



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO TÉRMICO MECÂNICO
DE UMA MOLA HELICOIDAL DE Ni-Ti COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA
PARA APLICAÇÃO NUMA MÁQUINA DE CALOR**

**TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**AUTOR: LUCIANA LIMA MONTEIRO
ORIENTADOR: RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA
CO-ORIENTADOR: TIAGO LEITE ROLIM**

RECIFE, 03 DE FEVEREIRO DE 2012



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO TÉRMICO MECÂNICO
DE UMA MOLA HELICOIDAL DE Ni-Ti COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA
PARA APLICAÇÃO NUMA MÁQUINA DE CALOR

Tese submetida à Universidade Federal de Pernambuco para a obtenção do grau de doutor em engenharia mecânica.

AUTOR: LUCIANA LIMA MONTEIRO

RECIFE, 03 DE FEVEREIRO DE 2012

Catálogo na fonte
Bibliotecário Marcos Aurélio Soares da Silva, CRB-4 / 1175

M775d Monteiro, Luciana Lima.

Desenvolvimento de um modelo térmico mecânico de uma mola Helicoidal de Ni-Ti com efeito memória de forma para aplicação numa máquina de calor / Luciana Lima Monteiro. - Recife: O Autor, 2012.

xv, 89 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Profº Drº. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2012.

Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia Mecânica. 2. Máquina de Calor. 3. Modelo Analítico. 4. Efeito Memória de Forma. 5. Mola Helicoidal. I. Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti (Orientador). II. Título.

621 CDD (22. ed.)

UFPE

BCTG/2012-140

“DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO TÉRMICO MECÂNICO DE UMA MOLA
HELICOIDAL DE NITI COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA PARA APLICAÇÃO EM
UMA MÁQUINA DE CALOR”

LUCIANA LIMA MONTEIRO

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E FABRICAÇÃO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM
CO-ORIENTADOR

Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA (UFPE)

Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM (UFPE)

Prof. Dr. YOGENDRA PRASAD YADAVA (UFPE)

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ (UFPE)

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO BRAYNER DE OLIVEIRA LIRA (UFPE)

Prof. Dr. CARLOS COSTA DANTAS (UFPE)

Prof. Dr. THEOPHILO MOURA MACIEL (UFCG)

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”
Antoine Laurent Lavoisier
(1743-1794)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS, pela saúde e perseverança durante todo o curso;

A meu querido marido Jorge Eduardo pelo seu apoio, carinho, paciência e incentivo em todos os momentos;

À minha filha adorada Amanda pelo brilho ensolarado que traz à minha vida, enchendo-a de ternura, amor e simplicidade e ao meu filho Lucas que é uma promessa de um novo tempo, pois ainda está sendo gestado, tal qual este estudo, e que acredito traga um novo brilho a minha vida;

À Luzinete Monteiro, minha querida mãe, presença constante em minha vida, pela educação, amor e dedicação que sempre teve por mim;

Ao meu estimado pai Luís Fernando Monteiro por fazer-me compreender que as dificuldades com que nos deparamos ao longo da vida, propiciam acuidade à nossa visão;

Ao meu orientador, professor Dr. Ricardo Sanguinetti, pela expressiva e significativa contribuição a este trabalho, amizade e dedicação que me foram dispensados;

Ao meu co-orientador, professor Dr. Tiago Leite Rolim, pela paciência e por todo o apoio na construção do protótipo;

Ao Prof. Dr. Cezar Gonzalez pelo prestimoso auxílio nos primeiros passos da elaboração do protótipo;

Ao grande amigo Gustavo Koury pelo indefectível apoio e pela sincera amizade;

A todos os professores do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica por ter nos transmitido seus conhecimentos, suas vivências, estímulo e amizade;

A Alex Moura pela ajuda e paciência na elaboração dos desenhos;

Aos alunos de iniciação científica, Pedro, Cassio e em especial à Adriano Carlos pela grande ajuda durante os testes do protótipo;

As minhas amigas e companheiras Mércia Franca e Ladjane Coelho pelas palavras amigas, pelos conselhos e pela disposição para me ajudar em qualquer momento;

Aos colegas do curso Euclides e Carlos Augusto pelos ensaios realizados no Laboratório de Materiais Inteligentes do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPE, e Orlando da Oficina Mecânica do Curso de Engenharia Mecânica da UFPE pela ajuda na construção do protótipo;

À empresa MECOL, particularmente ao Sr. Josias Souza, pelo imprescindível apoio à realização de algumas etapas deste estudo.

RESUMO

As ligas com memória de forma são materiais metálicos que exibem propriedades termoelásticas muito originais: Efeito da Memória de Forma e Pseudoelasticidade (superelasticidade e efeito tipo borracha). Estas ligas estão cada vez mais despertando interesse e reconhecimento nos últimos anos. Isto se deve a sua principal característica de retomar uma forma ou tamanho previamente definidos, quando submetidos a um ciclo térmico apropriado. O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo térmico e mecânico do comportamento de uma mola helicoidal de Ni-Ti com Efeito Memória de Forma (EMF) para ser empregada em um novo modelo de uma máquina de calor funcional. Esta máquina de calor é acionada por uma mola de Ni-Ti que funciona entre uma fonte quente (373 K) e uma fonte fria (273 K). Para obtenção da mola utilizou-se um arame de Ni-Ti de 2,2mm de diâmetro. Para esta mola de Ni-Ti obter o efeito memória de forma reversível foi necessário submetê-la a um treinamento, já que acontece quando a mudança de forma é promovida apenas pela variação de temperatura. Um projeto mecânico desta máquina foi construído para determinação das forças dissipativas geradas pela mola. Foram desenvolvidas as equações de calor e as equações da dinâmica que descrevem o comportamento da mola. Através das equações da dinâmica desenvolvidas pode-se determinar a massa mínima para o movimento da máquina, bem como a potência instantânea e média e o rendimento global. Pode-se verificar a funcionalidade da máquina através de uma relação do ângulo de inclinação da hélice e o coeficiente de atrito estático. Dentre os principais resultados foi observado que o rendimento global da máquina, comparado ao das máquinas desta categoria mostrou a viabilidade do projeto.

Palavras chaves: Máquina de Calor, Modelo Analítico, Efeito Memória de Forma, Mola Helicoidal.

ABSTRACT

The Shape Memory Alloys are metallic materials that exhibit very unique properties: thermoelastic effect of Shape Memory and Pseudoelasticity (superelasticity and rubber-like effect). These alloys are increasingly arousing interest and recognition in recent years. This is its main feature to resume a previously defined shape or size when subjected to an appropriate thermal cycle. The main objective of this work is to develop a model of the thermal and mechanical behavior of a coil spring with Ni-Ti Shape Memory Effect (EMF) alloy to be used in a new model of a heat engine. This heat engine is powered by a Ni-Ti spring that operates between a hot source (373 K) and a cold source (273 K). To obtain the spring used is a Ni-Ti wire of 2,2mm. For this spring to obtain the Ni-Ti shape memory effect was reversible necessary to subject it to a training, as happens when the change of shape is enhanced only by temperature variation. A mechanical design of this machine was developed for determining the dissipative forces generated by the spring. We have developed the equations of heat and the equations that describe the dynamic behavior of spring. Through the dynamic equations can be developed to determine the minimum mass for the motion of the machine, as well as the instantaneous power and average and total income. One can check the functionality of the machine by way of the inclination angle of the helix and the coefficient of static friction. Among the main results it was observed that the overall efficiency of the machine, compared to to the machines in this category showed the feasibility of the project.

Keywords: Heat machine, Analytical model, Shape memory effect, Helical spring.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	01
1.1 Objetivo geral.....	03
1.2 Objetivo específico.....	03
2 ESTADO DA ARTE	05
2.1 Definição de Ligas com Memória de Forma	06
2.1.1 Histórico	08
2.2 Efeito Memória de Forma	09
2.3 Estrutura Cristalina do NiTi	11
2.4 Temperatura de Transformação e Histerese	12
2.5 Relação Tensão <i>versus</i> Deformação	13
2.6 Máquinas de Calor	15
2.6.1 Máquinas com manivelas	16
2.6.1.1 Máquinas de dupla-manivela contra-sincronizada	16
2.6.2 Máquinas de talha	17
2.6.2.1 Máquinas de talha sincronizadas	17
2.6.2.2 Máquinas de talha não sincronizadas	19
2.6.3 Máquinas alternativas	20
2.7 Modelos Constitutivos	25
3 FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MOLA	26
3.1 Obtenção e Treinamento da Mola	26
3.2 Determinação experimental da constante elástica da mola	27
3.3 Determinação experimental da força de arrasto (dissipativas).....	28
4 DESCRIÇÃO DA MÁQUINA DE CALOR	31
4.1 Procedimentos Preliminares	31
4.2 Caracterização da Máquina de calor.....	31
4.3 Princípio de Funcionamento da Máquina de Calor	33
4.4 Principais Componentes da Máquina de Calor	35
4.4.1 Mola	35

4.4.2 Cilindro	36
4.4.3 Pino guia	36
4.4.4 Suporte principal	36
5 MODELO TÉRMICO E MECÂNICO	37
5.1 Modelo Térmico	37
5.1.1 Considerações adotadas para modelo térmico	38
5.2 Modelo do Sistema Mecânico	40
5.2.1 Análise estática	43
5.2.2 Análise dinâmica	45
5.2.2.1 Análise dinâmica do movimento axial da mola	45
5.2.2.2 Análise dinâmica do movimento angular da mola	47
5.3 Cálculo da Potência Média e Instantânea	51
5.4 Cálculo do Rendimento Global	52
5.5 Condições necessárias para o início do funcionamento	53
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
6.1 Solução Analítica das Equações de Calor	55
6.2 Solução Analítica das Equações Dinâmicas do Sistema Mecânico	61
6.2.1 Movimentação axial	61
6.2.2 Movimentação angular	62
6.3 Determinação da potência média e instantânea	68
6.4 Determinação da massa mínima	70
6.5 Determinação do rendimento global	70
7 CONCLUSÕES.....	72
8 TRABALHOS FUTUROS	73
9 TRABALHOS APRESENTADOS.....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
ANEXOS	83

LISTA DE ABREVIATURAS

EMF	Efeito de Memória de Forma
EMFR	Efeito Memória de Forma Reversível
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
MIT	Martensita Induzida por Tensão
NASA	<i>National Aeronautics and Space Agency</i>
Ti-Ni	Titânio-Níquel
NITINOL	<i>Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory</i>
SMA	<i>Shape Memory Alloy</i> / Liga com Efeito Memória de Forma
TM	Transformações Martensíticas
EDO	Equação Diferencial Ordinária

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	O efeito memória de forma	07
Figura 2.2 -	Evolução de β em função da temperatura - esquemático	10
Figura 2.3 -	Comportamento termomecânico das SMAs	14
Figura 2.4 -	O efeito memória de forma na curva tensão deformação	14
Figura 2.5 -	Máquinas com manivelas	16
Figura 2.6 -	Protótipo da máquina de Schiller	17
Figura 2.7 -	Máquinas de talha sincronizadas	18
Figura 2.8 -	Representação em 3D da montagem do motor de calor VT1..	18
Figura 2.9 -	Máquinas de talha não sincronizadas	19
Figura 2.10 -	Montagem experimental da máquina de Sato	19
Figura 2.11 -	Mecanismo de geração de torque da máquina SMA de Sato..	20
Figura 2.12 -	Máquinas alternativas	21
Figura 2.13 -	Máquina de calor alternativa utilizando liga com memória de forma	21
Figura 2.14 -	Máquina de Frank e Ashbee	22
Figura 2.15 -	Máquina alternativa de Kutlucinar e Saul	23
Figura 2.16 -	Diagrama esquemático da bomba SME	24
Figura 2.17 -	Montagem mecânica do atuador SMA	24
Figura 2.18 -	Máquina de Cortês	25
Figura 3.1 -	Curva das temperaturas de transformação de fase	26
Figura 3.2 -	Gráfico massa padronizada x deslocamento da mola	28
Figura 3.3 -	Esquema para medição da força dissipativa no movimento axial	29
Figura 3.4 -	Esquemático para medição da força dissipativa no movimento angular	29
Figura 3.5 -	Esquemático das forças dissipativas	30
Figura 4.1 -	A máquina de calor	32
Figura 4.2a -	Mola na posição inicial	34
Figura 4.2b -	Mola distendida no reservatório de água quente	34
Figura 4.2c -	Mola contraída no reservatório de água fria	35
Figura 5.1 -	Modelo matemático da mola com memória de forma	37
Figura 5.2 -	Desenho esquemático da mola e o balanço da energia	38
Figura 5.3 -	Relação entre x e x_0	41

Figura 5.4 -	Análise dinâmica da mola	42
Figura 5.5 -	Folga insuficiente entre o pino e a ranhura	43
Figura 5.6 -	Força resultante ao longo da ranhura (assumindo que $F_x = H$)	47
Figura 5.7 -	Movimento angular da mola	49
Figura 5.8 -	Detalhes do helicóide	50
Figura 6.1 -	Gráfico da temperatura (K) x tempo (s) durante aquecimento da mola	58
Figura 6.2 -	Gráfico da temperatura (K) x tempo (s) durante resfriamento da mola	60
Figura 6.3 -	Gráfico da temperatura da mola durante aquecimento e resfriamento	60
Figura 6.4 -	Gráfico do deslocamento axial (x) e angular (θ)	66
Figura 6.5 -	Gráfico do deslocamento axial da mola	66
Figura 6.6 -	Gráfico do deslocamento angular da mola	67
Figura 6.7 -	Gráfico da potência instantânea ampliado	68
Figura 6.8 -	Gráfico da velocidade angular	69
Figura 6.9 -	Gráfico da potência instantânea	69

LISTA DE SÍMBOLOS

Au-Cd Ouro e Cádmió

Cu-Zn Cobre e Zinco

Cu-Al-Ni Cobre, Alumínio e Níquel

Cu-Zn-Al Cobre, Zinco e Alumínio

M_s é a temperatura de início da transformação da austenita em martensita no resfriamento

M_f é a temperatura de término da transformação martensita

A_s é a temperatura de início da reversão da martensita em austenita no aquecimento

A_f é a temperatura de término da reversão da martensita em austenita

η rendimento global da máquina de calor

T temperatura da mola

μ coeficiente de atrito dinâmico

μ_e coeficiente de atrito estático

β fração volumétrica da martensita

E_{entra} Energia que entra na mola

E_{sai} Energia que sai da mola

ΔE Variação de Energia

ΔU Variação de energia interna na mola

h coeficiente de convecção natural para líquidos

A Área externa da mola

T_{fQ} Temperatura da fonte quente

D diâmetro externo da mola

d diâmetro do fio da mola

n número de espiras ativas

m massa da mola

C_p calor específico a pressão constante

dT/dt taxa de variação da temperatura da mola em relação ao tempo

T_{fF} temperatura da fonte fria

x referencial adotado
 x_0 comprimento da mola de acordo com a temperatura
 k constante elástica da mola
 T_m tração na mola
 H força de contato entre o pino guia e a ranhura
 F força entre o rolamento linear e o eixo horizontal
 F_x reação da força H na direção x
 F_a força de atrito
 N força normal
 R_Y reação vertical entre rolamento do carrinho e o trilho
 α ângulo de inclinação da hélice
 F_R força resultante na direção da ranhura
 F força entre rolamento linear e o eixo horizontal inferior
 h metade do passo do helicóide
 M massa da mola + pino
 b é o raio do cilindro
 a distância vertical do centro da mola até o contato pino/ranhura
 c comprimento do rolamento linear
 d distância horizontal do rolamento do carrinho até o pino guia
 dc variação do comprimento do arco
 θ ângulo percorrido pela mola
 $d\theta$ variação angular percorrido pela mola
 p_h passo da hélice
 P potência instantânea
 \overline{P} potência média
 ω velocidade angular
 E energia mecânica
 Q calor fornecido
 t Tempo
 K kelvin
 s segundos
 g grama
 cm centímetro

a' constante da EDO de 1ª ordem linear das equações de calor

b' constante da EDO de 1ª ordem linear das equações de calor

a'' constante da EDO de 2ª ordem da equação do movimento axial

b'' constante da EDO de 2ª ordem da equação do movimento axial

c'' constante da EDO de 2ª ordem da equação do movimento angular

d'' constante da EDO de 2ª ordem da equação do movimento angular

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Deslocamento da mola.	27
---	-----------

1 INTRODUÇÃO

As indústrias têm buscado cada vez mais elementos e materiais capazes de reduzir custos, otimizar operações e diminuir o impacto ambiental. Essas melhorias vêm acontecendo por meio da miniaturização, com respostas mais rápidas a comandos, e um maior rendimento energético. As Ligas com Memória de Forma apresentam uma larga faixa de aplicações potenciais em razão de suas propriedades termomecânicas. Essas ligas vêm sendo muito utilizadas na indústria aeronáutica, na robótica, na área de biomedicina, e também em dispositivos auto-reguláveis para torres de transmissão de energia.

Dentre eles pode-se citar as ligas metálicas com Efeito Memória de Forma. Geralmente esses materiais podem ser facilmente deformados a uma temperatura relativamente baixa e, ao serem expostos a uma temperatura mais elevada, retomam a forma inicial. Durante este processo verifica-se a existência de duas fases: uma a baixa temperatura (fase martensítica) e outra a alta temperatura (fase austenítica), mas que apresentam a mesma composição química. A mudança da fase de baixa temperatura para a fase de alta temperatura ocorre sem difusão atômica (OTSUKA; REN, 1999).

Estas ligas podem apresentar ainda um comportamento denominado Efeito memória de forma reversível, em inglês: *two-way*, no qual associa-se uma determinada forma a determinadas temperaturas, fazendo com que uma peça mude sua forma através de um processo cíclico de aquecimento e resfriamento. Este efeito é conseguido através de uma técnica de treinamento da liga (CAVA *et al.*, 2000).

Ao serem usadas em motores, essas ligas são capazes de realizar um trabalho mecânico utilizando calor a temperaturas muito baixas. Esta propriedade tem permitido que ligas com Efeito Memória de Forma (EMF) sejam aplicadas em muitas áreas de engenharia, onde é possível substituir um motor completo e sistemas de controle por elementos mecânicos simples, como barras e arames (CORTÉS, 2009).

Em 1989 os Estados Unidos e o Canadá realizaram uma pesquisa, em que foram abordados temas como inovações tecnológicas, comercialização e aplicações de ligas com memória de forma. Neste momento foi julgada a importância da

aplicação das ligas com memória de forma obtendo os seguintes resultados: (1^o) os dispositivos de elevação; (2^o) sensores; (3^o) máquinas de calor; (4^o) atuadores; (5^o) brinquedos, demonstração, artigos novos; (6^o) biomédico e médico; (7^o) junções, entre outros. (MILLER; WALKER, 1989).

Vale salientar que na “Conferência Internacional sobre Memória de Forma e Tecnologias Superelásticas” (SMST) realizada em Setembro de 2008, na cidade de Stresa, Itália, empresas automobilísticas como Fiat, Volvo; bem como, órgãos governamentais como a *National Aeronautics and Space Agency* (NASA) e outros, declararam a ampla utilização das ligas com memória de forma em seus projetos (CORTÉS, 2009).

Deste modo pode-se afirmar que uma das aplicações das ligas de Ni-Ti com Efeito Memória de Forma são em máquinas de calor. Sendo uma alternativa para extrair energia mecânica a partir, por exemplo, de águas quentes de resíduos industriais, energia geotérmica, energia térmica solar etc. Outras novas aplicações baseadas exatamente no mesmo princípio incluem motores com missões para o espaço, utilizados pela NASA.

A máquina de Carnot¹ indica a eficiência máxima possível que uma máquina de calor pode atingir, e é independente da substância que atua ou método de expansão/compressão. As Ligas com Efeito Memória de Forma têm sido consideradas como candidatas para médias operações aplicadas em máquinas de calor, por causa da mudança de fase que ocorre durante as operações de expansão e compressão. Apesar das irreversibilidades termodinâmicas, a reversibilidade cristalográfica $\beta \rightarrow M \rightarrow \beta$ torna o efeito memória de forma um grande atrativo para fabricação das máquinas de calor (SALZBRENNER, 1984).

Neste trabalho é apresentada a elaboração de um modelo matemático que descreve o comportamento térmico e mecânico de uma mola de Ni-Ti com Efeito Memória de Forma para aplicação em uma máquina de calor.

Foi determinada experimentalmente a constante elástica da mola na fase austenítica. O valor determinado foi 0,109N/mm. Para tanto foi elaborado um projeto mecânico e construído um protótipo (máquina térmica) no qual foram mensuradas as forças dissipativas geradas pela mola durante o movimento axial (ao longo do trilho)

¹ Uma máquina térmica (Carnot) realiza um determinado trabalho constantemente, operando em ciclos, ela deve receber calor de uma fonte quente e fornecer parte dele para uma fonte fria. Cf. www.cienciadosmateriais.org. Acesso em 30 mar. 2010.

e o movimento angular (ao longo de uma ranhura de rasgo helicoidal). No movimento axial o valor obtido foi 7,33N e no movimento angular foi de 7N. Foram desenvolvidas as equações de calor e as equações da dinâmica que descrevem o comportamento da mola, como elemento motor, deste dispositivo. No modelo matemático desenvolvido pode-se observar o comportamento térmico da mola quando em contato com os reservatórios. Neste modelo térmico determinou-se o tempo em que a mola atinge a temperatura dos reservatórios, parâmetro importante, no que diz respeito a transformação de fase do material. Entretanto, no modelo dinâmico da mola, verificou-se que o ângulo de inclinação da hélice e a massa que gira junto com a mola condicionam o funcionamento da máquina, a massa determinada foi de $M > 0,07\text{Kg}$. Foram determinados a potência de 0,5W e o rendimento global da máquina de 2×10^{-3} .

Foi utilizado o software SCILAB 5.3.3 para resolução das equações diferenciais ordinárias, e um software comercial versão educacional foi utilizado para elaboração do projeto mecânico e dos desenhos para fabricação dos componentes e para a simulação dos movimentos da mola. Estes resultados mostraram-se satisfatórios com os valores teóricos determinados.

1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo a elaboração de um modelo matemático que descreve o comportamento térmico e mecânico de uma mola de Ni-Ti com Efeito Memória de Forma para aplicação numa máquina de calor.

1.2 Objetivos específicos

- Fabricação e caracterização da mola de Ni-Ti;
- Construção do protótipo da máquina de calor;
- Medição das forças dissipativas desenvolvidas na ranhura da máquina;
- Desenvolvimento das equações diferenciais que descrevem o movimento e o comportamento térmico da mola;

- Determinação dos parâmetros para funcionalidade da máquina;
- Determinação da potência e rendimento da máquina.

2 ESTADO DA ARTE

Inseridas no conceito de materiais inteligentes encontram-se as ligas com memória de forma e todas as suas possibilidades de aplicação. Este efeito memória de forma pode se manifestar em materiais como polímeros, cerâmicas ou metais, obtendo-se um composto polivalente e capaz de se adaptar a novas condições de funcionamento (NASCIMENTO, 2009).

As ligas com Efeito Memória de Forma possuem a propriedade de retornar ao seu estado original quando sofrem impacto de temperatura; deste modo, são classificadas de termicamente ativas. Estas ligas são denominadas de ligas de memória de forma, por ter a característica de efeito memória, porém, apenas ocorre numa determinada temperatura e tensão, e provocada por uma mudança na estrutura cristalina entre duas diferentes fases chamadas de martensita e austenita.

Martensita é a fase de baixa temperatura, na qual o limite elástico do material é baixo, apresentando um comportamento plástico. A austenita é a fase de altas temperaturas, na qual a liga possui um comportamento tipicamente elástico. Aquecendo-se uma liga com memória de forma até uma determinada temperatura, ocorre uma mudança de fase na estrutura cristalina do material, ocorrendo assim uma contração. Pode-se utilizar esse fenômeno para construir atuadores leves e silenciosos, como verdadeiros músculos metálicos (ROMANO; TANURI, 2009).

Os fenômenos associados às ligas de memória de forma estão relacionados a transformações de fase que podem ser induzidas tanto pela variação da temperatura quanto pela variação no nível de tensão.

Schiller (2002) realizou uma pesquisa sobre as patentes de máquinas de calor feitas com ligas com Efeito Memória de Forma. Nesta pesquisa os modelos mais fabricados foram: máquinas com manivelas, máquinas de talha e máquinas alternativas. A máquina construída neste estudo está incluída na categoria de máquinas alternativas por ser um dos modelos de máquinas mais pesquisadas recentemente.

2.1 Definição de Ligas com Memória de Forma

O efeito memória de forma é observado em ligas que exibem uma transformação martensítica termoelástica. A transformação está completa quando a liga alcança uma temperatura designada como M_f , ou seja, término da transformação martensítica, neste momento considera-se que a liga está no estado martensítico. Se a liga nesta condição estiver deformada, pode ser restabelecida sua forma original aquecendo-a (SCHETKY, 2007).

Alguns autores chegam a considerar que as deformações na fase martensítica podem alcançar percentuais de até 10% só em mono cristais e em poli cristais só 6% (SOUZA, 2007).

A transformação martensítica apresenta diversas propriedades exclusivas dessas ligas. De acordo com Marco Motta de Souza, 2005:

- Pseudoplasticidade: é o termo empregado para descrever as aparentes deformações elásticas da austenita. As não usuais e amplas deformações reversíveis são possibilitadas através de transformação martensítica, a qual, neste caso, não é causada por resfriamento, mas por um aumento no nível de tensionamento do material. Um carregamento suficientemente elevado na fase austenita induz a transformação desta na martensita, onde apenas crescerão as variantes da martensita de orientação favorável à direção do carregamento. Mediante a retirada da carga, a transformação reversa ocorre e a deformação desaparece.
- Comportamento tipo borracha: fenômeno no qual a martensita exibe um comportamento de deformação reversível ou pseudoelástico após um tratamento de envelhecimento junto com um aumento na tensão limite acima da qual tem início a deformação plástica irreversível (SOUZA, 2005).

Durante aquecimento a transformação começa a uma temperatura designada como A_s que é a temperatura de início da transformação austenítica e a recuperação completa é alcançada quando atingir uma temperatura mais alta designada como A_f ou seja, término da transformação austenítica (BEKKER, BRINSON, 1998).

As temperaturas de transformação são dependentes da composição da liga e de seu processo termomecânico. A primeira ordem da transformação martensítica exibe histerese, como mostrado na **Figura 2.1**. Esta figura apresenta ainda o esquema do processo de recuperação da forma original. Além de formar a fase

martensita por resfriamento, a transformação pode assumir lugar isotermicamente pela aplicação de tensão suficiente; isto é chamado martensita induzida por tensão (MIT). Quando a tensão é retirada da fase martensítica a liga reverte para a fase inicial.

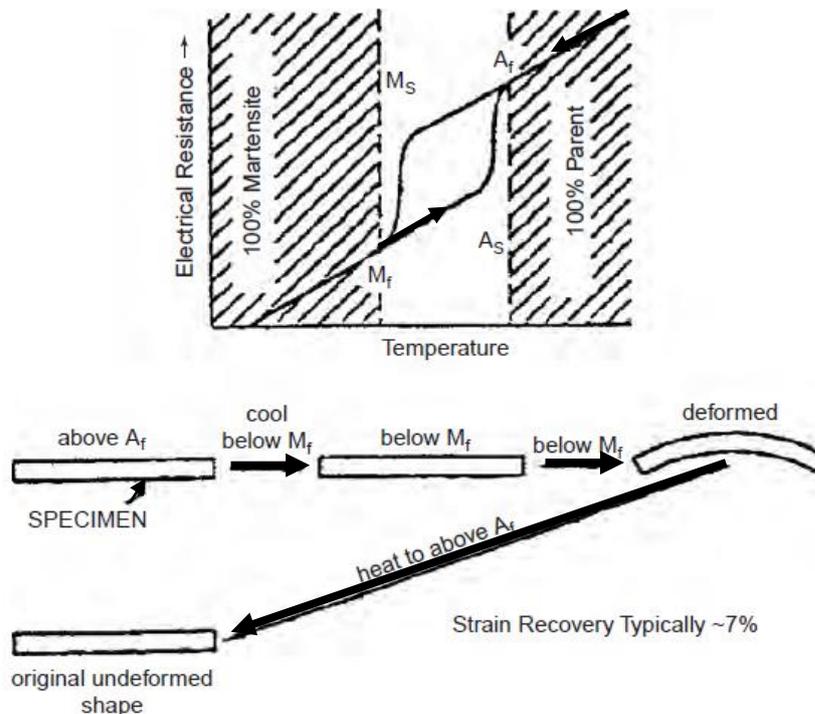


Figura 2.1 - O efeito memória de forma.
Fonte: Schetky, 2007.

A literatura relaciona as ligas de maior importância como: Ni-Ti, Cu-Zn-Al e Cu-Al-Ni. No entanto, as ligas Ni-Ti são consideradas de maior potencial em aplicações comerciais porque combinam boas propriedades mecânicas com os fenômenos de memória de forma e biocompatibilidade (PERKINS; HODGSON, 1990).

De uma maneira geral, as ligas com memória de forma apresentam baixa resistência à fadiga quando comparadas aos aços carbono comum. Com o escopo de melhorar esta propriedade, atualmente pesquisas vêm sendo desenvolvidas sobre o efeito da adição e combinação de certos elementos de ligas (ACOSTA, 2000).

Vale destacar a afirmação de Pérez et al (2003) de que as aplicações com ligas de aço inoxidável estão sendo reformuladas e serão substituídas pelas ligas de Ni-Ti. Para validar esta consideração, o autor esclarece que o uso das ligas de Ni-Ti

é mais vantajoso em razão de suas propriedades de superelasticidade e a capacidade de memória de forma.

Outra característica das ligas com efeito memória de forma é o tempo de resposta relativamente elevado. Em situações em que se necessita de uma resposta rápida existem outros materiais inteligentes, como os piezoelétricos², que podem apresentar resultados mais satisfatórios. Vale ressaltar, no entanto, que as ligas com efeito memória de forma são capazes de gerar grandes forças de restituição com um consumo de energia relativamente baixo, o que é uma propriedade que as diferenciam em diversas aplicações (HOLDER, 2003).

2.1.1 Histórico

Os primeiros passos no sentido da descoberta do efeito de memória de forma foram dados por um físico suíço, Arne Ölander em 1932, ao constatar a reversibilidade da transformação em uma liga Au-Cd por observação metalográfica e através do registro da variação da resistividade. Greninger & Mooradian, (Universidade de Harvard e o Massachusetts Institute of Technology, respectivamente), em 1938, observaram, numa liga de Cu-Zn, a formação e o desaparecimento da martensita, ao diminuir e aumentar a temperatura, respectivamente. O efeito de memória de forma propriamente dito foi posto em evidência, em 1949, por Kurdjumov & Khandros, e, pouco tempo depois, por Chang e Read, em 1951, numa barra de Au-Cd. Contudo, apenas em 1962, quando Buehler *et al.* descobriram o efeito de memória de forma numa liga equiatômica de Ni-Ti, é que a investigação começou a despertar interesse às potenciais aplicações práticas (CUNHA FILHO, 2002).

No espaço de 10 anos surgiu, então, no mercado uma grande variedade de produtos comerciais e o estudo do efeito de memória de forma foi propagado. Contemporaneamente assiste-se a uma intensificação deste tipo de estudos ao

² Materiais piezoelétricos são capazes de converter energia mecânica ou termal em energia elétrica, ou vice-versa. Se uma tensão for aplicada nesse material, as fibras piezoelétrica irão se expandir ou contrair. Esses efeitos têm sido usado por anos em microeletrônica e em dispositivos médicos. Para compor os compósitos inteligentes, os pesquisadores utilizaram um material à base de chumbo, zircônia e titânio. São micro-fibras, que devem ser cuidadosamente montadas para formar uma intrincada teia piezoelétrica. Como resultado, dessa teia, os pesquisadores conseguiram montar camadas ativas e passivas, sucessivamente. Desta forma, uma camada do material age como sensor, e próxima como atuador e assim por diante (sitio inovação tecnológica, 11/07/2002, acesso 26 abr. 2010.)

mesmo tempo em que novos produtos entram no mercado todos os anos (FERNANDES, 2003).

A liga Ni-Ti apresenta um dos melhores desempenhos entre as ligas com Efeito Memória de Forma e Efeito Pseudoelástico com recuperação de forma de até 8% e pode ser biocompatível como comparado por Rocha (2004), além das afirmações de Falvo *et al.* (2008) em relação à fadiga e a corrosão. Além disso, apresenta também um comportamento mecânico peculiar devido a sua facilidade de deformação em baixas temperaturas (STOECKEL, 1989).

As propriedades de Efeito Memória de Forma e superelasticidade da liga Ni-Ti são dependentes principalmente de composição, microestrutura e tratamento termomecânico, sendo que a temperatura na qual ocorre a recuperação de forma pode variar de -50 a 110°C (OTUBO *et al.*, 2005).

2.2 Efeito Memória de Forma

No efeito memória de forma a recuperação de forma consiste na reversão da martensita induzida termicamente por resfriamento ou mecanicamente (PINA,2006).

Já o Efeito Memória de Forma Reversível (EMFR) é obtido após submeter a liga a um processo de “treinamento” ou educação que permite associar uma forma a cada fase, em função de um determinado tratamento termomecânico (RANIECK *et al.*, 1992).

Os termos “treinar” ou “educar” uma liga significa submeter esta liga a um procedimento termomecânico cíclico, produzindo aquecimentos e resfriamentos sucessivos no material previamente deformado. Na **Figura 2.2** abaixo é apresentado o comportamento da transformação martensítica em relação a temperatura. A fração volumétrica da martensita (β) varia em ($0 \leq \beta \leq 1$) uma vez que, as transformações de austenita para martensita e de martensita para austenita obtidas por aquecimento são graduais. Valores de $\beta=1$ e $\beta=0$ correspondem à fase completamente martensítica e completamente austenítica, respectivamente (LIANG; ROGERS, 1990; BRINSON, 1993; ISSEN *et al.*, 1998). Em A_s a temperatura é de início da transformação austenítica, quando a liga está sendo aquecida. Em $\beta=0$, não há mais aquecimento e em A_f é a temperatura final da transformação austenítica. Ao resfriar a liga, esta irá gradualmente passar da fase austenítica para a fase

martensítica em M_s que é a temperatura de início da fase martensítica. Ao continuar resfriando a liga até $\beta=1$ em M_f encontra-se a temperatura final da transformação martensítica. Neste momento fecha-se o ciclo térmico.

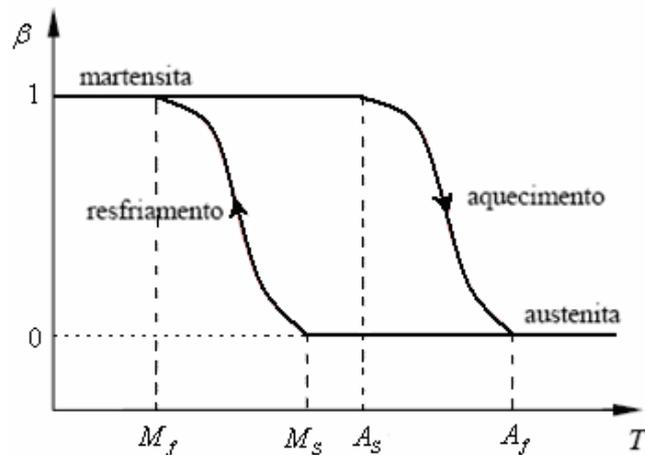


Figura 2.2 Evolução de β em função da temperatura – esquemático.
Fonte: Faria, 2007.

As ligas Ni-Ti são um composto intermetálico, que associados a outros elementos metálicos, podem apresentar uma deformação máxima comparável às de outras ligas metálicas (KRISHNAN *et al.*, 1974). Apresentam um maior número de elementos o que permite uma modificação significativa, tanto das suas propriedades mecânicas quanto das suas temperaturas de transformação (FRENZEL *et al.*, 2004).

O Ferro (Fe) e o Cromo (Cr) também são frequentemente adicionados para baixar as temperaturas de transformação, bem como o Cobre (Cu) é usado para reduzir a histerese de transformação e diminuir a tensão de orientação da Martensita (SHAW; KYRIAKIDES, 1995). A presença de impurezas como o Oxigênio (O) e o Carbono (C) podem também alterar as temperaturas de transformação e degradar as propriedades mecânicas, o que faz com que seja desejável minimizar a presença destes elementos (STOECKEL, 2000).

Devido à elevada reatividade do Titânio, a fusão dessas ligas Ni-Ti deve ser feita sob vácuo ou em atmosfera inerte, sendo comercialmente utilizadas técnicas como a fusão por arco de plasma ou por feixe de elétrons, ou ainda a fusão por indução sob vácuo (MIYAZAKI, 1989).

2.3 Estrutura Cristalina do NiTi

Em 1989 Miyazaki e Otsuka publicaram uma extensa revisão sobre o desenvolvimento de ligas com memória de forma, onde a origem do efeito foi discutida com base na estrutura cristalina e na cristalografia da transformação martensítica. Estes autores ressaltaram a importância do diagrama de fases para o entendimento da liga, especificamente, devido à presença de muitas fases metaestáveis nas regiões de temperaturas intermediárias, sendo que uma delas afeta fortemente o processo de transformação e as características de memória de forma (MIYAZAKI; OTSUKA,1989). Vale destacar que três anos antes, Nishida *et al.* (1986) já haviam relatado a importância das fases metaestáveis Ti_3Ni_4 e Ti_2Ni_3 . Essas fases metaestáveis passam para a fase de equilíbrio $TiNi_3$ após um longo período de envelhecimento.

Uma das causas de dificuldade de entendimento neste processo de transformação martensítica, nas ligas de Ni-Ti ricas em níquel solubilizado, é que acontece uma transformação pré-martensítica, caso haja um tratamento termomecânico que produza uma alta densidade de discordâncias ou o aparecimento de finos precipitados de Ti_3Ni_4 . Essa fase pré-martensítica foi chamada de fase romboédrica ou fase **R** e aparece primariamente à transformação martensítica quando M_s é mais baixo que a temperatura crítica para o surgimento da fase **R**. Alguns fatores, segundo Fumagalli *et al.*,2009, propiciam a redução da temperatura M_s , tais como:

- aumento na concentração de níquel;
- envelhecimento após solubilização;
- recozimento a temperaturas abaixo da temperatura de recristalização após trabalho a frio,
- ciclos térmicos;
- presença de um terceiro elemento.

2.4 Temperaturas de Transformação e Histerese

De acordo com Delay et al (1978) as temperaturas de transformação são propriedades do material que especificam a extensão da transformação no avanço (austenita para martensita) e no inverso (martensita para austenita).

Contudo, Machado (2007) considera de uma forma geral como um procedimento essencialmente difícil e crítico identificar a temperatura correta da transformação quando são utilizados efetivamente os materiais com memória de forma. Por outro lado, reconhece que esta e outras propriedades do material, tais como histerese e a capacidade total de memória de forma, são produtos da composição química, assim ligas individuais de Ni-Ti podem funcionar em temperaturas entre -50 e 110°C, dependendo da taxa exata de átomos de níquel e titânio utilizados em sua fabricação.

A priori, as Transformações martensíticas envolvem uma deformação por cisalhamento resultante do movimento cooperativo de átomos, e que resulta numa correspondência de rede, entre a fase matriz e a fase martensítica. Mesmo que os deslocamentos atômicos sejam pequenos (comparável à distância interatômica – resultado da interação entre forças de atração e repulsão), há uma mudança de forma macroscópica de valor definido que está associado ao processo de Efeito de Memória de Forma e Efeito Pseudoelástico (FUNAKUBO, 1987; OTSUKA; WAYMAN, 1998).

Para Otsuka e Wayman, (1998, p. 22), “as temperaturas de transformação podem ser determinadas medindo-se algumas propriedades físicas, como função térmica”. Por definição as temperaturas de transformação são:

M_s : é a temperatura de início da transformação da austenita em martensita no resfriamento;

M_f : é a temperatura de término da transformação martensita;

A_s : é a temperatura de início da reversão da martensita em austenita no aquecimento;

A_f : é a temperatura de término da reversão da martensita em austenita. Esta é a temperatura acima da qual a martensita torna-se totalmente instável.

Estas temperaturas estão apresentadas na **Figura 2.2**.

Em termos genéricos histerese significa a tendência de um material ou sistema de conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou.

Assim o fenômeno histerese é definido por Falvo (2008) como a diferença entre as temperaturas na qual o material está 50% transformado na fase austenítica e 50% transformado na fase martensítica. E ainda segundo Oliveira (2007) a histerese é um deslocamento da temperatura em que se tem início da transformação direta (M_s) e o início da transformação reversa (A_s).

Conforme Cunningham (1997) a histerese é uma característica importante do aquecimento e arrefecimento no comportamento de ligas com memória de forma e produtos feitos a partir destas ligas. Dependendo da liga usada e/ou seu processamento, a temperatura de transformação, bem como a forma do laço de histerese pode ser alterada em uma ampla faixa. As ligas de Ni-Ti normalmente têm temperaturas de transformação (A_f) entre 0°C e 100°C com uma faixa do laço de histerese de 25°C a 40°C.

E segundo Shahinpoor, (2008), a forma do laço de histerese não depende somente da liga e do seu processamento, mas também é influenciada pela própria aplicação. Se um fio (processamento padrão) trabalha contra uma carga constante, por exemplo, levantando certo peso, a transição de martensita para austenita ou vice-versa ocorre em uma faixa de temperatura muito estreita, normalmente de 5°C.

2.5 Relação Tensão *versus* Deformação

A fase austenítica de um material apresenta rigidez em sua estrutura enquanto a fase martensítica é mais maleável, isto se dá em razão da temperatura e da tensão aplicadas ao material, o que ocasiona mudança da estrutura em forma de cristal que provoca o efeito memória de forma. O material com efeito memória de forma acompanha as fases austenítica e martensítica alterando sua estrutura em forma de cristal. Uma liga com efeito memória de forma está na sua fase austenítica (alta temperatura) e resfria até abaixo da temperatura de transição, sua estrutura em forma de cristal irá mudar para martensítica (baixa temperatura).

A **Figura 2.3** a seguir mostra esquematicamente um diagrama tensão – deformação e temperatura que ilustra o comportamento termomecânico das Ligas com memória de forma abaixo de M_f e quando aquecido acima de A_f .

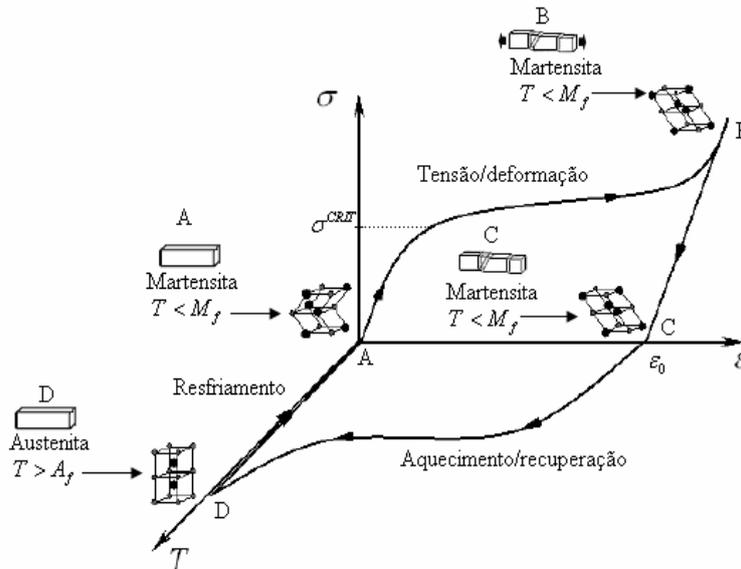


Figura 2.3 Comportamento termomecânico das SMA.
Fonte: Faria, 2007.

Observa-se que nesta figura uma amostra da Liga com memória de forma é submetida a um esforço de tração inicialmente a uma temperatura inferior a M_f . Com o aumento da carga, verifica-se inicialmente um comportamento elástico. Ao atingir um nível de tensão crítica σ^{CRIT} inicia-se uma deformação que prossegue sem variação significativa de tensão. Após uma deformação relativamente grande, próximo a 8%, que é característica de cada liga, o material volta a se comportar elasticamente. Após o descarregamento, e mantendo a temperatura abaixo de M_f , o material mantém a configuração deformada. A esse comportamento dá-se o nome de quasiplasticidade (NISHIYAMA, 1978).

O efeito memória de forma pode ser usado para gerar movimento e/ou força, enquanto o efeito da superelasticidade pode armazenar energia de deformação. A função dos diferentes efeitos é exemplificada na curva tensão-deformação apresentada na **Figura 2.4** segundo Gilbertson; De Miranda, 1992.

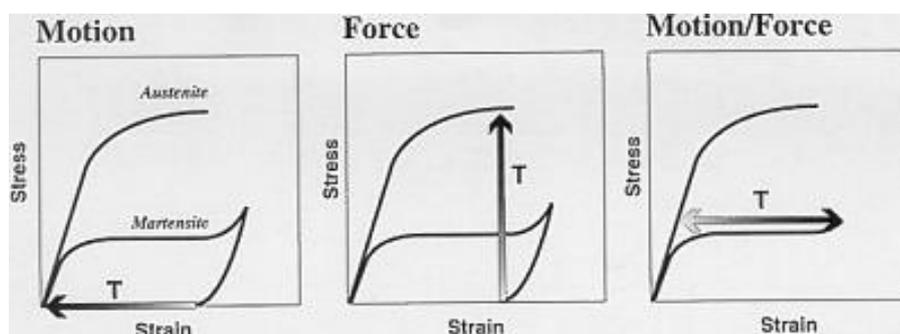


Figura 2.4 - O efeito memória de forma na curva tensão-deformação.
Fonte: Gilbertson; De Miranda, 1992.

2.6 Máquinas de calor

Quando uma máquina térmica realiza um determinado trabalho constantemente, operando em ciclos, ela deve receber calor de uma fonte quente e fornecer parte dele para uma fonte fria.

A baixa eficiência termodinâmica de uma máquina de calor, feita com elementos memória de forma, vem do fato de que estes elementos frios são aquecidos através da imersão em um fluido quente, e em seguida estes elementos são resfriados através de dissipador de calor ou em água fria. Tais diferenças de temperatura extrema é fonte de irreversibilidade, em razão da grande quantidade de entropia gerada. Deste modo, as máquinas não podem chegar a eficiência de uma máquina ideal, ou eficiência de Carnot (WAKJIRA, 2001).

Máquinas de calor e atuadores convertem energia de calor em trabalho mecânico. A diferença é que as máquinas de calor sofrem processo cíclico termodinâmico para produzir uma quantidade positiva de trabalho, enquanto os atuadores ativam um equipamento para controle do processo no uso de sensores pneumáticos, hidráulicos, ou eletrônicos (WAKJIRA, 2001).

Um das primeiras aplicações de ligas com memória de forma como máquinas de calor tem patente registrada em 1968, dez anos mais tarde pesquisadores reunidos em uma conferência internacional apresentaram o desenvolvimento de projetos relativos a máquinas de calor com ligas de Ni-Ti (DUNSTAN *et al.*, 1986).

De acordo com Jiujiang Zhu e outros (2001) os conceitos de máquinas de calor feitas com ligas com memória de forma podem ser divididos em quatro categorias:

- máquinas com manivelas,
- máquinas axiais,
- máquinas de campo de forças,
- máquinas diversas.

Complementando, Schiller (2002) sugeriu mais categorias: máquinas alternativas, máquinas de talha e máquinas sequenciais. A máquina construída neste estudo está incluída na categoria de máquinas alternativas por ser um dos modelos de máquinas mais pesquisadas recentemente.

Nas seções seguintes serão descritos os mecanismos das principais categorias das máquinas de calor feitas com ligas com memória de forma.

2.6.1 Máquinas com manivelas

Máquinas com manivelas convertem o movimento linear de um atuador feito de uma liga com memória de forma em movimento rotativo contínuo, excentricamente por ligar o atuador ao eixo de saída. Os atuadores são frequentemente treinados para formar extensão de molas. Algumas configurações exigem um volante para conduzir a manivela através do mecanismo do limite de posições.

A **Figura 2.5** apresenta três exemplos de máquinas com manivela patenteadas. Um interessante componente desta máquina na figura 2.7 (a) é o seu sincronizador (peça 8). As forças das manivelas sincronizadoras (peça 2) mantém a mesma orientação relativa durante as rotações em direções opostas. (SCHILLER, 2002).

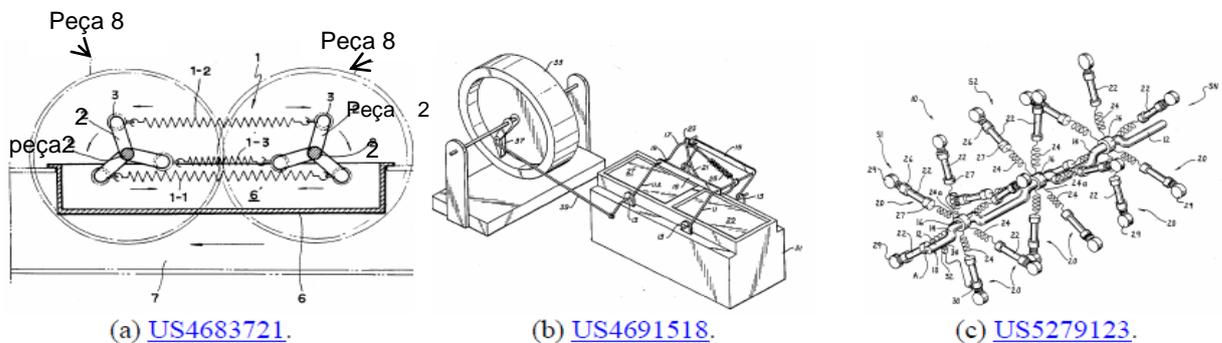


Figura 2.5 – Máquinas com manivelas
Fonte: Schiller, 2002.

2.6.1.1 Máquina de dupla-manivela contra-sincronizada

Os pesquisadores Jiujiang Zhu *et al.* (2001) publicaram o artigo *Energy Conversion in Shape Memory Alloy Heat Engine Part I: Theory and Part II: Simulation*, no *Journal of Intelligent Material Systems and Structure*, abordando as máquinas com manivelas. A primeira parte do artigo está relacionada às equações constitutivas gerais para as ligas com memória de forma (ibidem p. 127-132) e a segunda parte utilizou essas equações para simular a operação de uma máquina de

manivela dupla (ibidem p. 133-140). Os resultados da simulação experimental foram comparados com os estudos em uma máquina realizados por Hiroyuki Iwanaga *et al.*, 1988 (ZHU *et al.*, 2001, p. 634-637).

A construção da máquina de Ean Schiller foi baseada no modelo desenvolvido por Hiroyuki Iwanaga *et al.* (1988), a máquina do pesquisador está apresentada na **Figura 2.6**.

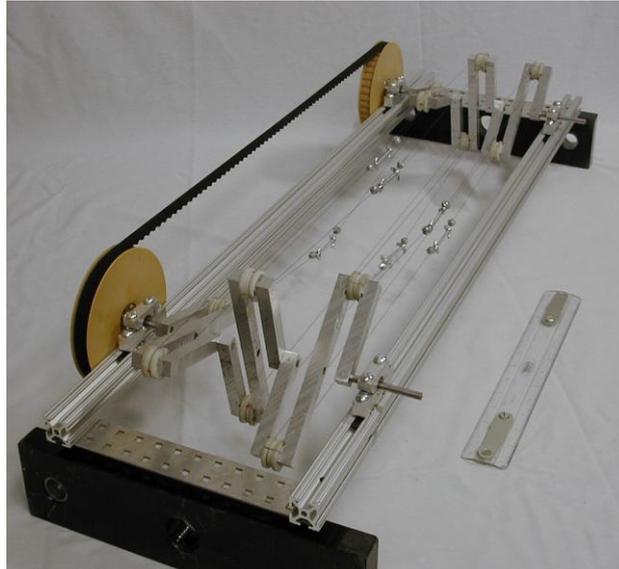


Figura 2.6 - Protótipo da máquina de Schiller.
Fonte: Schiller, 2002.

2.6.2 Máquinas de talha

Máquinas de talha usam cintos contínuos de arame de SMA como mecanismo motriz. Uma máquina de talha pode ser sincronizada ou não sincronizada. Sobre esses dispositivos pode-se encontrar nas seguintes referências Johnson, 1975; Tobushi & Cahoon, 1985; Tanaka *et al.*, 1985; Tobushi *et al.*, 1990; Tanaka e Yamada, 1991; Tanaka, 1992.

2.6.2.1 Máquinas de talha sincronizada

Máquinas de talha, normalmente, estão baseadas em atrito. Elas são suscetíveis a perder energia quando as voltas do arame feitas com Liga com Memória de Forma deslizam nas talhas.

Estas máquinas são limitadas, pois suas roldanas giram numa relação fixa. Sincronização é comumente usada para garantir que os dois eixos girem na mesma velocidade ou para manter a mesma orientação relativa.

A **Figura 2.7** apresenta três máquinas de talha sincronizadas.

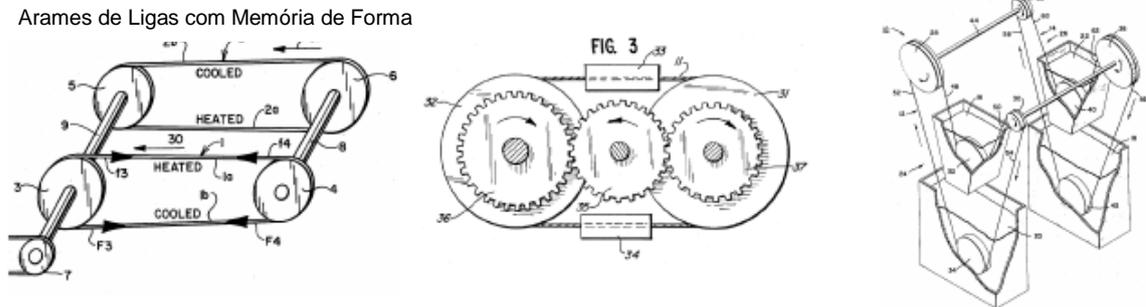


Figura 2.7 – Máquinas de talha sincronizadas.
Fonte: Schiller, 2002

Na **Figura 2.8** é apresentada uma máquina de calor desenvolvida por Jillcha Wakjira. O motor de calor VT1 é um dispositivo simples, com poucas peças móveis. Ela opera diretamente com a aplicação de calor a uma porção da cadeia do fio feito com Liga com Memória de Forma. Sua finalidade é converter energia térmica em trabalho útil durante a execução de um ciclo.

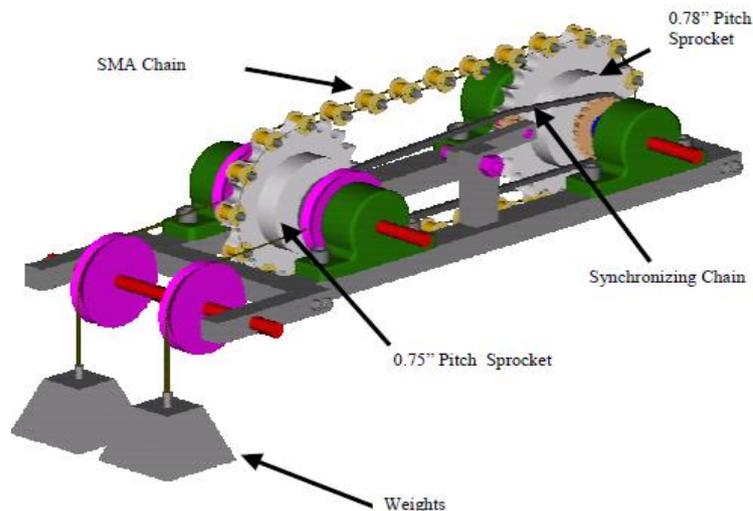


Figura 2.8 - Representação em 3D da montagem do motor de calor VT1.
Fonte: Wakjira, 2001.

2.6.2.2 Máquinas de talha não sincronizada

Nas máquinas não sincronizadas, as polias são livres para girar independentemente uma da outra. O arame feito com Liga com Memória de Forma envolve as polias, por exemplo, não há trem de engrenagens forçando as polias para manter a mesma velocidade ou relação de fase. Máquinas deste tipo geralmente operam em flexão. A **Figura 2.9** apresenta duas máquinas talha não sincronizada.

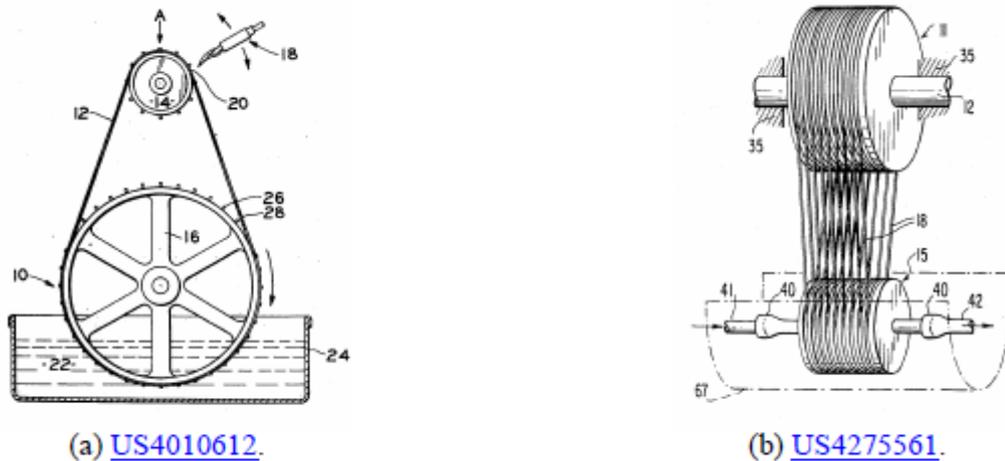


Figura 2.9 – Máquinas de talha não sincronizadas.
Fonte: Schiller, 2002

A máquina de calor de Yoshihisa Sato *et al.* (2008) apresentada na **Figura 2.10**, converte energia mecânica em energia elétrica utilizando correias de Ni-Ti com memória de forma.

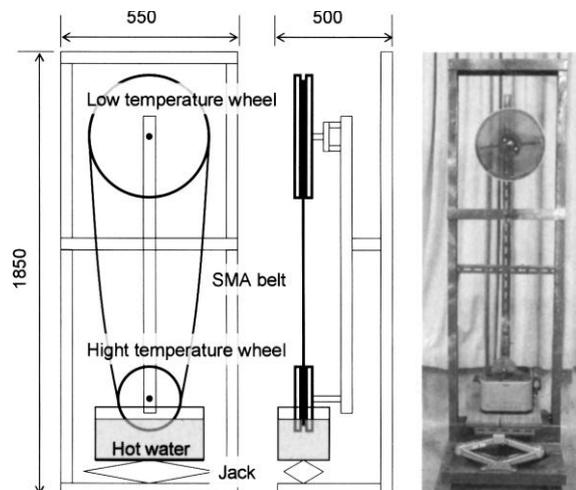


Figura 2.10 - Montagem experimental da máquina de Sato.
Fonte: Sato *et al.*, 2008.

Pode-se observar no mecanismo de geração de torque da máquina de calor de Sato *et al.* (2008) mostrado na **Figura 2.11**, que os contatos da correia SMA no ponto 1 na roda de alta temperatura (T1), gira enquanto absorve o calor atingindo uma temperatura elevada (A_f) no ponto 2 (T2) o momento de flexão dá impulso à roda de alta temperatura, assim produzindo torque M_h . Depois disso, a correia SMA entra em contato com a roda de baixa temperatura no ponto 3 (T3) e começa a refrigerar em direção ao ponto 4 (T4).

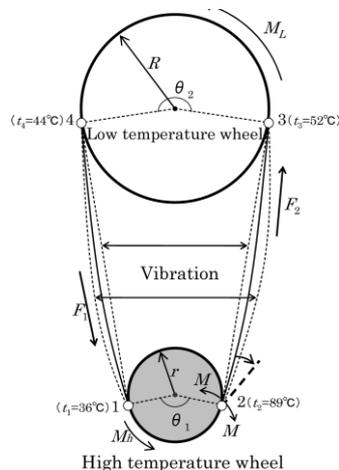


Figura 2.11 - Mecanismo de geração de torque da máquina SMA de Sato.
Fonte: Sato *et al.*, 2008.

2.6.3 Máquinas alternativas

Vale destacar que o protótipo construído neste trabalho está classificado como uma máquina alternativa.

As máquinas alternativas operam de forma linear, num modo de vai-e-vem, ao invés de um movimento cíclico. O desafio com máquinas alternativas é o ciclo térmico do arame quando ele se movimenta fisicamente entre as regiões de temperatura. Muitas vezes, as bombas externas são usadas para circular fluidos de aquecimento e de refrigeração ao longo dos arames, o que inevitavelmente diminui a eficiência geral.

A seguir a **Figura 2.12** (a) apresenta uma cabeça do pistão acionada por bobinas ocas de Ligas com Memória de Forma. E na **Figura 2.12** (b) apresenta uma

faixa de arames paralelos feitos com Liga com Memória de Forma que se conecta a um pistão através de uma placa de ligação.

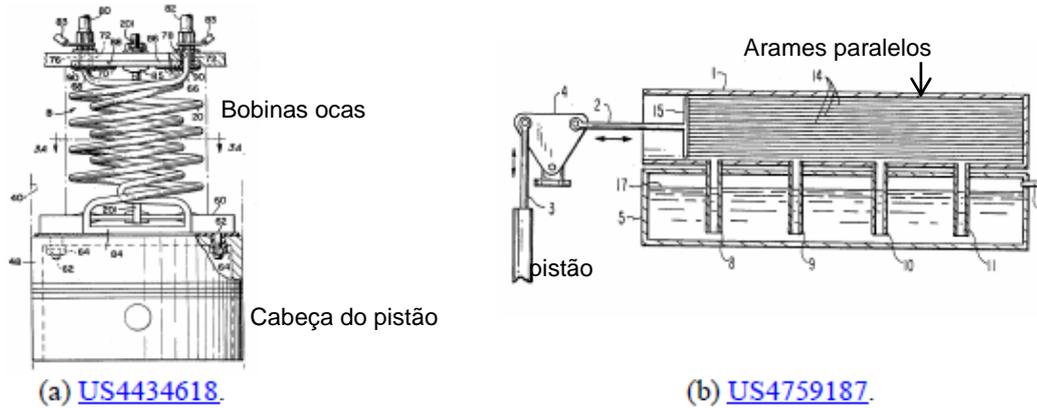


Figura 2.12 – Máquinas alternativas.

Fonte: Schiller, 2002

Outra máquina de calor alternativa feita com Liga com Memória de Forma foi proposta por Uichi Iwata e Toshio Sakuma (1998, p. 344-350), apresentada na **Figura 2.13**.

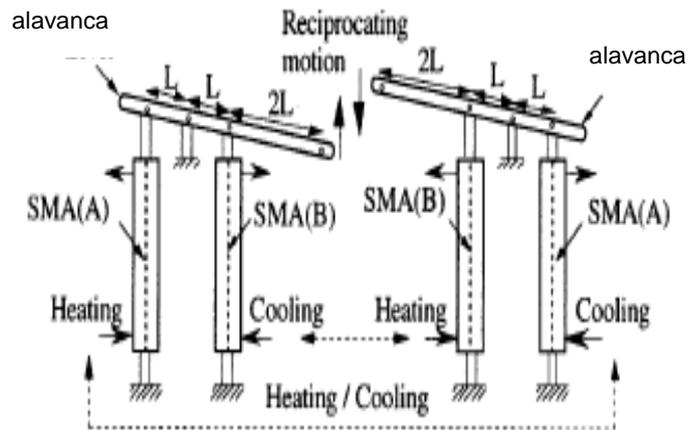


Figura 2.13 - Máquina de calor alternativa utilizando liga com memória de forma. Fonte: Iwata e Sakuma, 1998.

Esta máquina é composta por dois fios de Liga com Memória de Forma ligados em cada extremidade a uma alavanca. Como um fio é aquecido, mudando da fase martensita para austenita, o outro fio está frio. A força do fio aquecido gera uma tensão no outro fio que permite que a alavanca seja movimentada. Neste

momento o fio aquecido é resfriado e o fio estendido é aquecido e a alavanca é forçada a girar no sentido oposto. Realizando um movimento alternativo, e uma saída de energia pode ser gerada na forma de energia elétrica ou mecânica.

Outro modelo de máquina de calor alternativa com Ligas Memória de Forma é a máquina de Frank e Ashbee (1976) apresentada na **Figura 2.14**.

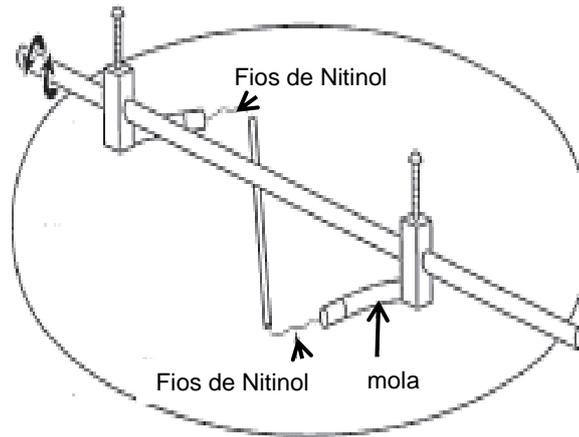


Figura 2.14 - Máquina de Frank e Ashbee.
Fonte: Frank; Ashbee, 1976.

A máquina acima apresentada tinha cerca de 4cm de molas em espirais, 4cm de fio a nitinol, 10cm de haste conectora (35g de massa), outros 4cm de fio a nitinol e outros 4cm de mola espiral em um mesmo plano fixados linearmente. A união foi inclinada nos fios em forma de S ao fixar as extremidades das molas em dois suportes de metal fixados 14cm a parte em 0,5cm de diâmetro em um eixo feito de vidro. Este eixo repousava em um recipiente de vidro localizado em uma placa aquecida e contendo um aquecedor de água que foi agitado magneticamente e mantido em um nível constante 4cm abaixo da borda do recipiente (FRANK; ASHBEE, 1976).

Mais um modelo de máquina de calor alternativa feita com Liga com Memória de Forma é a patente de Iskender Kutlucinar e Andrew Saul (2001). O modelo está apresentado na **Figura 2.15** a seguir.

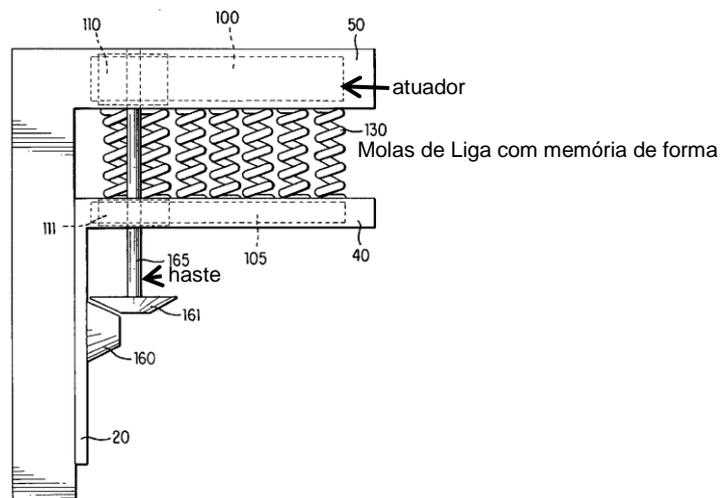


Figura 2.15 - Máquina alternativa de Kutlucinar e Saul.
Fonte: Kutlucinar e Saul, 2001.

A máquina de calor inclui uma manivela, um atuador acoplado em uma haste, em um meio aquecido. O atuador acoplado a haste inclui molas feitas de Liga com Memória de Forma que são maleáveis quando abaixo de uma temperatura crítica e retornam à sua forma original quando acima de uma temperatura crítica. O meio aquecido aumenta a temperatura de uma primeira porção de elementos com memória de forma abaixo da temperatura crítica. Esta ação de aquecimento e resfriamento dos elementos com memória de forma causa uma rotação da haste acionada por uma manivela. Esta máquina é descrita com detalhes em Iskender Kutlucinar e Andrew Saul (2001).

O pesquisador Paul McCornick (1986) desenvolveu um protótipo para uma bomba de deslocamento de volume, como a utilizada para bombeamento de águas profundas. A bomba é ativada por um elemento atuador com memória de forma (o motor) que suporta contração e alongamento durante aquecimento e resfriamento, respectivamente, como mostrado sistematicamente na **Figura 2.16**, de modo que resulta em um trabalho alternativo.

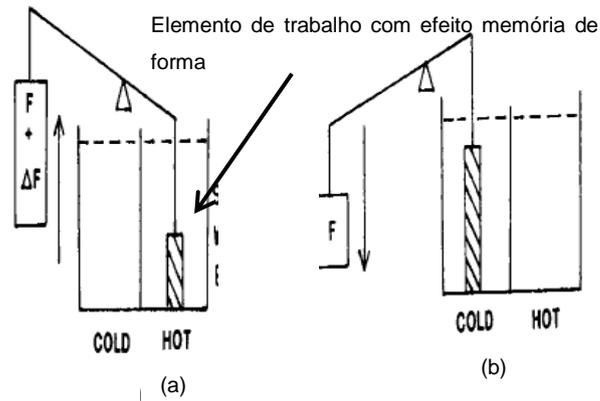


Figura 2.16 - Diagrama esquemático da bomba com Efeito Memória de Forma. (a) ciclo de aquecimento e (b) ciclo de resfriamento.
Fonte: McCornick, 1986.

Roberto Romano e Eduardo Tannuri (2009) desenvolveram um atuador onde um fio feito com Liga com Memória de Forma está fixado em uma extremidade no suporte da estrutura, por intermédio de um conector elétrico (C1). Sua outra extremidade é fixada diretamente no eixo da polia (raio $r_1 = 0,45\text{cm}$). Uma massa de 40g é utilizada como carga e está acoplada ao diâmetro externo da polia (raio $r_2 = 4,5\text{cm}$) por meio de um fio comum. A carga se movimenta aproximadamente 6cm. Este atuador está apresentado na **Figura 2.17**.

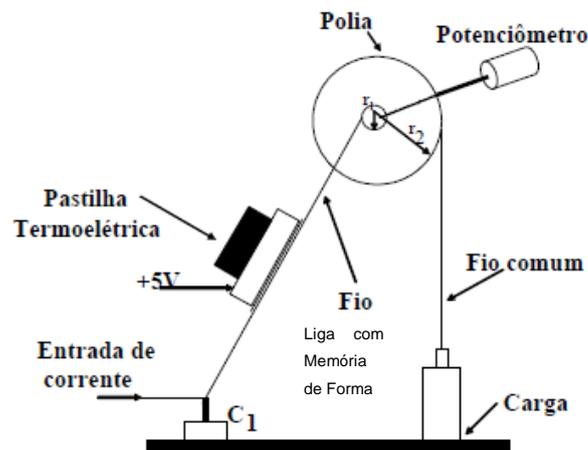


Figura 2.17 - Montagem mecânica do atuador com Liga com Memória de Forma.
Fonte: Romano; Tannuri, 2009.

Os estudos de Jesus Cortés (2009) mostram um dispositivo **Figura 2.18** que foi projetado e construído o qual proporciona uma rotação contínua de um eixo através de um fio feito de uma liga com Memória de Forma Ni-Ti e que está sujeito a flutuações de temperatura através da aplicação de impulsos elétricos.

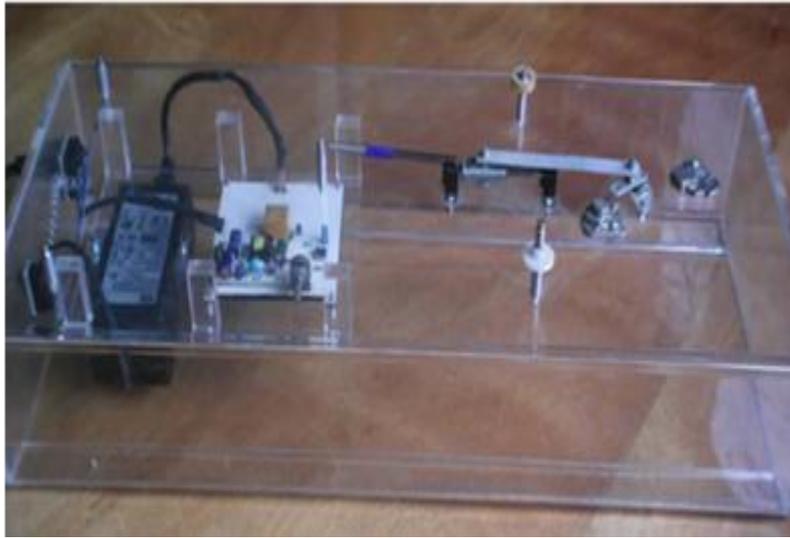


Figura 2.18 - Máquina de Cortés.
Fonte: Cortés, 2009.

2.7 Modelos constitutivos

Alguns dos modelos matemáticos, desenvolvidos por pesquisadores, simulam o comportamento da transformação de fase de ligas com memória de forma, outros modelos matemáticos propostos simulam o comportamento de um dispositivo, um mecanismo ou máquina feitos com ligas com memória de forma.

No presente estudo que trata do desenvolvimento de um modelo matemático que simula o comportamento de uma máquina de calor com memória de forma, pode-se citar alguns trabalhos significativos nesta área. Como os trabalhos realizados por Alfred Davis Johnson (1975), Dusntan et al (1986), Iwanaga et al (1988), Koji Ikuta *et al.* (1991), Romano (2009), Mohammad H. Elahinia e Hashem Ashrafiuon (2002), Schiller (2002), Mccornick (1987) e Cortés (2009). E os resultados destes trabalhos serviram de discussão deste presente estudo.

3 FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MOLA

3.1 Obtenção e treinamento da mola

As temperaturas de transformação podem ser obtidas através de calorímetros. Nesta técnica mede-se a quantidade de calor absorvida ou liberada por uma amostra ao ser submetida a um ciclo térmico de aquecimento e de resfriamento que atravesse o intervalo de temperaturas de transformação (RANIECKI et al, 1992).

Para obtenção da mola utilizou-se um arame de Ni-Ti de 2,2mm de diâmetro, que foi enrolado em um parafuso de 26mm de diâmetro. Depois, este parafuso (parafuso + arame de Ni-Ti) foi colocado no forno a 600°C por 2h e depois foi feito um resfriamento rápido em água à temperatura ambiente. A mola confeccionada ficou com 5 espirais ativas e comprimento livre de 73mm. Foi retirada uma parte desta mola 0,072g para realizar um ensaio no calorímetro diferencial de varredura-DSC modelo Mettler 823 da Toledo, para determinação das temperaturas de transformação de fase. Conforme gráfico da **Figura 3.1** em que está representada a curva das temperaturas de transformação obtidas no calorímetro, as temperaturas de transformação obtidas foram: $M_f=12^\circ\text{C}$; $M_s=36^\circ\text{C}$; $A_s=61^\circ\text{C}$; $A_f=84^\circ\text{C}$.

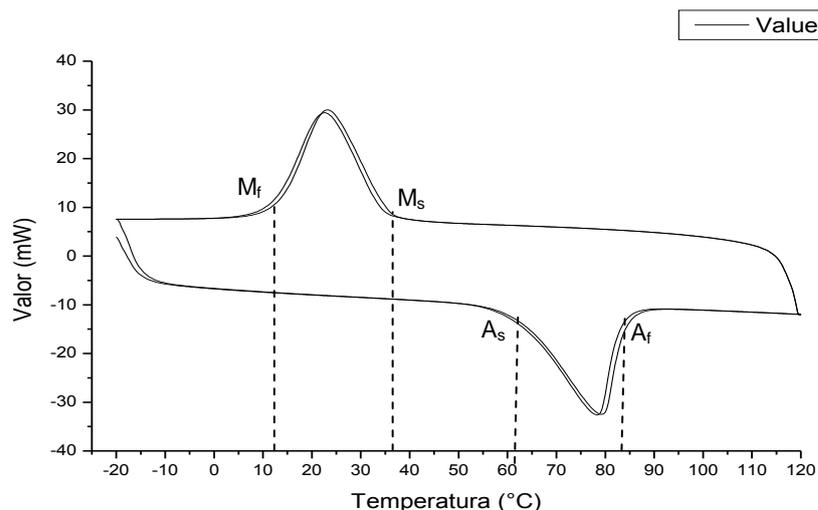


Figura 3.1 - Curva das temperaturas de transformação de fase.

Para a mola de Ni-Ti obter o efeito memória de forma reversível foi necessário submetê-la a um treinamento, já que acontece quando a mudança de forma é promovida apenas pela variação de temperatura. Durante o treinamento ou educação pode-se associar uma forma a cada fase em função de um determinado tratamento termomecânico. Desta forma após o treinamento da mola obteve-se a forma da mola contraída quando entra no reservatório de água quente e a forma da mola distendida quando entra no reservatório de água fria.

A mola foi medida numa balança digital marca Adventure TM com resolução de 0,0001g e erro 0,001g.

3.2 Determinação experimental da constante elástica da mola

A constante elástica da mola é um item necessário para determinar as soluções das equações desenvolvidas e apresentadas no Capítulo 5. Esta constante foi obtida, experimentalmente, em consequência do treinamento da mola, descrito no parágrafo anterior. Para simplificação é considerada a determinação da constante elástica na fase austenítica.

Utilizou-se ainda uma fonte de corrente contínua para simular o aquecimento, sendo aplicada uma corrente de 12A com uma tensão de 4,4V. Para o resfriamento utilizou-se o ar a temperatura ambiente do laboratório, constante em torno de 22°C. Para obter o movimento de contração e distensão da mola, seu deslocamento utilizou-se massas padronizadas fixadas em sua extremidade. Na **Tabela 3.1** são apresentados os resultados da variação da massa e a respectiva distensão da mola.

Tabela 3.1 - Deslocamento da mola.

MASSA (g)	DESLOCAMENTO (cm)
1950	17,5
2207	16,5
2407	15,5
2707	15,0

A partir da **Tabela 3.1** pode-se construir o gráfico apresentado na **Figura 3.2** para observação do comportamento da mola. Para determinação do valor de k foi considerado o valor para o maior deslocamento da mola, 17,5cm. E para simplificação foi considerada a equação: $F=kx$. Sendo assim $F=19,12\text{N}$ ($1,95\text{kg} \times 9,81\text{m/s}^2$), resultando na constante elástica de $0,10\text{N/mm}$.

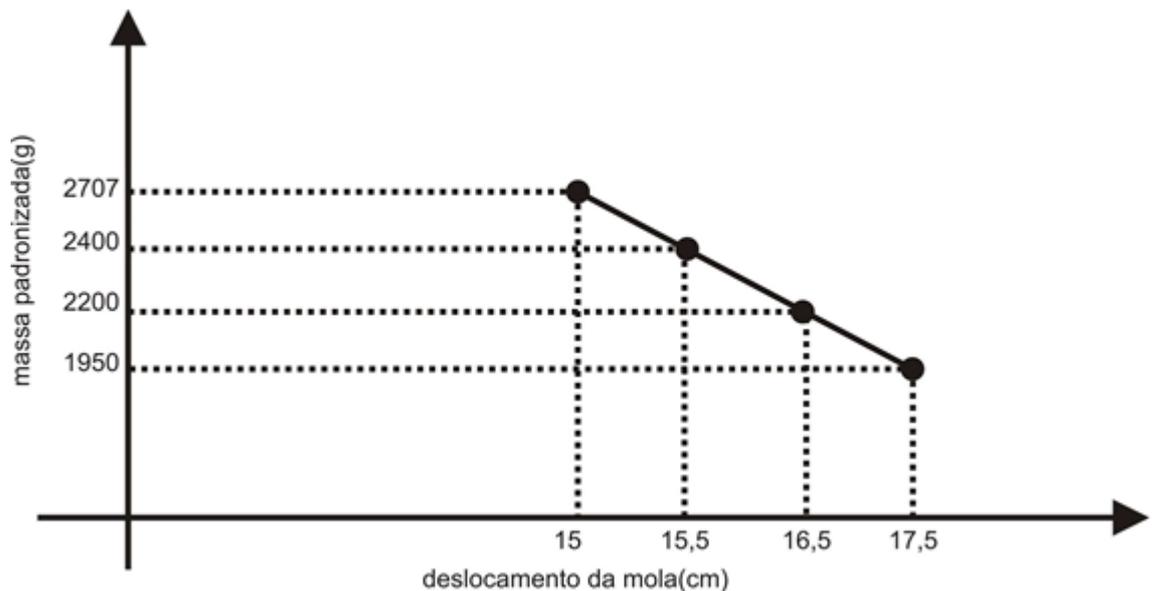


Figura 3.2 – Gráfico massa padronizada x deslocamento da mola.

3.3 Determinação Experimental da Força de arrasto (dissipativas)

A força que a mola produziu para realizar o movimento alternativo da máquina é uma etapa importante deste projeto. A medição desta força foi obtida indiretamente através de controle de cargas, ou seja, massas padronizadas inseridas na estrutura da máquina. Foi construído um aparato na estrutura da máquina para realizar esta medição. Com as massas padronizadas colocadas na lateral da estrutura foi observado o movimento do pino guia ao longo da ranhura. A **Figura 3.3** a seguir representa o esquema para realização da medição da força da mola no movimento ao longo do trilho.

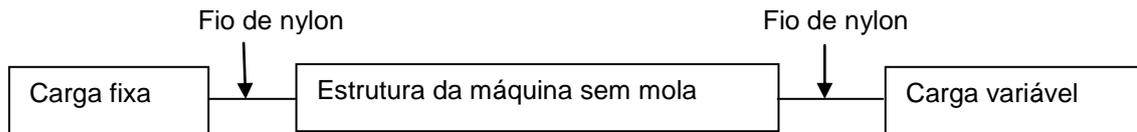


Figura 3.3 - Esquema para medição da força dissipativa no movimento axial.

De acordo com o esquema acima, as cargas fixa e variável foram fixadas à estrutura da máquina através de fios de nylon. Os fios de nylon foram presos ao pino guia. Para iniciar a medição, o pino guia foi posicionado na vertical e foram colocadas massas padronizadas no lado da carga variável. Quando as massas padronizadas somaram 733,20g foi suficiente para movimentar o pino guia em movimento descendente.

Em outro momento foi feita a medição da força necessária para o movimento rotacional da mola em torno do cilindro. Então com a parte superior da máquina na posição horizontal foram colocadas massas padronizadas na extremidade de um fio de nylon até levantá-la. Daí, quando foi colocado 700g, a estrutura se movimentou para cima conforme esquema apresentado na **Figura 3.4** abaixo.

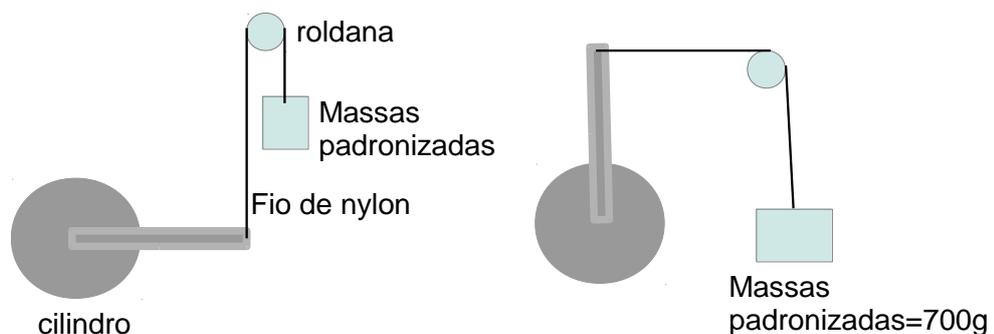


Figura 3.4 - Esquema para medição da força dissipativa no movimento angular.

Esta força medida foi de 7N, ou seja, força necessária que a mola deverá produzir para realizar o movimento alternativo. E para o movimento ao longo do trilho a mola deverá produzir uma força de 7,33N ou superior.

Na **Figura 3.5** a seguir estão apresentadas as forças dissipativas a serem vencidas pela força da mola.

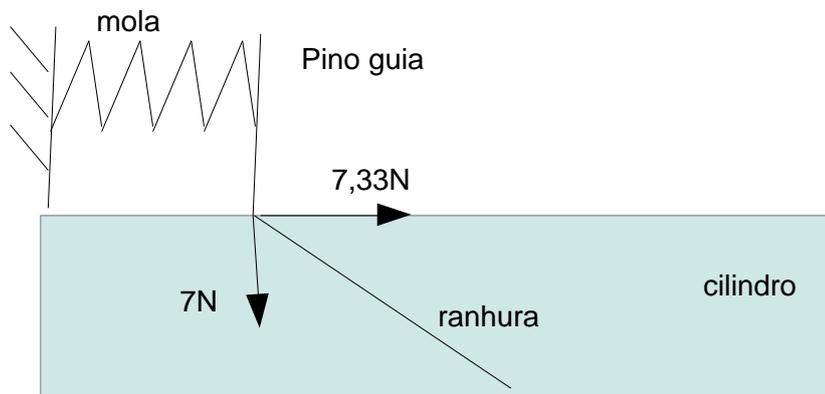


Figura 3.5 - Esquemático das forças dissipativas.

4 DESCRIÇÃO DA MÁQUINA DE CALOR

4.1 Procedimentos Preliminares

A mola é o componente crítico da máquina sendo a seleção e obtenção da liga o primeiro passo para a construção de uma máquina funcional. Não é simples combinar as propriedades da liga, tais como temperaturas de transformação, com as especificações desejadas para o projeto. O problema é que nem a liga e nem os dados solicitados estão prontamente disponíveis no mercado.

Cada fabricante de Ligas com Memória de Forma afirma ser capaz trabalhar as temperaturas de transformação de suas ligas. Eles apresentam uma capacidade de fornecimento de ligas numa ampla faixa de tamanhos e formas como em arames, fitas e barras. No entanto, se o interesse é por pequenas quantidades a maioria deles não fornece, pois consideram não ser comercialmente viável.

A máquina construída neste estudo está incluída na categoria de máquinas alternativas por ser um dos modelos de máquinas mais pesquisadas recentemente.

Durante os testes realizados na máquina percebeu-se que um dos fatores que mais influenciou na funcionalidade foi o ângulo de inclinação da ranhura (em forma de helicóide) do cilindro. Este ângulo de inclinação influenciou o movimento do pino guia, já que foi gerado um grande atrito entre este pino guia e a ranhura. A questão do ângulo de inclinação é discutida na análise dinâmica do protótipo nos próximos capítulos. Segue abaixo a caracterização da máquina de calor.

4.2 Caracterização da Máquina de Calor

A máquina de calor é constituída, basicamente, de um cilindro rígido de alumínio com diâmetro de 63,50mm e comprimento 260mm, uma estrutura de alumínio que é o suporte principal, um pino guia e a mola de Ni-Ti que é o elemento motor. Neste cilindro foi feita uma ranhura em forma de uma helicóide com 6mm de largura, feita em sua superfície lateral, varrendo um ângulo de 180°. O suporte principal de alumínio localizado na parte superior do cilindro está fixado ao cilindro através de parafusos, este suporte tem o mesmo comprimento do cilindro e serve para apoiar a mola durante seu movimento.

E ainda, este cilindro tem um rasgo em forma de helicóide onde se movimenta o pino guia junto com a mola de Ni-Ti. Neste pino guia, foram fixados em uma extremidade a mola de Ni-Ti e do outro lado, um fio de Nylon de 1mm de diâmetro tracionando uma carga.

Fazem parte do conjunto da máquina dois reservatórios para a mola ser mergulhada. Um reservatório possui água quente com temperatura mantida constante à 100°C e o outro reservatório possui água fria à temperatura constante à 0°C. Os reservatórios têm formatos retangulares 250x60x30mm. Foram fabricados em aço galvanizado e suas partes foram vedadas com massa de calafetar.

Na **Figura 4.1** está apresentada a máquina de calor com suas peças principais descritas. A fabricação das peças que compõem a máquina de calor foi fabricada em máquinas CNC por que dispõe da precisão requerida para fabricar as peças. As **Figuras 4.1** a **4.2** (a, b, c) foram feitas num software comercial versão educacional.

O projeto de fabricação das peças da máquina está apresentado no **ANEXO A**.

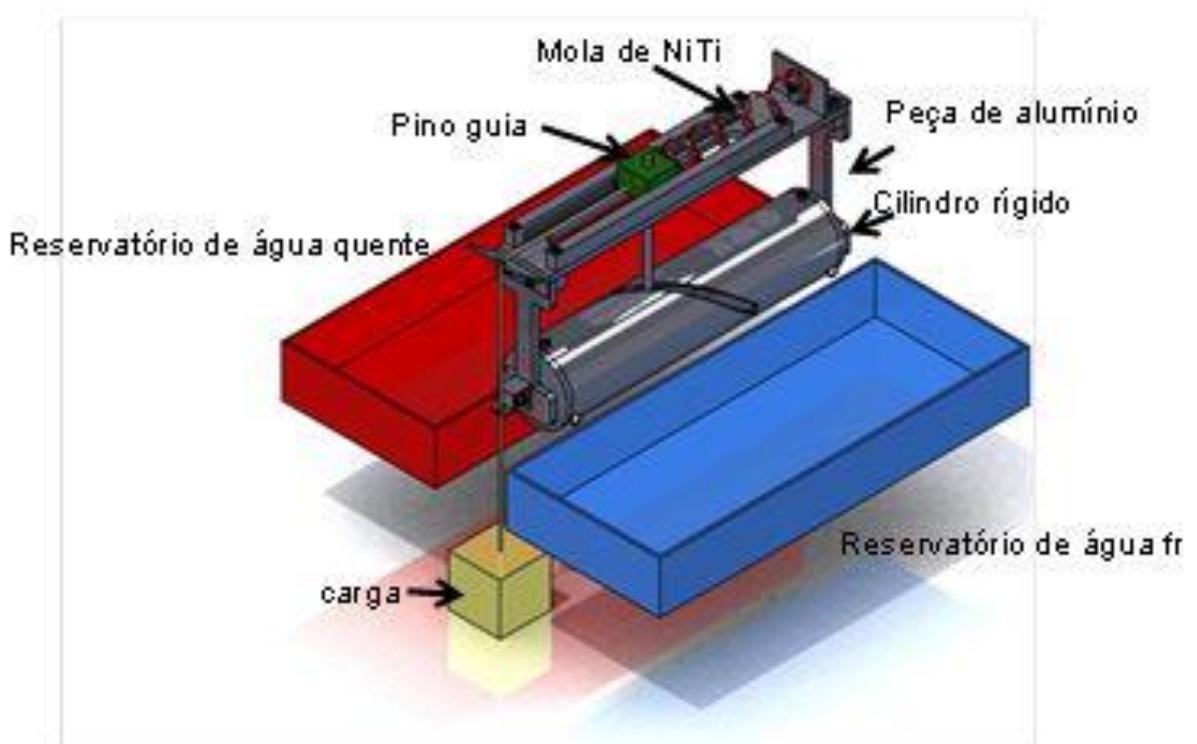


Figura 4.1 - A máquina de calor.

4.3 Princípio de Funcionamento da Máquina de Calor

A mola helicoidal de Ni-Ti, posicionada como mostrada na **Figura 4.1** acima, se movimentará devido a dois fatores: fenômeno do efeito memória de forma reversível ou “two way”, que é uma das propriedades das transformações martensíticas termoelásticas, ao entrar em contato com os reservatórios de água quente e de água fria; e aos esforços desenvolvidos pela mola sobre a ranhura em forma de helicóide devido o movimento da carga fixada no fio de nylon e na mola helicoidal de Ni-Ti. O movimento da mola produz movimento alternativo e o pino guia localizado na ranhura do cilindro, descreve um ângulo de 180° .

O ciclo se inicia quando a mola é distendida na fase martensítica sob ação de uma carga. Ao deixar o reservatório de água fria com temperatura mantida constante a 0°C , a mola percorre a ranhura em forma de helicóide através do pino guia, mergulhando no reservatório de água quente a 100°C (fonte quente), acima da temperatura A_f (temperatura final da transformação austenítica). A mola ao entrar em contato com a água quente se transforma na fase austenítica e se contrai. Ao se contrair, percorre o caminho inverso.

O suporte principal localizado na parte superior do cilindro se movimenta junto com a mola é parte integrante da máquina. Desta forma, a máquina descreve um movimento alternativo contínuo, produzindo um trabalho mecânico. Nas **Figuras 4.2** (a, b, c) a seguir está apresentado o comportamento da mola durante todo o ciclo.

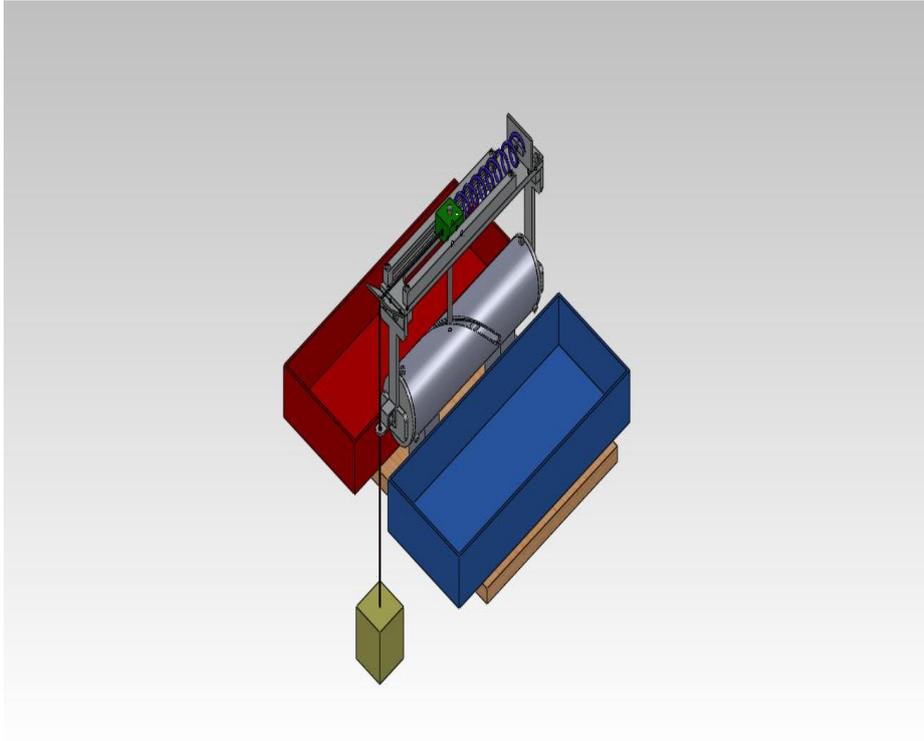


Figura 4.2 (a) - Mola na posição inicial.

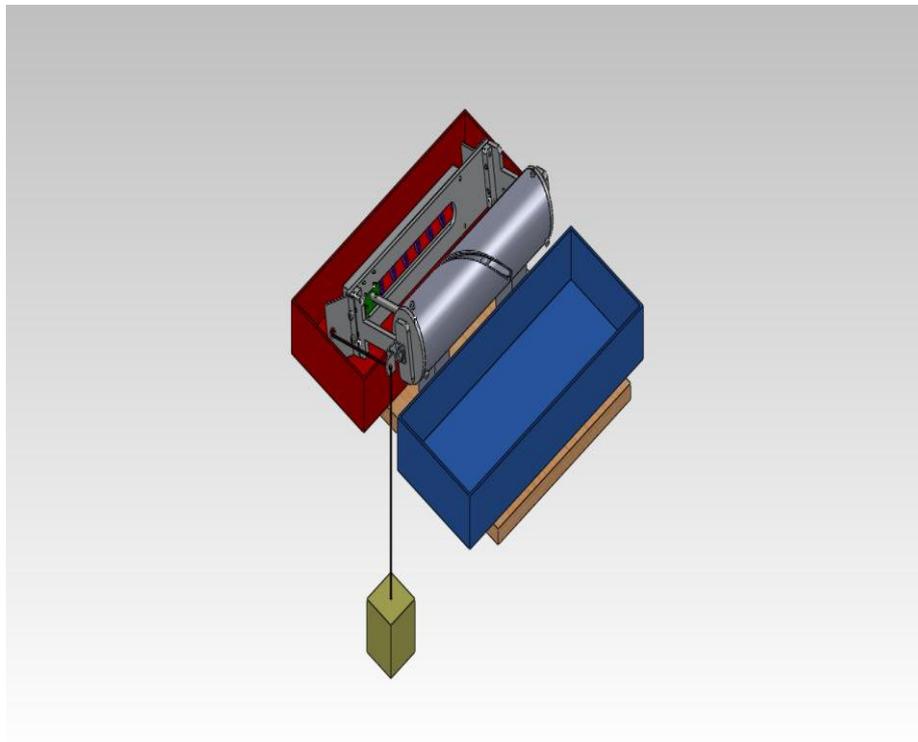


Figura 4.2 (b) - Mola distendida ao chegar ao reservatório de água quente.

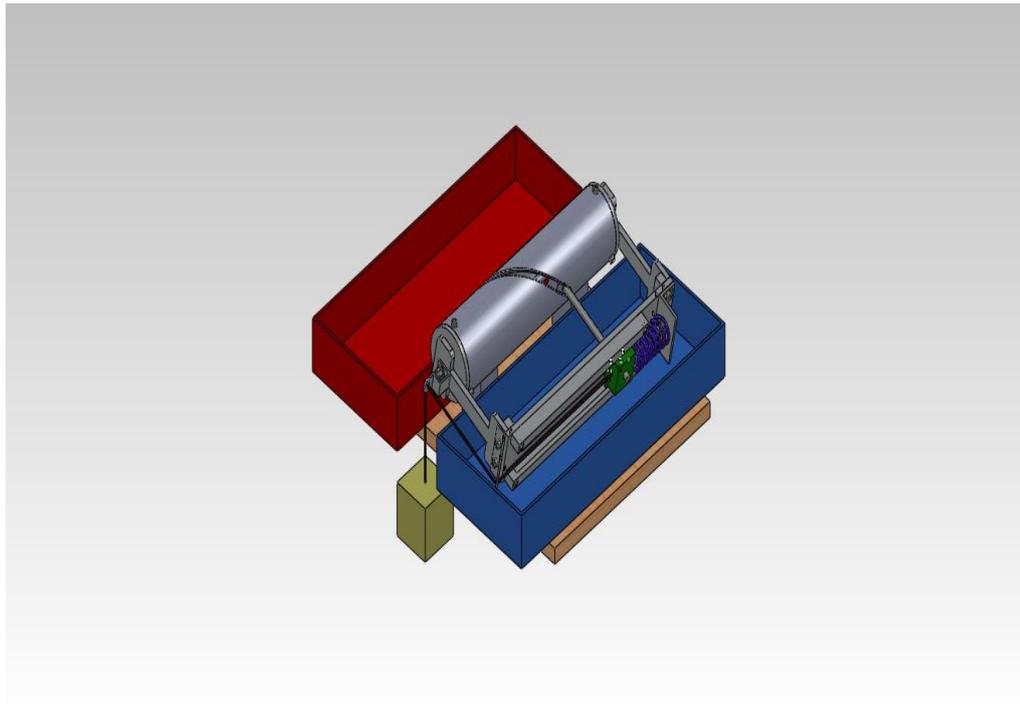


Figura 4.2 (c) - Mola contraída no reservatório de água fria.

4.4 Principais Componentes da Máquina de Calor

A seguir serão descritos os principais componentes da máquina de calor que influenciam no seu funcionamento.

4.4.1 Mola

A mola é o principal componente da máquina sendo o elemento motor para seu funcionamento. Para fabricação da mola foi utilizado um fio de 2,2mm de diâmetro feito de uma liga equiatômica de níquel e titânio. Após obtenção e treinamento da mola conforme descrito no Capítulo 6, a mola obteve as seguintes dimensões:

- Diâmetro externo - 27mm;
- Comprimento livre - 73mm;
- Número de espirais ativas -5.

A mola possui uma massa de 12,34g com área externa de $2,9\text{m}^2$; e área de secção transversal do arame $3,8\text{mm}^2$.

A mola fica posicionada na parte superior da máquina de calor encaixada no rasgo central do suporte principal.

4.4.2 Cilindro

O cilindro da máquina de calor é de alumínio com diâmetro de 63,50mm e comprimento de 260mm. Em torno deste cilindro foi feita uma ranhura em forma de helicóide onde o pino guia se movimenta, durante a contração e distensão da mola. Esta helicóide tem um passo de 150mm e 0,6 revoluções. Nas extremidades deste cilindro duas peças de alumínio de 123mm de altura e 51mm de largura foram fixadas através de parafusos. Na parte superior destas peças de alumínio foi fixado o suporte principal. No interior deste cilindro tem uma haste horizontal de aço onde se movimenta um rolamento linear de 8x16x22 Os detalhes de fabricação estão no **ANEXO A** (item 1).

4.4.3 Pino guia

O pino guia é uma haste de 131mm de comprimento e 7mm de diâmetro feita de aço onde na sua parte superior é fixado um carrinho que desliza sob 4 rolamentos de esferas. Na parte inferior desta haste foi fixado um rolamento linear que desliza dentro do cilindro através de uma haste horizontal de aço. Conforme detalhes de fabricação no **ANEXO A** (item 11).

4.4.4 Suporte principal

O suporte principal está localizado na parte superior da máquina. É uma parte fundamental na máquina porque a mola é fixada nele, e quando a mola rotaciona sob o cilindro, este suporte principal também rotaciona junto. A massa deste suporte é de 591,89g. Os detalhes de fabricação estão no **ANEXO A** (item 10).

5 MODELO TÉRMICO E MECÂNICO

A finalidade da modelagem matemática é representar todos os aspectos importantes do sistema com o propósito de obter as equações matemáticas (numéricas ou analíticas) que governam o comportamento do sistema (RAO; REDDY, 2009).

No modelo térmico do comportamento da mola foi empregada a equação da convecção natural, tanto para o aquecimento da mola como para o resfriamento, e adotadas algumas considerações a fim de simplificar o modelo.

No modelo mecânico foram empregadas equações da dinâmica de um ponto material para o movimento da mola ao longo do trilho e para o movimento angular. E para simulação do protótipo foi utilizado um software comercial versão educacional.

Sendo assim, nesta seção apresenta-se o desenvolvimento das equações das propriedades térmicas da mola e das equações do comportamento dinâmico da mola. Na **Figura 5.1** é mostrado um esquemático do modelo da mola.

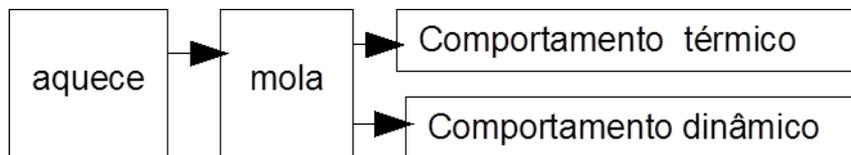


Figura 5.1 - Modelo matemático da mola com memória de forma.

5.1 Modelo Térmico

A mola é aquecida por convecção através de um reservatório de água quente (fonte quente) com temperatura considerada constante. E resfriada num reservatório de água fria (fonte fria). Conforme esquema apresentado na **Figura 5.2** a seguir.

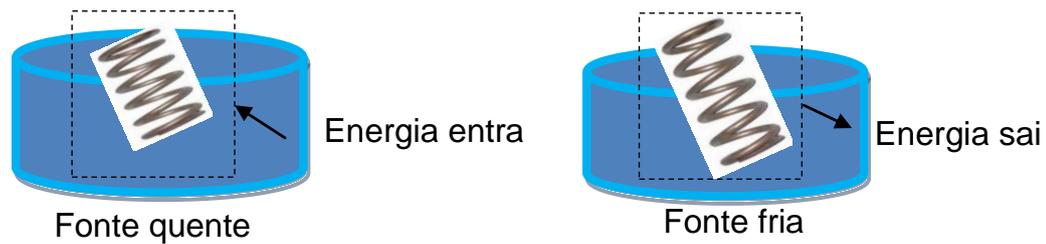


Figura 5.2 - Desenho esquemático da mola e o balanço da energia.

5.1.1 Considerações adotadas para modelo térmico

O modelo térmico elaborado tem as seguintes considerações simplificadoras:

- a) Modelo a parâmetros concentrados, a capacidade térmica do reservatório é bem maior que a da mola.
- b) A temperatura da mola varia no tempo enquanto estiver em contato com a água dos reservatórios.
- c) É desprezada a troca de calor entre a mola e o ar durante o ciclo.
- d) Considerar apenas troca de calor por convecção natural entre a mola e a água dos reservatórios.
- e) Dilatação térmica é desprezável.
- f) A temperatura dos reservatórios é constante ao longo do tempo.
- g) A temperatura ambiente é constante ao longo do tempo.
- h) A temperatura será uniforme ao longo do comprimento da mola.
- i) As deformações da mola são uniformes durante as transformações de fase.
- j) O efeito da radiação foi considerado desprezível, uma vez que as temperaturas envolvidas são relativamente baixas (menores que 100°C).
- l) A mola é o volume de controle estudado.
- m) Mola na fase austenítica.

Deste modo foi elaborado um modelo simplificado, mas que traduz bem o comportamento da mola com relação à temperatura, conforme mencionado nas considerações simplificadoras.

Conforme os conceitos básicos da termodinâmica, conservação de energia e transmissão de calor (INCROPERA; BERGAMAN, 2008 e MORAN; SHAPIRO, 2009), fazendo-se o balanço de energia, o modelo térmico pode ser expresso segundo a Equação 5.1:

$$E_{entra} - E_{sai} = \Delta U \quad (5.1)$$

Em que:

E_{entra} : Energia que entra na mola;

E_{sai} : Energia que sai da mola;

ΔU : Variação de energia interna na mola.

A variação de energia será por convecção natural e corresponde a:

$$\Delta E = hA(T_{fq} - T) \quad (5.2)$$

Onde:

T - Temperatura na mola (K)

h -coeficiente de convecção natural para líquidos (W/m²K)

Os valores escolhidos estão dentro dos limites como listados por Incropera e Bergman (2008), ou seja, 50 a 1000 W/m²K.

A - Área externa da mola (2.9283m²);

T_{fq} - Temperatura da fonte quente (373K);

A área externa da mola foi calculada conforme dados abaixo:

$$A = (\pi d)(\pi Dn) \quad (5.3)$$

Onde:

D - diâmetro externo da mola (27mm);

d - diâmetro do fio da mola (2,2mm);

n - número de espiras ativa (5).

A variação de energia interna corresponde a:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = mC_p \frac{dT}{dt} \quad (5.4)$$

Em que:

m - massa da mola (12,33g);

C_p - calor específico a pressão constante (tabelado 322J/Kg/K);

dT/dt - taxa de variação da temperatura da mola em relação ao tempo.

Então substituindo estes valores na Equação 5.4 tem-se:

$$mC_p \frac{dT}{dt} = hA(T_{fq} - T) \quad (5.5)$$

A Equação 5.5 acima representa a variação na temperatura da mola em função do tempo quando a mola está mergulhada na fonte quente, ou seja, durante seu aquecimento. Quando a mola está na fonte fria a Equação 5.5 é modificada para:

$$-mC_p \frac{dT}{dt} = hA(T - T_{fF}) \quad (5.6)$$

Onde T_{fF} é a temperatura da fonte fria (273K)

A Equação 5.6 acima representa a variação na temperatura da mola em função do tempo quando a mola está mergulhada na fonte fria, ou seja, durante o seu resfriamento.

Na literatura científica que trata de desenvolvimento de máquinas de calor com memória de forma como, Johnson (1975); Cortés (2009); Wakjira (2001) e outros, os valores dos parâmetros coeficiente de convecção, h , e do calor específico a pressão constante, C_p utilizados em seus projetos variam. Alguns valores destes parâmetros são dados pelo fabricante do fio com memória de forma e outros são considerados pelos autores conforme literatura da área de transferência de calor. Os valores adotados neste estudo foram os adotados pelos pesquisadores da área.

5.2 Modelo do Sistema Mecânico

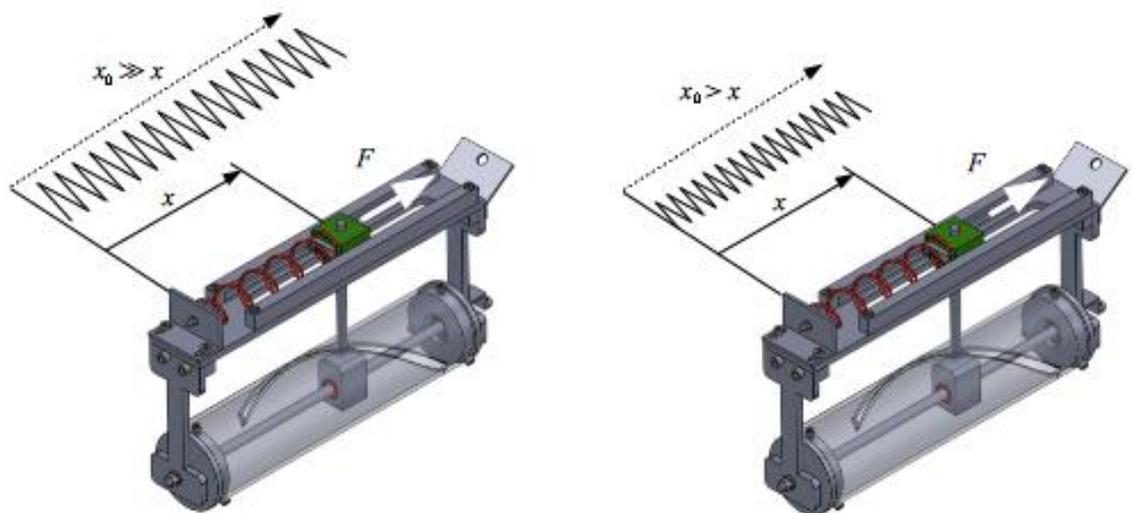
A mola ao se movimentar pela helicóide através do pino guia desenvolve uma força. Quando a mola se contrai, na fase austenítica, a carga está subindo. E quando a mola se distende, na fase martensítica, a carga está descendo.

Nesta seção está apresentada uma análise estática e dinâmica da mola ao longo do trilho, também chamado de movimento axial. É considerado o movimento de distensão e contração da mola. Como a mola ao se contrair e ao se distender se movimenta entre os dois reservatórios realizando um movimento angular é feita uma análise dinâmica deste movimento.

Vale salientar que ambos os movimentos axial e angular da mola são tangentes ao cilindro.

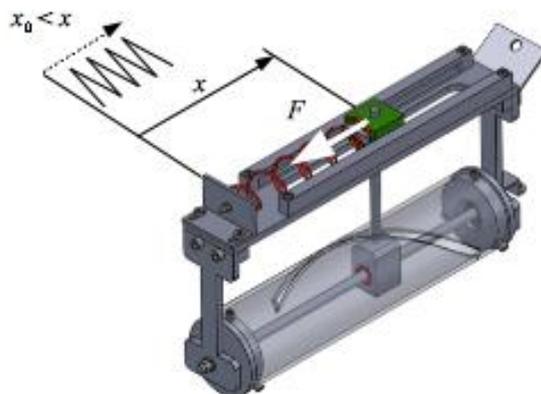
As equações foram descritas para uma mola de comprimento livre x_0 qualquer, em relação a um sistema referencial adotado x . Para melhor entendimento entre a relação x_0 e x considera-se as situações mostrada na **Figura 5.3** a mola na

fase martensítica (fria) tracionada onde $x_0 \gg x$, mola na temperatura ambiente pouco comprimida onde $x_0 > x$ e a mola na fase austenítica (quente) muito comprimida onde $x_0 < x$. Nas três situações, a mola estará tensionada se a distância x , medida à partir do referencial indicado na **Figura 5.3** for diferente do comprimento x_0 , que varia de acordo com a temperatura da mola. As tensões desenvolvidas na mola em cada caso, variam de acordo com a situação, pois o comprimento livre da mola, x_0 , é dependente da temperatura.



(a) Mola fria (tracionada)

(b) Mola à temperatura ambiente
(pouco comprimida)



(c) Mola quente (muito comprimida)

Figura 5.3 – Relação entre x e x_0

É considerado, primeiramente, o conjunto mola-pino guia-rolamento linear quando a mola está distendida, mostrado na **Figura 5.4** a seguir. Neste caso, a temperatura da mola é tal que o seu comprimento, x_0 , é maior que a distância

arbitrária x , medida conforme o sistema de referencial adotado do início da mola até a metade da massa. No que segue, adota-se a convenção de que uma força direcionada para a esquerda tem um sinal negativo, e vice-versa. Assim, por exemplo, tanto T_m (tração na mola) quanto $k(x-x_0)$ que é a força da mola são negativos. No tocante a momento, estabelecemos o sentido anti-horário, como positivo, conforme a convenção usual.

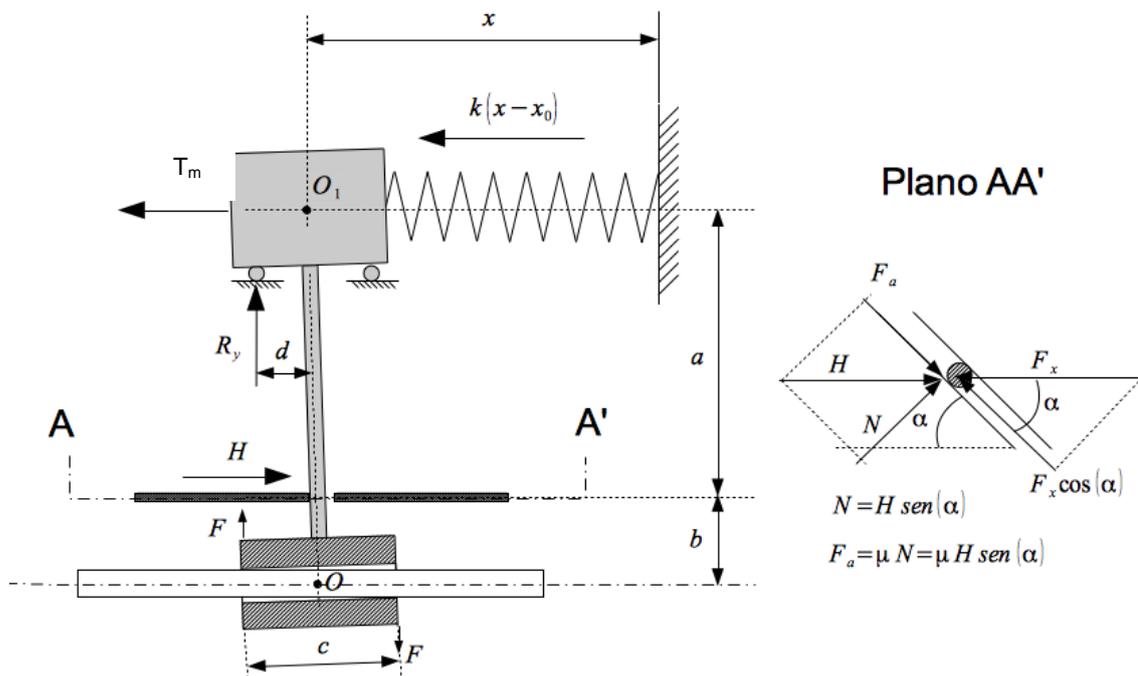


Figura 5.4 - Análise dinâmica do sistema.

Da **Figura 5.4**, observa-se que a massa atrelada à mola, o pino guia e o rolamento linear, giram solidariamente de um pequeno ângulo, no sentido anti-horário (propositalmente exagerado, para facilitar a visualização). Assumindo que a abertura da ranhura seja grande suficiente para que o pino guia passe através dela livremente e que deve encostar na parede esquerda, produzindo uma força de contato, H (ver detalhe do corte AA' , à esquerda).

É importante notar que, dependendo do processo de fabricação e da espessura do cilindro vazado, pode ocorrer a indesejável situação em que ambos os lados do pino toquem a superfície interna da ranhura, como mostra a **Figura 5.5** a seguir. Neste caso, a força de atrito entre o pino e a ranhura é, desnecessariamente aumentada. Neste estudo foi observado, experimentalmente, que apenas o pino guia

se escora na ranhura em um dos lados, apenas, conforme foi ilustrado na **Figura 5.4**.

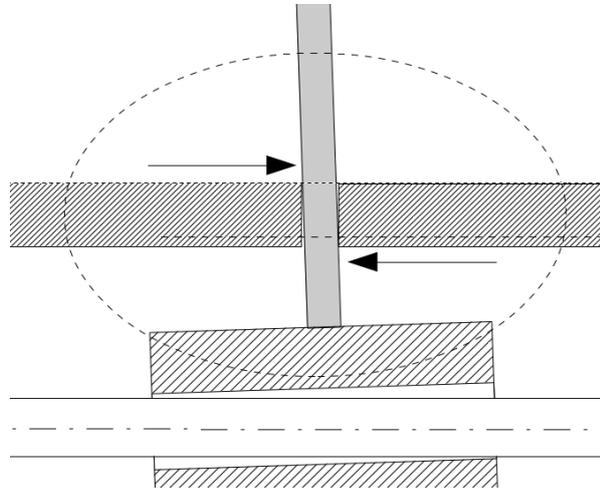


Figura 5.5 - Folga insuficiente entre o pino e a ranhura.

Devido à folga entre o rolamento linear e o eixo horizontal na parte inferior mostrado na **Figura 5.4**, estes se tocam em suas extremidades produzindo as forças F que serão consideradas de igual intensidade, ao se analisar. É considerada a reação do pino guia sobre a superfície interna do rolamento linear, e não o contrário. A massa acoplada à mola, na parte superior da estrutura da máquina, está apoiada no trilho em quatro rolamentos. Entretanto, devido ao fato de que os rolamentos mantêm contato com o trilho inferiormente, apenas duas reações R_y ocorrem e, neste caso, sobre os rolamentos da esquerda, devido à configuração das forças.

Como uma última observação, o atrito entre a massa acoplada à mola e o trilho de deslizamento será desprezado nos cálculos, devido à utilização de mancais de rolamento como rodízios, que, intrinsecamente, possuem uma baixa resistência à rolagem. E ainda, considera-se que todas as peças são rígidas, portanto, as forças elásticas devido à deformação de contato não são consideradas.

5.2.1 Análise estática

O detalhe da junção pino guia-ranhura é mostrado na vista de topo do corte AA', representado à direita da **Figura 5.4**. Nele, vemos que a origem da reação horizontal, H , é a resultante das forças na direção x , F_x . A componente de F_x ,

segundo o rasgo da ranhura: $F_x \cos(\alpha)$, deverá ser maior do que a força de atrito produzida entre o pino guia e a ranhura: $F_a = \mu_e N$, para que possa existir movimento (o μ_e é o coeficiente de atrito estático que é menor do que o coeficiente de atrito dinâmico, μ , representado na figura). Caso $F_x \cos(\alpha)$ seja menor do que $\mu_e N$, não haverá movimento do pino guia e o conjunto permanecerá estático. Neste caso ($F_x \cos(\alpha) \leq \mu_e N$), as equações de equilíbrio fornecem os seguintes resultados:

a) Somatório dos momentos em relação ao ponto **O** da **Figura 5.4**:

$$[T_m + k(x_0 - x)](a + b) - R_y d - Hb - 2F \left(\frac{c}{2}\right) = 0 \quad (5.7)$$

b) Somatório dos momentos em relação ao ponto **O₁** da **Figura 5.4**:

$$Ha - 2F \left(\frac{c}{2}\right) = 0 \therefore F = H \left(\frac{a}{c}\right) \quad (5.8)$$

c) Somatório das forças verticais:

$$2R_y - F + F = 0 \therefore R_y = 0 \quad (5.9)$$

Observa-se que, na Equação (5.7), foi utilizada a diferença: $x_0 - x$, ao invés de $x - x_0$, porque, sendo $x_0 > x$, a diferença $x - x_0$ resultaria em um número negativo, o que tornaria o balanço de momentos incorreto, visto que a força da mola, juntamente com a tração T_m , produzirá um momento positivo, de acordo com a convenção adotada.

Das Equações (5.7) a (5.9) e adotando a convenção do sentido da força (ver **Figura 5.4**), obtém-se a seguinte expressão para a força H :

$$H = -T_m + k(x - x_0) \quad (5.10)$$

A Equação (5.10) permanece válida desde que observe que $F_x = H$, e da **Figura 5.4** obtém-se que:

$$F_a = F_x \cos(\alpha) \quad (5.11)$$

E ainda observando a **Figura 5.4** e substituindo F_a por:

$$F_a = \mu H \sin(\alpha) \quad (5.12)$$

Tem-se:

$$\mu H \sin(\alpha) = F_x \cos(\alpha) \quad (5.13)$$

$$[T_m + k(x_0 - x)] \cos(\alpha) \leq \mu_s [T_m + k(x_0 - x)] \sin(\alpha) \quad (5.14)$$

Simplificando-se a Equação (5.14), obtém-se a condição para que não haja movimento entre o pino guia e a ranhura:

$$\frac{\cos(\alpha)}{\sin(\alpha)} = \tan^{-1}(\alpha) \leq \mu_s \quad (5.15)$$

A Equação (5.15) é muito importante, no sentido em que ela mostra que existe uma relação direta entre o ângulo da hélice, α , e o funcionamento da máquina. Vemos assim que, para que haja movimento é necessário que a condição: $\tan^{-1}(\alpha) \geq \mu_s$, seja satisfeita. Se isso ocorrer, as Equações da estática (5.7) a (5.9) não poderão mais ser aplicadas, devendo-se perfazer uma análise dinâmica no sistema, como será visto a seguir.

5.2.2 Análise dinâmica

Na análise dinâmica pode-se dividir o estudo das forças na direção axial ao cilindro, ou seja, ao longo do trilho, e na direção transversal ao pino guia responsável pelo movimento angular da mola. Com o sistema em movimento, um balanço de forças na direção horizontal (x) resultará em:

$$F_x = H = -T_m + k(x - x_0) \quad (5.16)$$

5.2.2.1 Análise dinâmica do movimento axial da mola

É possível expressar a mesma Equação (5.16) na direção x ou, até mesmo, na direção de um arco da circunferência obtida pela secção transversal da ranhura. Da **Figura 5.6** tem-se:

$$dr = \frac{dx}{\cos(\alpha)} \therefore \frac{d^2r}{dt^2} = \left[\frac{1}{\cos(\alpha)} \right] \frac{d^2x}{dt^2} \quad (5.17)$$

Observe que, neste caso, $F_x \cos(\alpha) > F_a$. Desta maneira, haverá uma força resultante na direção da ranhura, F_R , conforme mostra a **Figura 5.6** a seguir. Pela equação da dinâmica esta força resultante deverá ser igual à massa, deslocada vezes a aceleração, ao longo da ranhura. A força resultante ao longo da ranhura será dada por:

$$F_R = H \cos(\alpha) - F_a \quad (5.18)$$

Ainda da **Figura 5.6** pode-se verificar que a força resultante na direção x, ou seja, $F_R \cos \alpha$ é responsável pelo movimento da mola ao longo do trilho. Assim, tem-se que:

$$[H \cos(\alpha) - F_a] \cos \alpha = [H \cos(\alpha) - H \mu \operatorname{sen}(\alpha)] \cos \alpha = M \frac{d^2x}{dt^2} \quad (5.19)$$

Onde M , é a massa da mola + pino guia.

O valor do coeficiente de atrito estático (μ) utilizado na Equação (5.19) foi retirado de Serway (1992) entre o aço e o alumínio.

Substituindo-se H , dado pela Equação (5.16), na Equação (5.19), obtém-se:

$$[k(x - x_0) - T_m][\cos^2(\alpha) - \mu \operatorname{sen}(\alpha) \cos(\alpha)] = M \frac{d^2x}{dt^2} \quad (5.20)$$

A Equação (5.20) é a equação do movimento axial (ao longo do trilho) da mola.

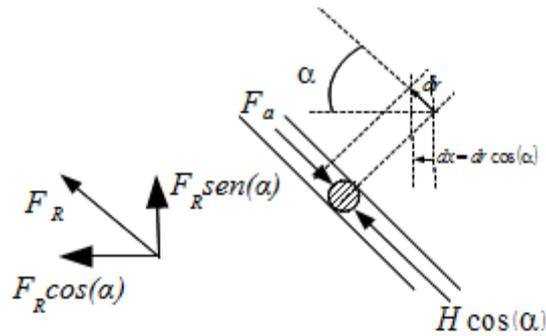


Figura 5.6 - Força resultante ao longo da ranhura (assumindo que $F_x=H$).

Observa-se que para $\alpha=0$ (movimento ao longo do trilho), a Equação (5.19), reduz-se à³:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = k(x - x_0) - T_m \quad (5.21)$$

De maneira semelhante, para $\alpha=90^\circ$, não haverá movimento na direção x , e a Equação (5.20) reduzir-se-á a:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = 0 \quad (5.22)$$

5.2.2.2 Análise dinâmica do movimento angular da mola

Conforme citado anteriormente, verifica-se que a mola ao se movimentar na ranhura do cilindro deverá, ora se distender e ora se contrair, ao entrar em contato com os reservatórios de água fria e de água quente, respectivamente, percorrendo aproximadamente 180° para realizar o movimento de rotação em torno do cilindro.

A análise do movimento angular da mola se inicia quando esta se encontra na posição $\theta=0^\circ$ onde a força da mola deverá ser máxima para vencer a inércia e iniciar o movimento de rotação. Em $\theta=90^\circ$ a mola se encontra na posição intermediária, ou seja, logo acima do cilindro e na metade do percurso, sendo ajudada pela força da gravidade para deslizar para o outro lado do cilindro. E em $\theta=180^\circ$ a mola terá que vencer a inércia novamente para iniciar o caminho de volta, para o outro lado do cilindro.

³ Observa-se que o termo referente à força de atrito já não mais existe, pois este foi desconsiderado entre os rolamentos e o trilho.

Pode-se assim verificar que quando $\theta=0^\circ$ a força que a mola deverá exercer sobre a estrutura é máxima para iniciar o movimento de rotação. Em $\theta=90^\circ$ a força deverá ser próxima da metade do valor máximo determinado. Em $\theta>90^\circ$ o peso da estrutura com a mola passa a ajudar o movimento. E em $\theta=180^\circ$ a mola volta a posição inicial após exercer a mesma força sobre a estrutura igual a força na posição $\theta=0^\circ$.

Desta forma pode-se concluir que, quando a mola se contrai (ao cair na fonte quente) passa a ser o agente gerador do movimento, ou seja,

$$F_{mola} - F_a - peso = Ma \quad (5.23)$$

E quando a mola se estende (ao cair na fonte fria) o peso é o agente gerador do movimento. Portanto

$$peso + f_{mola} - F_a = Ma \quad (5.24)$$

Onde f_{mola} é desprezível se comparado a F_{mola} .

A Equação (5.20) pode ser escrita ao longo do arco de circunferência descrito pelo movimento do conjunto mola-pino guia-parte superior da máquina. Na **Figura 5.7** observa-se um instantâneo deste movimento que se encontra no plano π e se desenvolve ao longo do arco tracejado. Ao longo do movimento, o plano se deslocará sobre o eixo x , na medida em que a mola se distende ou se contrai. No entanto, neste instante o interesse é apenas na projeção deste movimento sobre um plano qualquer, perpendicular ao eixo da mola.

Para isso, verifica-se em primeiro lugar a seguinte relação, que provém diretamente da definição do *radiano*, como unidade de medida angular (**Figura 5.7**):

$$d\theta = \frac{dc}{b} \therefore dc = bd\theta \quad (5.25)$$

onde o ângulo θ é dado em radianos.

No que se segue, considerar-se-á a Massa como concentrada no centro de gravidade da massa, que por sua vez, dista de $a+b$ do eixo de rotação no plano perpendicular ao pino guia, como mostra a **Figura 5.7 (b)**. Nestas condições, é possível escrever a seguinte expressão simplificada para o momento de inércia da massa em relação ao eixo de rotação, J_0 :

$$I_o = M(a + b)^2 \quad (5.26)$$

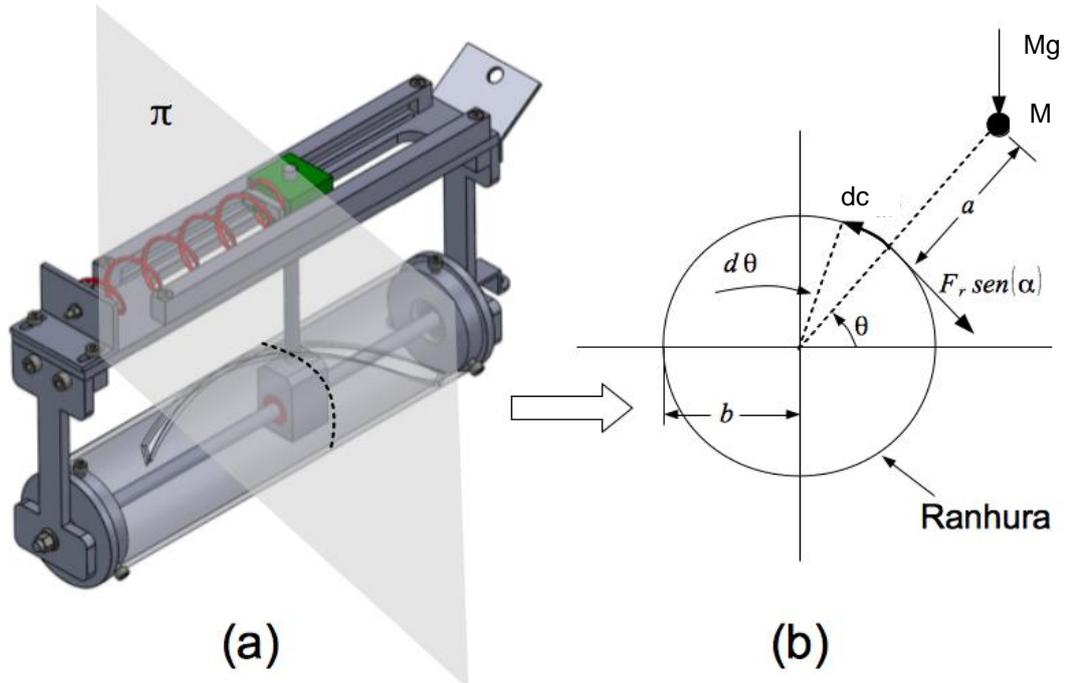


Figura 5.7 - Movimento angular da mola.

Da **Figura 5.7(b)**, pode-se extrair a seguinte equação de equilíbrio dinâmico:

$$F_R \sin(\alpha)b + Mg(a + b)\cos(\theta) = [M(a + b)^2] \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (5.27)$$

Ainda é necessário expressar a distância x em função do ângulo θ na Equação (5.27). Para isso, “desenrola-se” o helicóide ao longo do tubo vazado, transformando-a em um triângulo retângulo, segundo mostra a **Figura 5.8**. O conjunto mola-pino guia da máquina descreve um movimento ao longo de dois pontos intermediários do helicóide: x_i e x_f , cujos correspondentes no plano são também mostrados na figura, que também mostra que a altura h é igual à metade do passo da hélice, p_h :

$$h = \frac{p_h}{2} \quad (5.28)$$

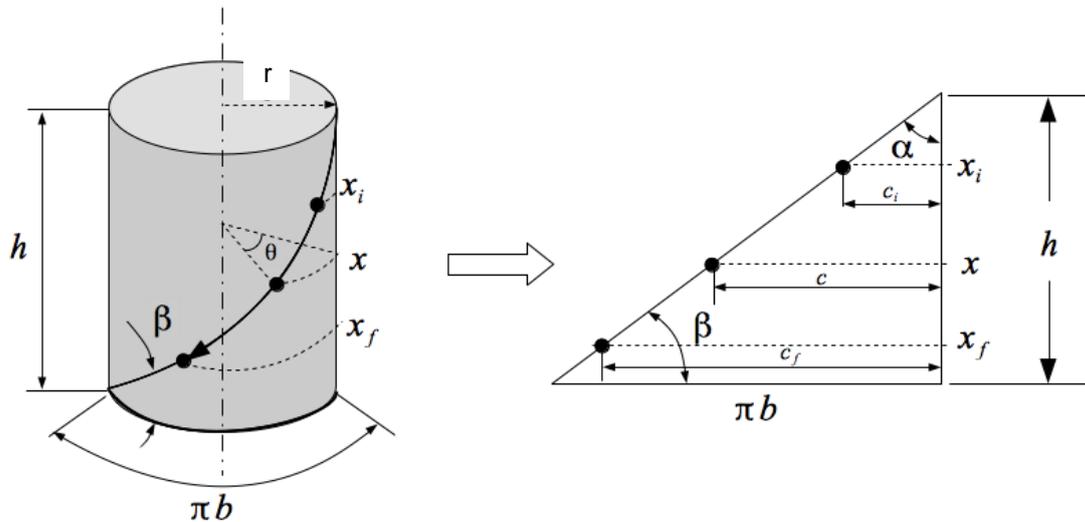


Figura 5.8 - Detalhes do helicóide.

Observa-se que na **Figura 5.8** o ângulo de inclinação α , é tomado em relação ao plano longitudinal. E o ângulo β , por sua vez, está em relação ao plano transversal do cilindro. Daí se infere que $\beta=90^\circ -\alpha$.

Ainda pode-se verificar nessa mesma **Figura 5.8** que o valor da metade da circunferência (cateto horizontal do triângulo) é igual a π vezes o raio $[(2\pi b)/2=\pi b]$. Neste caso, h é a altura do cilindro e, assim sendo, varia livremente, sem ter relação com o diâmetro.

Na **Figura 5.8**, observa-se ainda que cada distância, x , está associada com um arco, c , que, por sua vez, relaciona-se ao ângulo, θ , através da seguinte relação:

$$c = \theta b \quad (5.29)$$

Das relações simples no triângulo retângulo da **Figura 5.8**, obtém-se a seguinte equação para x :

$$x = \left(\frac{h}{\pi b}\right) c \therefore x = \left(\frac{h}{\pi}\right) \theta \quad (5.30)$$

A Equação 5.30 descreve a relação entre o deslocamento axial e angular da mola.

Observando-se a Equação (5.30) supõe-se que, quando o ângulo θ é zero, a distância da massa ao engaste é igual a zero também. Como isto em geral não acontece, é interessante reescrever a Equação (5.30) da seguinte maneira:

$$x = \left(\frac{h}{\pi}\right)\theta + x_{inicial}$$

Substituindo-se x , dado pela Equação (5.30), na Equação (5.27), obtém-se, finalmente, para o movimento angular da mola o seguinte:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \left[\frac{h \sin(\alpha) b k c_\mu}{\pi M(a+b)^2} \right] \theta - \frac{(kx_0 + T_m) \sin(\alpha) b c_\mu}{M(a+b)^2} \quad (5.31)$$

Onde a constante c_μ é uma relação entre o coeficiente de atrito estático (μ) e o cosseno e seno do ângulo de inclinação da hélice (α):

$$c_\mu = \cos(\alpha) - \mu \sin(\alpha) \quad (5.32)$$

5.3 Cálculo da Potência Média e Instantânea

A potência instantânea pode ser determinada conhecendo-se a velocidade ω e o torque resultante aplicado na mola-pino guia. Uma das maneiras de se obter o torque resultante é através da segunda lei de Newton, que diz que este é igual ao momento de inércia vezes a aceleração angular do conjunto. Assim, pode-se inferir que a potência instantânea é dada por:

$$P = [M(a+b)^2] \frac{d^2\theta}{dt^2} \times \omega \quad (5.33)$$

Substituindo-se o produto do momento de inércia vezes a aceleração angular pelo primeiro membro da Equação (5.27), tem-se:

$$P = [F_R \sin(\alpha) b + Mg(a+b) \cos(\theta)] \times \omega \quad (5.34)$$

Onde os valores de ω e θ podem ser obtidos ponto a ponto a partir da Equação (5.27). A Equação (5.27) pode ser escrita como um sistema de equações:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{F_R \sin(\alpha)b + Mg(a+b)\cos(\theta)}{MM(a+b)^2} \quad (5.35)$$

E a partir da solução numérica da Equação (5.35) acima determinar estes valores. Desta maneira, é interessante se reescrever a versão discreta para o i -ésimo valor das variáveis ω e θ da Equação (5.34) da seguinte maneira:

$$P_i = [F_R (i)\sin(\alpha)b + Mg(a+b)\cos(\theta_i)] \times \omega_i \quad (5.36)$$

Onde ω_i é o valor de ω no tempo t_i e assim por diante. A potência média pode ser, então, aproximada como:

$$\bar{P} = \frac{1}{\Delta t} \left\{ \sum_{t=t_i}^{t=t_N} [F_R (i)\sin(\alpha)b + Mg(a+b)\cos(\theta_i)] \times \omega_i \right\} \quad (5.37)$$

5.4 Cálculo do Rendimento Global

Pode-se determinar o rendimento global da máquina através da seguinte equação:

$$\eta = \frac{E}{Q} \quad (5.38)$$

Onde E é a Energia mecânica e Q o calor fornecido.

Para determinar E pode-se utilizar a equação da potência média:

$$\bar{P} = \frac{E}{t} \Rightarrow E = \bar{P} t \quad (5.39)$$

Onde o t é o tempo completo do movimento da mola.

5.5 Condições necessárias para o início do funcionamento

Observando-se a Equação (5.35), vê-se que, para que a estrutura contendo a massa inicie o movimento de rotação, em torno do eixo guia, é necessário que a sua aceleração seja maior que zero, ou seja:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{F_R \sin(\alpha)b + Mg(a+b)\cos(\theta)}{M(a+b)^2} > 0 \quad (5.40)$$

A Equação (5.40) implica em:

$$F_R \sin(\alpha)b + Mg(a+b)\cos(\theta) > 0 \quad \therefore$$

$$M > -\frac{F_R \sin(\alpha)b}{g(a+b)\cos(\theta)} \quad (5.41)$$

No início do movimento, sendo $\theta=0^\circ$ ou $\theta=180^\circ$, $\cos(\theta)=1$. Assim, tem-se que:

$$M > -\frac{F_R \sin(\alpha)b}{g(a+b)} \quad (5.42)$$

Substituindo-se a força F_R na Equação (5.42), temos, finalmente:

$$M > -\frac{[H\cos(\alpha) - F_a] \sin(\alpha)b}{g(a+b)} \quad (5.43)$$

Substituindo H e F_a na Equação acima tem-se:

$$M > -\frac{[\cos(\alpha) - \mu\sin(\alpha)] [k(x - x_0) - T_m] \sin(\alpha)b}{g(a+b)} \quad (5.44)$$

A Equação (5.44) determina a massa mínima para a máquina iniciar o movimento.

Para encontrar a solução das equações descritas neste capítulo utilizou-se o software SCILAB⁴. As equações de calor desenvolvidas anteriormente são equações diferenciais ordinárias de 1ª ordem e a solução é analítica. As equações da dinâmica resultaram numa equação linear de 2ª ordem. E para resolver o sistema da Equação (5.35) utilizou-se o método RUNGE-KUTTA.

As soluções das equações desenvolvidas neste capítulo fornecem o comportamento da mola como: temperatura da mola \times tempo, deslocamento da mola \times tempo, massa mínima para vencer o atrito e iniciar o movimento, potência média da máquina e o rendimento global da máquina. Estas soluções estão determinadas no Capítulo 6, deste estudo.

⁴ Disponível em: <http://www.scilab.org/>. Acesso em: 30 mar. 2011.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir estão apresentadas as soluções analíticas das equações do modelo térmico e mecânico referido no Capítulo 5 e discussões dos resultados.

6.1 Solução Analítica das Equações de Calor

Para determinar o comportamento térmico da mola quando mergulhada nos reservatórios, são utilizadas aquelas Equações de calor (5.5) para o aquecimento da mola e (5.6) para o resfriamento da mola. A solução destas equações está descrita abaixo.

Conforme a Equação (5.5) reescrita

$$mC_p \frac{dT}{dt} = hA(T_{fQ} - T)$$

tem-se:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{hAT_{fQ}}{mC_p} - \frac{hAT}{mC_p}$$

$$\frac{dT}{dt} + \left(\frac{hA}{mC_p} \right) T = \frac{hAT_{fQ}}{mC_p} \quad (6.1)$$

A Equação (6.1) acima é uma EDO de 1° ordem linear com solução em T . Onde $T=f(t)$. A equação é do tipo:

$$\frac{dT}{dt} + a'T = b' \quad (6.2)$$

onde:

$$a' = \frac{hA}{mC_p}$$

e

$$b' = \frac{hAT_f Q}{mC_p}$$

Para determinar a solução para a Equação (6.2) acima, primeiramente, encontra-se o fator integrante $\mu(t)$

$$\mu(t) = e^{\int a' dt}$$

Resolvendo a equação acima:

$$\mu(t) = e^{a't}$$

Multiplicando o fator integrante acima da Equação (6.2) obtém-se:

$$e^{a't} \frac{dT}{dt} + e^{a't} aT = e^{a't} b' \quad (6.3)$$

O lado esquerdo da Equação (6.3) é a derivada de um produto, então pode ser reescrita na forma:

$$\frac{d(e^{a't}T)}{dt} = e^{a't} b'$$

Integrando a Equação (6.3) acima, encontra-se:

$$\int \frac{d(e^{a't}T)}{dt} dt = b' \int e^{a't} dt$$

Para resolver a integral acima o procedimento é:

$$u = a't \therefore du = a' dt \therefore dt = \frac{du}{a'}$$

$$\int \frac{d(e^{a't}T)}{dt} dt = \frac{b'}{a'} \int e^u du$$

$$e^{a't}T(t) = \frac{b'}{a'}e^{a't} + k'$$

$$T(t) = \frac{b'}{a'} + k'e^{-a't} \quad (6.4)$$

As condições de contorno para a Equação (6.4) acima são para $t=0$ (s) $T=273$ (K), assim o valor de k será:

$$k' = 273 - \frac{b'}{a'} \quad (6.5)$$

Substituindo o valor de k' na Equação (6.4) tem-se:

$$T(t) = \frac{b'}{a'}(1 - e^{-a't}) + 273e^{-a't} \quad (6.6)$$

Substituindo os termos a' e b' na Equação (6.6) acima:

$$T(t) = T_{fQ} \left(1 - e^{-\left(\frac{hA}{mC_p}\right)t} \right) + 273e^{-\left(\frac{hA}{mC_p}\right)t} \quad (6.7)$$

A Equação (6.7) acima é a solução analítica da Equação (5.5) durante o aquecimento da mola. A partir da Equação (6.7) é determinado o tempo que a mola atinge a temperatura da fonte quente.

Para obter o gráfico da temperatura da mola em relação ao tempo foi utilizado o software livre SCILAB 5.3.3. A rotina para determinar o comportamento da mola na fonte quente está apresentada no **ANEXO B**. Os dados utilizados foram:

$$h = 1000 \text{ (W/(m}^2\text{K))}$$

$$A = 2,9283 \times 10^{-3} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$m = 0,01213 \text{ (kg)}$$

$$C_p = 200 \text{ (J/kg/K)}$$

$$T_{fQ} = 373 \text{ K}$$

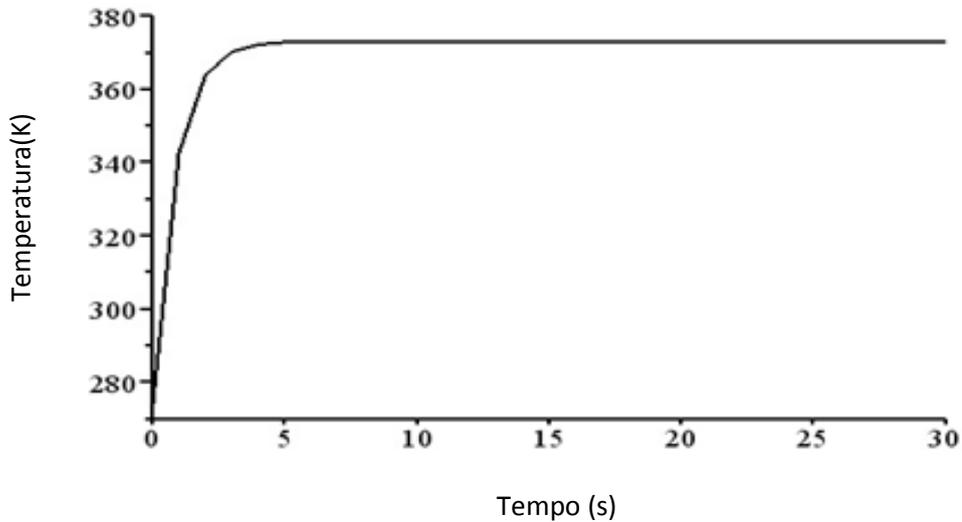


Figura 6.1 - Gráfico da temperatura (K) x tempo (s) durante aquecimento da mola.

Na **Figura 6.1** está representado o comportamento da mola durante o aquecimento, assim, pode-se observar o rápido aquecimento, quase imediato, quando a mola entra em contato com a fonte quente. Em menos de 5 segundos a mola atinge 373K que é a temperatura da fonte quente, destacando que a mola chega ao reservatório de água quente na temperatura de 273K.

Para determinar o comportamento da mola quando mergulhada na fonte fria, o desenvolvimento analítico é o mesmo empregado para o aquecimento da mola, já que, somente as condições iniciais mudam, pois é considerado que a mola chega na fonte fria com temperatura de 373K.

As condições de contorno para a Equação (6.8) são para $t=0(s)$ $T=373(K)$, o valor de k' será:

$$k' = 373 - \frac{b'}{a'} \quad (6.8)$$

Substituindo o valor de k' na Equação (6.4) encontra-se:

$$T(t) = \frac{b'}{a'}(1 - e^{-a't}) + 373e^{-a't} \quad (6.9)$$

Substituindo os termos a' e b' na Equação (6.9) acima:

sendo

$$a' = \frac{hA}{mC_p}$$

e

$$b' = \frac{hAT_{fF}}{mC_p}$$

tem-se então:

$$T(t) = T_{fF} \left(1 - e^{-\left(\frac{hA}{mC_p}\right)t} \right) + 373 e^{-\left(\frac{hA}{mC_p}\right)t} \quad (6.10)$$

A Equação (6.10) acima descreve a temperatura da mola enquanto estiver em contato com a fonte fria.

A rotina para determinar o comportamento da mola na fonte fria está apresentada no **ANEXO C**. Os dados utilizados foram:

$$h = 1000 \text{ (W/(m}^2\text{K))}$$

$$A = 2,9283 \times 10^{-3} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$m = 0,01213 \text{ (kg)}$$

$$C_p = 200 \text{ (J/kg/K)}$$

$$T_{fF} = 273 \text{ K}$$

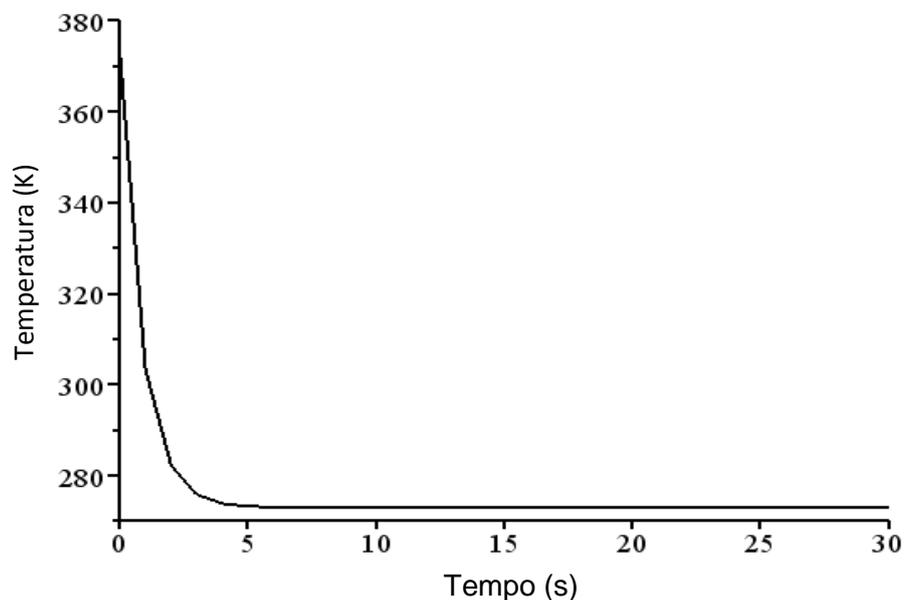


Figura 6.2 - Gráfico da temperatura (K) x tempo (s) durante resfriamento da mola.

Na **Figura 6.2** está representado o comportamento da mola durante o resfriamento. Pode-se observar o rápido resfriamento, quase imediato, quando a mola entra em contato com a fonte fria. Em menos de 5 segundos a mola atinge 273K que é a temperatura da fonte fria. A mola chega ao reservatório de água fria na temperatura de 373K.

A **Figura 6.3** apresenta o comportamento da temperatura da mola durante o aquecimento e resfriamento.

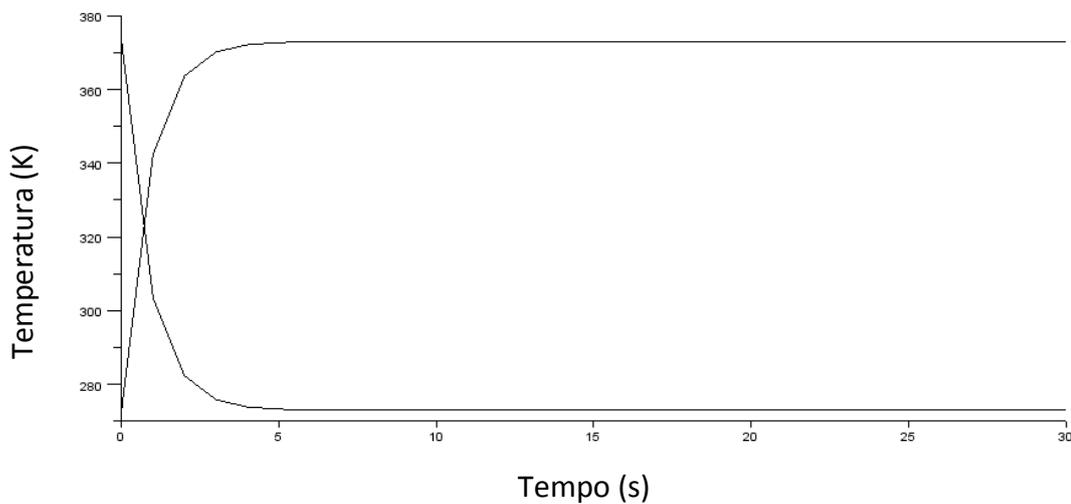


Figura 6.3 - Gráfico da temperatura da mola durante aquecimento e resfriamento.

Estes perfis de temperatura obtidos pelas soluções das equações de calor simulam o comportamento térmico da mola durante o ciclo de trabalho. Estes resultados são satisfatórios e condizem com a literatura. Dunstan (1986) demonstrou experimentalmente que os perfis de temperatura dos elementos feitos com Liga com memória de forma de uma máquina de calor sugere fortemente que a forma da curva não está associada com o comportamento da memória de forma, mas é determinada pelas características de transferência de calor do sistema. E ainda, foram utilizados em seu experimento dois fios de Ni-Ti de 0,75mm de diâmetro e 4cm de comprimento para realizar um movimento alternativo numa máquina de calor no tempo de 2 segundos.

6.2 Solução Analítica das Equações Dinâmicas do Sistema Mecânico

As Equações (5.20) e (5.31), respectivamente, desenvolvidas no Capítulo 5 que descrevem o movimento axial e o movimento angular da mola são equações diferenciais lineares para as quais se podem obter soluções analíticas. É importante reescrevê-las da maneira canônica como a seguir.

6.2.1 Movimentação axial

$$[k(x - x_0) - T_m][\cos^2(\alpha) - \mu \operatorname{sen}(\alpha) \cos(\alpha)] = M \frac{d^2x}{dt^2}$$

onde:

$$c_{x\mu} = \cos^2(\alpha) - \mu \cos(\alpha) \operatorname{sen}(\alpha)$$

Substituindo $c_{x\mu}$ na Equação (5.20) acima tem-se o seguinte desenvolvimento:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = T_m c_{x\mu} + k c_{x\mu} (x - x_0)$$

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = T_m c_{x\mu} + k c_{x\mu} x - k c_{x\mu} x_0$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \left(\frac{k c_{x\mu}}{M}\right) x + \left(\frac{k c_{x\mu} x_0 + T_m c_{x\mu}}{M}\right) = 0$$

Reescrevendo a equação acima na forma canônica, tem-se:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + a''x + b'' = 0 \quad (6.11)$$

onde:

$$a'' = -\frac{k c_{x\mu}}{M} \quad (6.12)$$

$$(6.13)$$

$$b'' = \left(\frac{kc_{x\mu}x_0 + T_m c_{x\mu}}{M} \right)$$

6.2.2 Movimentação angular

A partir da Equação 5.31 segue desenvolvimento para a forma canônica:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \left[\frac{h \sin(\alpha) b k c_{\mu}}{\pi M (a + b)^2} \right] \theta - \frac{(kx_0 + T_m) \sin(\alpha) b c_{\mu}}{M (a + b)^2}$$

Reescrevendo a equação acima na forma canônica, tem-se:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + c''\theta + d'' = 0 \quad (6.14)$$

onde

$$c'' = - \frac{h \sin(\alpha) b k c_{\mu}}{\pi M (a + b)^2} \quad (6.15)$$

e

$$d'' = \frac{(kx_0 + T_m) \sin(\alpha) b c_{\mu}}{M (a + b)^2} \quad (6.16)$$

Onde c_{μ} de conformidade é:

$$c_{\mu} = \cos(\alpha) - \mu \sin(\alpha)$$

A determinação das soluções das Equações (6.11 e 6.14) foi feita através do método transformada de Laplace.

Para a Equação (6.14):

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + c''\theta + d'' = 0$$

Nas condições iniciais pode-se ter:

$$\theta(0)=0 \text{ e } \theta'(0)=0$$

$$s^2 \mathcal{L}(\theta) - s\theta(0) - \theta'(0) + c'' \mathcal{L}(\theta) + \mathcal{L}(t) = 0$$

$$s^2 \mathcal{L}(\theta) + c'' \mathcal{L}(\theta) + \mathcal{L}(t) = 0$$

$$\mathcal{L}(\theta)(s^2 + c'') + \mathcal{L}(t) = 0$$

$$\mathcal{L}(\theta) = -\frac{\mathcal{L}(t)}{(s^2 + c'')}$$

$$\mathcal{L}(\theta) = -\frac{d''}{s(s^2 + c'')}$$

Resolvendo a equação acima por frações parciais:

$$-\frac{d''}{s(s^2 + c'')} = \frac{A}{s} + \frac{Bs}{(s^2 + c'')}$$

onde A e B são constantes:

$$-d'' = A(s^2 + c'') + Bs^2$$

$$A + B = 0 \rightarrow B = \frac{d''}{c''}$$

então

$$\mathcal{L}(\theta) = -\frac{d''/c''}{s} + \frac{\left(d''/c''\right)s}{(s^2 + c'')}$$

Aplicando a transformada inversa de Laplace na equação acima:

$$\mathcal{L}^{-1}[\mathcal{L}(\theta)] = \theta = -\frac{d''}{c''} \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{s}\right) + \frac{d''}{c''} \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{s}{(s^2 + c'')}\right) \quad (6.17)$$

Conforme tabela de transformadas de Laplace (OGATA, 1993) encontra-se:

f	$F(s) = \mathcal{L}(f)$
1	$\frac{1}{s}$
$\cos(\omega t)$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$

Neste estudo observa-se:

$$c'' = \omega^2$$

então:

$$\omega = \sqrt{c''} \quad (6.18)$$

Substituindo a Equação (6.18) na Equação (6.17) acima:

$$\theta = -\frac{d''}{c''} + \frac{d''}{c''} \cos(\omega t) \quad (6.19)$$

Assim, a Equação (6.19) pode ser reescrita na forma abaixo:

$$\theta(t) = \frac{d''}{c''} [\cos(\sqrt{c''} t) - 1] \quad (6.20)$$

Deste modo pode-se afirmar que a Equação (6.20) acima é a solução da Equação (6.14). De maneira análoga, para o movimento axial, a solução para a Equação (6.11) é:

$$x(t) = \frac{b''}{a''} [\cos(\sqrt{a''} t) - 1] \quad (6.21)$$

Para determinar os valores das Equações (6.20) e (6.21), ou seja, $\theta(t)$ e $x(t)$ foram inseridos os seguintes dados no programa SCILAB 5.3.3:

k – constante da mola; medida experimentalmente, $k=0,109\text{N/mm}$

α – ângulo de inclinação ($\alpha= 33^\circ=0,57\text{radianos}$)

M – massa da mola + pino; $M = 0,604\text{kg}$

T_m – tração no fio da carga de; $T_m = 7,33\text{N}$

x_0 – comprimento livre da mola; $x_0=73mm$

b – raio do cilindro de $r=31,75mm$

h – metade do passo da helicóide $h=75mm$

$(a+b)$ – distância da M até a origem O ; $(a+b)=116mm+31,75=147,75mm$

μ -coeficiente de atrito; 0.61

O gráfico foi obtido através do software SCILAB 5.3.3. A rotina usada está apresentada no **ANEXO D**.

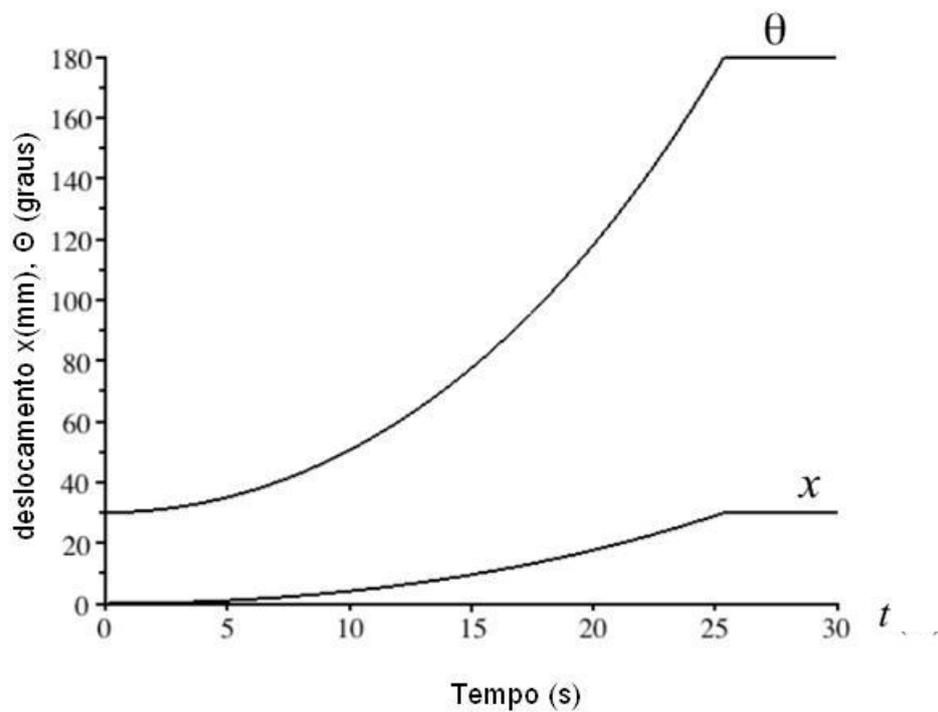


Figura 6.4 – Gráfico do deslocamento axial (x) e angular (θ).

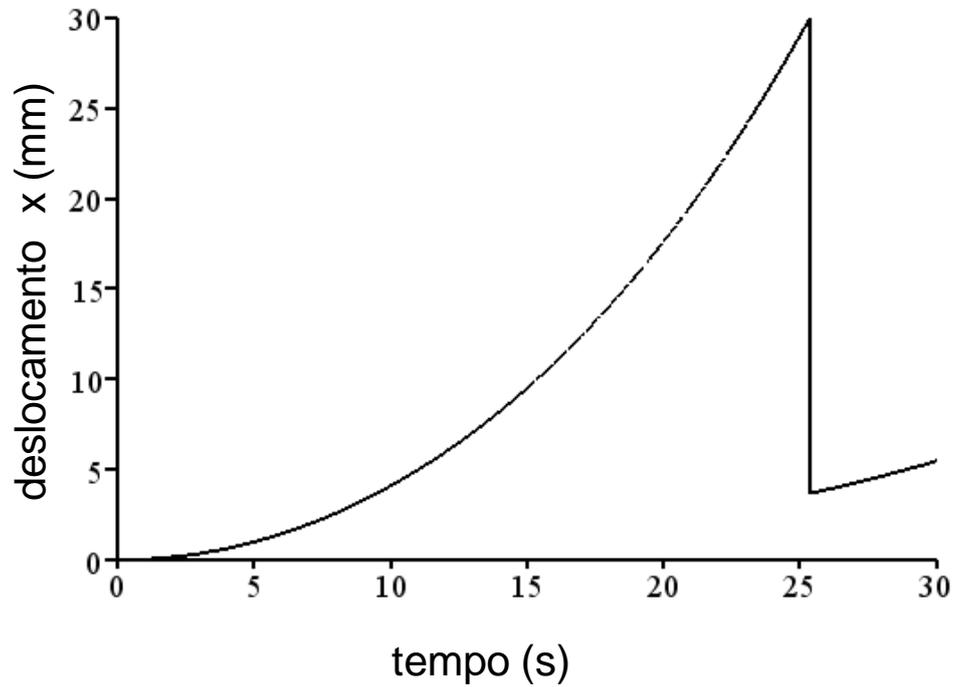


Figura 6.5 Gráfico do deslocamento axial da mola

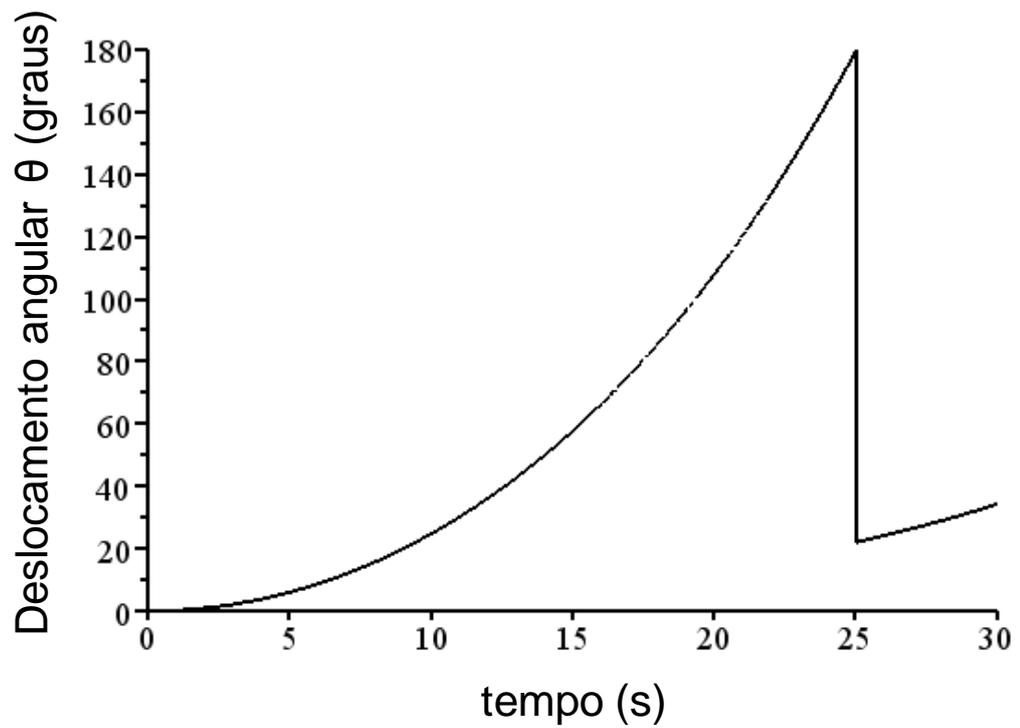


Figura 6.6 gráfico do deslocamento angular da mola.

Na **Figura 6.4** pode-se verificar o deslocamento axial e angular da mola. No movimento angular o programa plotou a solução da Equação (6.14) no intervalo entre $\theta=0$ e $\theta=\pi$. O programa simulou o movimento real da mola partindo da fonte quente para a fonte fria. No movimento axial observa-se que a mola se distende 30mm do seu comprimento inicial. O tempo percorrido para a mola se deslocar da fonte quente para a fonte fria é de 25s. Ainda pode-se verificar que a aceleração da mola é muito lenta para iniciar o movimento. E o gráfico apresenta uma coerência para realizar os dois movimentos.

Estes resultados estão de acordo com a simulação da máquina descrita no capítulo 4.

Zhu (2001) afirma através do seu modelo matemático, que a potência e a eficiência térmica aumentam com a diminuição do comprimento da mola feita com liga com memória de forma apenas no caso de baixa velocidade de rotação. E em alta velocidade de rotação, o resultado pode ser ao contrário. E de acordo com os resultados de sua simulação, a eficiência da máquina de calor estudada por ele chega a 2 a 3%.

6.3 Determinação da potência instantânea e média

Nas **Figuras 6.7, 6.8 e 6.9** abaixo estão apresentados os gráficos da potência instantânea e média respectivamente. Este gráfico é a solução das Equações (5.36) e (5.37). No **ANEXO E** está apresentada a rotina para obtenção dos gráficos abaixo.

Pode-se verificar na **Figura 6.7** a potência instantânea da máquina. Na **Figura 6.8** pode-se observar o gráfico da velocidade angular da máquina. E na **Figura 6.9** está apresentado o gráfico completo da potência instantânea.

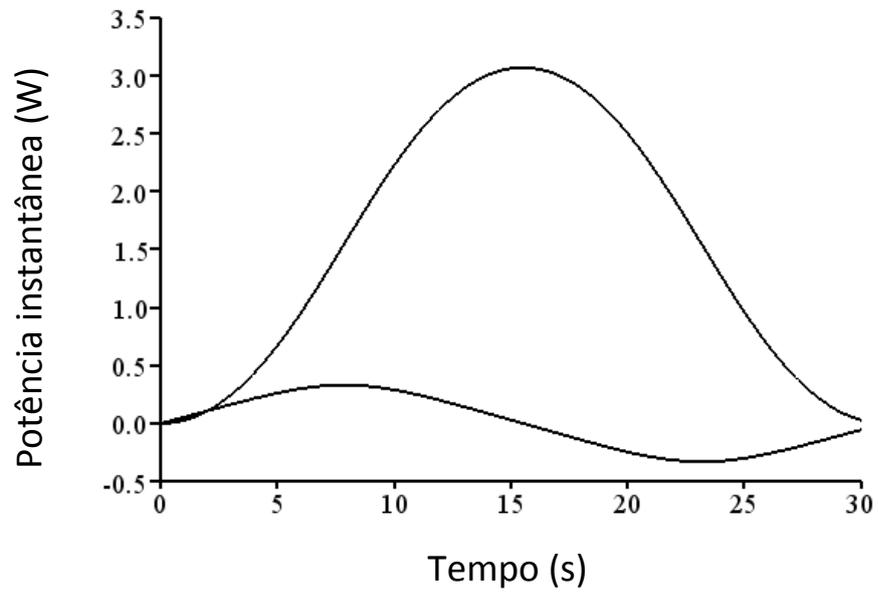


Figura 6.7 Gráfico da potência instantânea ampliado.

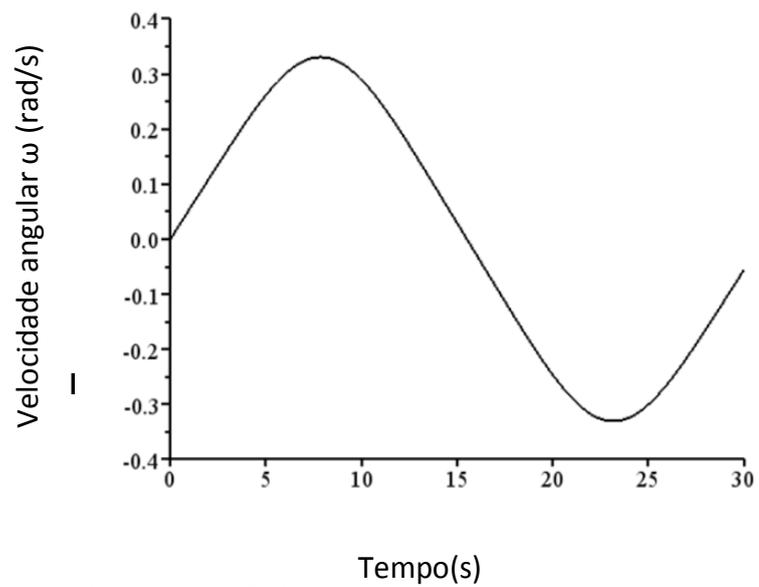


Figura 6.8 – Gráfico da velocidade angular.

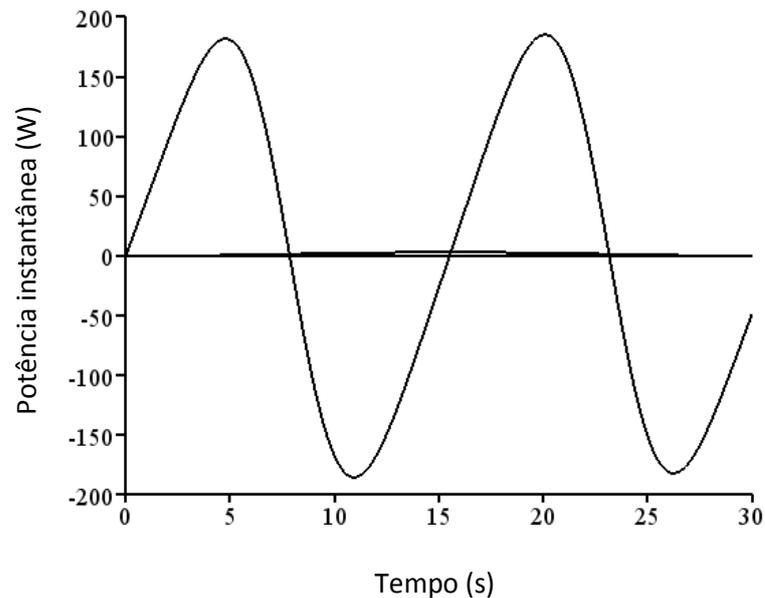


Figura 6.9 – Gráfico da Potência instantânea.

A potência média da máquina foi calculada a partir da Equação (5.37). O valor determinado foi de 0,5 W.

Os resultados apresentados nos gráficos acima estão satisfatórios com a realidade deste tipo de máquinas de calor. PG MC Cornick (1986) afirma que a potência de uma máquina de calor com Liga com memória de forma é em função da taxa de transferência de calor entre o elemento atuante e a temperatura dos reservatórios.

A máquina de Sato (2008) obteve uma potência máxima 187mW com a temperatura dos reservatórios 48°C e 89°C, respectivamente frio e quente. As dimensões da correia são 5mm de largura, 0,7mm de espessura e 2,3m de comprimento.

Em Schiller (2002), a sua máquina com manivelas obteve uma potência de 0,75W utilizando fios de Ni-Ti com 0,75mm de diâmetro.

IWANAGA, Hiroyuki (1988) desenvolveu uma máquina de calor de dupla manivela com memória de forma, com fios de Ti-Ni com diâmetro de 0,75mm e investigou a característica básica da potência desta máquina e fez as seguintes observações:

A potência da máquina aumenta enquanto o diâmetro da mola se torna maior. No caso de um fio com diâmetro maior, apenas parte do material próximo à superfície é acompanhado de uma transformação martensítica mais rápida que o centro do fio, isto resulta numa deformação não uniforme do material. Como um resultado, o efeito memória de forma do material diminui. Esta diminuição no efeito memória de forma em ciclos térmicos é um dos maiores problemas no funcionamento de uma máquina de calor.

6.4 Determinação da massa mínima

Conforme a Equação (5.44) o valor da massa mínima para iniciar o funcionamento da máquina:

$$M > 0,07 \text{Kg}$$

6.5 Determinação do rendimento global

O rendimento global foi determinado a partir da Equação (5.39). O valor obtido é de:

$\eta = 2,08 \times 10^{-3}$. Este valor está dentro da faixa deste tipo de máquinas de calor feitas com elementos de liga com memória de forma.

Pode-se fazer uma analogia com o rendimento da máquina de Carnot, que é o máximo que uma máquina térmica trabalhando entre dadas temperaturas da fonte quente e da fonte fria pode ter (mas o rendimento nunca chega a 100%). Desta forma, considerando uma máquina de Carnot trabalhando entre a fonte fria com temperatura de congelamento da água 0°C e a fonte quente com a temperatura de ebulição de 100°C , tem-se o rendimento desta máquina assim determinado:

$$\eta = T_2 - \frac{T_2}{T_1} \quad (6.22)$$

Onde T_1 é a temperatura da fonte quente e T_2 é a temperatura da fonte fria. Então substituindo as temperaturas T_1 e T_2 respectivamente por 373K e 273K temos como resultado da Equação (6.22) 0,27, ou seja, rendimento de 27%.

Salzbrenner (1984), obteve em sua pesquisa uma eficiência de 2% numa máquina de calor que utilizava fios de Ni-Ti de 1" de diâmetro como elemento motor. Estes fios sofreram uma transformação martensítica no resfriamento (sem aplicação de força) nas temperaturas de 19°C (M_s) e de 38°C (A_f).

PG Mc Cormick (1987), afirma que na determinação da eficiência numa máquina de calor com memória de forma é necessário levar em conta a histerese entre as temperaturas de transformações de avanço e retorno e a flexibilidade elástica finita do elemento motor com memória de forma em geral. Ele obteve uma eficiência de 1,95% na máquina de calor estudada por ele.

Ainda sobre a eficiência PG Mc Cormick (1986), avaliou o efeito de alguns fatores que influenciam do desempenho de uma máquina de calor com memória de forma. Tais fatores são: a temperatura dos reservatórios, a transferência de calor entre os elementos de trabalho e os reservatórios, a histerese, deformações elásticas do efeito memória de forma nos elementos de trabalho e atrito entre os componentes da máquina.

7 CONCLUSÕES

- O modelo da máquina desenvolvida só funciona para valores do coeficiente de atrito que satisfaçam a relação: $\tan^{-1}(\alpha) \geq \mu_s$;
- As forças dissipativas no movimento axial e no movimento angular da mola foram determinadas experimentalmente e encontrou-se 7,33N e 7N respectivamente;
- O ciclo da máquina desenvolvida completa-se num tempo (período) de 25s;
- O modelo térmico concebido apesar das considerações simplificadoras, embora não modele as transformações de fase (acopladas), mostrou-se confiável para uma previsão do comportamento da mola;
- Devido a inércia térmica o movimento da máquina (inércia mecânica) cresce durante o ciclo;
- Mesmo o estudo térmico e mecânico desacoplado, como feito na maioria dos modelos matemáticos desenvolvidos para simulação de movimentos, os resultados obtidos mostraram-se satisfatório;
- A simulação do movimento da mola feita num software comercial versão educacional descreve o movimento real da máquina.

8 TRABALHOS FUTUROS

- Estudar os efeitos convectivos sobre a mola, considerando-se o tempo que esta passa dentro dos reservatórios;
- Estudar o tempo de vida útil da mola considerando-se a possibilidade de fadiga por ciclagem térmica;
- Verificar a eficiência da máquina através do emprego de outros tamanhos de mola;
- Aplicar os parâmetros construtivos da máquina avaliando os efeitos sobre o movimento.
- Aplicar no modelo matemático atual controladores, que permitam uma robustez grande no sistema e que podem contornar eventuais erros de modelagem.

9 TRABALHOS APRESENTADOS

- LL Monteiro, ACdS Araújo, TL Rolim, YP Yadava, RAS Ferreira, Projeto de uma máquina térmica acionada por uma mola de NiTi com efeito memória de forma. **CIBEM 10**, Porto, Portugal, 2011, p. 3185-3191.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA, Lizia Oliveira. **Estudo de um mecanismo de retenção/liberação utilizando liga com efeito de memória de forma.** , 79p. [Dissertação de Mestrado] Departamento de Engenharia Aeronáutica e Mecânica. Instituto Tecnológico da Aeronáutica. São José dos Campos, 2000.

BALL, J. M. Mathematical models of martensitic microstructure. **Materials Science and Engineering A**, 378, p. 61–69, 2004.

BEKKER, A.; BRINSON, L. C. Phase diagram based description of the hysteresis behavior of shape memory alloys. **Acta Mater**. vol. 46, p. 3649-3665, 1998.

_____; _____; ISSEN, K. Localized and diffuse thermo induced phase transformation in 1-D shape memory alloys. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, vol 9, p. 355-365, 1998.

BRINSON, Catherine. One-Dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: Thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, vol. 4, p. 229-242, 1993.

BOYLE JR, John M. **Modeling of a shape memory alloy reciprocating engine.** Department of Mechanical and Aeronautical Engineering. Clarkson University. New York, 2001.

CAVA, Carlos Américo Panisset Lanhas La; SILVA, Eduardo Prieto; MACHADO, Luciano Guimarães; PACHECO, Pedro Manuel Calas Lopes; SAVI, Marcelo Amorim. Modelagem de um dispositivo de pré-carga com memória de forma para juntas flangeadas. **CONEM 2000 - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Natal, Brasil, 7-11 Agosto 2000.

CORTÉS, Jesús Alejandro Ríos. **Diseño de dispositivos para generar movimiento a partir del comportamiento termomecánico de los materiales con memoria de forma.** [Tese] Facultad del Estudios Superiores, Campus Aragón, San Juan de Aragón, Edo de México, 2009.

CUNHA FILHO, Pedro Linhares da. **Obtenção e caracterização microestrutural da liga Cu-14Al-4Ni**. 75f. [Dissertação] Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, agosto 2002.

CUNNINGHAM, B.; ASHBEE, K. H. G. Marmem engines. **Acta Metallurgica**, vol. 25, p. 1315-1321, 1997.

DELAEY, Luc; DERUYTTERE, Andre; AERNOUDT, Etienne; ROOS, Josef R. Shape memory effect superelasticity and damping in Cu-Zn-Al alloys. **INCRA**, n 238, p. 113, 1st February 1978.

DUNSTAN, P.S.;KENNON, N.F.;MIDDLETON, L.A.;DUNNE, D.P. Thermal characteristics of a nitinol heat engine. **Journal of Materials Science**. vol.21, no. 5, p. 1637-1641, 1986.

ELAHINIA, Mohammad H.; ASHRAFIUON, Hashem. Nonlinear control of a shape memory alloy actuated manipulator. ASME. **Journal of Vibration and Acoustics**, vol. 124, p. 566-575, 2002.

FALVO, A.; FURGIUELE, F.; MALETTA, C. Hysteresis modeling of two-way shape memory effect in Ni-Ti alloys. **Journal Meccanica**, 43:165-172, 2008.

FARIA, Vailton Alves de. **Análise numérica de frequência natural de materiais compósitos híbridos com memória de forma**. 133f. [Dissertação] Mestrado em Sistemas Mecatrônicos. Departamento de Engenharia Mecânica. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, julho 2007.

FERNANDES, Francisco Manuel Braz. **Ligas com memória de forma**. Universidade Nova de Lisboa. Departamento de Ciências de Materiais / CENIMAT, Lisboa, Portugal, abril 2003.

FRANK, F. C.; ASHBEE, K. H. G. The nitinol engine. **Energy Digest**, p. 22-24, 1976.

FRENZEL, Jan; ZHANG, Zhonghua; NEUKING, Klaus; EGGELER, Gunther. High quality vacuum induction melting of small quantities of NiTi shape memory alloys in graphite crucibles. **Materials Science and Engineering**, v. A368, p. 299-310, 2004.

FUMAGALLI, L.; BUTERA, F.; CODA, A. Smartflex.NiTi Wires for shape memory actuators. **Journal of Materials Engineering and Performance**, vol. 18(5-6) p. 691-695, 2009.

FUNAKUBO, Yoshi. **Shape memory alloy**. New York: Gordon & Bleach, 1987.

GILBERTSON, Roger G.; DE MIRANDA, Celene. **Working with shape memory wires**. California (USA): Mondo-Tronics Inc, 1992.

HOLDER, K.; SOLC, F.; VASINA, M. Shape memory alloy - unconventional actuators. *In: Proceedings of the International Conference on Industrial Technology - ICIT*, Maribor, Slovenia, p. 190-193, 2003.

HUANG, M.; BRINSON, L. C. A multivariant model for single crystal shape memory alloy behavior. **J. Mech. Phys. Solids**, vol. 46, No 8, p. 1379-1409, 1998.

IKUTA, Koji; TSUKAMOTO, Masahiro; HIROSE, Shigeo. Mathematical model and experimental verification of shape memory alloy for designing micro actuator. **Proceedings of the IEEE on Micro Electromechanical Systems, an Investigation of Microstructures, Sensors, Actuators, Machines, and Robots**. Albuquerque, New Mexico, USA, p. 103-108, Abril 1991

INCROPERA, Dewitt; BERGMAN, Lavine. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. cap. 1; 6. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

IWANAGA, Hiroyuki; TOBUSHI, Hisaaki; ITO, Hiromichi. Basic research on output power characteristics of a shape memory alloy heat engine. **JSME International Journal**, series I, vol. 31, p. 634-637, 1988.

IWATA, Uichi; SAKUMA, Toshio. Working characteristics of a reciprocating. Type heat engine using shape memory alloys. **JSME International Journal B**, 41, p. 344-350, 1998.

JOHNSON, Alfred Davis. Nitinol heat engines. *In: Intersociety Energy Conversion Engineering Conference – Conference Record*, p. 530-534, 1975.

KRISHNAN, Ranjani V.; DELAEY, Luc; WARLIMONT, Hans. TAS, Huseyin. Thermoelasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations, Part.1 Structural and microstructural changes. **Journal of Materials Science**, v. 9, p.1521-1535, 1974.

KUTLUCINAR, Iskender V.; SAUL, Andrew M. **Heat converter engine using a shape memory alloy actuator**. may 8, 2001. Disponível em: <<http://patents.com/us-6226992.html>> Acesso em: 12 abr. 2010.

LIANG, Chen; ROGERS, Craig A. One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, vol. 1, no. 2, p. 207-234, April 1990.

LOJEN, G.; ANZEL, I.; KENEISSEL, A.; KRIZMAN, A.; UNTERWEGER, E.; KOSEC, B.; BIZJAK, M. Microstructure of rapidly solidified Cu-Al-Ni shape memory alloy ribbons. **Journal of Materials Processing Technology**, vol.163, p. 220-229, 2005.

MACHADO, Luciano G. **Shape memory alloys for vibration isolation and damping**. 2007, 230p. [Tese de Doutorado], Texas A&M University, Texas (USA), 2007.

MCCORNICK, Paul G. Shape memory effect heat engine performance. **Applied Energy**, vol. 24, issue 3, 1986, p. 221.

_____. Effect of heat recovery on the performance of a shape-memory effect heat engine. **Applied Energy**, vol. 27, issue 4, 1987, p. 289-304.

MILLER, Richard K.; WALKER, Terri C. **Survey on shape memory alloys**, Madison, GA: Future Technology Surveys, 1989.

MIYAZAKI, Shuichi; OTSUKA, Kazuhiro. Development of shape memory alloys. **ISIJ International**, v. 29, n. 5, p. 353-377, 1989.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N. **Princípios de termodinâmica para engenheiros**. 6. ed. cap. 2-3. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

NASCIMENTO, Ricardo Luiz Espingardas. **Produção e caracterização de compósitos inteligentes**, 2009. 129f. [Dissertação de Mestrado] Faculdade de Tecnologia. Departamento de Ciência de Materiais. Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2009.

NISHIDA, Morinobu; WAYMAN, Clarence Marvin; HONMA, Toshihisa. Precipitation process in near equiatomic TiNi shape memory alloys. **Metallurgical Transaction**. A17, p. 1505-1515, 1986.

NISHIYAMA, Z. **Martensitic transformation**. In: MORRIS, E. Fine, MESHII, M., WAYMAN, C. M. (Ed.) Academic Press, 1978.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. São Paulo: Prentice-Hall do Brasil, 1993, p.71-76.

OLIVEIRA, Carlos Augusto do Nascimento. **Caracterização termoelástica de atuadores helicoidais da liga Cu-Zn-Al com memória de forma**, 2007. [Dissertação de Mestrado] Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). 2007.

OLSON, G. B.; COHEN, M. Theory of martensitic nucleation: a current assessment. **Proceeding International Conference on Solid-Solid Phase Transformations, The Metallurgical Society of AIME**, p. 1145-1163, 1982.

OTSUKA, Kazuhiro; WAYMAN, Clarence Marvin. **Shape memory materials**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1998, p. 1-131.

_____; REN, Xiaobing. Recent developments in the research of shape memory alloys. **Intermetallics 7**, Japan: Elsevier Science Ltd, 1999, p. 511-528.

OTUBO, Jorge; MEI, Paulo Roberto; KOSHIMIZU, Sadamu; MARTINEZ, Luis Gallego. **Produção e caracterização de lingote da liga Ni-Ti com efeito de memória de forma**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.

PÉREZ, Jacinto Cortéz; CERÓN, Hugo Becerril; RODRIGUÉZ, Gabriel A. Lara; ZÚÑIGA, Horacio Flores. Diseño de um termo – actuador baseado em alambres con memoria de forma. **Ingenierías**, vol. VI, n. 18, Enero-Marzo 2003, p. 37-43.

PERKINS, Jeff; HODGSON, Darel. The two-way memory effect. **Engineering aspects of shape memory alloys**. 1990, p. 195-206.

PINA, Euclides Apolinário Cabral de. **Estudo da estabilização martensítica na liga Cu-Al-Mn com memória de forma**. 2006. [Dissertação de Mestrado] Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). 2006.

RANIECKI, B.; LEXCELLENT, C.; TANAKA, K. Thermodynamic models of pseudoelastic behavior of shape memory alloys. **Arch. Mech.** 44, 1992, 261-284.

RAO, Shankar G.; REDDY, Reshava E. **Mathematical methods**. New Delhi (India): I.K. International Publishing Pvr Ltd., 2009, 606p.

ROCHA, Téo Lenquist da. **Modelagem de estruturas inteligentes**. 2004. 138f. [Dissertação de Mestrado] Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista (UNESP). 2004.

ROMANO, Roberto; TANNURI, Eduardo Aoun. Modeling, control and experimental validation of a novel actuator based on shape memory alloys. **Mechatronics the Science of Intelligent Machines**, v. 19, n. 7, Oct. 2009.

SALZBRENNER, R. Shape memory heat engines. **Journal of Materials Science**, vol. 19, n. 6, June 1984, p. 1827-1835.

SANTOS, Cláudia Nazaré dos. **Aspectos cristalográficos da transformação martensítica de uma liga Fe-27%Ni**. 2008.120f. [Tese] Doutorado em Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2008.

SATO, Yoshihisa; YOSHIDA, Naotsugu; TANABE, Yukinori; FUJITA, Hideki; OOIWA, Norio. Characteristics of a new power generation system with application of a shape memory alloy engine. **Electrical Engineering in Japan**, 165:8-15, 2008.

SCHETKY, Laurence McDonald. Shape-memory alloys as multifunctional materials. Chapter 13. *In*: SHAHINPOOR, Mohsen & SCHNEIDER, Hans-Jorg. **Intelligent materials**. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2007, p. 317-338.

SCHILLER, Ean H. **Heat engine driven by shape memory alloys: prototyping and design**. 2002. 80p. [Thesis] Master of Science in Mechanical Engineering. Faculty of the Virginia. Polytechnic Institute and State University, VA, USA. 19 Sept. 2002.

SHAHINPOOR, Mohsen; SCHNEIDER, Hans-Jorg. **Intelligent materials**. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2008.

SHAW, John A.; KYRIAKIDES, Stelios. Thermomechanical aspects of Ni-Ti. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 43 (8), p. 1243-1281, 1995.

SERWAY, R. A. **Física**. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1992.

SOFTWARE SCILAB 5.3.3. Disponível em:
<<http://www.scilab.org>> Acesso em: 30 Mar. 2011.

SOUZA, Marco Motta de. **Caracterização de uma liga com efeito de memória de forma**. 2005. 113f. [Tese de Doutorado] Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2005.

SOUZA, Ricardo Estefany Aquino de. **Corrosão de liga com memória de forma de Cu-Al-Ni em fluido produzido de campo terrestre de petróleo**. 2007. 146f. [Dissertação de Mestrado] Pós-Graduação em Engenharia de Processos. Universidade Tiradentes. Aracaju, 2007.

STOECKEL, Dieter. Thermal actuation with shape memory alloys. **NDC**. Nitinol Devices & Components, Inc. California (USA), 1989.

_____. The shape memory effect: phenomenon, alloys, applications. **NDC**. Nitinol Devices & Components, Inc., California (USA), 2000.

TANAKA, H., KOHDA, M. and OKUDA, T. A study of the high-power Nitinol heat engine. *In: Proceedings* of the 20th Intersociety Energy Conversion, vol. 2, p. 2729-2734, 1985.

TANAKA, Yoshifumi; YAMADA, Akio. A rotary actuator using shape memory alloy for a robot. Analysis of the response with load. *In: Proceedings* of the IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems. IROS'91, Osaka, Japan, p. 1163-1168, 1991.

TANAKA, Makoto. Shape memory alloy engine. *In: Proceedings* of the 27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. IECEC'92, San Diego, CA, p. 3.87-3.91, Aug. 3-7, 1992.

TOBUSHI, H.; CAHOON, J. R. Mechanical analysis of a solar-powered solid state engine. **Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering**, vol. 9, n. 3, p. 137-141, 1985.

_____, H.; KIMURA, K.; IWANAGA, H.; CAHOON, J. R. Basic research on shape memory alloy heat engine (output power characteristics and problems in development). **JSME International Journal Series**, series 1, vol. 33, n. 2, p. 263-267, 1990.

VERHOEVEN, J. D. Fundamentals of physical metallurgy. Canada: John Wiley & Sons, Inc, 1975.

ZHU, Jiujiang; LIANG, Nei-gang; LIEW, Khai M.; HUANG, Wei M. Energy conversion in shape memory alloy heat engine Part II: Simulation. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, vol. 12, p. 133-140, February 2001.

WAKJIRA, Jilcha Fekadu. **The VT1 shape memory alloy heat engine design**. 2001. 107 p. [Thesis] Master of Science in Mechanical Engineering. Faculty of the Virginia. Polytechnic Institute and State University, VA, USA, 2001.

ANEXO A

DESENHOS DE FABRICAÇÃO DA MÁQUINA DE CALOR

Nº do Item	Nome da peça	QDT.	PÁG.
1	Tubo	1	3
2	Eixo	1	3
3	Suporte rol. linear	1	4
4	Caixa rolamento	2	3
5	Espaçador	2	4
6	Barra lateral	2	5
7	Guia cabo 1	1	5
8	Guia cabo 2	1	5
9	Barra fixação	2	6
10	Barra superior	1	7
11	Haste	1	4
12	Guia rolamento	2	8
13	Carro deslizante	1	6
14	Rolamento 15 RBB 276	4	
15	Eixo rolamento	4	6
16	Trava mola	2	8
17	Suporte mola	1	8
18	Paraf. allen M4 x 20	2	
19	Paraf. allen M4 x 16	2	
20	Paraf. allen M4 x 25	2	
21	Paraf. allen M4 x 20	2	
22	Porca M5	2	
23	Paraf. allen M4 x 12	6	
24	Rolamento ISO 15 RBB 026	2	
25	Rolamento Linear 8x16x22	1	
26	Arruela lisa M5	2	
27	Paraf. allen M3 x 16 + arruela + porca	1	
28	Paraf. allen M3 x 12	1	
29	Mola (liga m. forma)	1	

	Nome	Assinatura	Data	Projeto:
Desenho	Alex Moura		17/07/11	Ligas com memória de forma
Verificado				
Aprovado				
				Título:
				Máquina de calor
				No. Desenho: AEM 003
				Obs:
				Escala: 1:3
				Rev:
				Folha: 02/08

Universidade Federal de Pernambuco
 Centro de Tecnologia e Geociências
 Departamento de Engenharia Mecânica

Nº Item: 3;
Peça: Suporte r. linear;
Material: Alumínio ou aço ABNT 1020.

Nº Item: 5;
Peça: Espaçador;
Material: Alumínio ou aço ABNT 1020;
Escala: 2:1.

Nº Item: 11;
Peça: Haste;
Material: aço ABNT 1020.

	Nome	Assinatura	Data	Projeto:
Desenho	Alex Moura		17/07/11	Ligas com memória de forma
Verificado				
Aprovado				
				Título:
				Máquina de calor
				No. Desenho: AEM 003
				Obs:
				Escala: 1:3
				Rev:
				Folha: 04/08

Universidade Federal de Pernambuco
 Centro de Tecnologia e Geociências
 Departamento de Engenharia Mecânica

Nº Item: 6;
Peça: Barra lateral;
Material: Alumínio.

Nº Item: 7;
Peça: Guia cabo 1;
Material: Alumínio;
Escala: 1:1.

Nº Item: 8;
Peça: Guia cabo 2;
Material: Alumínio.

EXIBIR A ESCALA 1 : 2

Obs: todos os filetes da peça tem raio de 5 mm. O objetivo desses filetes são apenas de quebrar os cantos vivos. Então não há preocupação com sua dimensão.

Nome	Assinatura	Data	Projeto:
Desenho	Alex Moura	17/07/11	Ligas com memória de forma
Verificado			Título:
Aprovado			Máquina de calor
Universidade Federal de Pernambuco Centro de Tecnologia e Geociências Departamento de Engenharia Mecânica			No. Desenho: AEM 003
			Obs:
			Escala: 1:2 Rev: Folha: 05/08

Nº Item: 9;
Peça: Barra fixação;
Material: Alumínio.

Nº Item: 13;
Peça: Carro deslizante;
Material: Aço ABNT 1020.

Nº Item: 15;
Peça: Eixo rolamento;
Material: Aço ABNT 1020;
Escala: 2:1.

Nome	Assinatura	Data	Projeto:
Desenho	Alex Moura	17/07/11	Ligas com memória de forma
Verificado			Título:
Aprovado			Máquina de calor
Universidade Federal de Pernambuco Centro de Tecnologia e Geociências Departamento de Engenharia Mecânica			No. Desenho: AEM 003
			Obs:
			Escala: 1:1 Rev: Folha: 06/08

Nº Item: 10;
Peça: Barra superior;
Material: Alumínio.

DETALHE G ESCALA 10 : 1

SEÇÃO B-B ESCALA 1 : 1

Obs: O detalhe G demonstra o rebixo para encaixe do rolamento.

Nome	Assinatura	Data	Projeto:
Desenho	Alex Moura	17/07/11	Ligas com memória de forma
Verificado			Título:
Aprovado			Máquina de calor
Universidade Federal de Pernambuco Centro de Tecnologia e Geociências Departamento de Engenharia Mecânica			No. Desenho: AEM 003
			Obs:
			Escala: 1:2 Rev: Folha: 07/08

ANEXO B

ROTINA UTILIZADA NO SOFTWARE SCILAB- 5.3.3

// Retorna a temperatura da mola

```
function y=Tm(h, A, m, cp, Tf, t)
    a = (h*A)/(m*cp)
    b = (h*A*Tf)/(m*cp)
    y = Tf*(1-exp(-(h*A*t)/(m*cp)))+273*exp(-(h*A*t)/(m*cp))
endfunction
```

// Plotando o grafico

```
t = 0:1:30
st = size (t)
h = 1000
A = 2.9283e-3
m = 0.01233
Tf = 373
cp = 200

for i=1:st(2)
    Tempmola(i) = Tm(h,A,m,cp,Tf,t(i))
end

plot2d(t,Tempmola)
```

ANEXO C

ROTINA UTILIZADA NO SOFTWARE SCILAB- 5.3.3

```
// Retorna a temperatura da mola

function y=Tm(h, A, m, cp, Tf, t)
    a = (h*A)/(m*cp)
    b = (h*A*Tf)/(m*cp)
    y = Tf*(1-exp(-(h*A*t)/(m*cp)))+373*exp(-(h*A*t)/(m*cp))
endfunction

// Plotando o grafico

t = 0:1:30
st = size (t)
h = 1000
A = 2.9283e-3
m = 0.01233
Tf = 273
cp = 200

for i=1:st(2)
    Tempmola(i) = Tm(h,A,m,cp,Tf,t(i))
end

plot2d(t,Tempmola)
```

ANEXO D

ROTINA UTILIZADA NO SOFTWARE SCILAB- 5.3.3

// deslocamentos da mola

```
Data = struct ('b', 31.75,'h', 150,'a', 131,'k',0.109,'alpha', 0.57,'m',0.604,...
             'T', 7.33, 'mi', 0.61, 'xini', 30,'x0q',-50,'x0f', 73)
```

function **y=dm(Data, t, x0)**

```
    k = Data.k; alpha = Data.alpha; mi = Data.mi; a = Data.a ; b = Data.b
    m = Data.m ; T = Data.T; h = Data.h ; pi=3.14;
```

```
    //-----
```

```
    cmi= cos(alpha)-mi*sin(alpha)
```

```
    c= -(k*cmi*sin(alpha)*b*(h/pi))/(m*(a+b)^2)
```

```
    d= (T*cmi*sin(alpha)*b+k*cmi*sin(alpha)*b*x0)/(m*(a+b)^2)
```

```
    y=(d/c)*(cos(sqrt(c)*t)-1)
```

endfunction

```
//-----
```

```
t=0:0.01:30;
```

```
st=size(t);
```

```
x0 = Data.x0f
```

```
for i=1:st(2)
```

```
    deslocamola(i)= - dm(Data,t(i),x0)
```

```
    if abs(deslocamola(i))>3.14 then
```

```
        deslocamola(i)= 3.14
```

```
        x0 = Data.x0q
```

```
    end
```

```
    deslocx (i) = deslocamola(i)*Data.h/3.14 + Data.xini
```

```
//-----
```

end

```
xset('thickness',2);
```

```
xset('font', 2, 4);
```

```
xset('line style',1)
```

```
plot2d(t,deslocamola*9.55)
```

```
plot2d(t,deslocx)
```

ANEXO E

ROTINA UTILIZADA NO SOFTWARE SCILAB- 5.3.3

```

// Vector function Fun(Y,t)
// Y = vetor
// t = tempo
function y=Fun(Y, t)
    // Constantes.....
    k = Data.k; pi = 3.1416; x0 = Data.xini; T = Data.T; h =Data.h; m = Data.m
    mi = Data.mi; alpha = Data.alpha; a = Data.a; b = Data.b; g = 9.8
    // Vector obtained variables.....
    teta = Y(1), w = Y(2)
    // funções auxiliares.....
    H = k*( (h/pi)*teta - x0 ) - T
    Fa = mi*H*sin(alpha)
    Fr = H*cos(alpha) - Fa
    //.....
    y(1) = w
    y(2) = (Fr*sin(alpha)*b + m*g*(a+b)*cos(teta)) / (m*(a+b)^2)
endfunction
//-----
// Calculo da potencia instantanea
//-----
function y=pow(Y)
    teta = Y(1); w = Y(2); g = 9.800
    k = Data.k; pi = 3.1416; x0 = Data.xini; T = Data.T; h =Data.h; m = Data.m
    mi = Data.mi; alpha = Data.alpha; a = Data.a; b = Data.b; g = 9.8
    //.....
    H = k*( (h/pi)*teta - x0 ) - T
    Fa = mi*H*sin(alpha)
    Fr = H*cos(alpha) - Fa
    y = (Fr*sin(alpha)*b +m*g*(a+b)*cos(teta))*w

endfunction
//-----
Data = struct ('b', 31.75,'h', 150,'a', 131,'k',0.109,'alpha', 0.57,'m',0.604,...
              'T', 7.33, 'mi', 0.61, 'xini', 30,'x0q',-50,'x0f', 73)

//-----

Tmax = 30// Time interval (s)
Tmin = 0// Starting time (s)
Dt = 0.1// Time step (s)
Y = [0;0] // Boundary conditions [teta zero, omega zero]
time =Tmin:Dt:Tmax
st=size(time)

```

ANEXO E

ROTINA UTILIZADA NO SOFTWARE SCILAB- 5.3.3

```

Pav = 0 // potencia media

for i=1:st(2)
  // Output vectors
  Tet(i) = Y(1); Om(i) = Y(2); P(i) = pow(Y)
  Pav = Pav + P(i)

  K1 = Fun(Y,time(i))
  K2 = Fun(Y+Dt*K1*0.5, time(i)+0.5*Dt)
  K3 = Fun(Y+Dt*K2*0.5, time(i)+0.5*Dt)
  K4 = Fun(Y+Dt*K3,time(i)+Dt)
  Y = Y + (Dt/6)*(K1 + 2*K2 + 2*K3 + K4)
  if Tet(i)>3.14 then
    break
  end
end

Pav = Pav/st(2) // calculo da potencia media

//-----
// Section 4: Plotting the results
//-----
// Output formatting
xset('thickness',2);
xset('font', 2, 4);
xset('line style',1)
plot2d(time, Tet) // Angulo
plot2d(time, Om) // Velocidade angular (rad/s)
//plot2d(time, Tet*Data.h/3.14 )// Posição da mola (x)
plot2d(time, P )// Potencia instantanea

// -----END-----

```