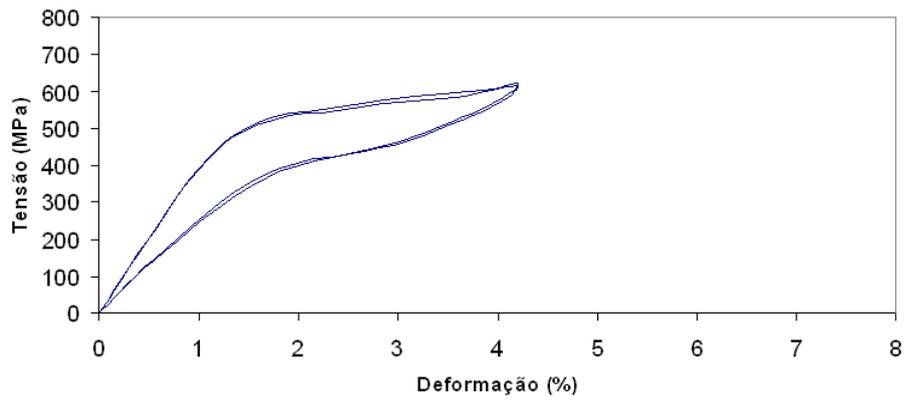


Figura 3.15. Curva Tensão-Deformação cíclico para $\epsilon_{max} = 4,25\%$ – Fio 1.

Comportamento Pseudoelástico da SMA

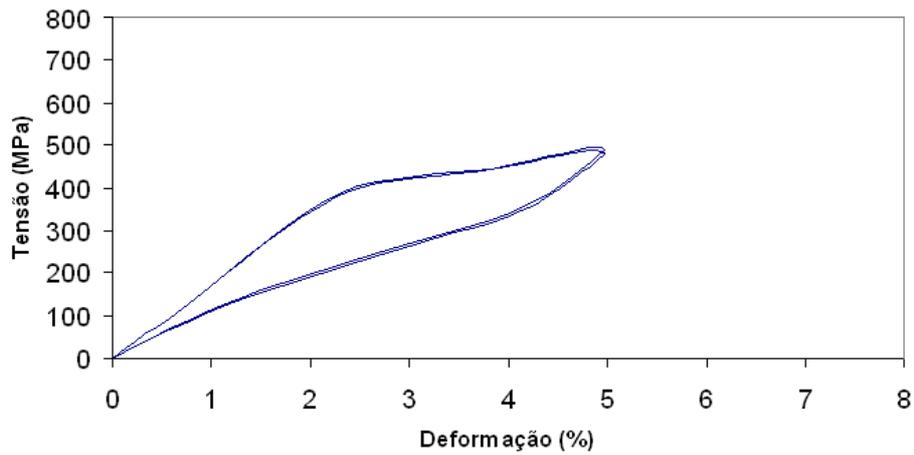


Figura 3.16. Curva Tensão-Deformação cíclico para $\epsilon_{max} = 5\%$ – Fio 1.

Comportamento Pseudoelástico da SMA

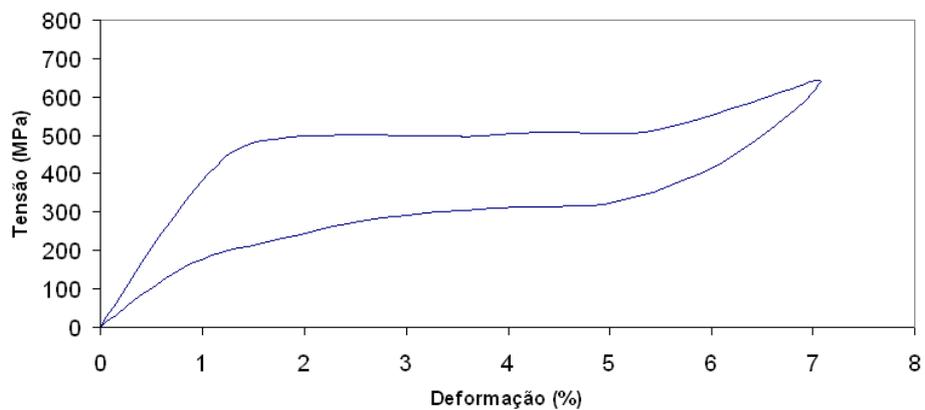


Figura 3.17. Curva Tensão-Deformação cíclico para $\epsilon_{max} = 7\%$ – Fio 1.

Os gráficos mostrados nas Figuras (3.13) a (3.17) ilustram o fenômeno de pseudoelasticidade que ocorre em ligas com memória de forma. Como pode ser observado na Figura (3.13) o material deve sofrer alguns carregamentos cíclicos para que sua histerese se estabilize. Nos experimentos realizados, cerca de 150 ciclos são suficientes para a completa estabilização do comportamento.

4 – CONCEPÇÃO, PROJETO E CONSTRUÇÃO DO ISOLADOR

O desenvolvimento do Protótipo 1.0 de um isolador de vibração pseudoelástico consistiu de sua concepção, projeto, construção e ensaio estático. Este consistiu de ensaios de tração do isolador.

4.1 – CONCEPÇÃO

A concepção do isolador de vibração pseudoelástico baseou-se num sistema massa-mola, no qual os fios de SMA atuam, durante os processos de carregamento e descarregamento, como uma mola não linear e amortecedor, adicionalmente, já que as tensões atuantes durante esses processos modificam o módulo de elasticidade do material, devido às mudanças de fase austenita-martensita, e, a cada ciclo, os fios de SMA absorvem energia.

O isolador de vibração concebido (Protótipo 1.0) é composto por um cilindro de aço 1045, ao qual podem ser fixados até oito fios de SMA com 1,185mm de diâmetro cada, acondicionados com dispositivos de fixação na tampa superior e no suporte. Na Figura (4.1) pode-se visualizar esquematicamente o protótipo 1.0 desenvolvido, e nas Figuras (4.2) e (4.3) vistas em perspectiva com detalhes adicionais.

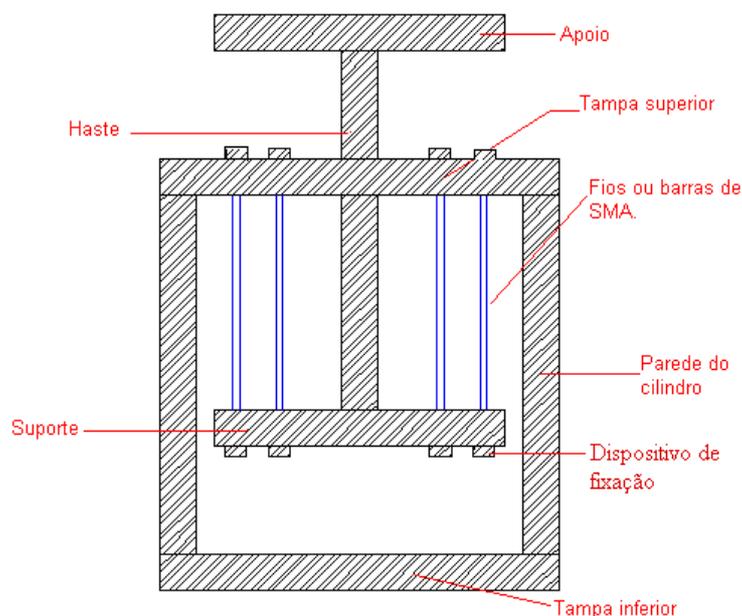


Figura 4.1. Desenho esquemático da seção longitudinal do Protótipo 1.0.

4.2 – PROJETO

O projeto estrutural do Protótipo 1.0 baseou-se nos modelos convencionais de amortecedores de grandes estruturas, tais como pontes e edifícios, conforme descrito nas literaturas (Weber *et al.*, 2006).

A plataforma onde a massa é apoiada consiste de um disco com 100mm de diâmetro e 10mm de espessura, o qual é fixado à haste por interferência. Já a haste possui 19mm de diâmetro por 130mm de comprimento. A tampa superior possui 100mm de diâmetro externo e um furo central de 20,5mm de diâmetro interno, com 8 furos eqüidistantes do centro da tampa em 25mm. O Cilindro possui 150mm de comprimento, 100mm de diâmetro externo e 10mm de espessura de parede. O suporte interno possui 70mm de diâmetro externo, com 10mm de espessura e 8 furos eqüidistantes do centro da tampa em 25mm. Já a tampa inferior possui 100mm de diâmetro e 10mm de espessura e quatro furos passante de 4mm para fixação ao cilindro por parafusos. Os cálculos para o dimensionamento do protótipo 1.0 encontram-se no Apêndice A. Os desenhos técnicos são apresentados no Apêndice B. A Figura (4.2 (a) e (b)) apresentam esquematicamente a composição do Protótipo 1.0.

Na Figura (4.2(a)) tem-se um desenho ilustrativo do Protótipo projetado e, na Figura (4.2(b)), pode-se visualizar a composição estrutural interna do Protótipo 1.0.

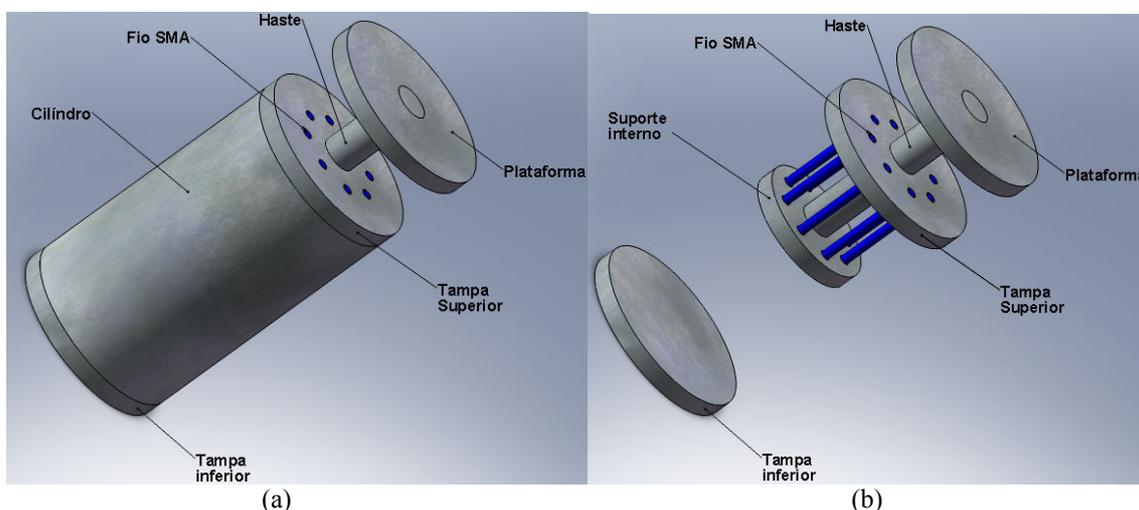


Figura 4.2. (a) Desenho ilustrativo do Protótipo 1.0. (b) Visão da composição interna do Protótipo 1.0.

Inicialmente, para a fixação dos fios SMA, foi desenvolvido um dispositivo aqui denominado de “cunha”, que pode ser visualizado esquematicamente na Figura (4.3).

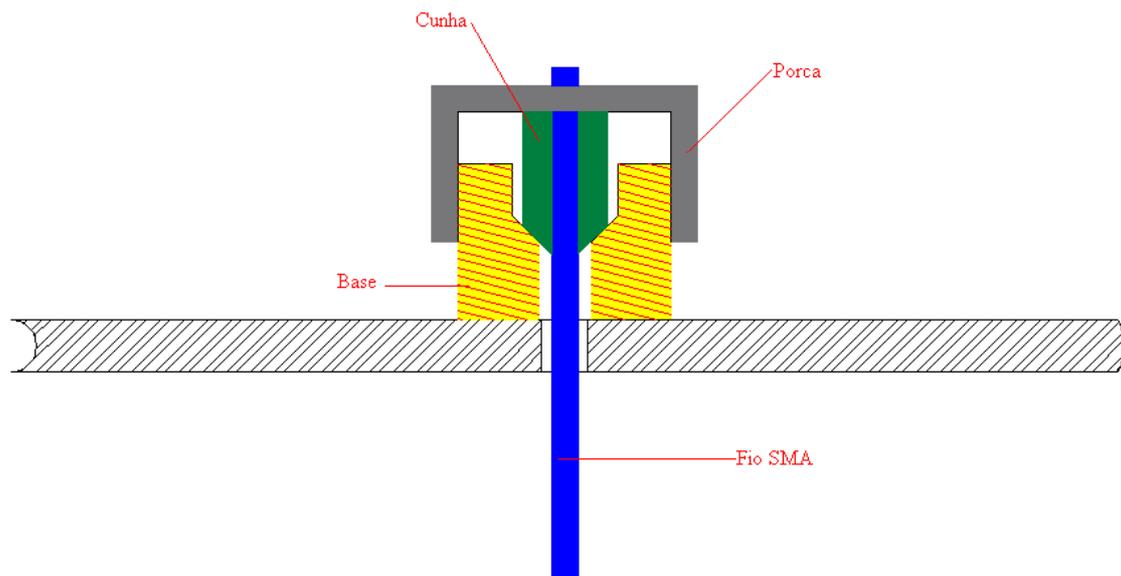


Figura 4.3. Desenho esquemático da cunha.

Basicamente, este dispositivo, Fig. (4.3), funciona da seguinte forma: insere-se o fio SMA, torce-se a porca, de forma a deslocar a cunha até que a mesma se feche, devido à força de reação da base, prensando o fio de SMA.

4.3 – CONSTRUÇÃO

Os componentes que formam a estrutura do Protótipo 1.0 foram fabricados na oficina do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília – ENM/UnB, localizado no edifício SG-09 do Campus Universitário Darcy Ribeiro. Tais componentes foram usinados em aço SAE 1045. Posteriormente esses componentes foram submetidos a um tratamento térmico de têmpera a 865°C por 45min em um forno *Laboratory Muffle Furnace* LM 312.06 SO 1063, da fabricante *Linn Elekytro Therm* GMBH e resfriados em água, o que possibilitou um aumento na dureza Brinell de cerca de 30% (268HB para 347HB).

Devido a dificuldades durante o processo de fabricação da cunha, fez-se necessário utilizar um mecanismo mais simples para a fixação dos fios. Assim, foram utilizados parafusos sextavados M10, os quais foram perfurados por uma broca de 1.2mm de diâmetro.

No próximo capítulo são apresentadas a modelagem e a simulação numérica do isolador de vibração pseudoelástico.

5 – MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ISOLADOR

Para a simulação do comportamento pseudoelástico da SMA foram utilizados os modelos de Lagoudas (2001) e Da Silva (1995).

5.1 - MODELAGEM MATEMÁTICA VIA LAGOUDAS

Basicamente, o isolador simplificado proposto por Lagoudas é constituído por uma base vibratória com deslocamento $y(t)$, uma barra de SMA de comprimento L e área de seção transversal (A), bem com de uma massa apoiada em sua extremidade, com deslocamento $x(t)$.

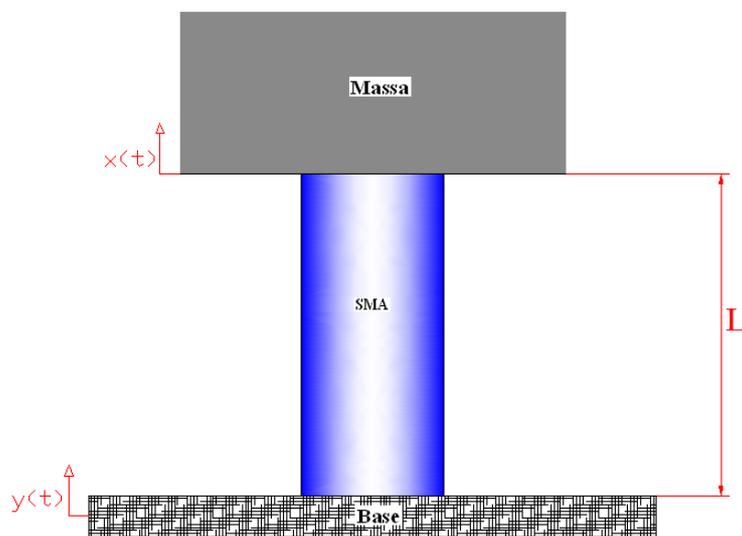


Figura 5.1. Princípio de funcionamento do isolador de vibração pseudoelástico - esquemático.

O comportamento dinâmico do isolador é regido por um sistema de equações diferenciais ordinárias lineares, que se alteram de acordo com a fase em que a SMA se encontra. Para a fase elástica, de acordo com Lagoudas (2001), tem-se a seguinte equação constitutiva:

Analisando as forças que atuam sobre a SMA, para o isolador mostrado na Fig. (44) tem-se que:

$$F_{SMA} = \sigma A, \quad (24)$$

ou

$$-M\ddot{x} = \sigma A, \quad (25)$$

onde F_{SMA} é a força atuante sobre a barra de SMA, σ é a tensão normal resultante, A é a área da seção transversal da barra de SMA, M é a massa aplicada sobre a barra de SMA e \ddot{x} é a aceleração.

Seu comportamento dinâmico é regido por equações diferenciais ordinárias não lineares, que se alteram de acordo com a fase em que a barra de SMA se encontra. Para a fase elástica, de acordo com Lagoudas (2001), tem-se as seguintes equações:

$$\frac{mL}{A} \ddot{x}(t) + Ex(t) = Ey(t). \quad (26)$$

Para regiões de transformação de fase, a equação diferencial é a seguinte:

$$\frac{mL}{A} \ddot{x}(t) + E\varepsilon'x(t) = E\varepsilon'(y(t) + \varepsilon'L). \quad (27)$$

Para regiões em que ocorre o descarregamento elástico parcial, tem-se:

$$\frac{mL}{A} \ddot{x}(t) + Ex(t) = EL \left(\frac{\varepsilon_{\max}}{L} + y(t) \right) - \sigma_{\max}. \quad (28)$$

E, para regiões onde ocorre o carregamento elástico parcial, tem-se a seguinte expressão:

$$\frac{mL}{A} \ddot{x}(t) + Ex(t) = EL \left(\frac{\varepsilon_{\min}}{L} + y(t) \right) - \sigma_{\min}. \quad (29)$$

Sendo a massa indicada por M , o módulo de elasticidade da SMA por E , a área da seção transversal da barra por A e a deformação de transformação por ε . ε_{\max} e σ_{\max} representam a deformação e a tensão no início do descarregamento parcial, e ε_{\min} e σ_{\min} representam a deformação e a tensão no início do carregamento parcial, respectivamente.

Na Tab.(4) são apresentadas as propriedades dos materiais e dimensões do sistema considerado por Lagoudas (2001). Na Tabela (5) são apresentados os dados referentes à SMA.

Tabela 4. Parâmetros da simulação via Lagoudas (2001).

Parâmetro	Valor
Massa - m	500 kg
Comprimento da barra SMA - L	1 m
Amplitude de excitação da base - $y(t)$	0,01 m
Raio da barra - r	0,1 m
Frequência de excitação - ω	50 hz
Temperatura de operação - T	315 K

Tabela 5. Propriedades da SMA para Lagoudas (2001).

Propriedade	Valor
E_A	70 GPa
E_M	30 GPa
C	7 MPa/K
M_{f0}	284 k
M_{s0}	292 K
A_{s0}	296 K
A_{f0}	315 K

Após a implementação numérica do modelo de Lagoudas em ambiente Matlab®, usando o método de Newmark (1959), simulou-se o comportamento dinâmico do isolador de vibração pseudoelástico concebido. As Figuras (5.2) e (5.3) mostram os resultados obtidos para os dados mostrados nas Tabelas (4) e (5).

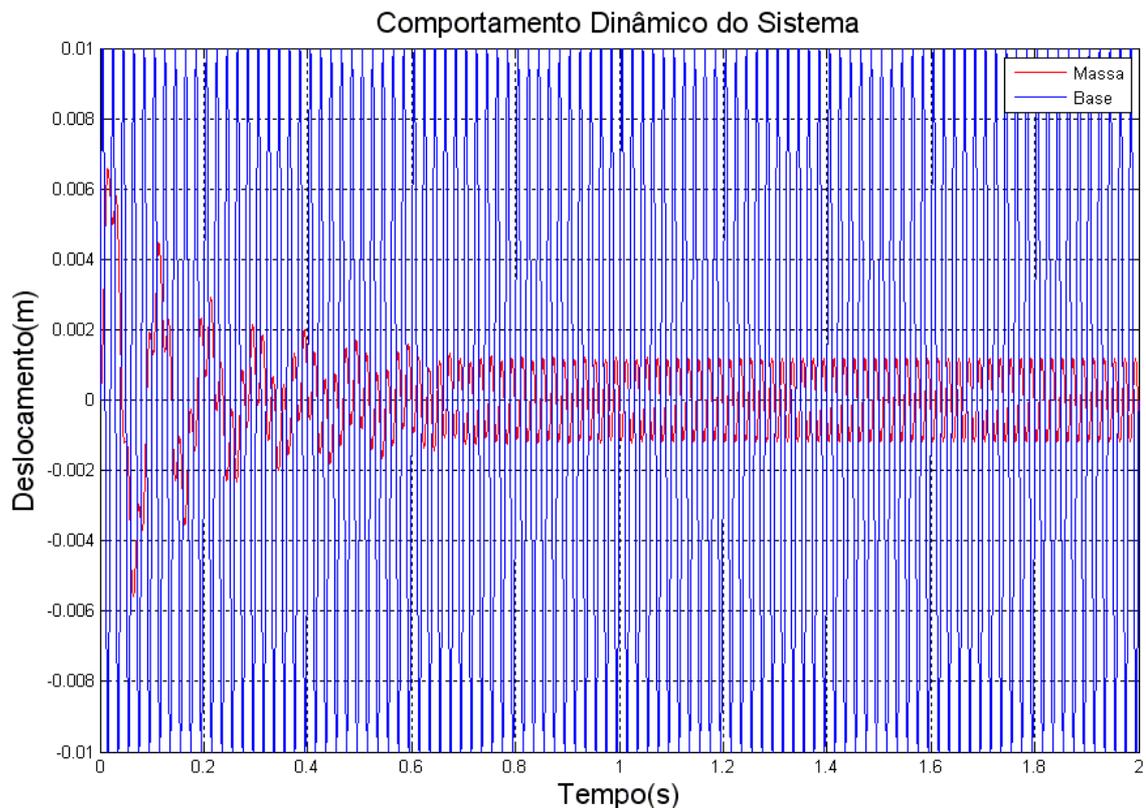


Figura 5.2. Deslocamentos da base e da massa para os dados iniciais (Tab. (4) e (5)), $\omega = 50\text{Hz}$.

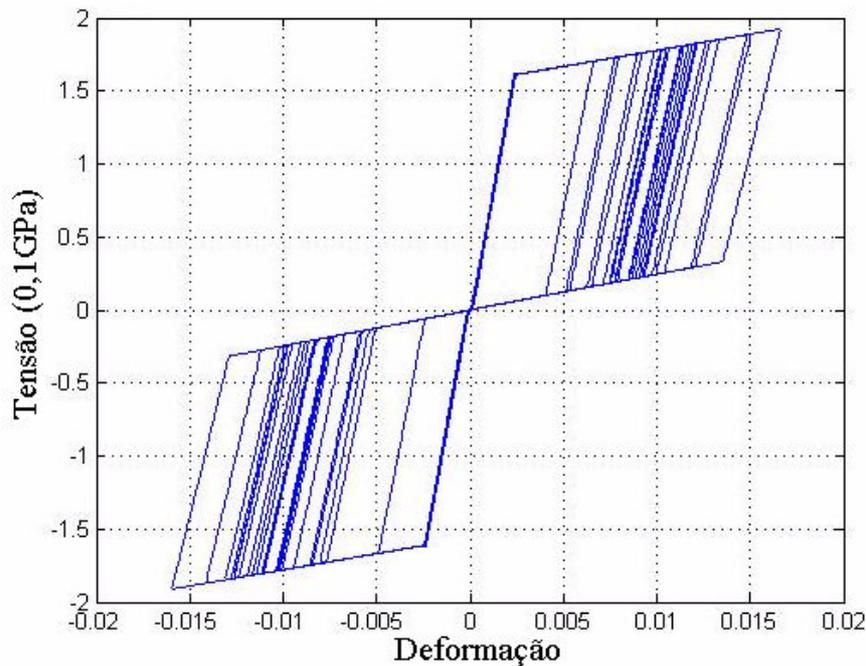


Figura 5.3. Curva tensão-deformação resultante, $\omega=50\text{Hz}$.

Nota-se da Figura (5.2) que a SMA reduziu a amplitude do movimento da massa em cerca 35% para $t = 0,025\text{s}$ e 80% para $t > 0,8\text{s}$. Na Figura (5.3) observa-se a curva tensão-deformação da SMA, que apresenta comportamento pseudoelástico para esse caso.

Para analisar melhor o comportamento do isolador de vibração pseudoelástico, foram realizadas simulações para diferentes frequências, amplitudes e massas.

5.1.1 - Simulação para diferentes frequências

Na simulação inicial, Figuras (5.2) e (5.3), obteve-se o comportamento do sistema para uma frequência de 50Hz. As Figuras (5.4) a (5.7) mostram como o isolador se comporta para outros níveis de frequências, tais como 25Hz (Figuras (5.4) e (5.5)) e 80Hz (Figuras (5.6) e (5.7)).

Como pôde ser observado na Figura (5.4), a SMA inicialmente ampliou a amplitude de deslocamento da massa em cerca 40% para $t = 0,025\text{s}$ e posteriormente reduziu a amplitude de deslocamento da massa em mais de 60% para $t > 0,7\text{s}$. Na Figura (5.5) observa-se a curva tensão-deformação da SMA, que apresenta comportamento pseudoelástico para esse caso.

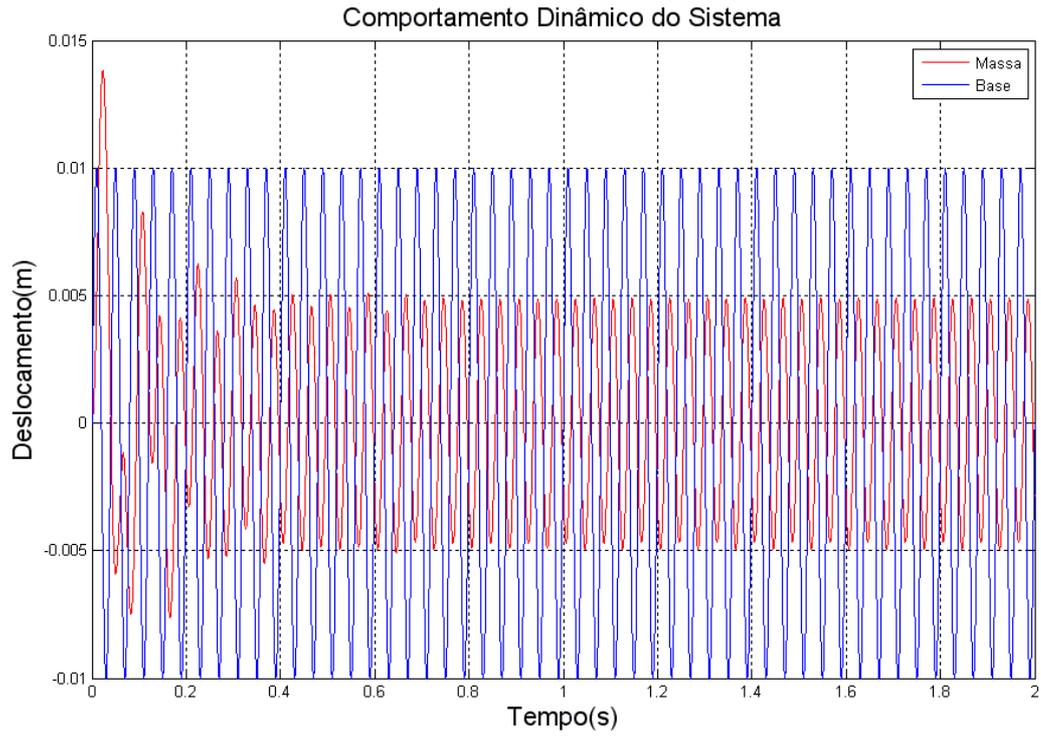


Figura 5.4. Deslocamentos da base e da massa para $\omega = 25\text{Hz}$.

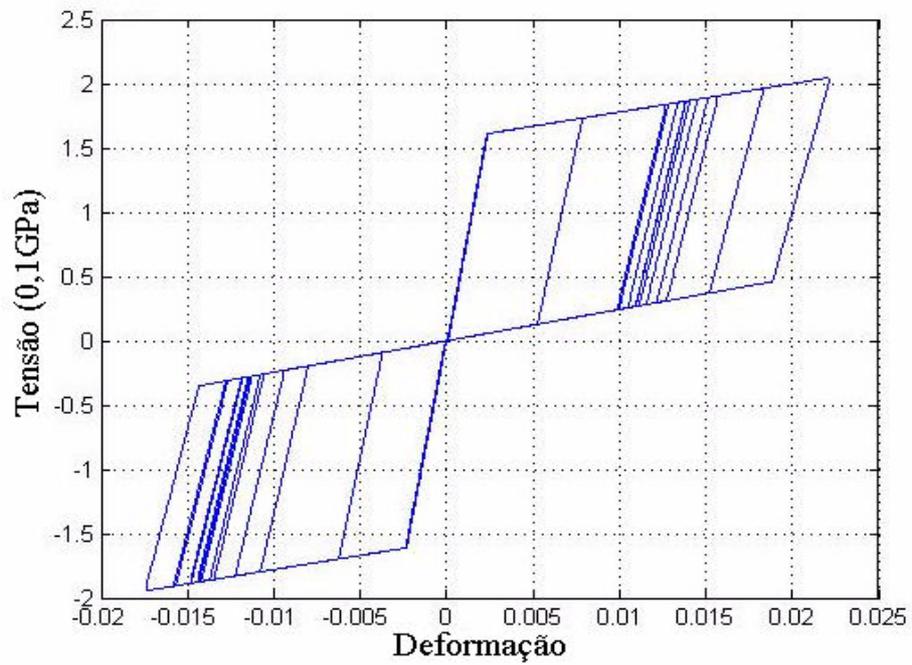


Figura 5.5. Curva tensão-deformação resultante para $\omega = 25\text{Hz}$.

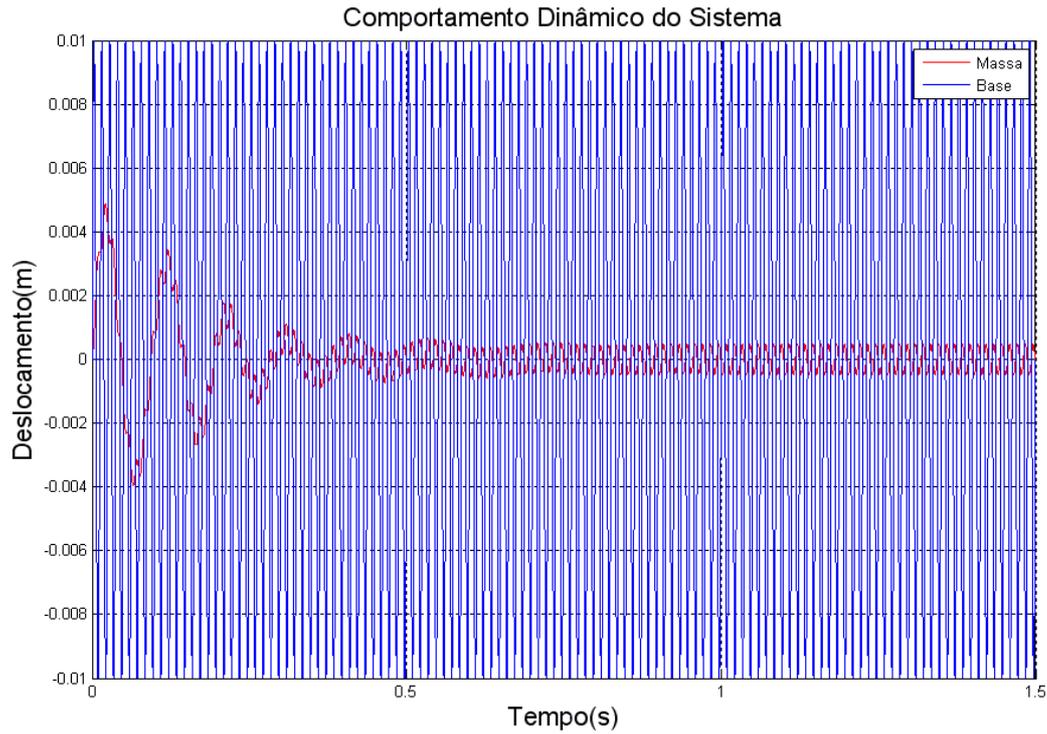


Figura 5.6. Deslocamentos da base e da massa para $\omega = 80\text{Hz}$.

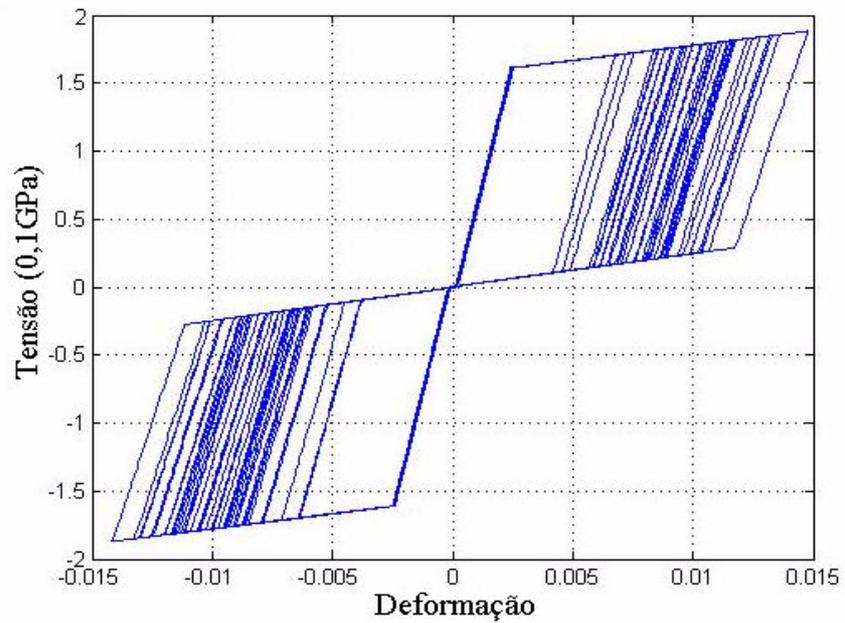


Figura 5.7. Curva tensão-deformação resultante para $\omega = 80\text{Hz}$.

Nota-se da Figura (5.6) que a SMA reduziu a amplitude de deslocamento da massa em cerca de 50% para $t = 0,025\text{s}$ e 80% para $t > 0,8\text{s}$. Na Figura (5.7) verifica-se que a curva tensão-deformação da SMA, apresenta comportamento pseudoelástico para esse caso.

Na Figura (5.8) mostra-se a curva de transmissibilidade-freqüência para a faixa de freqüência de 1 a 100Hz.

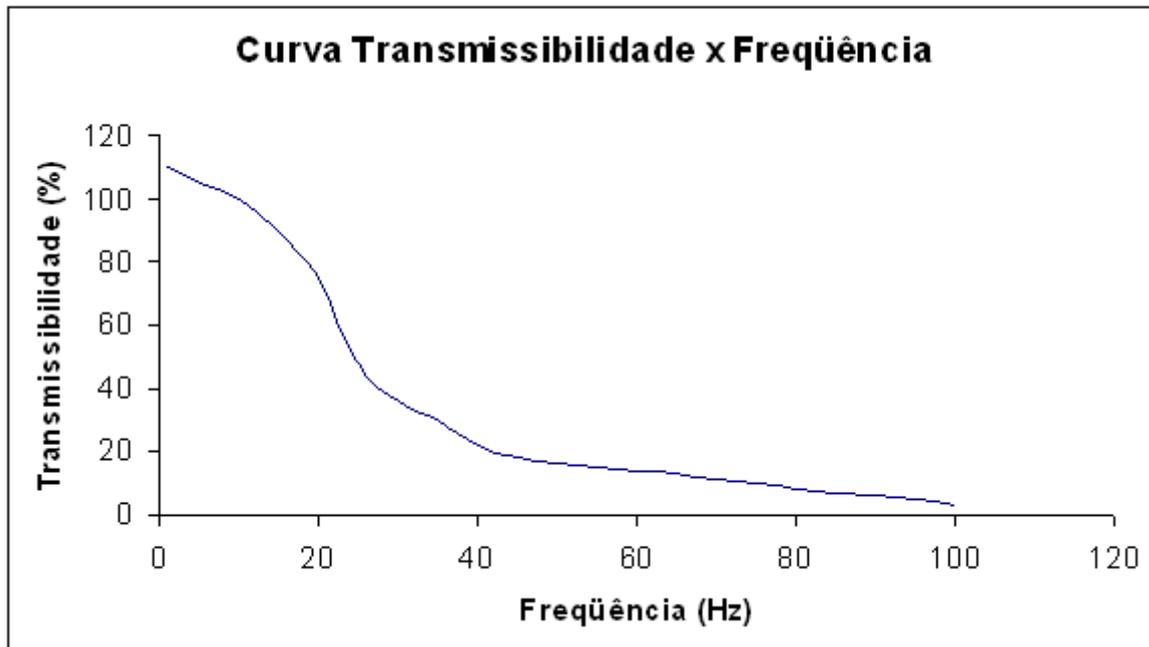


Figura 5.8. Curva transmissibilidade-freqüência para $1 \leq \omega \leq 100$ Hz .

Nota-se na Figura (5.8) que para freqüências de 1 a 10Hz, o transmissibilidade é superior a 100%, ou seja, para essa faixa de freqüência o dispositivo deixa de ser um isolador e passa a ser um amplificador de movimento. Contudo, com o aumento da freqüência de excitação, verifica-se que o mesmo volta a tornar-se um isolador de vibração, sendo que, para uma freqüência de 100Hz, a transmissibilidade do movimento se reduz a aproximadamente 3%.

5.1.2 - Simulação para diferentes amplitudes

Na simulação inicial Figura (5.2), obteve-se o comportamento do sistema para uma amplitude de deslocamento máximo da base de 0,01m com 50Hz de freqüência. As Figuras (5.8) a (5.11) mostram como o isolador se comporta para outras amplitudes, tais como 5mm (Figuras (5.9) e (5.10)) e 50mm (Figuras (5.11) e (5.12)).

Como pode ser observado na Figura (5.9), a SMA inicialmente elevou a amplitude de deslocamento da massa em cerca 15% para $t = 0,025$ s e posteriormente reduziu essa amplitude em mais de 80% para $t > 0,4$ s. Na Figura (5.10) observa-se que a curva tensão-deformação da SMA apresenta comportamento pseudoelástico para essa situação.

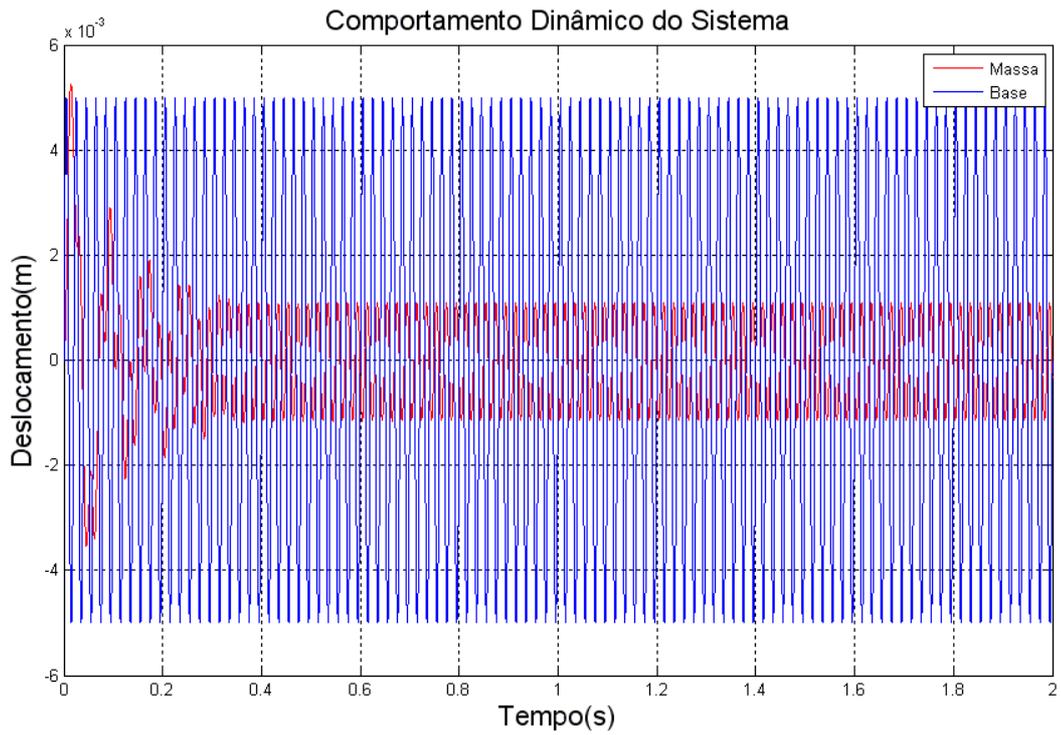


Figura 5.9. Comportamento dinâmico do sistema para $y(t) = 0,005m$.

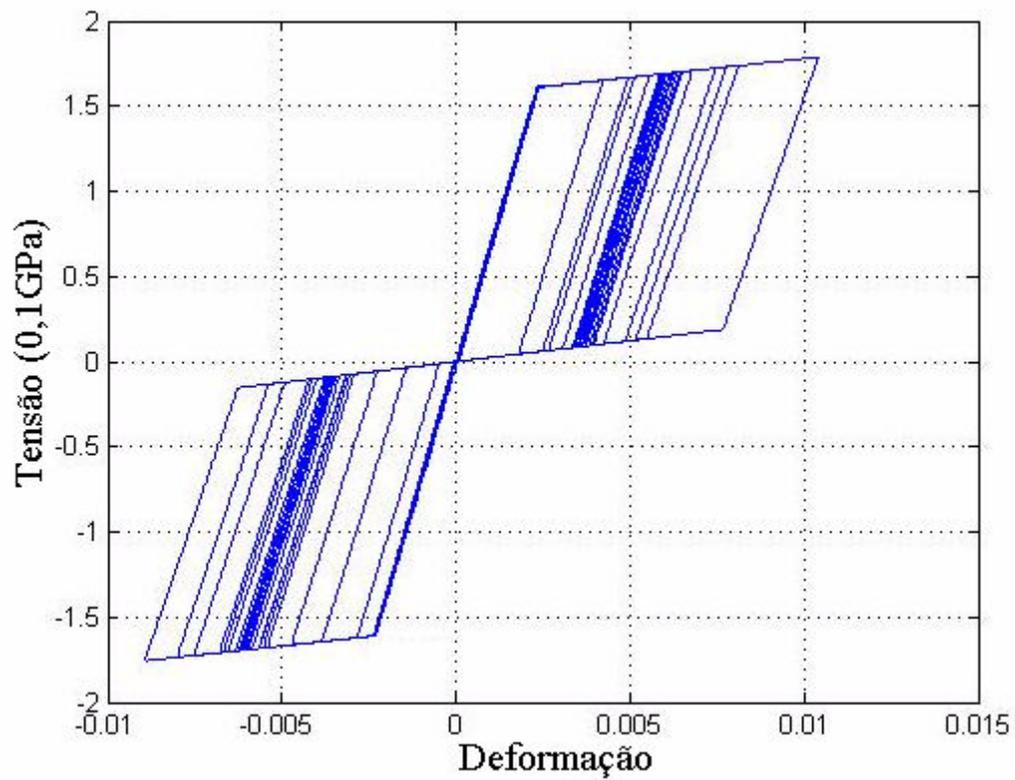


Figura 5.10. Curva tensão-deformação resultante para $y(t) = 0,005m$.

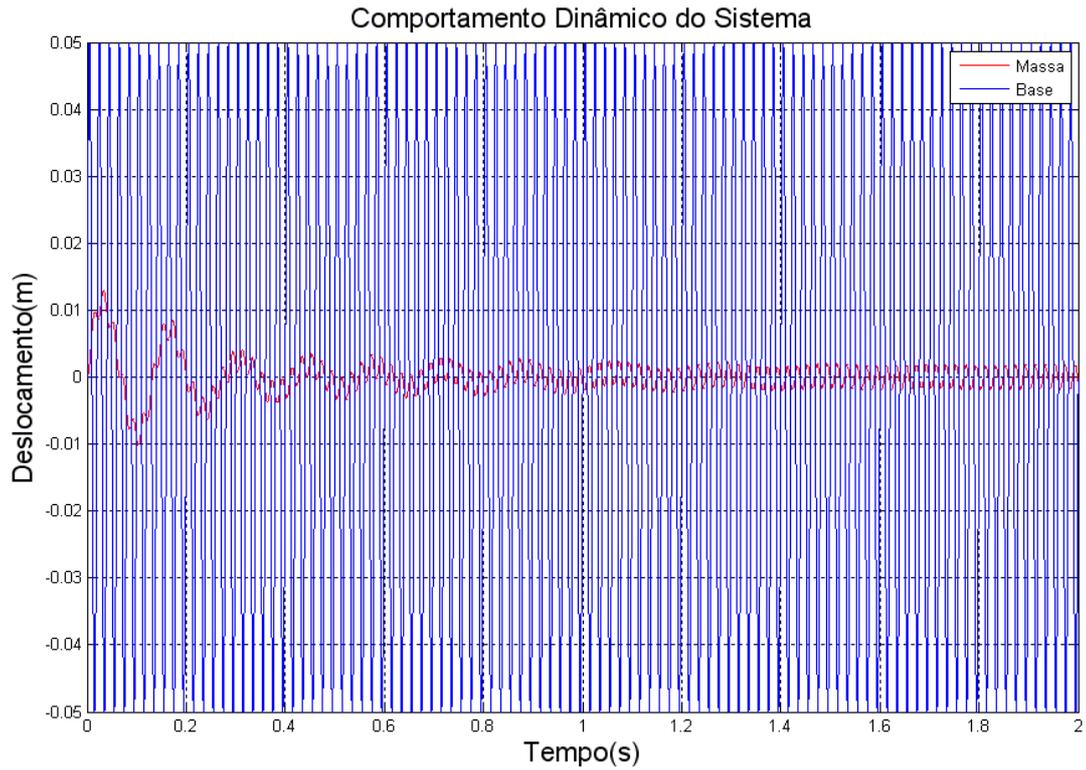


Figura 5.11. Comportamento dinâmico do sistema para $y(t) = 0,05m$.

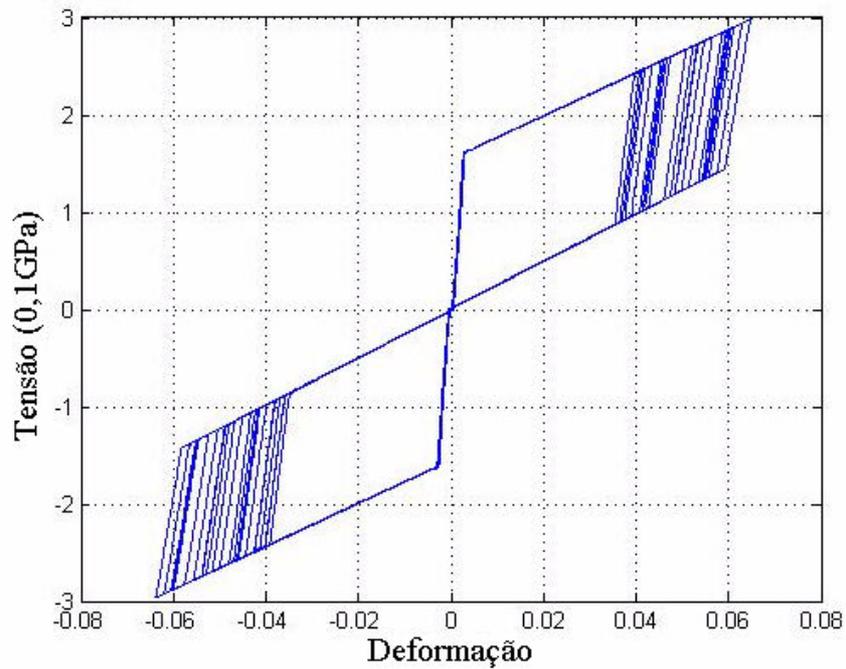


Figura 5.12. Curva tensão-deformação resultante para $y(t) = 0,05m$.

Nota-se da Figura (5.11) que a SMA reduziu a amplitude de deslocamento da massa em cerca de 70% para $t = 0,025s$ e 80% para $t > 1,6s$. Na Figura (5.12) verifica-se que a curva tensão-deformação da SMA apresenta comportamento pseudoelástico para esse caso.

5.1.3 - Simulação para diferentes massas

Na simulação apresentada nas Figuras (5.2) e (5.3) obteve-se o comportamento do sistema para uma massa de 500Kg com 0,01m de amplitude e 50Hz de frequência. As Figuras (5.12) a (5.15) mostram como o isolador se comporta para outras massas, tais como 100Kg (Figuras (5.13) e (5.14)) e 800Kg (Figuras (5.15) e (5.16)).

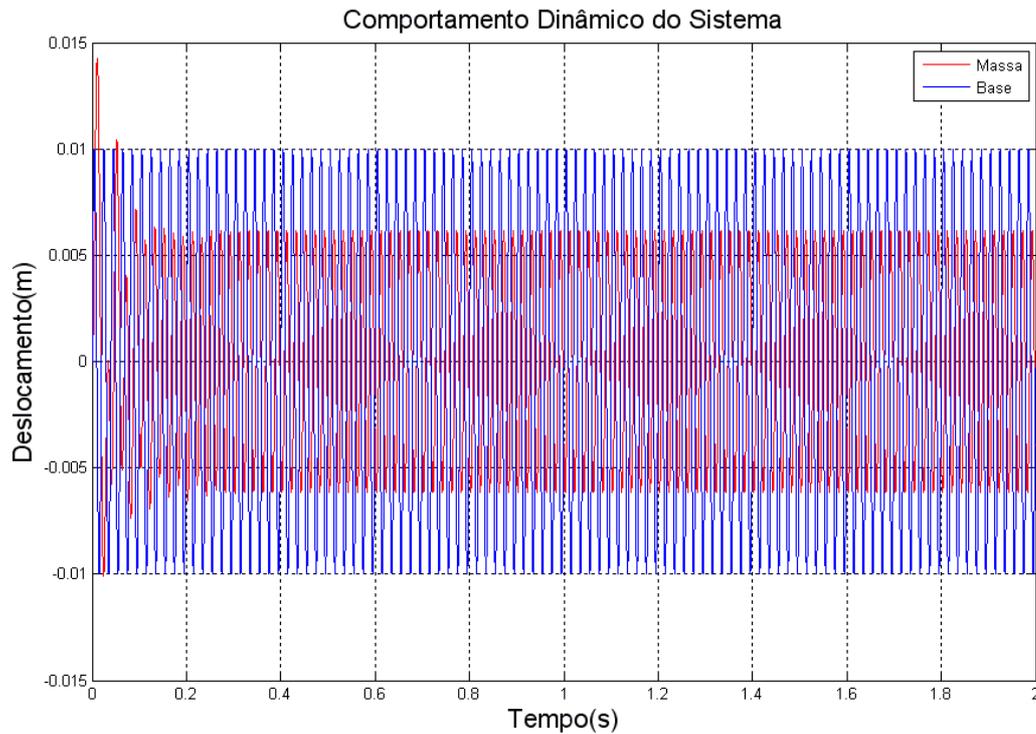


Figura 5.13. Deslocamentos da base e da massa para $m = 100\text{Kg}$.

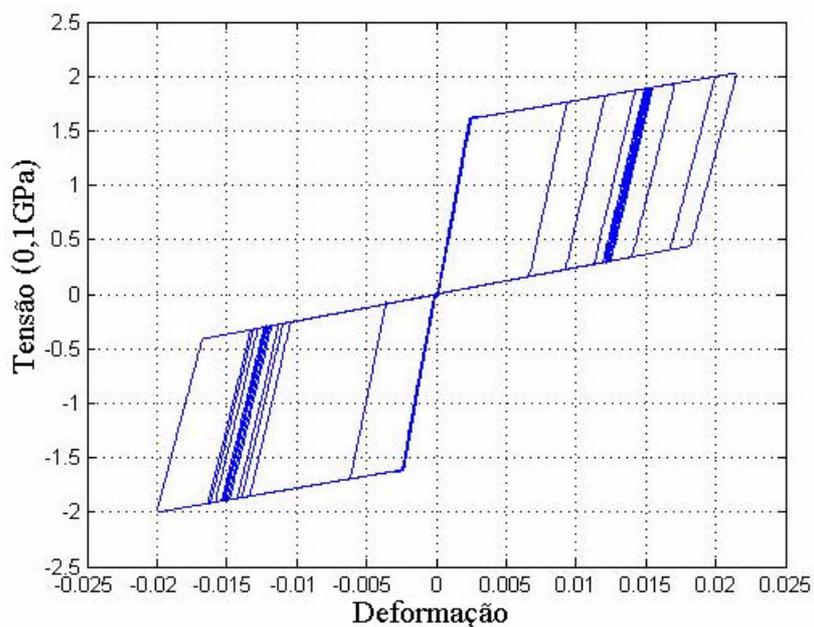


Figura 5.14. Curva tensão-deformação resultante para $m = 100\text{Kg}$.

Como pôde ser observado na Figura (5.13), a SMA inicialmente ampliou a amplitude do movimento da massa em cerca 50% para $t = 0,015s$ e posteriormente reduziu essa transmissibilidade em mais de 40% para $t > 0,3s$. Na Figura (5.14) observa-se a curva tensão-deformação da SMA que apresentou comportamento pseudoelástico para essa situação.

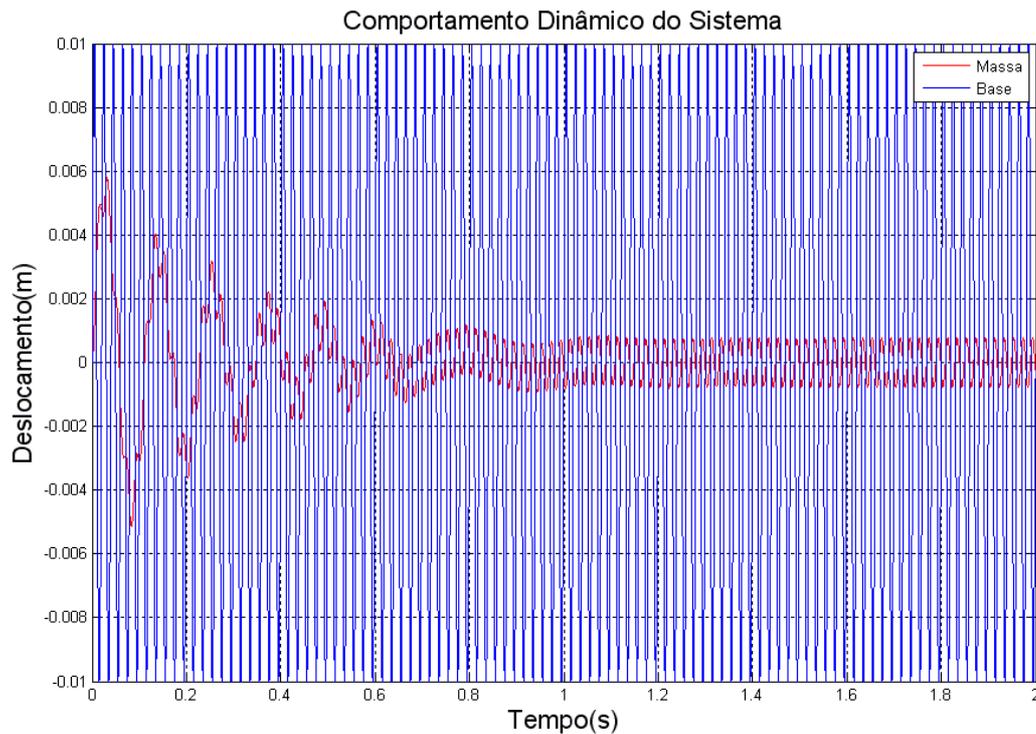


Figura 5.15. Deslocamentos da base e da massa para $m = 800Kg$.

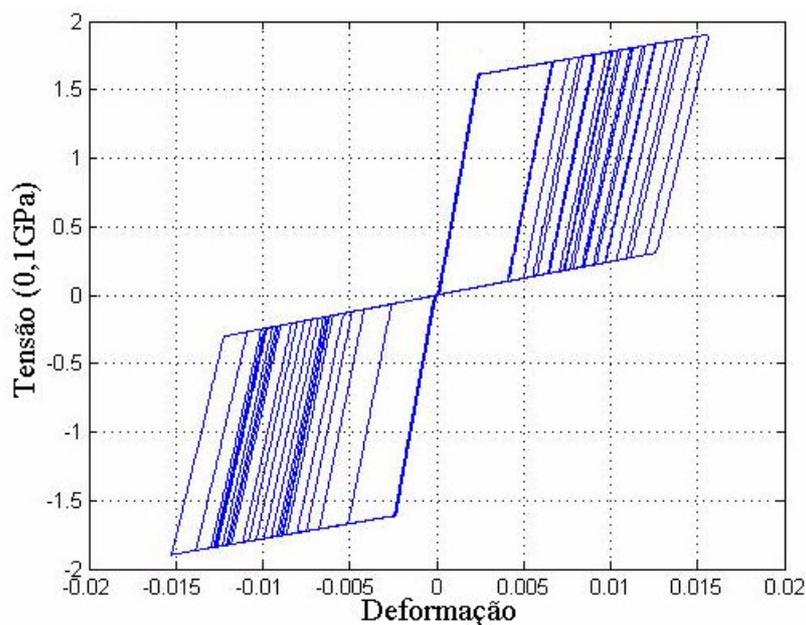


Figura 5.16. Curva tensão-deformação resultante para $m = 800Kg$.

Nota-se da Figura (5.15) que a SMA reduziu a transmissibilidade da vibração em cerca 40% para $t = 0,025s$ e 80% para $t > 1,2s$. Na Figura (5.16) verifica-se que a curva tensão-deformação da SMA apresenta comportamento pseudoelástico para essa situação.

As Figura (5.17) e (5.18) ilustram o comportamento do sistema para uma massa de 5Kg, de forma que a SMA esteja sempre na fase elástica.

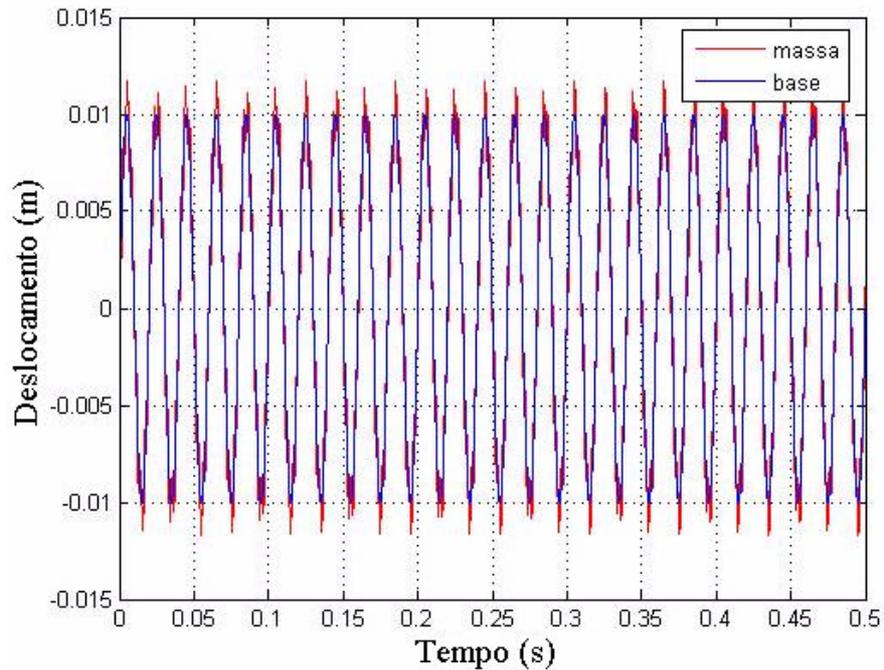


Figura 5.17. Deslocamentos da base e da massa para $m = 5Kg$.

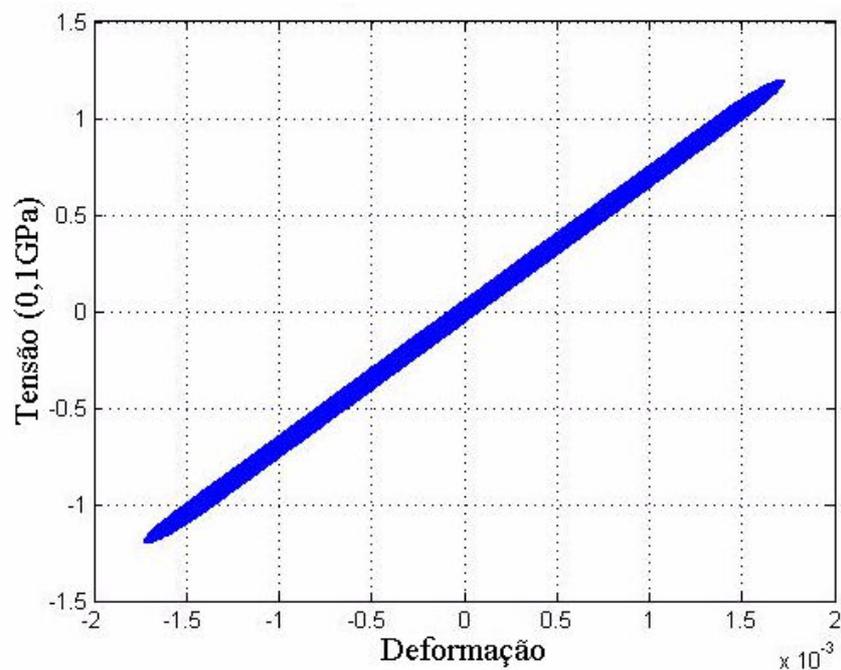


Figura 5.18. Curva tensão-deformação resultante para $m = 5Kg$.

Quando a massa é pequena de forma que provoque apenas deformações elásticas no isolador pseudoelástico, todo o movimento da base é transmitido à massa, como mostrado na Figura (5.17). Na Figura (5.18) verifica-se o que o sistema apresenta comportamento bastante próximo do elástico, com deformações reversíveis e uma relação linear entre tensão e deformação. Para que o isolador apresente comportamento pseudoelástico é necessário uma carga mínima de 20Kg.

5.2 - MODELAGEM MATEMÁTICA VIA DA SILVA

A partir do modelo de Da Silva (1995) apresentado no Capítulo 2, pode-se estimar as forças que atuam sobre a SMA, para o isolador mostrado na Figura (5.1):

$$F_{SMA} = \sigma A , \quad (30)$$

$$-m\ddot{x} = \sigma A . \quad (31)$$

Seu comportamento dinâmico é regido por equações diferenciais ordinárias lineares, que se alteram de acordo com a fase em que a SMA se encontra. Para a fase elástica austenítica, tem-se a seguinte equação:

$$\frac{mL}{A} \ddot{x}(t) + Ex(t) = Ey(t) . \quad (32)$$

Na fase de transformação de austenita para martensita tem-se:

$$m\ddot{x}(t) = \sigma_H A . \quad (33)$$

Para descarregamentos parciais, tem-se:

$$\frac{mL}{A} \ddot{x}(t) + Ex(t) = E(\xi \varepsilon_0 L + y(t)) . \quad (34)$$

Na fase de transformação de martensita para austenita tem-se:

$$m\ddot{x}(t) = \sigma_L A . \quad (35)$$

Para carregamentos parciais, tem-se:

$$\frac{mL}{A} \ddot{x} + Ex(t) = E(\xi \varepsilon_0 L + y(t)) . \quad (36)$$

Para a fase elástica martensítica, tem-se

$$\frac{mL}{A} \ddot{x} + Ex(t) = E(\varepsilon_0 L + y(t)) . \quad (37)$$

Na Tabela (6) são apresentados os parâmetros característicos da SMA utilizados para a simulação com o modelo Da Silva.

Tabela 6. Parâmetros característicos da SMA (Da Silva, 1995).

Propriedade	Valor
σ_L	450 MPa
σ_H	300 MPa
E	70 GPa
T_R	310 K
ϵ_0	0,06
C	1 MPa/K

Após simulação do comportamento termomecânico das SMA via modelo de Da Silva, simulou-se o comportamento dinâmico do isolador de vibração pseudoelástico. A Figura (5.19) mostra os resultados obtidos para os dados mostrados nas Tab. (4) e (6). Para analisar melhor o comportamento do isolador, variou-se os parâmetros amplitude, frequência, e massa.

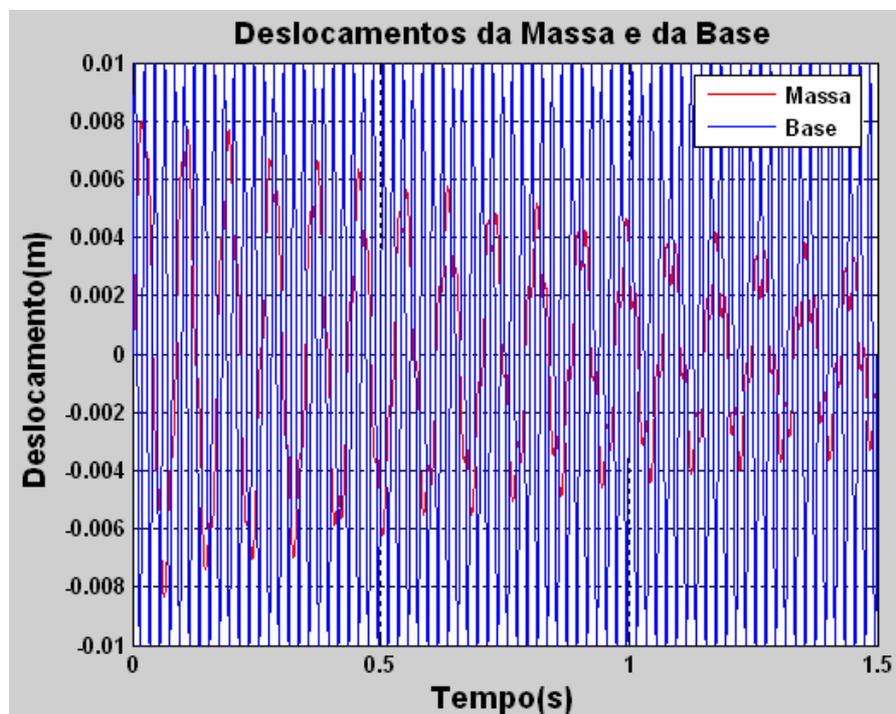


Figura 5.19. Deslocamentos da base e da massa para os dados iniciais (Tab. (4) e (6)), $\omega = 50\text{Hz}$.

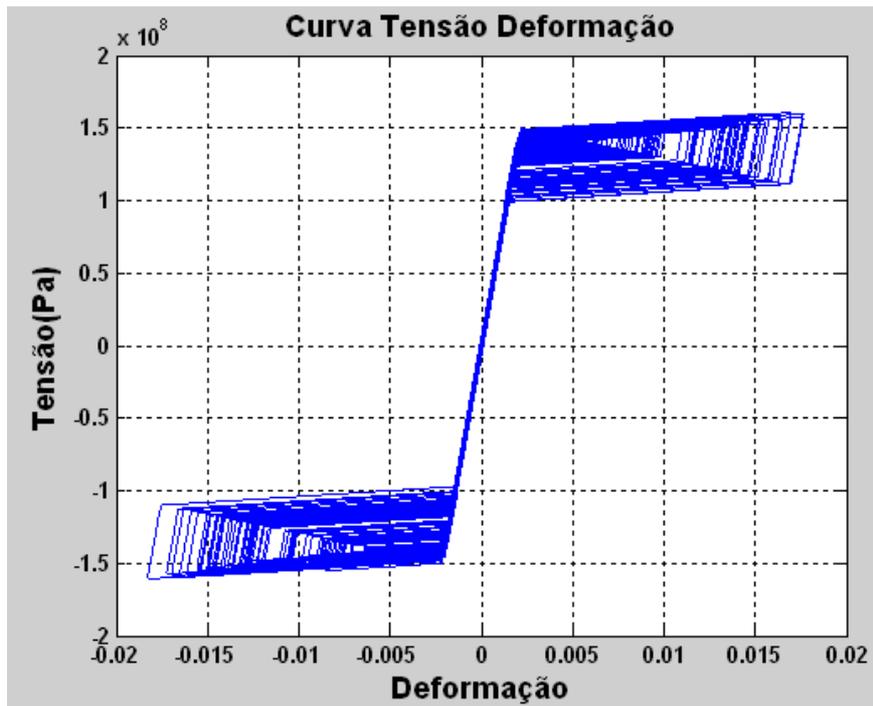


Figura 5.20. Curva tensão-deformação resultante para os dados iniciais (Tab. (4) e (6)), $\omega = 50\text{Hz}$.

Nota-se da Figura (5.19) que a SMA reduziu a amplitude do movimento da massa inicialmente em cerca 20% para 70% em $t = 1,5\text{s}$. Na Figura (5.20) observa-se a curva tensão-deformação da SMA, que apresenta comportamento pseudoelástico para esse caso. Em relação à simulação baseada no modelo de Lagoudas (2001), os laços de histerese apresentam comportamentos diferentes para carregamentos parciais.

Para analisar melhor o comportamento do isolador de vibração pseudoelástico pelo modelo de Da Silva (1995), foram realizadas simulações para diferentes frequências, amplitudes e massas.

5.2.1 - Simulação para diferentes frequências de excitação

Na simulação inicial, Figura (5.19), obteve-se o comportamento do sistema para uma frequência de 50hz. As Figuras (5.21) a (5.24) mostram como o isolador se comporta para outros níveis de frequências, tais como 25Hz (Figuras (5.21) e (5.22)) e 80Hz (Figuras (5.23) e (5.24)).

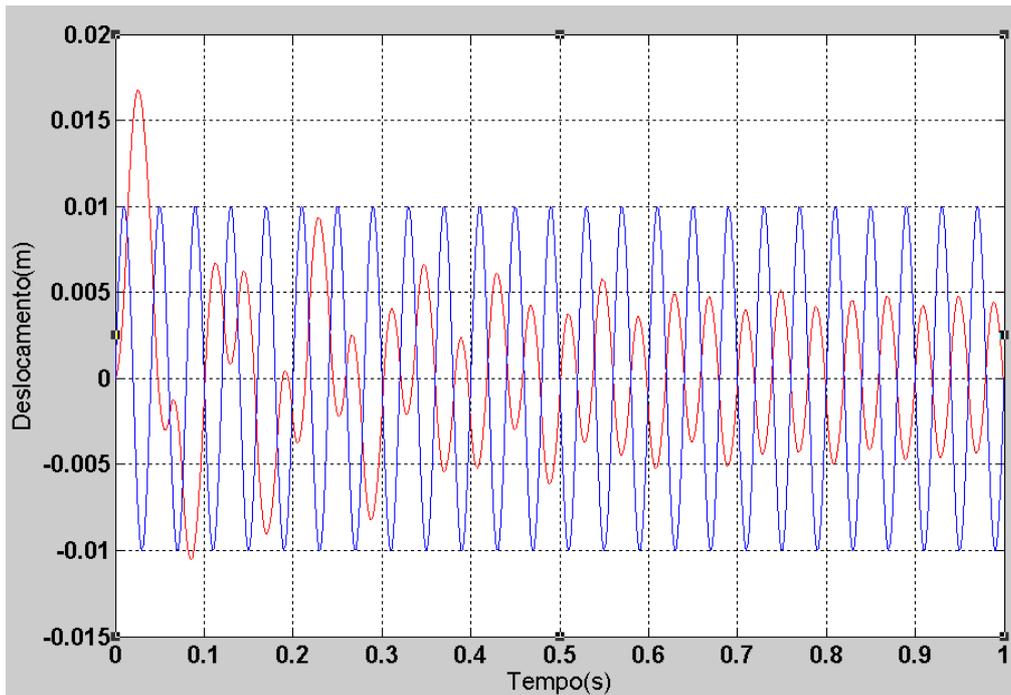


Figura 5.21. Deslocamentos da base e da massa para $\omega = 25\text{hz}$.

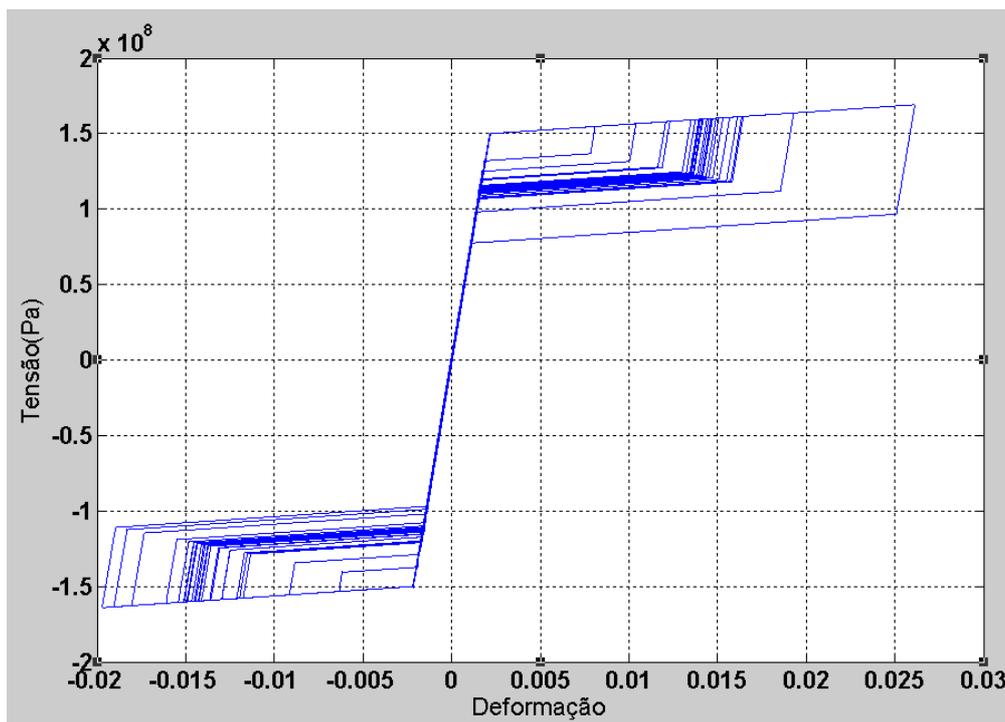


Figura 5.22. Curva tensão-deformação resultante para $\omega = 25\text{hz}$.

Como pôde ser observado na Figura (5.21), a SMA inicialmente ampliou a amplitude do movimento da massa em cerca 70% para $t = 0,05\text{s}$ e posteriormente reduziu essa transmissibilidade em mais de 50% para $t > 0,8\text{s}$. Na Figura (5.22) observa-se a curva tensão-deformação da SMA que apresentou comportamento pseudoelástico para essa situação.

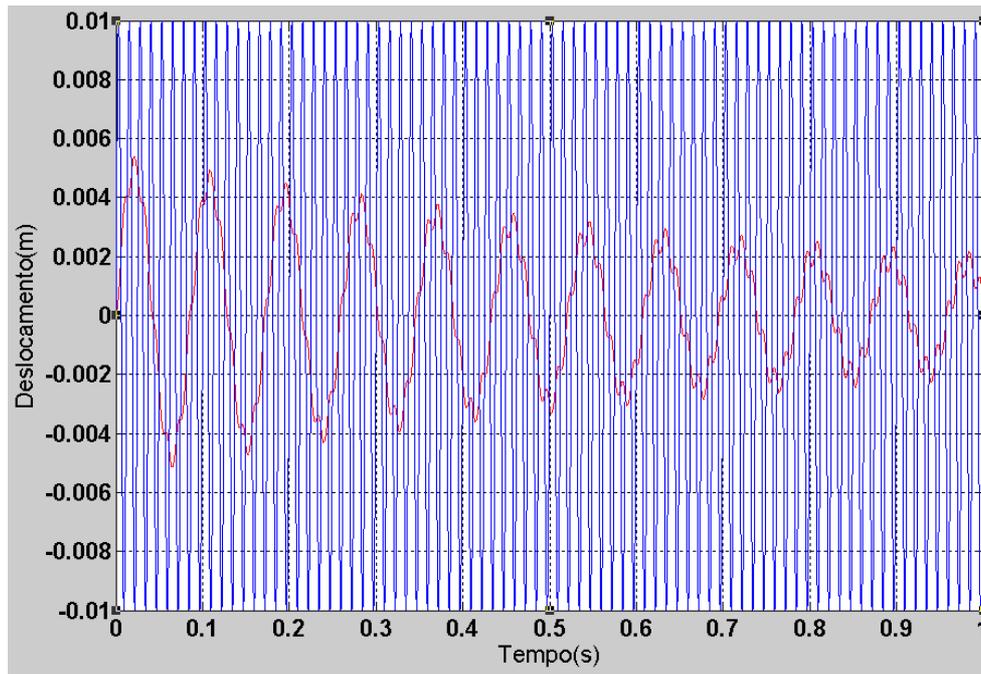


Figura 5.23. Deslocamentos da base e da massa para $\omega = 80\text{hz}$.

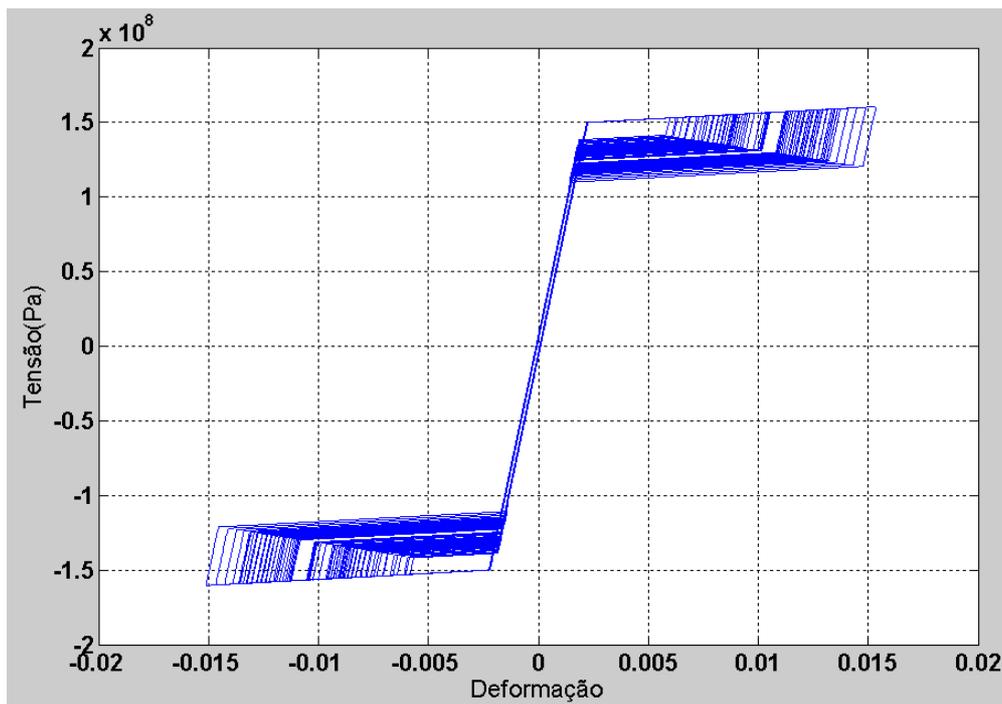


Figura 5.24. Curva tensão-deformação resultante para $\omega = 80\text{hz}$.

Nota-se da Figura (5.23) que a SMA reduziu a amplitude do movimento da massa inicialmente em cerca 50% em $t = 0,025\text{s}$ para mais de 75% em $t > 0,95\text{s}$. Na Figura (5.24) observa-se a curva tensão-deformação da SMA, que apresenta comportamento pseudoelástico para esse caso.

5.2.2 - Simulação para diferentes massas

Na simulação apresentada nas Figuras (5.19) e (5.20) obteve-se o comportamento do sistema para uma massa de 500Kg. As Figuras (5.25) a (5.28) mostram como o isolador se comporta para outras massas, tais como 100Kg (Figuras (5.25) e (5.26)) e 800Kg (Figuras (5.27) e (5.28)).

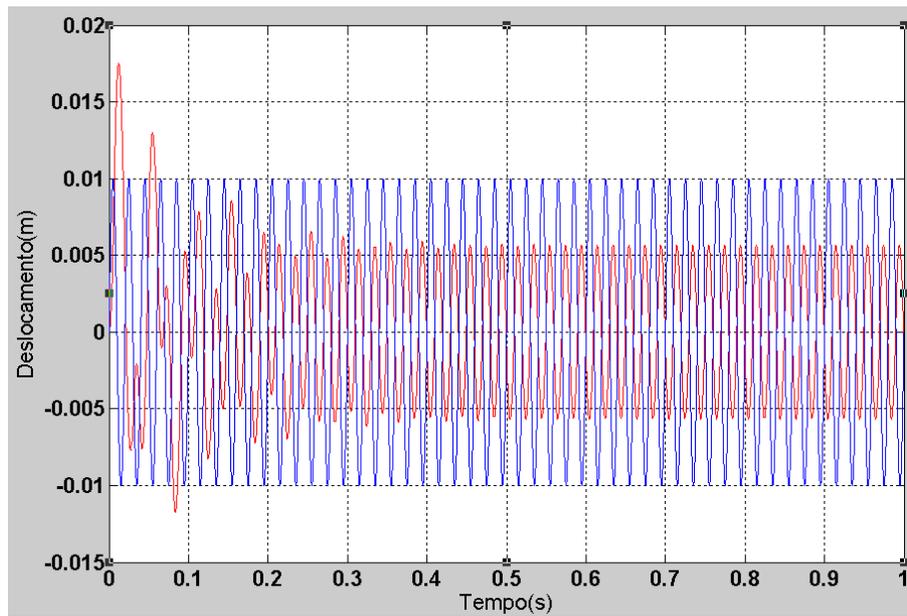


Figura 5.25. Deslocamentos da base e da massa para $m = 100\text{Kg}$.

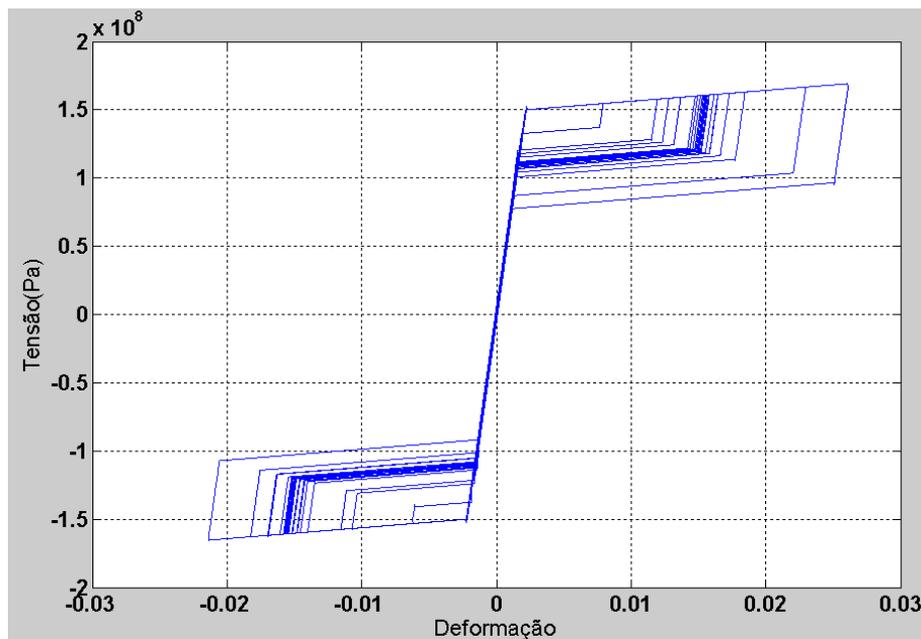


Figura 5.26. Curva tensão-deformação resultante para $m = 100\text{Kg}$.

Como pôde ser observado na Figura (5.25), a SMA inicialmente ampliou a amplitude do movimento da massa em cerca 70% e posteriormente reduziu essa transmissibilidade para algo em de 40% para $t = 1s$. Na Figura (5.26) observa-se a curva tensão-deformação da SMA que apresentou comportamento pseudoelástico para essa situação.

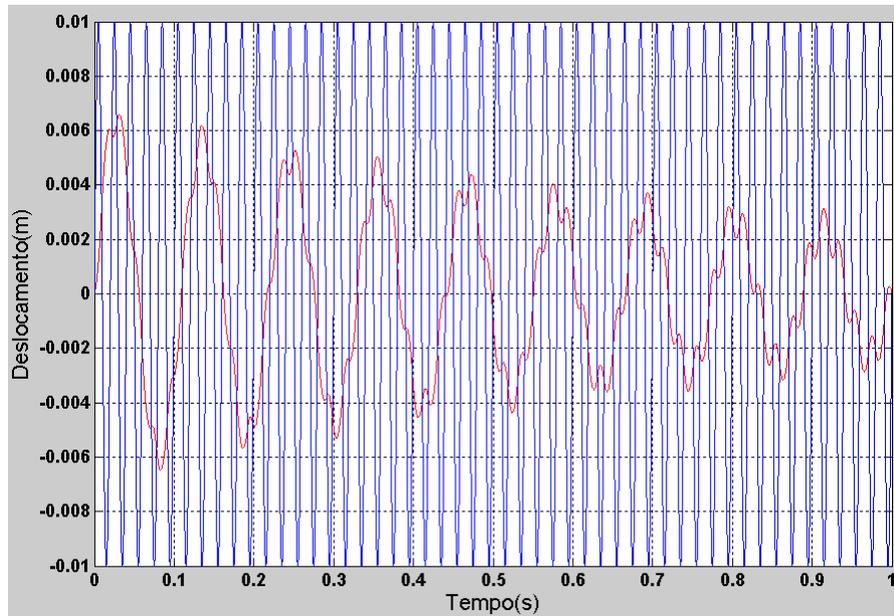


Figura 5.27. Deslocamentos da base e da massa para $m = 800Kg$.

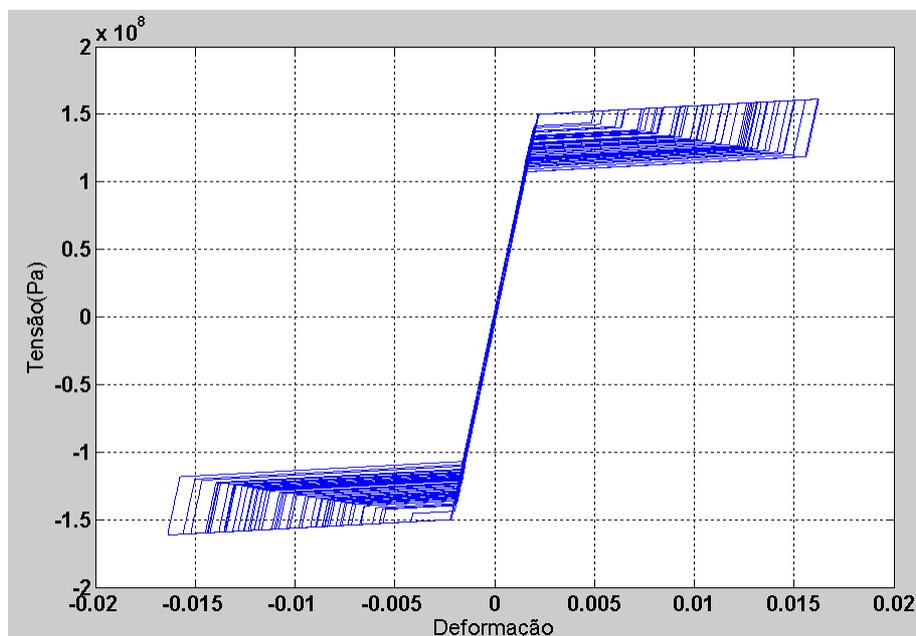


Figura 5.28. Curva tensão-deformação resultante para $m = 800Kg$.

Nota-se da Figura (5.27) que a SMA reduziu a amplitude do movimento da massa inicialmente em cerca 30% em $t = 0,025s$ para mais de 70% em $t = 0,92s$. Na Figura (5.28)

observa-se a curva tensão-deformação da SMA, que apresenta comportamento pseudoelástico para esse caso.

As Figuras (5.29) e (5.30) mostram o comportamento do sistema para uma massa de apenas 5kg, de forma que a SMA esteja sempre na fase elástica. Os demais parâmetros foram mantidos de acordo com o mostrado na Tabela 2.

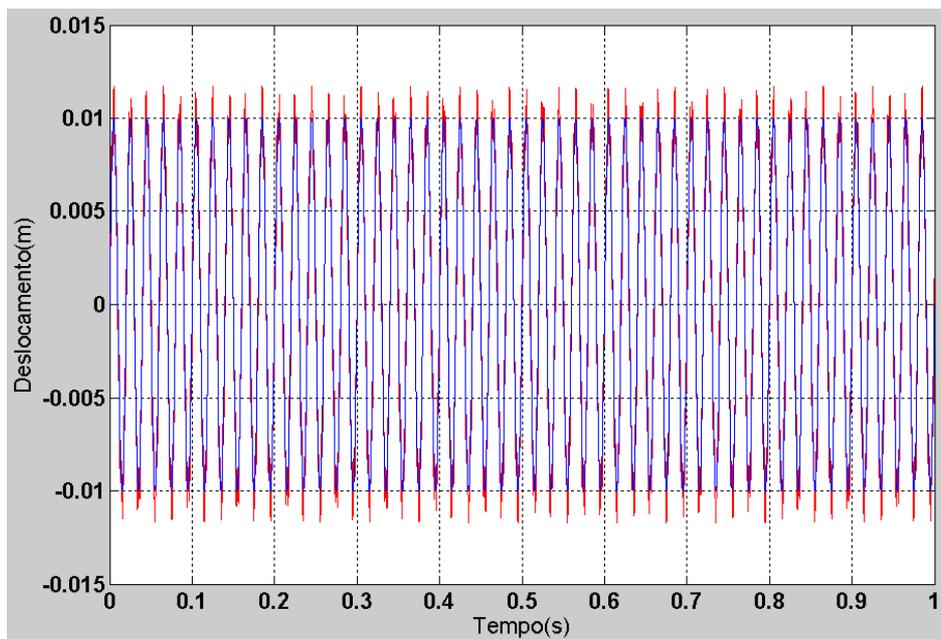


Figura 5.29. Deslocamentos da base e da massa para $m = 5\text{Kg}$.

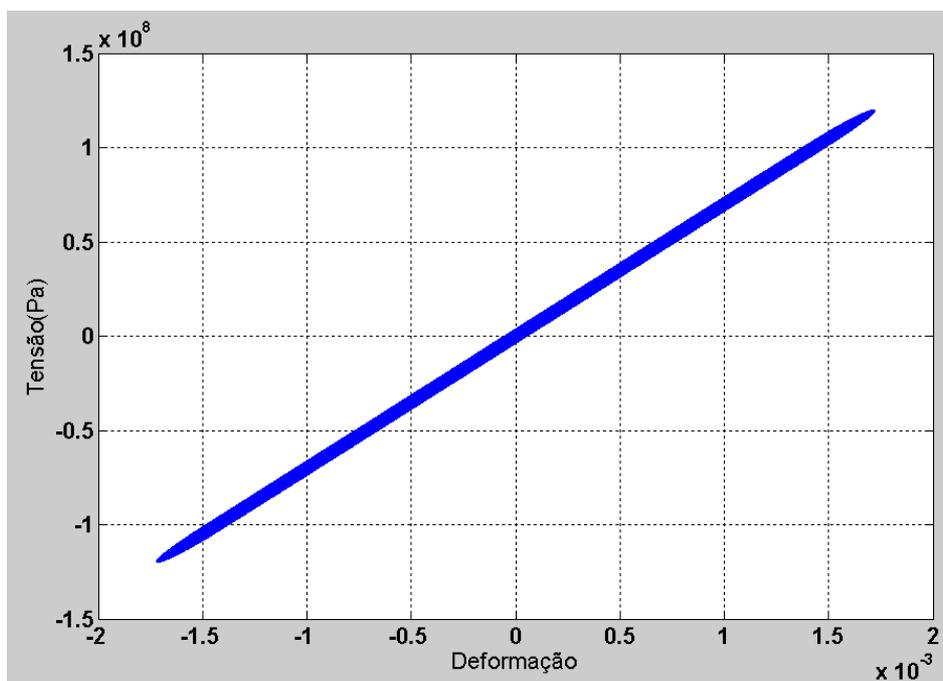


Figura 5.30. Curva tensão-deformação resultante para $m = 5\text{Kg}$.

Quando a massa é pequena de forma que provoque apenas deformações elásticas no isolador pseudoelástico, todo o movimento da base é transmitido à massa, como mostrado na Figura (5.29). Na Figura (5.30) verifica-se o que o sistema apresenta comportamento elástico, com deformações reversíveis e uma relação linear entre tensão e deformação para essa situação. Para que o isolador apresente comportamento pseudoelástico é necessário uma carga mínima de 20Kg.

Verificou-se que o modelo de Da Silva (1995) e o modelo simplificado de Lagoudas (2001) são capazes de representar as principais características do comportamento pseudoelástico das SMA, tanto para carregamentos completos quanto para carregamentos parciais. Através da simulação numérica do comportamento dinâmico do isolador pseudoelástico, foi possível verificar a potencialidade das SMA para isolação de vibração. Para os dois modelos, o movimento de excitação foi reduzido em até 97% para uma massa de 500kg e 100Hz de frequência de excitação da base. Verificou-se também que para o isolador apresente comportamento pseudoelástico é necessário uma carga mínima de 20kg. Foi possível ainda observar como a resposta do sistema considerado varia com a alteração de propriedades do isolador e da SMA em questão, como frequência, amplitude e massa.

6 – COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PROTÓTIPO 1.0

O comportamento mecânico do Protótipo 1.0 será caracterizado neste trabalho por meio de ensaios de compressão quase-estático cíclicos. O objetivo aqui é verificar se o Protótipo 1.0 apresenta um comportamento pseudoelástico.

O Protótipo 1.0 foi construído com 4 fios de NiTi de 1,185mm de diâmetro com 31mm de comprimento. Os ensaios de compressão foram realizados sob condições de deslocamento prescrito a uma velocidade de 5mm/s. O deslocamento máximo prescrito variou de 1,4mm a 2,5mm, correspondendo a uma faixa de deformação de 4,5 a 8%.

Na Figura (6.1) pode-se visualizar uma ilustração dos esforços sobre o isolador e os fios de SMA durante os ensaios.

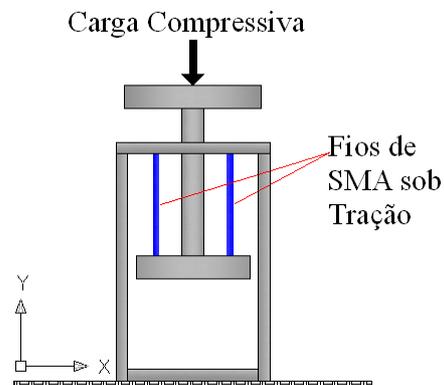


Figura 6.1. Ilustração dos esforços sobre o Protótipo e sobre os fios de NiTi durante os ensaios.

Na Figura (6.3) pode-se visualizar o protótipo concebido montado na máquina de ensaios universal MTS 810 para a realização dos testes estáticos.



Figura 6.3. Montagem do Protótipo 1.0 na máquina de ensaios universal MTS 810.

As Figuras (6.4) a (6.7) apresentam as curvas tensão-deformação obtidas para as diferentes deformações máximas prescritas. Para cada ensaio, foram utilizados novos fios de SMA e 200 ciclos de carregamento, com temperatura ambiente de 23°C.

Comportamento do Isolador de Vibração Pseudoelástico

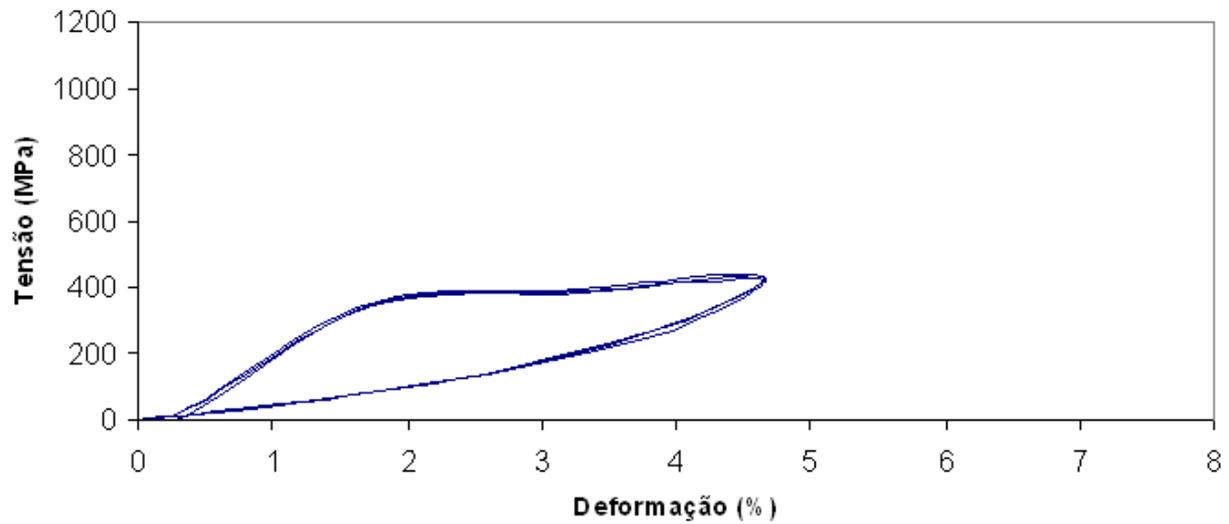


Figura 6.4. Curva Tensão-Deformação do Protótipo 1.0 para $\epsilon_{max} = 4,5\%$.

Comportamento do Isolador de Vibração Pseudoelástico

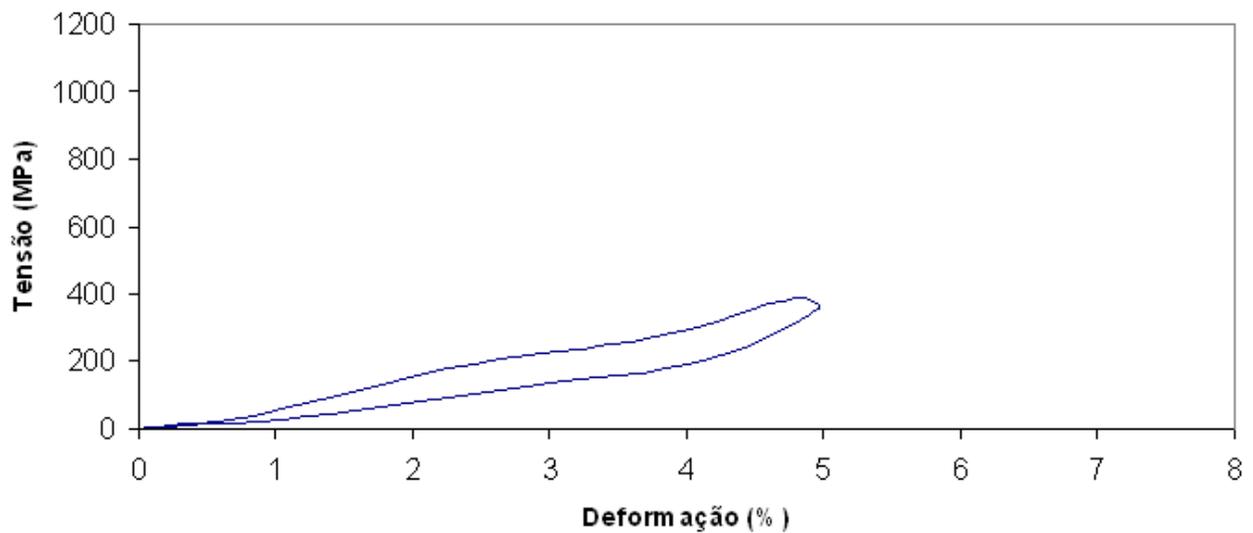


Figura 6.5. Curva Tensão-Deformação do Protótipo 1.0 para $\epsilon_{max} = 5\%$.

Comportamento do Isolador de Vibração Pseudoelástico

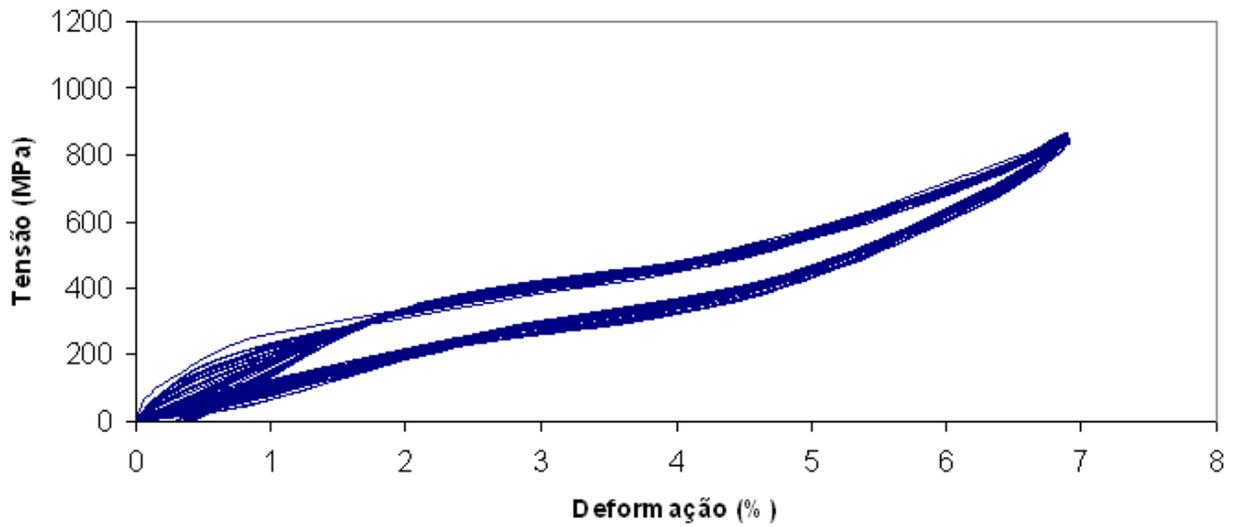


Figura 6.6. Curva Tensão-Deformação do Protótipo 1.0 para $\epsilon_{max} = 7\%$.

Comportamento do Isolador de Vibração Pseudoelástico

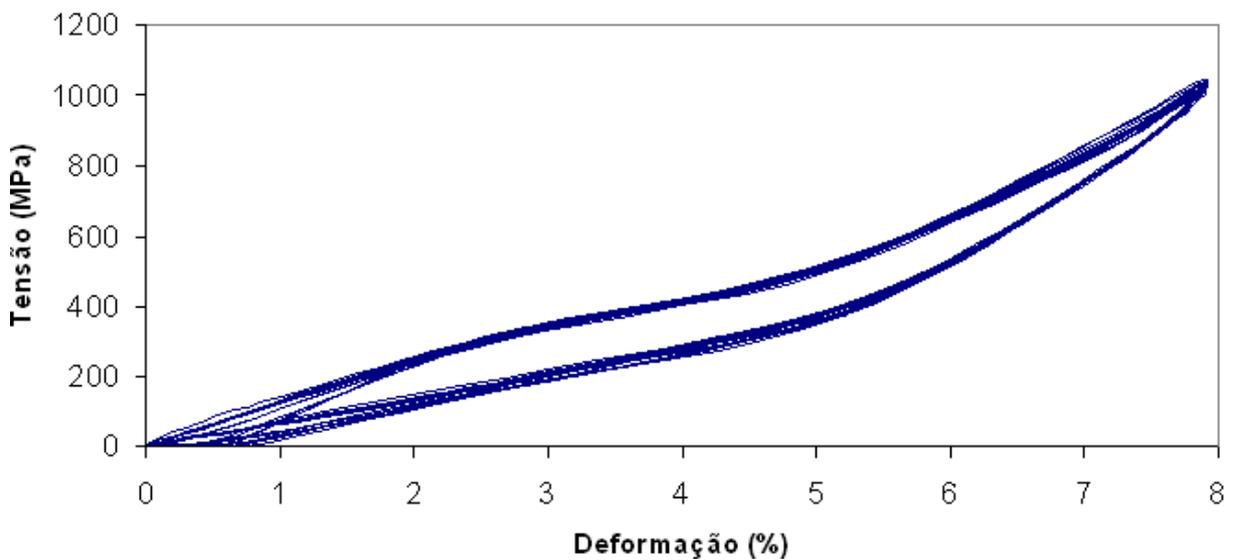


Figura 6.7. Curva Tensão-Deformação do Protótipo 1.0 para $\epsilon_{max} = 8\%$.

As curvas apresentadas nas Figuras (6.4) a (6.7) mostram o comportamento mecânico do isolador de vibração (Protótipo 1.0), o qual se comporta pseudoelasticamente para deformações próximas de 8%.

7 – CONCLUSÃO

Neste trabalho concebeu-se, projetou-se, construiu-se, simulou-se e testou-se um isolador de vibração baseado no comportamento pseudoelástico das SMA. O isolador concebido consiste de um cilindro metálico ao qual podem ser fixados até oito fios de SMA com no máximo 5mm de diâmetro. Para a caracterização do isolador de vibração foram realizados testes de carregamento cíclico, os quais mostraram que o Protótipo 1.0 apresenta comportamento pseudoelástico.

Verificou-se que o modelo de Da Silva (1995) e o modelo simplificado de Lagoudas (2001) são capazes de representar o comportamento pseudoelástico das SMA, tanto para carregamentos completos quanto para carregamentos parciais.

Foram realizadas também simulações numéricas para determinação do comportamento dinâmico do isolador de vibração pseudoelástico, nas quais as frequências variaram de $\omega=25\text{Hz}$ a $\omega= 100\text{Hz}$, as massas de 5 a 800kg e as amplitudes de excitação da base de 0,005 a 0,05m. Os resultados obtidos mostraram que o mesmo é capaz de reduzir o movimento vibratório em até 97% para uma massa de 500Kg e 100Hz de frequência de excitação da base.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar a caracterização dinâmica do Protótipo 1.0;
- Ajustar o código numérico desenvolvido em MatLab® com os valores obtidos nos ensaios experimentais da SMA, tais como módulo de elasticidade nas diferentes fases, deformação máxima, entre outros, assim como inserir as características do isolador de vibração projetado (Protótipo 1.0).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHOUR, O.; ROGERS, C. A.; KORDONSKY, W. **Magnetorheological fluids: materials, characterization, and devices.** Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 7, p.123–130, 1996.
- AYRES, T.; CHAUDHRY, Z.; ROGERS, C. A. **Localized Health Monitoring of Civil Infrastructure via Piezoelectric Actuator/Sensor Patches.** SPIE's 1996 Symposium on Smart Structures and Integrated Systems, SPIE 2719, p. 123-131, 1996.
- BALAPGOL, B. S.; BAJORIA, K. M.; KULKARNI, S. A. **Natural Frequencies of Multilayer SMA Laminated Composite Cantilever Plate,** Smart Mater. Struct., Vol. 15, p.1021-1032, 2006.
- BAZ, A.; IMAN, K.; MCCOY, J. **Active Vibration Control of Flexible Beams Using Shape Memory Actuators,** Journal of Sound and Vibration, Vol. 140(3), p.437–456, 1990.
- BIRMAN, V. **Micromechanics of Composites with Shape Memory Alloy Fibers in Uniform Thermal Fields,** AIAA Journal, 34(9), p.1905-1912, 1996.
- BIRMAN, V. **Effects of SMA dampers on linear vibrations of elastic structures,** Proc. SPIES 3038, p.268-276, 1997.
- BUSH, J. D.; PURDY, W. E.; JOHNSON, D. A. **Development of a Non – Explosive Release Device for Aerospace Applications.** 26th Aerospace Mechanisms Symposium. NASA Goddard Space Flight Center, USA, 1992.
- CAO, W.; CROSS, L. E. **Physics Review. B,** 44, p. 5-12, 1991.
- CHOI, S. B.; HWANG, J. H. **Structural Vibration Control Using Shape Memory Actuators.** Journal of Sound and Vibration, v.231, n.4, p. 1168-1174, 2000.
- CLARK, P. W., AIKEN, I. D., KELLY, J. M., HIGASHINO, M., KRUMME, R. C. **Experimental and analytical studies of shape memory alloy damper for structural control,** Proc. Passive Damping, San Diego, USA, 1995.
- DA SILVA, E. P. **Modelagem Mecânica de Transformação de Fase Induzidas por Tensões em Sólidos,** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 1995.
- DA SILVA, E. P. **Aplicação de Ligas com Memória de Forma em Estruturas Adaptativas.** Série Arquimedes, Volume 2, Anais do DINCON, 2003.
- DA SILVA, E. P. **Active Shape Control of a Beam by Means of Shape Memory Actuators,** 18th International Congress of Mechanical Engineering, 2005.
- DELAEY, L.; KRISHNAN, R. V.; TAS, H. **Thermoelasticity, pseudoelasticity, and the Memory Effects Associated with Martensitic Transformations.** Part 1, Structural and microstructural changes associated with the transformations. Journal of Materials Science, 9, p.1521-1535, 1974.

- DELAEY, L.; KRISHNAN, R. V.; TAS, H. **Thermoelasticity, pseudoelasticity, and the Memory Effects Associated with Martensitic Transformations.** Part 2, The macroscopic mechanical behaviour. *Journal of Materials Science*, 9, p.1536-1544, 1974.
- EATON, J. P. **Feasibility study of using passive SMA absorbers to minimize secondary system structural response**, Dissertação de Mestrado, Worcester Polytechnic Institute, MA, 1999.
- GHANDI, F.; CHAPUIS, G. **Passive Damping Augmentation for a Vibrating Beam using Pseudoelastic Shape Memory Alloy Wires.** *Journal of Sound and Vibration*, p.519-539, 2002.
- GHANDI, M. V. ; THOMPSON, B. S. **Smart Materials and Structures.** Michigan: Chapman & Hall, 1992.
- GIURGIUTIU, V.; ROGERS, C. A. **Large-Amplitude Rotary Induced-Starin (LARIS) Actuator.** *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, Technomic Pub. Co., p.41-50, 1997.
- GOTTHARDT, R.; BIDAUX, J. E. **Function materials based on polymerc matriz composites with embedded shape memory alloy.** In.: *Int. Conf. Displacive Phase Transf. & their application in Material Engineering* , TMS Publications, Inur K. (Editor), p.157-166, 1998.
- HE, Y. Y.; OI, S.; CHU, F.L.; LI, H.X. **Vibration control of a rotor-bearing system using shape memory alloys: I. Theory**, *Smart Mater. Struct*, Vol. 16, p.114-121, 2007.
- HE, Y. Y.; OI, S.; CHU, F.L.; LI, H.X. **Vibration control of a rotor-bearing system using shape memory alloys: II. Experimental**, *Smart Mater. Struct*, Vol. 16, p.122-127, 2007.
- HIETANEN, S. **ER fluids and MR materials** – Basic properties and some application developments. Espoo: Technical Research Centre of Finland (VTT). Research report BVAL73-011181. 2001. 27 p.
- IKEDA, T. **Fundamentals of Piezoelectricity.** Oxford University Press, USA, 280p., 1990.
- JANOCHA, H. **Adaptronics and Smart Structures:** basics, materials, design and applications. Springer – Verlag Berlin Hiedelberg, 1999.
- KUANG, K. S. C. ; CANTWELL, W. J. **The use os plastic optical fibres and shape memory alloys for damage assessment and damping control in composite materials.** *Sci. Technol.* Vol. 14, p.1105-1313, 2003.
- LAGOUDAS, D. C. ; MAYES, J. J. ; KHAN, M. M. **Simplified Shape Memory Alloy (SMA) Model for Vibration Isolation.** Texas, Aerospace Engineering Department, 2001.
- LAU, K.; ZHOU, L.; TAO, X. **Control of Natural Frequencies of a Clamped-Clamped Composite Beam with Embedded Shape Memory Alloys Wires.** *Composite Structures* 58, p.39-47, 2002.
- MEIROVITCH, L. **Dynamics and Control of Structure**, Wiley-Interscience, New York, USA, 448p, 1990.

- MEIROVITCH, L. **Fundamentals of Vibrations**, McGraw-Hill, New York, USA, 816p, 2000.
- MEMORY METALLE, **Material Data Sheet Niti-Alloy S (superelastic)**, German, 2008.
- MOULSON, A. J.; HERBERT, J. M. **Electroceramics**. Chapman & Hall, London 1990.
- MTS MANUAL. **Model 685.53 Grip Control Module, Product Information**. MTS System Corporation, Eden Prairie, Minnesota, USA, 2001.
- MTS MANUAL. **Model 793.00 System Software**. MTS System Corporation, Eden Prairie, Minnesota, USA, 2001.
- NAGAYA K. ; TAKEDA S. **Active Control Method for Passing Through Critical Speeds of Rotating Shafts by Changing Stiffness of the Supports**, J. Sound Vib. 113, p.307–315, 1997.
- NEWMARK, N.M. **A Method of Computation for Structural Dynamics**, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE 85, p.67–94, 1959.
- NIE, J; YAN, X. **Intelligent Bearing System for passing through Critical Speed of Aeroengine Rotor by Changing Stiffness using SMA Wires**, Materials Science Forum, Vol. 327-328, p.99-102, 2000.
- OTSUKA, K. ; WAYMAN, C. M. **Shape Memory Materials**. Cambridge University Press, United Kingdom, 1998.
- PARK, S. E.; SHROUT, T.: **J. Mat. Res. Innov.**, 1, p. 20-25, 1997.
- RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. 3^{ed}. Prentice Hall, Reading, Mass., USA, 1078p., 2004.
- ROGERS, C. A.; LIANG, C. **Design of Shape Memory Alloy Springs with Applications in Vibration Control**. Journal of Intelligent Material Systems and Structure. p. 314-322, 1997.
- ROH, J. H.; HAN, J. H.; LEE, I., **Effects of Shape Memory Alloys on Structural Modification, Key Engineering Materials**, Vol. 270-273, p.2120-2125, 2005.
- SAADAT, S.; SALICHS, J; NOORI, M.; HOU, Z.; DAVOODI, H.; BAR-ON, I.; SUZUKI, Y.; MASUDA, A., **An Overview of Vibration and Seismic Application of NiTi Shape Memory Alloy**, Smart Mater. Struct., Vol. 11, p.218-229, 2002.
- SCHETKY, L. M. **Shape Memory Alloys**. Scientific American, v. 241 (5), p.68-76, 1979.
- SHAHIN, A. R.; MECKL, P. H.; JONES, J. D. **Modeling of SMA Tendons for Active Control of Structures**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 8, No. 1, p.51-70, 1997.
- SHIBAYAMA, A.; MIYAZAKI, T.; YAMAGUCHI, K.; MURAKAMI, K.; FUJITA, T. **Electro-Magnetorheological Fluids Dispersing Zeolite Particles Containing Iron**. International Journal of Modern Physics B, Volume 16, Issue 17-18, p.2405-2411, 2002.

- STOECKEL, D. **Nitinol Medical Devices and Implants**. SMST- Conference Proceedings, p.531-541, 2000.
- STOECKEL, D.; BONSIGNORE, C.; DUDA, S. **A Survey of Stent Designs**. Min. Invas. Ther & Allied Technol, p.137-147, 2002.
- THOMSON, P., BALAS, G. J., NALBANTOGLU, V. **Shape Memory Alloys for Augmenting Damping of Flexible Structures**, AIAA Guidance Navigation and Control Conf., San Diego, CA, 1996.
- WANG, Z. L.; KANG, Z. C. **Functional and Smart Materials**. Plenum Press, New York, 1998.
- WEBER, F.; FELTRIN, G.; HUTH, O. **Guidelines for Structural Control**. Structural Engineering Research Laboratory, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research. Dübendorf, Switzerland, 2006.
- WILLIAMS, K., CHIU, G., BERNHARD, R., **Adaptive-passive Absorbers using Shape-Memory Alloys**, Journal of Sound and Vibration, Vol. 249, No. 5, p.835-848, 2002.
- YAN, X.; NIE, J. **Study of a New Application Form of Shape Memory Alloy Superelasticity**. Institute of Physics Publishing. Smart Materials and Structures. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, Republic of China, 2003.
- YANG, G. **Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control**. Tese de Doutorado, Notre Dame, Indiana, USA, 2001.
- ZAK A. J.; CARTMAELL, M. P.; OSTACHOWICZ, W. M. **Dynamics and Control of a Rotor using an Integrated SMA/Composite Active Bearing Actuator**, Engineering Materials. Vol. 245-246, p.233-240, 2003.
- ZHANG, X. D.; ROGERS, C. A.; LIANG, C. **Modeling of Two-Way Shape Memory Effect**. ASME - Smart Structures and Materials, v.24, p.79-90, 1991.

APÊNDICES

APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DO PROTÓTIPO 1.0

Abaixo são apresentados os cálculos para o dimensionamento das peças mais solicitadas da estrutura do isolador de vibração pseudoelástico, desenvolvidos em ambiente Scilab®.

```
//Determinação dos esforços na tampa superior do isolador de vibração pseudoelastico

//Cargas envolvidas (N):
C=48000; // Forças atuantes devido ao tensionamento dos fios SMA
P=25;    // Peso da tampa

//Dados das Propriedades do aço:
q=7860; // Densidade do aço [kg/m³];
S=170; // Tensão de escoamento do aço [Mpa];
E1=80; // Modulo de elasticidade Transversal [GPa];

// Caracteristicas da tampa superior:
D=100; // Diametro externo [mm]
f=6; // Diametro dos furos [mm]
d=20; // Diametro da haste [mm]
F=6000; // Força aplicada pelo fio SMA (N)
x=8; // Quantidade de fios de SMA
A=(D^2*pi/2)-(x*f^2*pi/2)-(%pi*d^2/2) // Area da tampa superior [mm²]
S=(x*F/A)+((x*F*(D-d)/2))/(%pi*(D^4-d^4)/4) // Tensão maxima admissivel [MPa]
At=C/E1 // Area Transversal [mm²]
x=2*At*1.5/(2*pi*(D-d-f*8)) // Espessura da tampa [mm]

x =

    8.9 mm
```

```
//Determinação dos esforços no suporte dos fios do isolador de vibração pseudoelastico

//Cargas envolvidas (N):
C=48000; // Forças atuantes devido ao tensionamento dos fios SMA
P=18;    // Peso da tampa

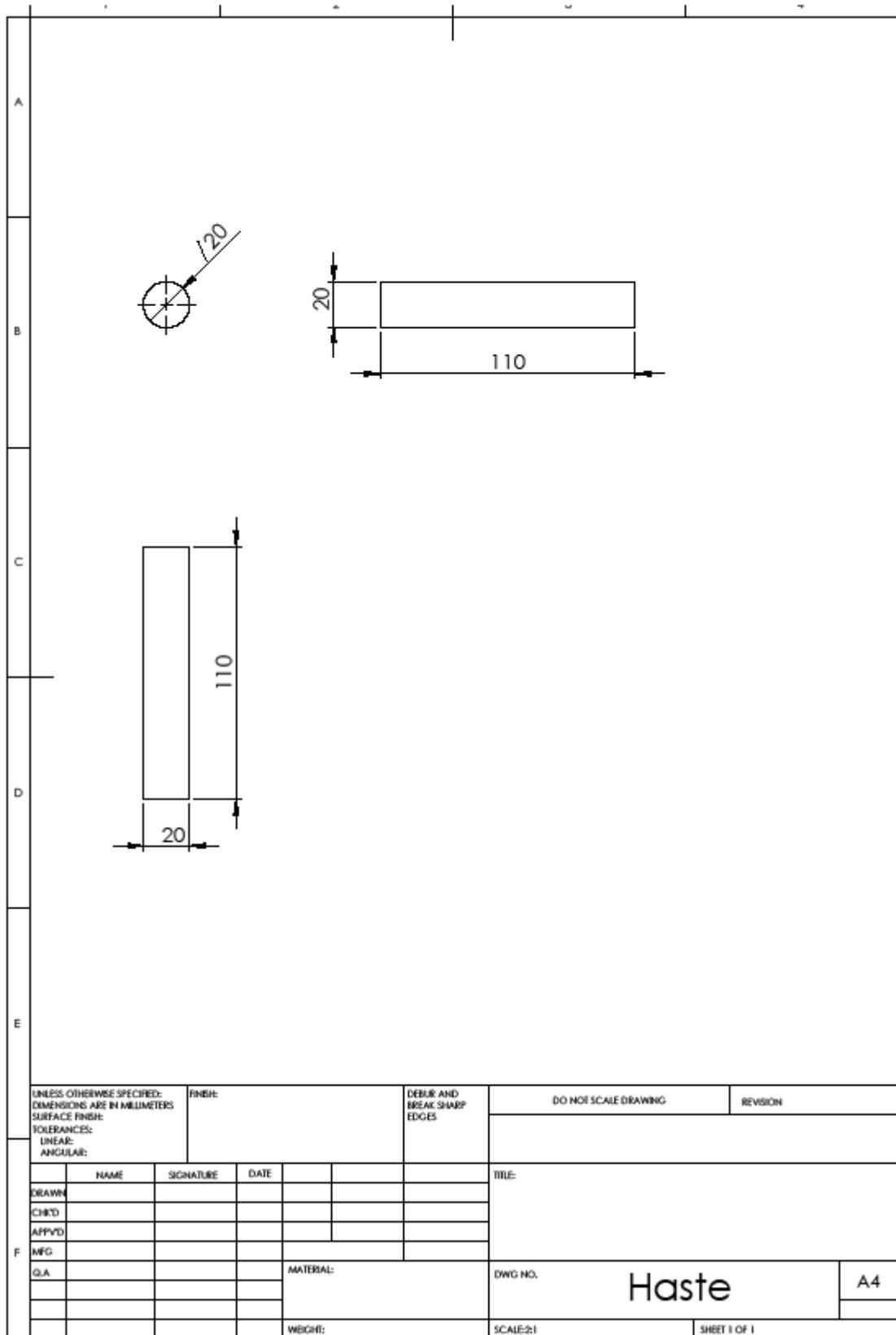
//Dados das Propriedades do aço:
q=7860; // Densidade do aço [kg/m³];
S=170; // Tensão de escoamento do aço [Mpa];
E1=80; // Modulo de elasticidade Transversal [GPa];

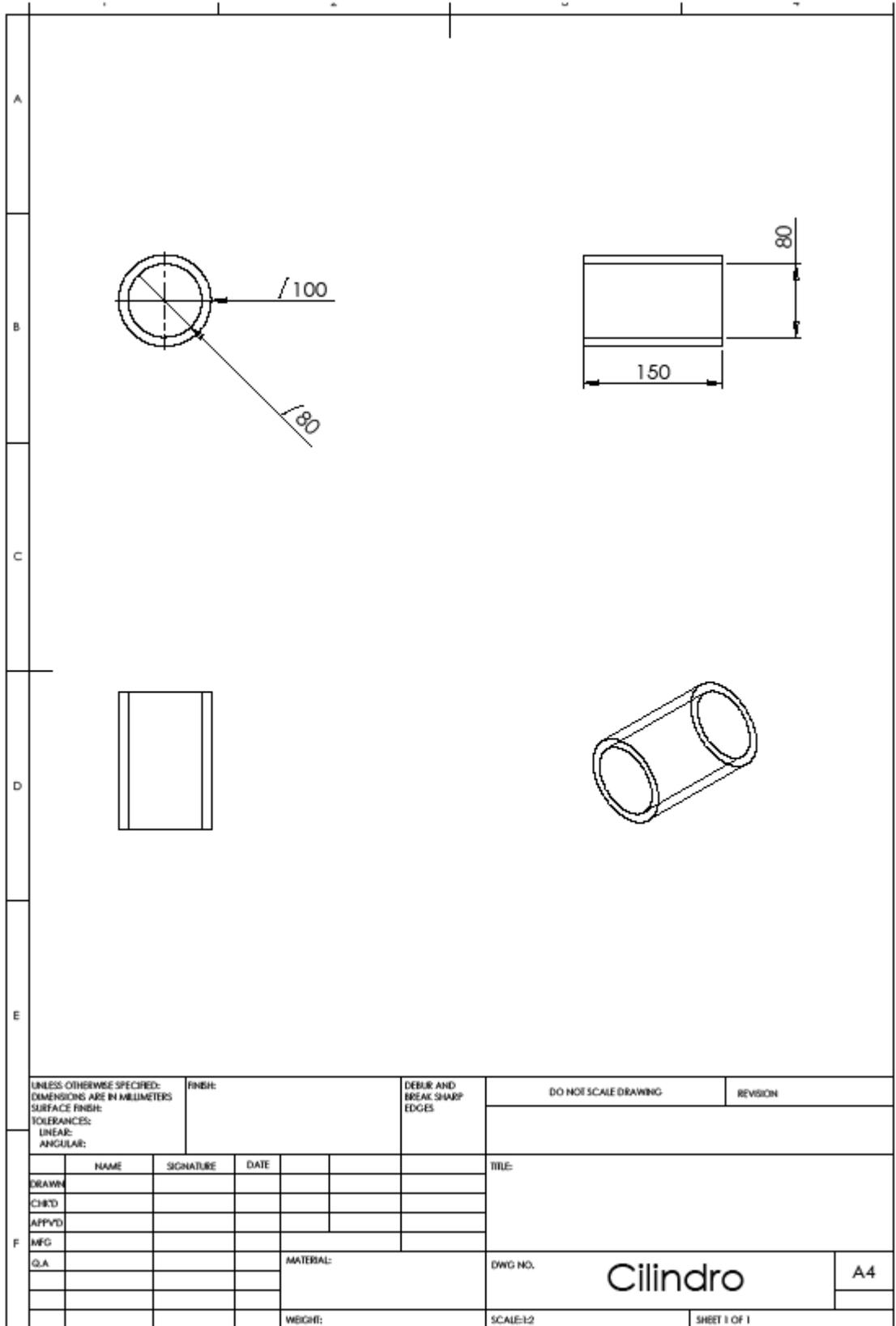
// Caracteristicas da tampa superior:
D=70; // Diametro externo [mm]
f=6; // Diametro dos furos [mm]
d=20; // Diametro da haste [mm]
F=6000; // Força aplicada pelo fio SMA (N)
x=8; // Quantidade de fios de SMA
A=(D^2*pi/4)-(x*f^2*pi/4)-(%pi*d^2/4) // Area da tampa superior [mm²]
S=(x*F/A)+((x*F*(D-d)/2))/(%pi*(D^4-d^4)/4) // Tensão maxima admissivel [MPa]
At=C/E1 // Area Transversal [mm²]
x=2*At/(2*pi*(D-d-f*8)*10) // Espessura da tampa [mm]

x =

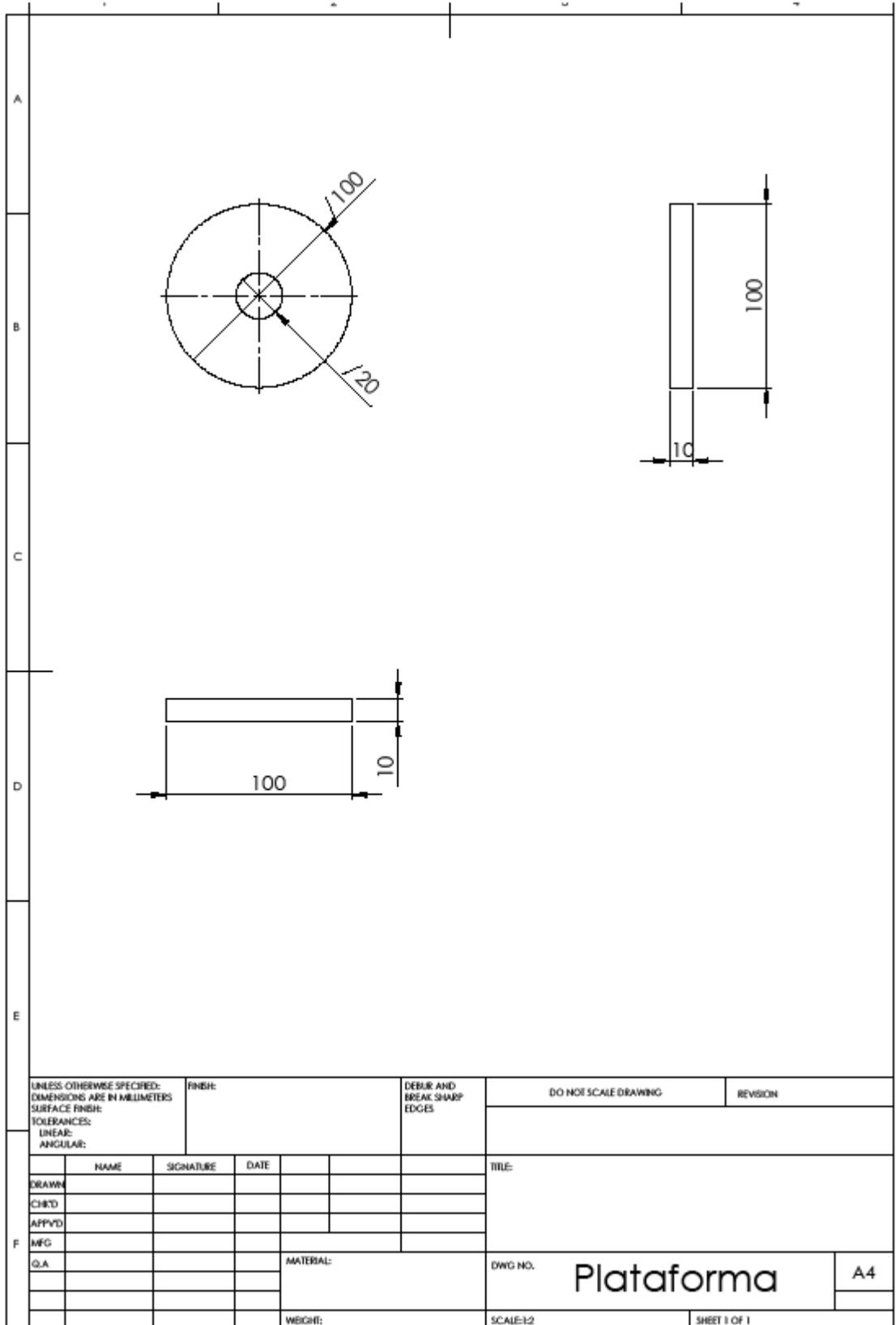
    9.5mm
```

APÊNDICE B – DESENHOS TÉCNICOS DO PROTÓTIPO 1.0

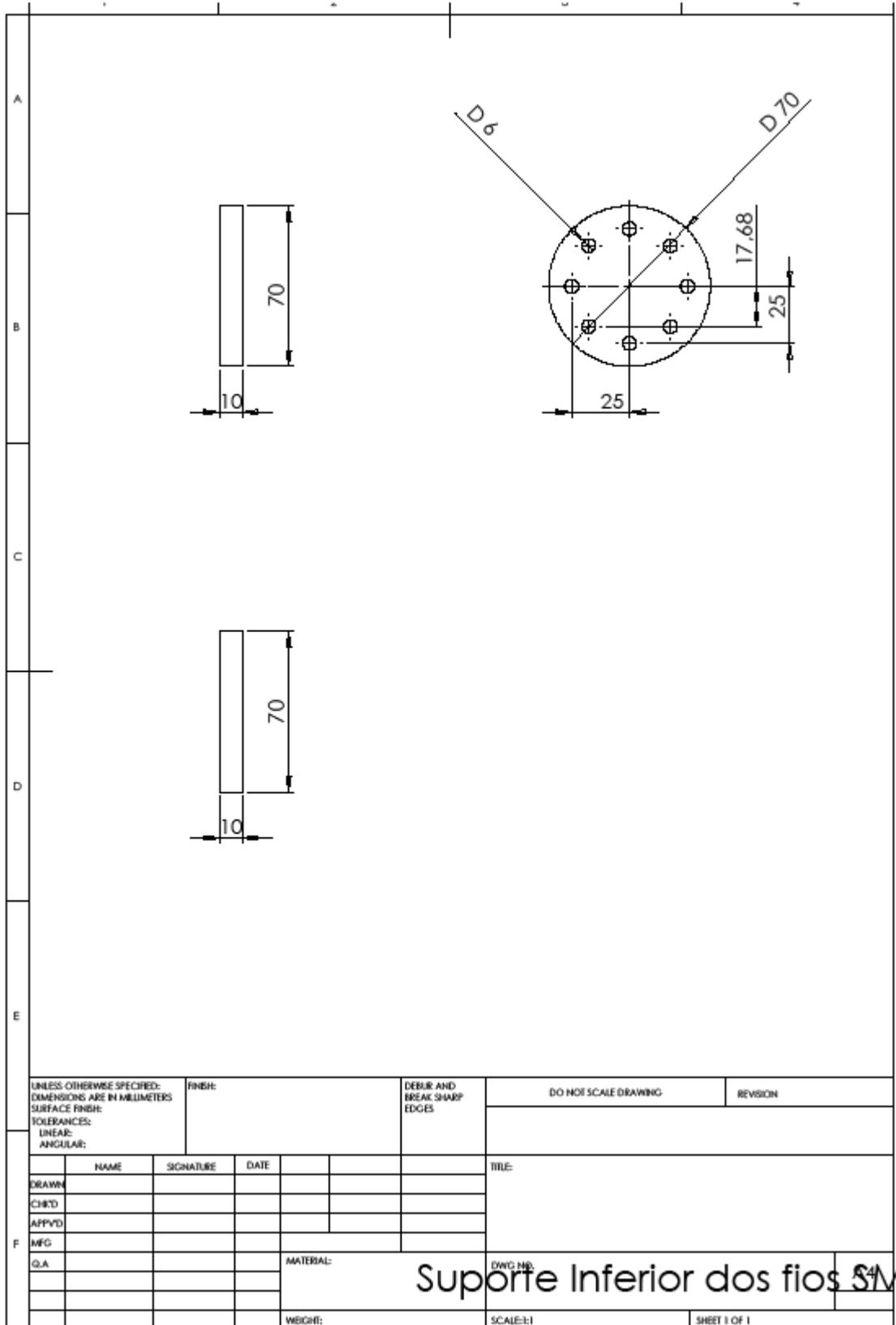


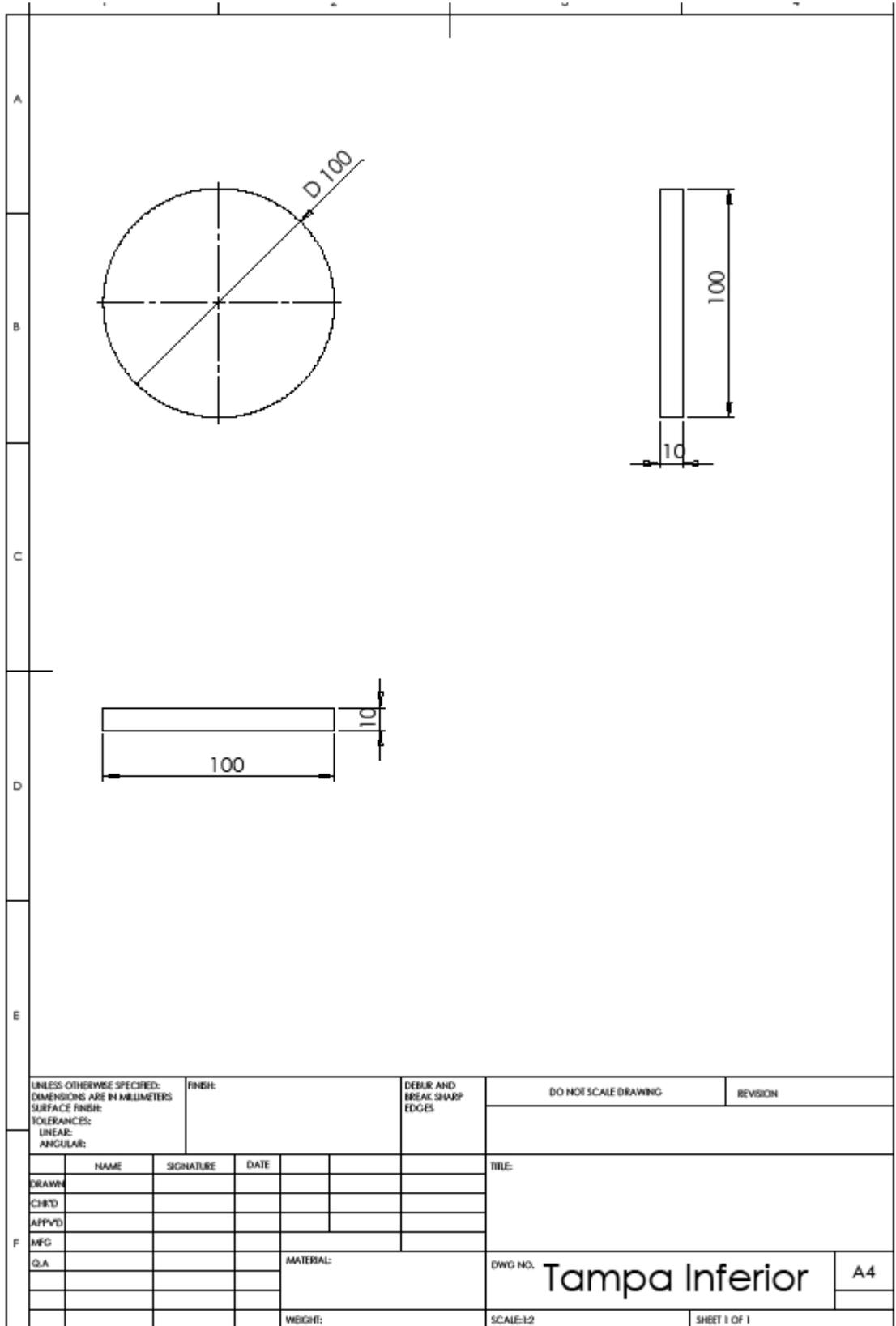


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:											
DRAWN		NAME	SIGNATURE	DATE				TITLE:			
CHK'D											
APP'VD											
MFG											
Q.A.					MATERIAL:		DWG NO.		Cilindro		A4
					WEIGHT:		SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1		

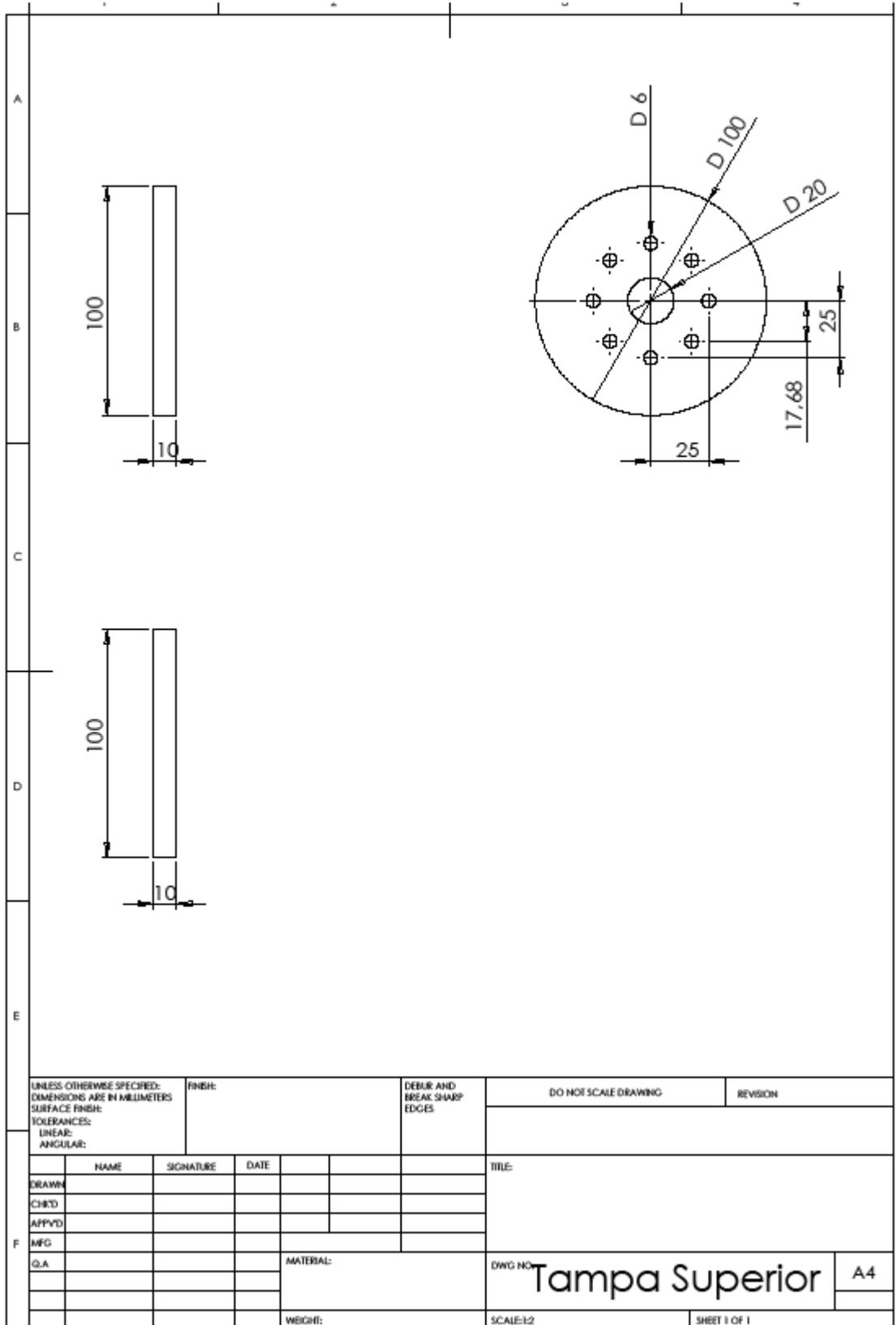


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:											
DRAWN		NAME	SIGNATURE	DATE					TITLE:		
CHK'D									DWG NO. Plataforma A4		
APP'VD											
MFG											
Q.A.					MATERIAL:						
					WEIGHT:		SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1		





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
DRAWN		NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:			
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
Q.A.					MATERIAL:	DWG NO.		Tampa Inferior	
						SCALE:1:2		A4	
					WEIGHT:	SHEET 1 OF 1			



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:											
TOLERANCES:											
LINEAR:											
ANGULAR:											
DRAWN		NAME	SIGNATURE	DATE				TITLE:			
CHK'D											
APP'VD											
MFG											
Q.A.								MATERIAL:		DWG NO. Tampa Superior A4	
										SCALE: 1:2	
								WEIGHT:		SHEET 1 OF 1	