



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

**CARACTERIZAÇÃO DE UMA FITA DE $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ COM EFEITO DE MEMÓRIA DE
FORMA PARA APLICAÇÃO EM UMA MICROVÁLVULA**

RONIERE LEITE SOARES

Campina Grande – Estado da Paraíba

Março/2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CCT
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

CARACTERIZAÇÃO DE UMA FITA DE $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ COM *EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA* PARA APLICAÇÃO EM UMA MICROVÁLVULA

Roniere Leite Soares

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS.

Orientador: Dr. Walman Benício de Castro

Co-orientador: Dr. Benedito Antonio Luciano

Campina Grande - PB

Março de 2013



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

S676c

Soares, Roniere Leite.

Caracterização de uma fita de $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ com efeito de memória de forma para aplicação em uma microválvula / Roniere Leite Soares. – Campina Grande, 2013.

79 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2013.

"Orientação: Prof. Dr. Walman Benício de Castro, Prof. Dr. Benedito Antonio Luciano".

Referências.

1. Fluido. 2. Microválvula. 3. Efeito de Memória de Forma - EMF. 4. Microssistema. 5. Ti-Ni-Cu. I. Castro, Walman Benício de. II. Luciano, Benedito Antonio. III. Título.

CDU 62-3(043)

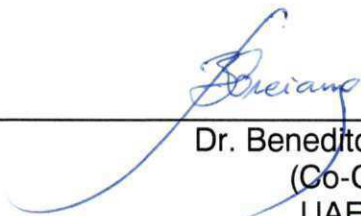
**CARACTERIZAÇÃO DE UMA FITA DE $Ti_{50}Ni_{43}Cu_7$ COM EFEITO DE MEMÓRIA
DE FORMA PARA APLICAÇÃO EM UMA MICROVÁLVULA.**

Roniere Leite Soares

Dissertação Aprovada em 21/03/2013 pela banca examinadora constituída dos seguintes membros:



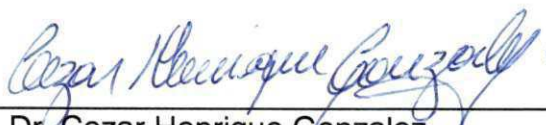
Dr. Walman Benício de Castro
(Orientador)
UAEM/UFCG



Dr. Benedito Antonio Luciano
(Co-Orientador)
UAEE/UFCG



Dr. Carlos José de Araújo
(Examinador Interno)
UAEM/UFCG



Dr. Cezar Henrique Gonzalez
(Examinador Externo)
DEMEC/UFPE

DEDICATÓRIA

Ao Deus Todo-Poderoso, por tudo que nos tem permitido sonhar e realizar;

Ao Bom Jesus dos Martírios - Padroeiro da Cidade de Boa Vista-PB;

Aos meus pais Ronaldo Vitorino e Zefinha Leite;

À minha esposa Rossana Gouveia;

Aos meus filhos Rivonaldo e Rilan Lacerda;

Aos meus irmãos Renato e Raiff Soares;

Às minhas cunhadas Renata Coelho e Kally Almeida;

Aos meus tios Ivanaldo Ouriques e Maria do Carmo Soares;

Aos meus coirmãos Fabrício e Fabíola Vasconcelos;

Aos meus sobrinhos: Râmida, Raven, Ravy e Rai.

CURRICULUM VITÆ

- Bacharel em Desenho Industrial pela UFPB, *campus II*, Campina Grande-PB (1991-1995) – habilitação em Design de Produto;
- Licenciado em Letras Vernáculas pela UEPB (1997-2003) – habilitação plena em Língua Portuguesa;
- Professor Substituto das disciplinas de Desenho no Departamento de Engenharia Mecânica, UFPB - *campus II* - Campina Grande-PB (2001-2002);
- Aprovado em 3º lugar no concurso de provas e títulos para Professor Auxiliar do Departamento de Artes Visuais do CCHLA, UFPB, João Pessoa-PB - 2004;
- Mestre em Ciências da Sociedade pela UEPB (2003-2005) – área temática: Educação, Linguagem e Diversidade Cultural;
- Professor Efetivo na Área de Expressão Gráfica, da Unidade Acadêmica de Engenharia de Produção, UFCG (desde Abril/2012).

AGRADECIMENTOS

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais;

Ao professor Dr. Walman Benício de Castro, por vislumbrar neste projeto a possibilidade de união das engenharias com a área de desenho industrial;

Ao engenheiro Msc. George Anselmo, pelo apoio nos experimentos realizados no LaMMEA – Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas;

Ao professor Dr. Carlos José de Araújo (da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica), pelas contribuições teórico-práticas promovidas no desenvolvimento e execução deste projeto;

Ao professor Dr. Benedito Antonio Luciano (da Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica-UFCG), pela orientação acerca das propriedades elétricas inerentes à função da fita no projeto do microssistema;

Às professoras e primas Dra. Tatianny Soares Alves (UFPI) e Dra. Itamara Farias Leite (UFPB), por acreditar no meu potencial, incentivando-me a perseverar na área da Engenharia de Materiais;

Ao professor associado Dr. José Jefferson da Silva Nascimento (UFCG-UAEMa) e ao professor Dr. Antonio Tavernard Pereira Neto (UFCG-UAEQ), pelo apoio nas discussões dos processos de simulação computacional;

Ao professor adjunto Johannes Cornelis Johanna Maria Derks (Unidade Acadêmica de Engenharia de Produção, UFCG), pela disponibilidade de orientação na prototipagem da *microválvula* no ambiente Inventor, usada para apresentação.

EPÍGRAFE

Êxodo 31 (versículos 1-5)

¹Depois falou o SENHOR a Moisés, dizendo:

²Eis que eu tenho chamado por nome a Bezalel, o filho de Uri, filho de Hur, da tribo de Judá,

³E o enchi do Espírito de Deus, de sabedoria, e de entendimento, e de ciência, em todo o labor,

⁴Para elaborar projetos, e trabalhar em ouro, em prata e em cobre,

⁵E em lapidar pedras para engastar, e em entalhes de madeira, para trabalhar em todo o esforço intelectual.

CARACTERIZAÇÃO DE UMA FITA DE $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ COM EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA PARA APLICAÇÃO EM UMA MICROVÁLVULA

RESUMO

Nesta dissertação é apresentada a caracterização da liga $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ com *efeito de memória de forma* a ser empregada numa microválvula destinada ao controle fluídico mediante o Efeito Joule. Neste intuito, buscou-se obter inicialmente uma porção fundida de massa com proporções controladas de 45%Ti48%Ni7%Cu em peso, transformada em fitas solidificadas rapidamente pelo processo *melt spinning* a uma velocidade de 38 m/s. As fitas obtidas foram submetidas ao processo térmico de relaxação com o objetivo de promover a eliminação dos defeitos internos. Em seguida, a obtenção das temperaturas de transformação de fase e o registro das energias de entalpia das fitas foram feitos experimentalmente mediante Calorimetria Exploratória Diferencial. Adicionalmente, o teste DMA (Dynamic Mechanical Analysis) foi feito para registrar o crescimento percentual do módulo de elasticidade da fita submetida a temperaturas variadas. A submissão da fita a um banho térmico possibilitou traçar o gráfico Resistência Elétrica *versus* Temperatura nos padrões desejados e, assim, chegou-se à escolha da fita a ser empregada na microválvula teorizada por *Bellouard*. Para demonstrar experimentalmente que esta fita seria capaz de funcionar normalmente no produto para o qual foi teoricamente sugerida, traçou-se o gráfico experimental de Resistividade Elétrica. O projeto tridimensional da microválvula, a geometria 3D interna e, a partir desta última, uma simulação computacional à base de estrutura estática com a ferramenta CFX do ANSYS® Workbench V14 foram realizados e apresentados, possibilitando a visualização do deslocamento do fluido newtoniano no interior da microválvula.

Palavras-chave: EMF, fluido, microsistema, microválvula, Ti-Ni-Cu.

CHARACTERIZATION OF A $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ RIBBON WITH *SHAPE MEMORY EFFECT* FOR APPLICATION IN A MICROVALVE

ABSTRACT

In this work is presented the characterization of $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ alloy with *shape memory effect* to be used in a microvalve to fluid control by Joule effect. To this purpose, it was obtained a portion fused mass with controlled rates of 45%Ti48%Ni7%Cu weight was transformed into ribbons by melt spinning process at a speed of 38 m/s. The ribbons obtained were subjected to thermal relaxation process in order to promote the elimination of internal defects. Then, to obtain the phase transformation temperatures and the energy enthalpy, the ribbons were submitted to Differential Scanning Calorimetry (DSC). Following, the dynamic mechanical analysis (DMA) test was done to record the percentage increase in the modulus of elasticity of the ribbon submitted to different temperatures. By submission of the ribbon to a thermal bath it was possible to plot the electrical resistance versus the pattern desired temperature and thus the ribbon to be used in the microvalve theorized by *Bellouard* was chosen. To demonstrate experimentally that this tape would be able to work normally in the product for which it was theoretically suggested, an experimental electrical resistivity versus temperature graph was plotted. Additionally, from the three-dimensional design and the 3D and internal microvalve geometry, a computer simulation based on static structure CFX tool with the ANSYS® Workbench V14 were performed and displayed, enabling the visualization of the Newtonian fluid movement within the microvalve.

Keywords: fluid, microsystem, microvalve, SMA, Ti-Ni-Cu.

PUBLICAÇÕES

SOARES, Roniere Leite; CASTRO, Walman Benício de. **Aplicações versáteis do Nitinol com efeito de memória de forma (EMF) no desenvolvimento de produtos miniaturizados**. *Congreso Internacional de Diseño Industrial - Córdoba, Argentina - CIDI2012, 16 al 18 de mayo de 2012. Anais de congreso: p. 217-227.* ISBN 9789871494231. 798 p. Título do livro de atas: Córdoba: centro internacional de diseño. Disponível em: http://www.faudi.unc.edu.ar/portada_archivos_2012/libro-digital-cidi

SOARES, Roniere Leite *et al.* **Estudo em dinâmica dos fluidos computacional do escoamento de oxigênio na microválvula de Bellouard**. O SHEWC'2013 - Congresso Mundial de Pesquisas Ambientais, Saúde e Segurança (XIII *Safety, Health and Environment World Congress*), organizado pela COPEC, em Porto-Portugal. Período: 07 a 10 de julho de 2013. Instituição Anfitriã: Ordem dos Engenheiros (Região Norte). Disponível em: <http://www.copec.org.br/shewc2013>

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	i
EPÍGRAFE	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
PUBLICAÇÕES	v
ÍNDICE DE TABELAS	viii
ÍNDICE DE QUADROS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE FÓRMULAS.....	xiv
ABREVIAÇÕES E SIGLAS.....	xv
SÍMBOLOS.....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Ligas com Efeito de Memória de Forma (LMF): generalidades	1
1.2 Obtenção do Efeito Memória de Forma.....	2
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo Geral.....	4
2.2 Objetivos Específicos	4
3. JUSTIFICATIVA.....	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
4.1 Efeito de Memória de Forma	6
4.2 Temperaturas de Transformação em Ligas do Sistema Ni-Ti.....	10
4.3 Nomenclaturas dos Microssistemas	12
4.4 Processos de Fabricação para Microssistemas.....	13
4.5 Tipos de Microssistemas	13
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
5.1 Fabricação da liga Ti-Ni-Cu	27
5.2 Obtenção das fitas de Ti-Ni-Cu com EMF por <i>Melt Spinning</i>	27
5.3 Tratamento térmico das fitas	29
5.4 Caracterização das fitas por DSC.....	30
5.6 Teste de Resistência Elétrica em função da Temperatura	31
5.7 Projeto tridimensional da microválvula (dimensões: 2 x 5 x 8 mm)	32
5.8 Particularidades da Microválvula	33

5.9 ASPECTOS METODOLÓGICOS	34
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
6.1 Caracterização DSC	36
6.2 Análise Mecânica Dinâmica (DMA)	40
6.3 Experimentos Elétricos	42
6.4 Propriedades Elétricas da fita tratada obtida a 38 m/s	51
6.5 Projeto da Microválvula	56
6.6 Simulação CFD <i>Ansys® Workbench 14</i>	61
6.6.1 Microválvula fechada	63
6.6.2 Microválvula aberta.....	67
7. CONCLUSÕES.....	71
8. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	72
REFERÊNCIAS	73
APÊNDICES (dimensões da microválvula de <i>Bellouard</i> : 2 x 5 x 8 mm)	76

ÍNDICE DE TABELAS

	Pag.
Tabela 1 – TTRs da liga Ni ₄₂ Ti ₅₁ Cu ₇ %at (MOTAMEDI, 2005)	9
Tabela 2 – Temperaturas de Transformação (TTRs) para ambas as fitas estudadas	38
Tabela 3 – Comparação de valores experimentais obtidos por DSC	39
Tabela 4 - Comparativo dos valores obtidos experimentalmente <i>versus</i> média aritmética	47
Tabela 5 - Valores obtidos para os Coeficientes de Variação para cada TTR	50
Tabela 6 – Valores das grandezas associadas às temperaturas médias de transformação	55

ÍNDICE DE QUADROS

	Pag.
Quadro 1 – Materiais com Efeito de Memória de Forma	1
Quadro 2 – Resumo dos microssistemas quanto às aplicações	14
Quadro 3 – Organograma das atividades desenvolvidas	34
Quadro 4 – Organograma com detalhamento das atividades realizadas	34
Quadro 5 – Resistividades dos elementos Ni, Ti e Cu (GRIFFITHS, 1999)	44

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Fig. 1 – Ciclo intermitente de transformações de fases em uma liga com memória de forma (LMF).....	3
Fig. 2 – (a) Entupimento coronariano desobstruído por colocação de <i>stent</i> de Liga de Memória de Forma (LMF) ou <i>Shape Memory Alloys</i> (SMA); (b) Expansão volumétrica por efeito de absorção da temperatura corpórea.....	6
Fig. 3 – Organização da fase austenítica e distâncias entre os centros atômicos na fase martensítica (HENNY, 2011): unidades em nanômetro ou nano ($1\text{nm} = 1 \times 10^{-9}\text{m}$).....	7
Fig. 4 – Relação entre os elementos Ni-Ti e o teor de Níquel na determinação da temperatura inicial de transformação martensítica (HARRISON & HANLON, <i>apud</i> HENNY, 2011).....	8
Fig. 5 – Comprimento <i>versus</i> Temperatura em um teste típico de carga constante em ligas com EMF: a variação de temperatura gera uma histerese ΔT (MATTH, 2011).....	10
Fig. 6 – Curva DSC para uma Liga de Memória de Forma (LMF) do sistema Ni-Ti.....	11
Fig. 7 – Ângulo de Mistura <i>versus</i> Temperaturas inicial e final da Austenita (A_s e A_f).....	12
Fig. 8 – Blocos funcionais de um microssistema integrado (RIBAS, 2011).....	13
Fig. 9 – As três formas de micro-usinagem para a construção de estruturas suspensas (<i>etching</i>) (RIBAS, 2011).....	13
Fig. 10 – Sistema modular de atuação colonoscópica com SMA (PEIRS, 1997).....	15
Fig. 11 – (a) sistema modular de colonoscopia montado com fita SMA em posição ortogonal; (b) módulo em perspectiva explodida com peças desmontadas (PEIRS, 1997).....	15
Fig. 12 – Atuador endoscópico com fio SMA (PEIRS, 1997).....	16
Fig. 13 – Válvula com fio atuador de SMA (PEIRS, 1997).....	16
Fig. 14 – Válvula com fio atuador de SMA (REYNAERTS, 1998).....	17
Fig. 15 – Atuador e pinça de Ni-Ti com EMF (REYNAERTS, 1998).....	18
Fig. 16 – Atuador cilíndrico com EMF para fluido líquido (REYNAERTS, 1998).....	19
Fig. 17 – Modelo matemático de uma pinça atuadora com fita de Ni-Ti SMA (ROH e BAE, 2010).....	19
Fig. 18 – micro-pinça monolítica recozida à laser: integração de múltiplas funções num substrato.....	20
Fig. 19 – Pinças para micro-montagem contendo atuadores com memória de forma e sensores (MERTMANN, 1997, p. 622).....	21
Fig. 20 – Princípio de funcionamento da: (a) válvula de assento e (b) válvula tipo gaveta.....	22
Fig. 21 – Estruturas funcionais Micro-fluidicas: (a) microválvula e (b) micro-bomba (BERNARD, 1998, p. 248) e (VANDELLI <i>et al</i> , 1998) <i>apud</i> (RIBAS, 2011, p. 15).....	23
Fig. 22 – (a) Válvula no seu estado não-atuado (fechado); (b) no estado atuado (aberto).....	23
Fig. 23 – Vistas seccionais longitudinais: (a) Entrada-2 aberta e Entrada-1 fechada; (b) Entradas 1 e 2 abertas; (c) Entrada-1 aberta e Entrada-2 fechada.....	24
Fig. 24 – Dimensões gerais do atuador Ni-Ti SMA (MEGNIN, 2011).....	24
Fig. 25 – Aspecto tridimensional panorâmico da microválvula (MEGNIN, 2011).....	25
Fig. 26 – Foto ilustrativa do microatuador SMA bidirecional (BARTH, 2012, p. 81)..	26
Fig. 27 – Microválvula SMA bidirecional: (a) desmontada; (b) montada (BARTH, 2012, p. 82).....	26

Fig. 28 – Máquina <i>Discovery All</i> (Departamento de Engenharia Mecânica da UFCG)	27
Fig. 29 – Foto ilustrativa de um equipamento <i>Melt Spinning</i> em funcionamento	28
Fig. 30 – Desenho esquemático do método <i>Melt Spinning</i>	28
Fig. 31 – Exemplo de fita de Ti-Ni-Cu obtida pelo método de solidificação <i>Melt Spinning</i>	29
Fig. 32 – Equipamento <i>Platinum</i> usada para efeito de tratamento térmico	29
Fig. 33 – Calorímetro Exploratório Diferencial (DSC) - DEM	30
Fig. 34 – Máquina Q-800 TA <i>Instruments</i> para testes DMA: (a) vista frontal; (b) vista posterior	31
Fig. 35 – Aparelho usado para captação de dados (DDP e Temperatura)	31
Fig. 36 – (a) Aparato para medição da Resistência Elétrica (Ω) em função da Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); (b) Fonte de Corrente Contínua 0,302A e intensidade de tensão variável	32
Fig. 37 – Telas ALT + Print Screen Sys Rq do software usado na obtenção dos dados Res x Temp	32
Fig. 38 – Microválvula com sensor/atuador SMA em fita Ni-Ti – sugerida por Bellouard (2008)	33
Fig. 39 – Porção da liga $\text{Ti}_{45}\text{Ni}_{48}\text{Cu}_7$ obtida por fundição, utilizando a máquina <i>Discovery All</i>	35
Fig. 40 – Resultado da caracterização DSC sobre as TTRs da fita $\text{Ti}_{45}\text{Ni}_{48}\text{Cu}_7$ obtida por 38 m/s	37
Fig. 41 – Resultado da caracterização DSC sobre as TTRs da fita $\text{Ti}_{45}\text{Ni}_{48}\text{Cu}_7$ obtida por 50 m/s	38
Fig. 42 – Resultado do teste DMA para fita tratada de $\text{Ti}_{45}\text{Ni}_{48}\text{Cu}_7$ obtida por <i>Melt Spinning</i> (38 m/s)	40
Fig. 43 – Relação trigonométrica entre os módulos E, E' e E'' (CHAPLIN, 2012)	41
Fig. 44 – Resultado do teste DMA para fita tratada de $\text{Ti}_{45}\text{Ni}_{48}\text{Cu}_7$ obtida por <i>Melt Spinning</i> (50 m/s)	42
Fig. 45 – Máquina de soldagem <i>Kernit SMP 3000 Gold</i> e fita Ti-Ni-Cu $\pm 24,5\text{mg}$ em teste de 4 pontos	45
Fig. 46 - Resultado do Banho Térmico [Resistência(Ω) versus T($^{\circ}\text{C}$)] como duração de 33 min e 30 s (para a fita obtida por 38 m/s, tratada termicamente a 750°C por 3 h)	46
Fig. 47 – Picos de diminuição da resistência elétrica durante o experimento R x T	47
Fig. 48 - Temperaturas de Transformação (experimentos e médias)	48
Fig. 49 - Temperaturas de Transformação ($^{\circ}\text{C}$) versus Experimentos	48
Fig. 50 - TTRs: Austenita inicial (A_s); Austenita final (A_f); Martensita inicial (M_s); Martensita final (M_f)	49
Fig. 51 – (a) Faixa temporal martensítica (resfriamento); (b) faixa temporal austenítica (aquecimento)	51
Fig. 52 – Temperatura x tempo (em minutos) para fita Ti-Ni-Cu tratada	51
Fig. 53 - Curvas iguais para associação do tempo às grandezas elétricas da fita Ti-Ni-Cu (38 m/s)	52
Fig. 54 - Curvas iguais para associação da temperatura às grandezas elétricas da fita Ti-Ni-Cu	52
Fig. 55 - Proporção da Tensão com potência, resistividade e resistência elétricas	53
Fig. 56 – Resistividades encontradas no experimento RxT	53
Fig. 57 – Gráfico duplo que converge os valores Resistência x Temperatura e Resistividade x Tempo	54

Fig. 58 - Curvas típicas inversas traçadas a partir do experimento R x T.....	55
Fig. 59 – Proporção aproximada da microválvula (2 x 5 x 8 mm - <i>container</i> fechado) na escala natural com relação a uma mão adulta e sua representação tridimensional ampliada.....	56
Fig. 60 – Representação 3D da microválvula (<i>container</i> aberto): encaixe vertical sob pressão.....	56
Fig. 61 – Perspectiva explodida: visão inferior da base e da tampa (sem os componentes internos).....	57
Fig. 62 – Tampa e base encaixadas (corte transversal e longitudinal): orifícios de passagem e controle do fluido; tampa sem os componentes adicionais.....	57
Fig. 63 – Tampa e base (corte longitudinal): com os componentes internos adicionais alocados na tampa; a base não possui componentes.....	57
Fig. 64 – Tampa (corte longitudinal) e componentes internos; base inteira sem corte.....	58
Fig. 65 – Montagem explodida da microválvula (com componentes adicionais da tampa): vistas superior e inferior.....	59
Fig. 66 – Vista seccional para análise de forças promovidas pela mola e tampa no estado martensita.....	60
Fig. 67 – Vista seccional para análise de forças promovidas pela fita na fase austenita.....	60
Fig. 68 – Etapas para desenvolvimento da simulação com técnicas de Fluidodinâmica Computacional.....	62
Fig. 69 – Microválvula fechada: volume total por onde o fluido transita internamente.....	62
Fig. 70 – Microválvula aberta: volume total por onde o fluido transita internamente.....	62
Fig. 71 – 1 entrada e 2 saídas do gás oxigênio na microválvula fechada: orifícios de passagem.....	63
Fig. 72 – Geometria na qual há o trânsito fluídico no interior da microválvula fechada.....	63
Fig. 73 – Visão superior do duto onde o fluido estanca em virtude da tampa fechada.....	64
Fig. 74 – Visão inferior dos elementos finitos gerados nas superfícies internas de contato onde a velocidade de deslocamento do fluido tende a zerar.....	64
Fig. 75 – Definição das entradas e saídas por onde o fluido se desloca na microválvula fechada.....	64
Fig. 76 – Confluência das linhas que confirmam o princípio de conservação de massa.....	65
Fig. 77 – (a) Vista superior dos orifícios circulares onde há entrada, passagem, estancamento e saída do fluido no interior da microválvula fechada; (b) vetores de fluxo direcionados.....	65
Fig. 78 – Delineamento dos caminhos por onde algumas moléculas percorrem o interior da microválvula fechada. As velocidades legendadas estão em $m*s^{-1}$	66
Fig. 79 – 1 entrada e 3 saídas do gás oxigênio na microválvula aberta: orifícios de passagem.....	67
Fig. 80 – Geometria na qual há o trânsito fluídico no interior da microválvula aberta.....	67
Fig. 81 – Visão dos dutos e paralelepípedos internos por onde há o escoamento do oxigênio.....	68
Fig. 82 – Detalhe ampliado da formação de figuras mistas na superfície plana superior e no cilindro de escapamento final da microválvula (escala gráfica expressa em "metro").....	68

Fig. 83 – Definição das entradas e saídas por onde o fluido se desloca internamente na válvula aberta	69
Fig. 84 – Convergência das linhas que confirmam o princípio de conservação de massa	69
Fig. 85 – Caminhos por onde algumas moléculas percorrem o interior da microválvula aberta.....	70
Fig. 86 - Vistas ortográficas da microválvula (tampa e base): vistas frontal, superior e lateral.....	76
Fig. 87 - Perspectiva superior da microválvula (tampa e base encaixadas): encaixe por pressão.....	76
Fig. 88 - Vista seccional da microválvula (tampa e base em corte longitudinal): medidas em milímetros.....	76
Fig. 89 - Destaques das geometrias da base e da tampa, respectivamente	77
Fig. 90 - Vistas ortográficas da tampa (com detalhes dos contornos invisíveis).....	77
Fig. 91 - Perspectiva da tampa (vista inferior)	77
Fig. 92 - Vistas ortográficas da base (peça única).....	78
Fig. 93 - Perspectiva da base (vista superior)	78
Fig. 94 - Perspectiva da tampa e base (montagem do encaixe).....	78
Fig. 95 - Vistas ortográficas da microválvula: dimensionamento completo (cotas em milímetros).....	79

ÍNDICE DE FÓRMULAS

	Pag.
Equação 1 - Cálculo da histerese térmica de transformação de fase.....	36
Equação 2 - Cálculo do Módulo de Elasticidade.....	40
Equação 3 - Cálculo da Relação Tan-Delta.....	41
Equação 4 - Cálculo da Potência Elétrica.....	43
Equação 5 - Cálculo da Energia (em Joules)	43
Equação 6 - Cálculo do Fator de Potência	44
Equação 7 - Cálculo da Eficiência Energética	44
Equação 8 - Cálculo da Condutância Elétrica	44
Equação 9 - Cálculo da Resistividade Elétrica	44
Equação 10 - Cálculo da Resistência Elétrica para Corrente Contínua.....	45
Equação 11 - Cálculo da Resistência Elétrica para Corrente Alternada.....	45
Equação 12 - Cálculo da Histerese Térmica (médias austenítica e martensítica)....	47
Equação 13 - Cálculo da Média Aritmética	47
Equação 14 - Cálculo do Desvio Médio das TTRs	49
Equação 15 - Cálculo do Desvio Padrão das TTRs.....	49
Equação 16 - Cálculo da Variância das TTRs	49
Equação 17 - Cálculo do Coeficiente de Variação das TTRs	49
Equação 18abc – Coordenadas cartesianas para fluidos newtonianos.....	61

ABREVIações E SIGLAS

2D – duas dimensões (bidimensional)

3D – três dimensões (tridimensional)

ABAQUS – *software* comercial de análise por elementos finitos

A_f – Austenita final

A_p – Pico austenítico

A_s – Austenita inicial

CA – Corrente Alternada

CAD – *Computer-Aided Design* (projeto assistido por computador)

CAE – *Computer-Aided Engineering* (engenharia assistida por computador)

CC – Corrente Contínua

CCC – Cúbica de Corpo Centrado

CFC – Cúbica de Face Centrada

cm – centímetros

CMOS – *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*

DDP – Diferença de Potencial

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica (UFCEG)

DMA – *Dynamic Mechanical Analysis* (Análise Mecânica Dinâmica)

DSC – *Differential Scanning Calorimetry* (Calorimetria Diferencial de Varredura)

EMF – Efeito de Memória de Forma

E_f - Módulo de elasticidade final

E_s - Módulo de elasticidade inicial

Fase-R – fase martensítica diferenciada na qual os efeitos de memória de forma são menores que os da fase martensítica considerada como normal

kW – quilowatts

LMF – Ligas de Memória de Forma

LVDT - *Linear Variable Differential Transformer* (transformador diferencial linear variável)

M_f – Martensita final

ml - mililitros

mm – milímetros

M_p – Pico martensítico

MPa – Megapascal

M_s – Martensita inicial

Nitinol – Ni-Ti (Níquel e Titânio)

NOL - *Naval Ordnance Laboratory*

Pa – Pascal → MPa – MegaPascal → GPa – GigaPascal

PCB – *Printed Circuit Board* (Placa de Circuito Impresso)

PSPP – *Plasma Skull Push-Pull*

PWM - *Pulse-Width Modulation* (modulação por largura de pulso)

RF – Rádio Frequência

SAE 30 - óleo lubrificante para motor

sccm – *self-consistent cell model* (unidade de *modelo de célula auto-consistente*)

SCR – *Silicon Controlled Rectifier* (Retificador Controlado de Silício)

SMA – *Shape Memory Alloys* (Ligas com Memória de Forma)

SME – *Shape Memory Effect* (Efeito Memória de Forma)

TTM – Tratamento Termo-Mecânico

TTRs – Temperaturas de Transformação

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos

SÍMBOLOS

∂ – derivada parcial

\bar{X} – Média aritmética

τ – tensão transversal (ou de cisalhamento)

%wt = percentagem em massa

\propto – proporcional a...

$\hat{\phi}$ – Valores entre...

cm^3 – centímetro cúbico

E – módulo de elasticidade

e_c = amplitude térmica de resfriamento

e_h = amplitude térmica de aquecimento

F – Força

E_f - Módulo de elasticidade final

E_s - Módulo de elasticidade inicial

H_A = energia de transformação de fase no aquecimento (austenita), em J/g

H_M = energia de transformação de fase no resfriamento (martensita), em J/g

H_T - Histerese Térmica

I = Corrente elétrica (expressa em ampères [A])

J/g = Joules por grama (densidade de energia)

k- ϵ - Modelo de Turbulência adotado para microválvula

m^2 – metro quadrado

O_2 - Gás oxigênio

$^{\circ}\text{C}$ – Graus centígrados

P = Potência elétrica (expressa em watts [W] ou Joules/segundo)

R = Resistência elétrica (expressa em ohms [Ω])

S ou A – Área da secção transversal

$\tan(\delta)$ – tangente de delta (Tan Delta)

V = Tensão elétrica (expressa em volts [V])

W = watts ou J/s

ΔC – Variação de comprimento

ΔH ou H_t – Histerese térmica de transformação de fase

Δt = Variação de tempo

ε – deformação axial

η – eficiência energética

η – nano (nanometro = $\eta\text{m} = 1 \times 10^{-9}\text{m}$)

μ – micron (micrometro = $\mu\text{m} = 1 \times 10^{-6}\text{m}$)

ρ – Resistividade elétrica

σ – Condutividade elétrica

σ – tensão normal (axial)

Ω – ohm (unidade da resistência elétrica)

1. INTRODUÇÃO

1.1 Ligas com Efeito de Memória de Forma (LMF): generalidades

O Efeito de Memória de Forma (EMF) ou *Shape Memory Effect* (SME) (OTSUKA & WAYMAN, 1998), descoberto em 1932 pelo pesquisador sueco Arne Olander, pode ser definido como a capacidade de um material, após ter sofrido uma pseudodeformação plástica, em seu estado martensítico, voltar ao estado ou forma original quando aquecido à temperatura de formação da fase austenítica (CFC) ou CCC (HENNY, 2011). Em LMF, isso ocorre mediante uma transformação da sua estrutura cristalina (de martensita para austenita) via processos térmicos, resultando em grandes tensões. Segundo Airoidi (1997), o estado martensítico pode mudar de acordo com os percentuais dos elementos de liga e temperaturas a serem atingidas, variando, como, por exemplo, na liga $Ni_{40}Ti_{50}Cu_{10}$, entre os estados CCC, ortorrômbico e monoclinico.

De acordo com Kohl (2004, p. 25), existem vários materiais com EMF além das ligas metálicas, conforme é apresentado no quadro 1:

Metais	Ligas da base Fe: FePt, FeMnSi, FeNiC
	Ligas da base Cu: CuZn, CuZnAl, CuAlNiMn
	Ligas da base Ni-Ti: Ni-Ti (Nitinol), Ti-Ni-Cu, Ni-TiPd
Cerâmicas	Dióxido de Zircônio (ZrO_2)
Polímeros	Politetrafluoroetileno (PTFE)

Quadro 1 – Materiais com Efeito de Memória de Forma

As ligas de Ni-Ti (Nitinol), por exemplo, formam um conjunto de materiais com Efeito de Memória de Forma dentre os que são mais usados em aplicações práticas. O nome Nitinol vem do acrônimo inglês de *Nickel-Titanium* e *Naval Ordnance Laboratory*, instituição onde William J. Buehler e Frederick Wang desenvolveram este material, em 1962. (PEREIRA, 2000)

Na reconstituição desses materiais à forma original, as ligas com *efeito de memória de forma* podem realizar trabalho mecânico. Um fio pode ser tensionado, por exemplo, a partir de sua forma memorizada inicialmente; e o seu comprimento diminui sob aquecimento, podendo ser utilizado como atuador em aplicações automobilísticas, robótica, biomecânica, telemática, etc. Nesse caso, o atuador se comporta de forma análoga a um músculo: ora contraindo, ora relaxando.

Experimentalmente pode ser verificado que o fio de liga com EMF pode fazer uma força de recuperação bastante elevada.

[...] Se este retorno for impedido de alguma maneira, forças elevadas podem ser geradas, através do efeito EMF. Devido a esta característica de gerar força, elementos de EMF podem ser utilizados como atuadores termomecânicos, por exemplo, em dispositivos médicos. Contudo, além de serem capazes de gerar forças elevadas, as ligas com EMF têm a capacidade de recuperarem deformações de até 8%. [...] (FILHO, Sousa *et al*, 2011, p. 60)

Alguns projetos utilizam o EMF visando que o material, ao voltar a sua forma memorizada, produza alguma ação desejada sobre o sistema. Como exemplo, pode-se aplicar esse fenômeno na vedação de uma junta de tubos, ou no projeto de dispositivo de liberação de painéis solares de um satélite. Nesse último caso, um atuador cilíndrico de liga com EMF é comprimido a partir de sua forma memorizada; o alongamento do atuador quando aquecido é utilizado para romper um pino de retenção.

1.2 Obtenção do Efeito Memória de Forma

A obtenção do EMF (ou SME) não se deve apenas a uma mistura físico-química entre elementos baseada em estudos percentuais preliminares. Deve-se também, em parte, ao processo de fabricação da peça (ou objeto/artefato) e/ou ao tratamento térmico, deformação e aquecimento aos quais esta peça é posteriormente submetida. Primeiramente, a peça é obtida com a forma adequada à sua utilização. Após isso, aplica-se o tratamento térmico para efeito de eliminação dos efeitos, acentuação dos picos e redução das tensões internas, o que potencializa o EMF. Foi o que ocorreu com as fitas de TiNiCu. Neste processo, a amostra foi aquecida a uma temperatura dentro de uma faixa onde só existe a fase austenita. Então, a liga é rapidamente resfriada, com sua temperatura caindo para um valor abaixo de uma faixa de temperatura na qual só existe a fase *martensita inicial*. A partir desse momento a peça pode sofrer deformação plástica aparente, pois é possível a alteração para a fase *martensita deformada* por efeito de aplicação de tensão mecânica. Isso se deve a uma propriedade chamada pseudoplasticidade. Caso a peça seja aquecida a uma temperatura dentro de uma amplitude térmica onde só existe a fase austenita, a peça retorna ao formato memorizado. É o que podemos perceber no gráfico ilustrativo da figura 1:

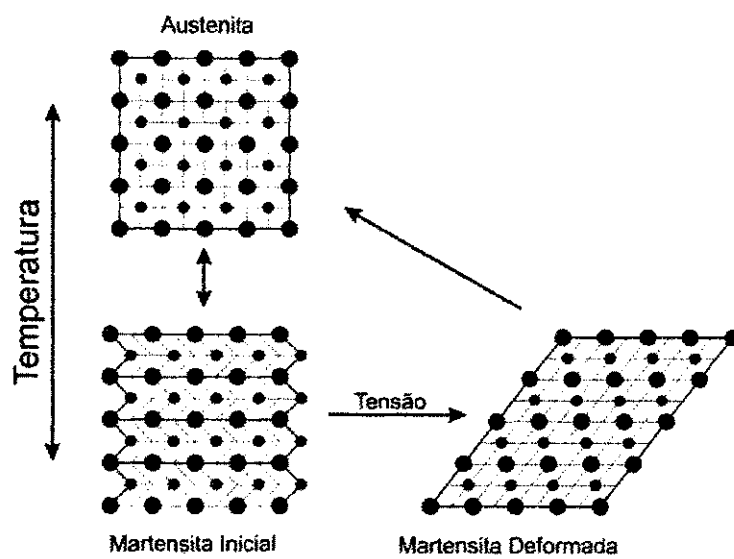


Fig. 1 – Ciclo intermitente de transformações de fases em uma liga com memória de forma (LMF)

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho foi caracterizar uma fita de $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ com *efeito de memória de forma* obtida pelo processo de solidificação rápida, conhecido como *Melt Spinning*, para aplicação na microválvula de *Bellouard* (2008). Além disso, objetivou-se simular o escoamento do gás O_2 nesta microválvula por meio do software CFD Ansys® *Workbench* V14 US (módulo CFX).

2.2 Objetivos Específicos

- a) Elaborar ligas de Ti-Ni-Cu com efeito de memória de forma empregando a técnica PSP (Plasma Skull Push-Pull) usando a máquina de fundição *Discovery All* e adotando uma composição em peso cujas proporções são 50%Ti, 43%Ni e 7%Cu;
- b) Produzir as fitas de Ti-Ni-Cu com *efeito de memória de forma* através da técnica de *melt spinning*, variando velocidades de giro da roda (38 m/s e 50 m/s);
- c) Realizar o tratamento térmico das fitas de Ti-Ni-Cu para correção dos defeitos, melhoria das propriedades físicas, redução das tensões internas e acentuação dos picos das Temperaturas de Transformação (TTRs);
- d) Caracterizar as fitas de Ti-Ni-Cu por DSC para registros de suas respectivas TTRs;
- e) Efetuar os testes de performance em um analisador dinâmico-mecânico para verificação e comparação do crescimento percentual do módulo de elasticidade, sob mudança crescente de temperaturas em um intervalo de tempo;
- f) Escolha de fita a ser aplicada na microválvula e execução do experimento *Resistência x Temperatura* na fita escolhida;
- g) Análise estatística e validação dos dados obtidos por DSC e RxT;
- h) Cálculos dos valores de resistividades em função das variações de temperaturas;
- i) Desenvolver o projeto tridimensional da microválvula a partir do esquema de *Bellouard* (2008);
- j) Simular o escoamento do gás oxigênio no interior da microválvula através da plataforma computacional CFD Ansys® *Workbench* V14.0 USA;
- k) Ampliar a área de atuação da Engenharia dos Materiais com o desenvolvimento do projeto de produto, por meio da execução de: desenho técnico, detalhamento geométrico 3D, perspectivas, vistas seccionais e explodidas etc.

3. JUSTIFICATIVA

A importância do trabalho desenvolvido se deu, em primeira instância, pela integração interdisciplinar do projeto de produto com as engenharias mecânica, química, elétrica e de materiais. Em segundo momento, desenvolver um dispositivo eletromecânico para controle de fluido à base de Ti-Ni-Cu permitiu construir dados e informações consistentes que serviram de base para viabilidade de uma futura produção em série na área automobilística ou médica. A pesquisa também se justifica pelo fato de inserir no grande rol de interesse acadêmico que atualmente se dissemina no âmbito das crescentes pesquisas acerca de materiais de interesse industrial que possam ser aplicados em microssistemas.

Atualmente, são inúmeras as áreas de interesse e aplicações potenciais para micro-estruturas. A indústria eletrônica, o setor automobilístico, os sistemas CAE/CAD, as telecomunicações e os equipamentos biomédicos resumem o mercado mais representativo na miniaturização de estruturas. São consideradas também áreas de interesse: a instrumentação, o controle de processos industriais, a aeronáutica, a medicina e a automação industrial. Todas elas visualizam nesses micro-mecanismos eletromecânicos uma forma de desenvolver sensores e/ou atuadores miniaturizados para aplicações de uso antes limitadas devido ao tamanho macro dos dispositivos.

O *design* da microválvula realizado por modelagem estática em ferramenta CAD e modelagem dinâmica no CFX foi outro aspecto relevante, pois possibilitou uma integração do projeto com a área de simulação computacional fluidodinâmica a fim de mostrar o quão é significativo o domínio de aplicativos compatíveis que exemplificam a prática de rotina das grandes empresas como a Petrobras, Wellstream e Eletronuclearque, que têm adotado esse sistema de trabalho.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Efeito de Memória de Forma

Segundo Anselmo (2010, p. 16), materiais inteligentes são aqueles que reagem a alterações ocorridas no meio que os envolvem. Dentre esses materiais têm destaque as ligas metálicas com Efeito de Memória de Forma (EMF). As LMF apresentam geralmente composição binária ou ternária, que retornam à sua forma original depois de um aquecimento subsequente à pseudodeformação plástica sofrida. Algumas das consequências geradas pelo EMF são gerações de tensões, sensibilidade térmica, atuação termomecânica, variação de geometria, entre outras. Isso possibilita a aplicação tecnológica e criação de produtos industriais com funções específicas nas mais diversas áreas do conhecimento. Entre algumas das aplicações que estão em crescimento é possível citar: projetos de diversos microsistemas (CHRISTOU, 2006), membranas e filmes, detecção de estímulos acústicos/mecânicos e fluxo de líquidos/gases, estruturas suspensas, detectores de movimento, estruturas 3D móveis, estruturas para o uso em acelerômetro, sensores e atuadores miniaturizados, microválvula, micro-bomba, circuitos integrados, micro-espelhos, pinças para micro-montagem, dispositivos micro-usinados (dispositivos térmicos, dispositivos óticos, dispositivos mecânicos, dispositivos para Rádio Frequência (RF) e microondas) e *stents*, conforme figura 2:

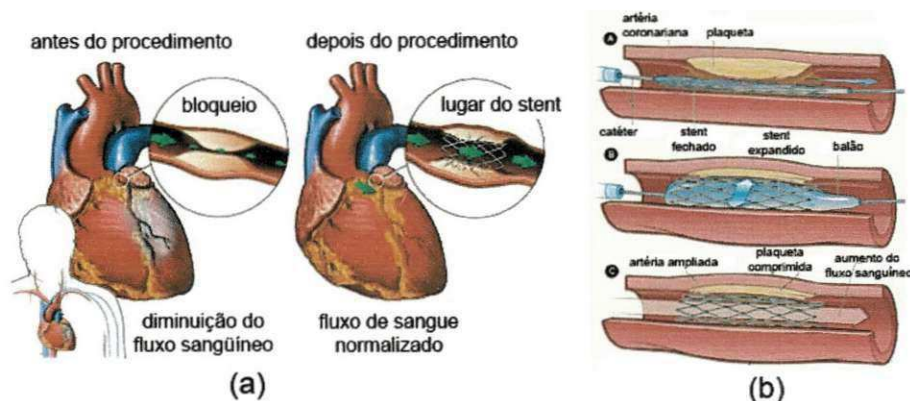


Fig. 2 – (a) Entupimento coronariano desobstruído por colocação de *stent* de Liga de Memória de Forma (LMF) ou *Shape Memory Alloys* (SMA); (b) Expansão volumétrica por efeito de absorção da temperatura corpórea

Há dois tipos de EMF: unidirecional e bidirecional. No primeiro, o efeito de memória de forma simples ("one-way shape memory effect") ocorre apenas no aquecimento, portanto, é não-reversível. No segundo, o efeito de memória duplo ("two-way shape memory effect") ocorre no aquecimento e também no resfriamento,

e, portanto, é reversível. Assim sendo, temos respectivamente as transformações não-termoelástica (martensita→austenita) ou (martensita←austenita) e termoelástica (martensita↔austenita).

As Ligas Metálicas com *Efeito de Memória de Forma* de interesse comercial são as dos sistemas Cu-Al-Zn, Cu-Al-Ni e as ligas do sistema Ni-Ti (Nitinol). Um objeto de Nitinol na temperatura ambiente é fácil de entortar, porém, após uma aparente deformação, torna-se rígido e recupera a sua forma original quando aquecido acima de uma determinada temperatura, a qual pode variar, dependendo das percentagens dos elementos envolvidos na mistura. Trata-se de uma mudança de fase no estado sólido (martensita/austenita) (NASCIMENTO, 2010b). A fase martensita, em temperatura ambiente, geralmente se apresenta na estrutura CCC (cúbica de corpo centrado, conforme ilustrado na figura 3) ou TCC (tetragonal de corpo centrado) e a austenita, em temperatura maior, apresenta-se na estrutura cristalina CFC (cúbica de face centrada).

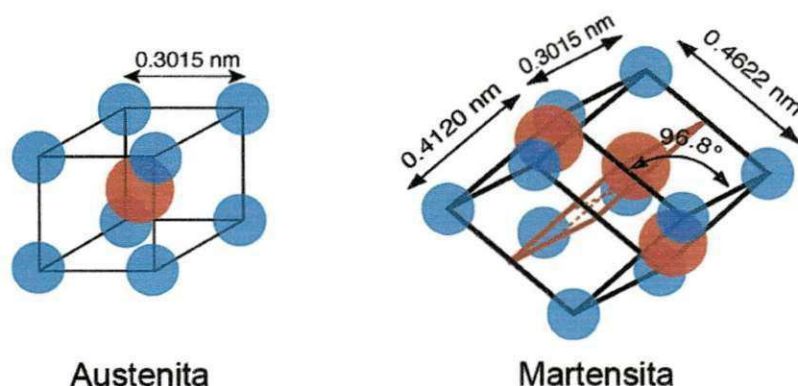


Fig. 3 – Organização da fase austenítica e distâncias entre os centros atômicos na fase martensítica (HENNY, 2011): unidades em nanômetro ou nano ($1\text{nm} = 1 \times 10^{-9}\text{m}$)

As ligas de Nitinol têm 50-51%Níquel em percentagem atômica ou 55-56%Níquel em percentagem de peso¹. A temperatura de mudança de fase pode ser modificada pela adição de outros elementos na liga. A adição de Cu (Cobre) reduz, enquanto que o Nb (Nióbio) aumenta a temperatura de mudança de fase, a qual, nas ligas mais usadas, situa-se entre 55°C e 65°C. O Nitinol foi descoberto na década de 1960 no Laboratório de Material Bélico Naval dos EUA (NOL – *Naval Ordnance Laboratory*, localizado em *White Oak, Maryland*). O nome da liga é composto pelos

¹ Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Nitinol#cite_note-nitinol.com-9> e <http://pt.wikipedia.org/wiki/Nitinol#cite_note-10> Acessado em: 20/02/2013.

símbolos químicos dos elementos (Ni-Ti) juntamente com a sigla do laboratório (NOL).

A liga de Ni-Ti é um material que tem excelente biocompatibilidade, ou seja, compatibilidade com tecidos orgânicos. Por isso vem sendo largamente empregada em material biomédico, como *stents*, cateteres, implantes ortopédicos, aparelhos ortodônticos, etc. Existem ainda aplicações na robótica, que emprega fios de Nitinol para a construção de “músculos artificiais” destinados à movimentação de robôs ou similares. Nesta aplicação, uma corrente elétrica atravessando o dispositivo causa seu aquecimento e a conseqüente mudança de forma. Esta aplicação é, contudo, restrita, pois os movimentos assim obtidos são bastante lentos em comparação com outras tecnologias disponíveis.

Segundo Duerig (2011, p. 02), a proporção de mistura na liga altera as temperaturas de transformações (TTRs) nas fases martensítica e austenítica. Essa relação é apresentada na figura 4 em termos de proporções atômicas.

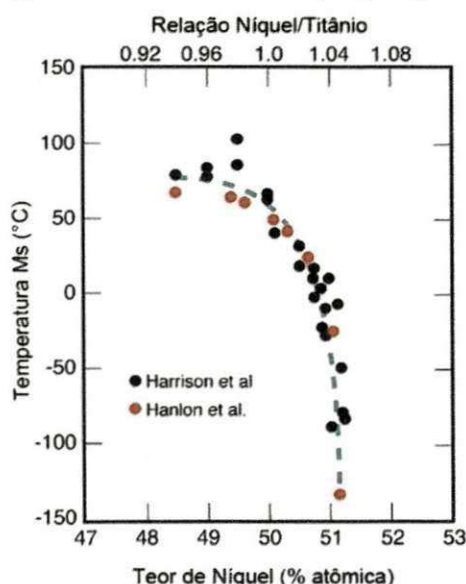


Fig. 4 – Relação entre os elementos Ni-Ti e o teor de Níquel na determinação da temperatura inicial de transformação martensítica (HARRISON & HANLON, *apud* HENNY, 2011)

Todavia, isso ocorre também em termos de proporções percentuais de massa. Essas temperaturas são fundamentais, pois elas são capazes de mensurar as energias necessárias (em J/g) para que uma estrutura cristalina martensita mude para outro tipo de célula cristalina austenita, ou vice-versa. Podemos elencar essas temperaturas convencionais com as seguintes abreviações: M_s , temperatura de início de transformação da martensita, sob resfriamento; M_f , temperatura final de

transformação da martensita, sob resfriamento; A_s , temperatura de início da transformação reversa, sob aquecimento; A_f , temperatura final da transformação reversa, sob aquecimento; M_p , temperatura acima da qual as propriedades de memória de forma não se manifestam e a liga com memória de forma se comporta como qualquer outra liga metálica comum.

Segundo Aquino (2011, p. 38), a descoberta do Nitinol no decênio de 1960, reafirma o interesse pelas ligas com memória de forma e desperta, ainda, focos de estudos pautados no tratamento térmico, microestrutura e composição. A partir desta última variável foi possível perceber a partir de 1965 que a adição de um terceiro elemento diminui as temperaturas de transformação (TTRs). Em 1978, Melton e Mercier (*apud* Aquino, 2011) concluíram que a adição do cobre, especificamente, não diminui consideravelmente as TTRs. Isso confirma que as TTRs a serem consideradas com experiências desenvolvidas com ligas bimetálicas Ni-Ti são praticamente as mesmas com ligas trimetálicas Ti-Ni-Cu. Além disso, no ano de 1999, Miyazak *et al* (*apud* Aquino, 2011) comprovou que esta última liga apresenta maior tempo de vida sujeito à fadiga. A adição do percentual de Cu diminui o alto custo da liga bimetálica tornando a liga Ti-Ni-Cu adequada às aplicações industriais e comerciais.

Percebeu-se posteriormente que a diminuição das TTRs pode ser considerável dependendo do teor de Cu acrescentado, pois a liga Ni-Ti possui as temperaturas de transformação muito altas para aplicações em produtos que precisam de um trabalho inicial em temperaturas ambiente, em torno de 21°C a 23°C e que não podem exceder uma faixa máxima de trabalho a 100°C.

Segundo Motamedi (2005, p. 153), as temperaturas de transformação encontradas em seu trabalho para a liga $Ni_{42}Ti_{51}Cu_7$ foram, segundo a tabela 1:

M_f (°C)	M_s (°C)	A_s (°C)	A_f (°C)
36	53	47	62

Tabela 1 – TTRs da liga $Ni_{42}Ti_{51}Cu_7$ at (MOTAMEDI, 2005)

Para o microssistema que se pretende projetar nesse trabalho, por exemplo, uma fita produzida por uma liga que tenha as temperaturas de transformação semelhantes às apresentadas por Motamedi (2005) pode ser considerada como uma fita apropriada, pois trabalha em temperaturas relativamente próximas à faixa de

temperatura ambiente. Sua composição serve de base para que se adote neste projeto uma liga Ti-Ni-Cu de distribuição percentual análoga.

4.2 Temperaturas de Transformação em Ligas do Sistema Ni-Ti

Para qualquer uso de uma liga ternária do sistema Ni-Ti é desejável que se conheça as Temperaturas de Transformação (TTRs). As TTRs são aquelas temperaturas nas quais as mudanças de fases ocorrem, dependendo dos percentuais de composição. Às TTRs estão associadas às energias necessárias para que se concretizem as modificações das estruturas cristalinas. Há inúmeras maneiras de realização de testes de temperatura de transformação, mas três são de uso comum com ligas metálicas para fornecer dados úteis para engenheiros e projetistas de produtos: *Load Constant*, DSC, e *Af Active*. (MATTH, 2011)

Segundo Matth (2011), aplica-se uma carga à liga e monitora-se sua deformação/recuperação de forma simultânea com a temperatura enquanto o material é resfriado e aquecido dentro da faixa de transformação. Por exemplo, o alongamento e a contração de um fio de memória de forma sob carga de tração é mostrada na figura 5 quando a temperatura é reduzida e, posteriormente, elevada. Geralmente, a carga específica que o material vai demandar na aplicação real é utilizada para o teste para simular as condições de uso. Os pontos de temperatura registrados são aqueles usados com frequência para descrever o comportamento de uma liga particular. M_s é onde a martensita começa a se formar no resfriamento e M_f é onde termina Martensita; No resultado gráfico, é delineado o início da formação da austenita durante aquecimento enquanto A_f identifica o acabamento da transformação da austenita. Este tipo de teste é geralmente utilizado para aplicações que utilizam o efeito memória de forma em ligas.

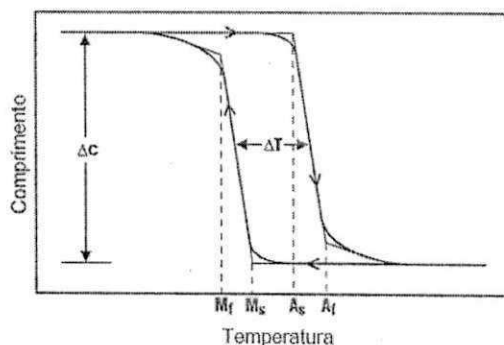


Fig. 5 – Comprimento *versus* Temperatura em um teste típico de carga constante em ligas com EMF: a variação de temperatura gera uma histerese ΔT (MATTH, 2011)

A tensão e as TTRs são parâmetros (ou variáveis) dependentes, ou seja, as TTRs serão diferentes mediante cargas e tratamentos diferentes.

Outra técnica precisa para determinar os valores das TTRs é a Calorimetria Diferencial de Varredura, conhecida pela sigla DSC, de *Differential Scanning Calorimetry*. Para Matth (2011), esta técnica DSC gera um curva típica, como na figura 6, medindo a quantidade de calor emitida ou absorvida por uma pequena amostra da liga quando a mesma é resfriada ou aquecida por meio de suas fases de transformações. O DSC proporciona excelentes rendimentos, resultados repetidos em amostras totalmente recozidas a 700°C, em tempo suficiente para alcançar pleno recozimento, geralmente por cerca de 10 a 15 minutos para pequenas amostras.

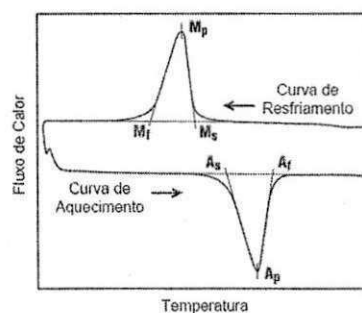


Fig. 6 – Curva DSC para uma Liga de Memória de Forma (LMF) do sistema Ni-Ti

O terceiro método de determinação das TTRs é feito mediante um banho de água onde é realizado o dobramento de uma amostra da liga, como um fio, enquanto este está abaixo da temperatura M_s . Assim, é feito o monitoramento da recuperação de forma, enquanto ela é aquecida. Por exemplo, se um fio é suavemente dobrado em forma de gancho, por pressão dos dedos, e em seguida, aquecido lentamente em banho líquido enquanto a temperatura do banho de monitoramento é medida, pode-se facilmente medir o ângulo de curvatura mantida em temperaturas específicas. Com a aquisição desses dados (como na figura 7), verifica-se que a curva atinge ângulo de curvatura de zero retidos na A_f . O raio da curva inicial de 180° não deve ser menor do que 10 vezes o diâmetro do fio para que haja a recuperação completa. Este método, embora não muito sofisticado, renderá resultados precisos se bem executado e requer muito pouco aparato experimental. Um banho de gelo seco esmagado e álcool é recomendado para testes nesta faixa. Por outro lado, um banho de água quente pode ser apropriado para ligas de alta temperatura. O teste é frequentemente usado para a gravação do A_f de materiais superelásticos em fios-guia e outras aplicações.

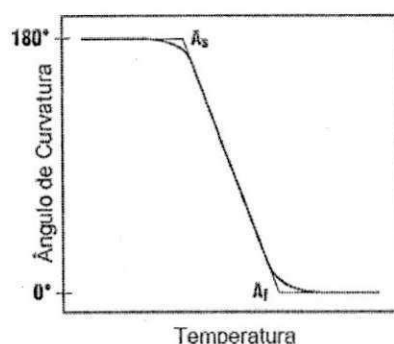


Fig. 7 – Ângulo de Mistura *versus* Temperaturas inicial e final da Austenita (A_s e A_f)

Outros métodos, como medir as mudanças de resistividade têm sido usados para medir as TTRs. No entanto, acima de três técnicas distintas servem especificamente às necessidades de pesquisadores, projetistas e engenheiros de desenvolvimento que, por ventura, precisam caracterizar ou comparar estatisticamente testes de qualidade nesses materiais. (MATTH, 2011)

4.3 Nomenclaturas dos Microssistemas

Os sensores de pressão miniaturizados surgiram na década de 1960, mas até hoje não se tem terminologia definida para padronizar os microssistemas funcionais. (NASCIMENTO, 2010a, p. 11)

Vejamos algumas nomenclaturas encontradas em nossa triagem:

- **Micro-máquinas** (Micromachines): usada na Ásia
- **Microssistemas** (Microsystems): usada na Europa
- **MEMS** (Micro-Electro-Mechanical Systems): usada nos EUA
- **MOEMS** (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems): usada quando existem componentes óticos envolvidos
- **MST** (MicroSystems Technology): termo abrangente, mas pouco encontrado na literatura
- **Micromachining**: usada em técnicas e processos de micro-usinagem.

Sendo todos eles sistemas miniaturizados, compõem-se de três constituintes básicos: (i) o bloco de comunicação com o meio exterior que age como sensor e/ou atuador; (ii) o bloco de interface analógica para aquisição/transmissão e amplificação dos sinais dos sensores/atuadores; (iii) e o bloco de controle e tratamento numérico. Na figura 8, são apresentados os blocos funcionais de um microssistema integrado:

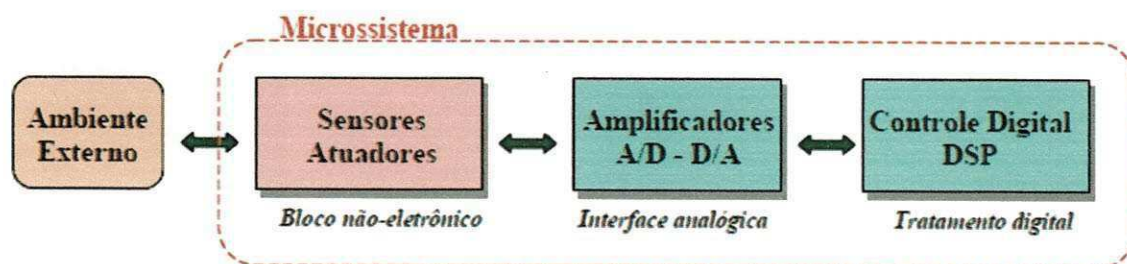


Fig. 8 – Blocos funcionais de um microsistema integrado (RIBAS, 2011)

4.4 Processos de Fabricação para Microsistemas

Os processos de fabricação específicos implementados para os microsistemas dividem-se em dois grupos: processos específicos para microsistema e processos compatíveis com a microeletrônica (circuitos integrados). Para o primeiro, os dois subgrupos são denominados de *Liga* e *Scream*. No segundo subgrupo, relativo aos processos de gravação denominados *etching* (ataque/usinagem), ocorrem de três modos distintos: remoção do substrato pela face anterior ou frontal (*front-side bulk micromachining*); remoção do substrato pela face posterior (*back-side bulk micromachining*); e remoção de camadas sacrificiais da superfície do substrato (*surface micromachining*), conforme mostrado na figura 9:

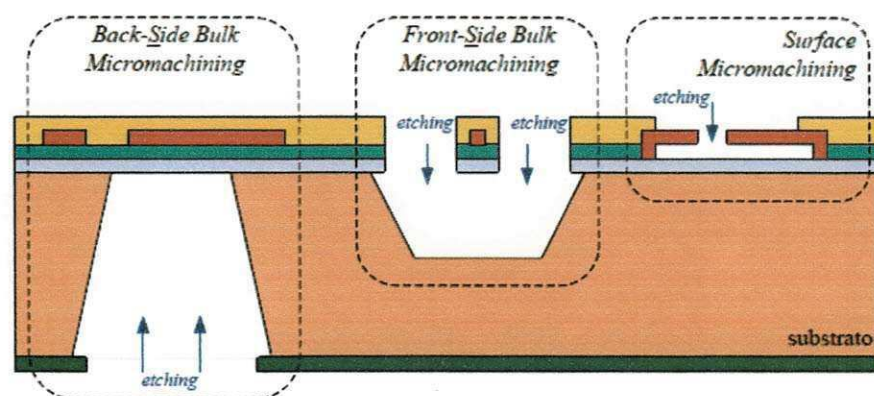


Fig. 9 – As três formas de micro-usinagem para a construção de estruturas suspensas (*etching*) (RIBAS, 2011)

4.5 Tipos de Microsistemas

Os dispositivos micro-usinados ou estruturas suspensas se aplicam para a construção de sensores e atuadores miniaturizados. Entre os tipos de dispositivos miniaturizados mais mencionados podem citar os dispositivos térmicos, dispositivos óticos, dispositivos mecânicos e dispositivos para RF e microondas.

Os MEMS (sistemas microeletromecânicos) são componentes ou dispositivos que executam funções elétricas e/ou mecânicas em escalas milimétricas, micrométricas ou nanométricas. Podemos visualizar no quadro 2 uma forma sucinta de dividir os microssistemas conforme suas aplicações:

	Microsensores	Microatuadores	Diversos		
Aplicações	onda acústica, biomedicina, química, inércia, óptica, radiação, pressão, térmica, etc	válvulas e bombas microfluídicas; relés elétricos e ópticos e switches; pinças; motores lineares e rotativos, etc	Leitura/gravação em cabeças de sistemas para armazenamento dos dados	Cabeças metálicas de impressão à jato de tinta	Micro-componentes de produtos (por exemplo, subsistemas de aeronaves, mini-robôs e brinquedos, aparelhos micro-cirúrgicos e equipamentos de telecomunicação móvel, eletrônica, etc)

Quadro 2 – Resumo dos microssistemas quanto às aplicações

Os dispositivos miniaturizados podem ser constituídos também pelas mais variadas composições de ligas com efeito de memória de forma, assim como constituídos por diferentes geometrias geradas em decorrências dos seus respectivos processos de fabricação, tais como: fios, arames, micromolas, filmes (películas), fitas, tiras e formas micro-usinadas (engrenagens e outras formas).

4.5.1 Sensores e Atuadores

Um microatuador ou microssensor geralmente tem sua forma derivada de sua função, ou seja, além da concepção projetual que está subjacente ao aspecto tridimensional do produto, esta concepção de *design* pode ser determinada, adequada ou modificada de acordo com a função específica do subcomponente com EMF presente. Isso significa dizer que, por exemplo, a escolha do artefato (fio (*thread*), fita (*ribbon*) ou tira (*strip*) que funcionará como sensor/atuador, implicará em novas morfologias e, conseqüentemente, em projetos diferenciados.

É possível encontrar na literatura diversos microprodutos e aplicações as mais variadas quando selecionamos um dos três artefatos mencionados anteriormente. Peirs (1997, p. 390) descreve, por exemplo, de acordo com a figura 10, um conceito de módulo que foi criado para ser um moderno aparelho de inspeção intestinal. O principal problema para inspecionar o cólon com um dispositivo usual são: (i) várias curvas que têm de ser manobradas no intestino humano; (ii) a possibilidade de

danificar o intestino pelo sistema convencional; (iii) o uso de um colonoscópio é impedido pelo movimento peristáltico que tenta expulsar o dispositivo, pois as movimentações do cólon são também afetadas pela respiração humana e pelo estado emocional.

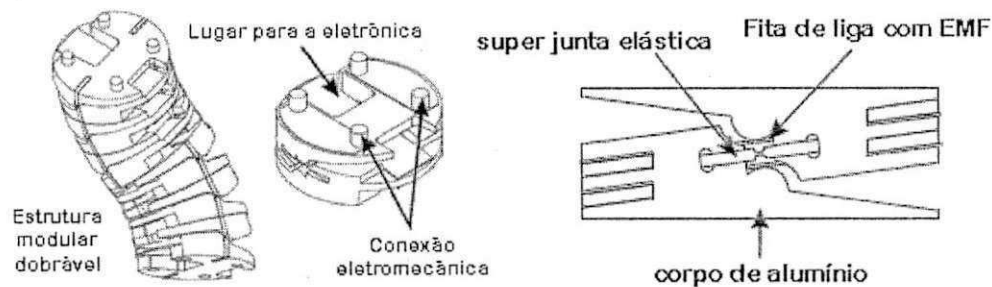


Fig. 10 – Sistema modular de atuação colonoscópica com SMA (PEIRS, 1997)

Conforme Peirs (*ibidem*), o projeto se assemelha a uma vértebra, onde uma coluna vertebral pode ser formada por vários elementos empilhados. De acordo com a figura 11, o controle individual de cada elemento é feito através de sistema binário externo que permite a alimentação de comportamentos. Isso é possível porque cada vértebra (componente) contém um circuito integrado para ser ativado, com rotação máxima de 90° (de um módulo em relação ao outro) e com flexões apropriadas.

O material é uma liga monocristalina de cobre superelástica (CuAlNi). Esse material tem uma baixíssima histerese térmica. Ele se comporta como um elástico normal até um certo nível de tensão atingida a partir da qual há deformação em vários pontos percentuais, sem qualquer mudança significativa no platô da curva tensão-deformação. Assim, essa deformação é totalmente reversível (PEIRS, 1997).

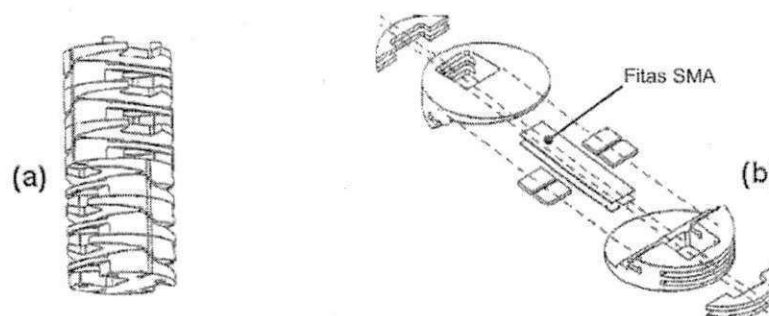


Fig. 11 – (a) sistema modular de colonoscopia montado com fita SMA em posição ortogonal; (b) módulo em perspectiva explodida com peças desmontadas (PEIRS, 1997)

Conforme é mostrado na figura 12, outro miniaturador de uso médico é concebido para mudar o ângulo de visualização na ponta de um endoscópio. O ângulo de visão pode ser alterado em mais de 140° e girando o espelho em mais de

70°. O sistema tem um diâmetro de 11mm e um comprimento de 20 mm. Um sistema de polias foi utilizado e um fio SMA de 80 µm de diâmetro é enrolado em torno do eixo do espelho para assegurar um braço de alavanca muito pequeno. Quando o fio SMA é aquecido, torna-se mais curto cerca de 3% e faz rodar o espelho. Quando o fio SMA esfria, uma mola de torção colocada sobre o eixo espelho (não visível), traz o espelho de volta para a posição inicial.

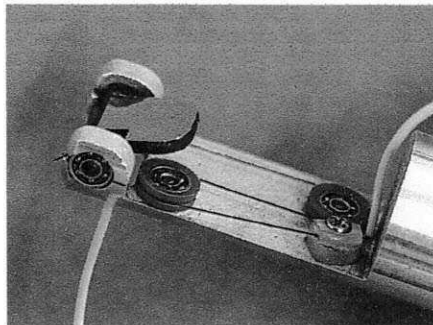


Fig. 12 – Atuador endoscópico com fio SMA (PEIRS, 1997)

Peirs (1997) ainda apresenta, conforme é mostrado na figura 13, uma microválvula para entrega sistemática de drogas através da cútis. Tal microsistema evita que o paciente precise tomar múltiplas injeções por dia. Sinais de força e comando são transmitidos por um transformador transcutâneo, de tal forma que perfurações na pele não são necessárias e um controle remoto do dispositivo é possível.

Esta válvula contém três partes: um corpo de plástico, um parafuso e um fio de SMA. Suas dimensões são 8,5 x 5 x 2 mm e essas pequenas medidas permitem a integração da válvula com uma placa de circuito impresso (PCB), controlando eletronicamente e, portanto, simplificando as conexões elétricas. A pinça abre quando o feixe central é elasticamente deformado por uma contração do fio SMA. Um aquecimento resistivo simples induz esta contração na SMA. Quando o fio SMA arrefece, a pinça fecha novamente em virtude da elasticidade da articulação.

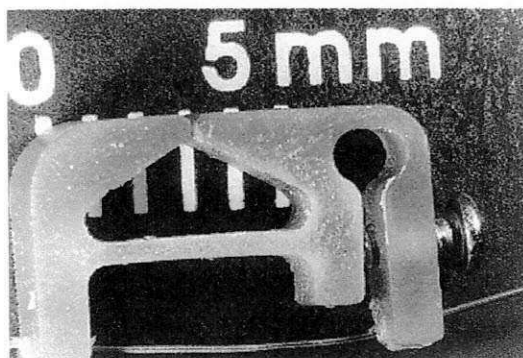


Fig. 13 – Válvula com fio atuador de SMA (PEIRS, 1997)

Segundo Peirs (1997), as aferições mostraram um consumo de energia de 80 mJ por ciclo. Neste caso, a válvula abre em 0,66s, de modo que o consumo de energia nessa instância é cerca de 120 mW. O produto beneficia pacientes que necessitam de múltiplas injeções diárias ao longo de um período longo de tempo. Foram realizados 10.000 ciclos de administração e nenhum vazamento de droga ocorreu. Estes 10.000 ciclos correspondem a, aproximadamente, 5 injeções por dia ou longo de 5 anos.

Reynaerts (1998, p. 643) também demonstra, conforme figura 14, um protótipo projetado para ser integrado em um dedo robótico como atuador interfalângico. O comprimento total do fio é de 360 mm e a rotação máxima é de 90°. O dispositivo usa um fio de $Ni_{48}Ti_{52}$ com seção retangular (1,75 x 0,15 mm). A SMA utilizada foi treinada para um alongamento máximo de 3%.

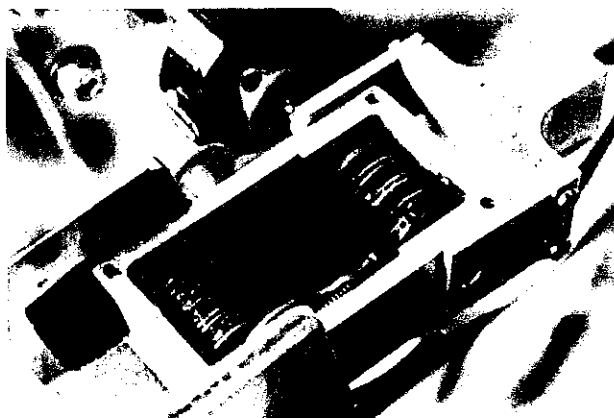


Fig. 14 – Válvula com fio atuador de SMA (REYNAERTS, 1998)

As Temperaturas de Transformação para este material são de $A_s=58^{\circ}\text{C}$, $A_f=63^{\circ}\text{C}$, $M_s=52^{\circ}\text{C}$ e $M_f=38^{\circ}\text{C}$. O atuador é arrefecido por bombeamento de óleo através da própria caixa. As dimensões totais deste atuador são 40x30x15 mm. Ele é acionado por um amplificador de corrente com base em *Silicon Controlled Rectifier* (SCR). Este amplificador tem uma potência nominal de 15 W e uma picopotência de saída de 100 W.

Segundo Reynaerts (1998, p. 647), em alguns microssistemas a pinça é concebida separadamente do atuador. No protótipo ilustrado na figura 15, um cabo de aço blindado transmite a força motriz do atuador para a garra. A pinça é uma das mandíbulas montada sobre alta precisão de guia linear e acoplada por um conjunto duplo de cremalheira pinhão. Ela tem inicialmente uma posição fechada, de tal modo que o atuador SMA é usado para abri-la.

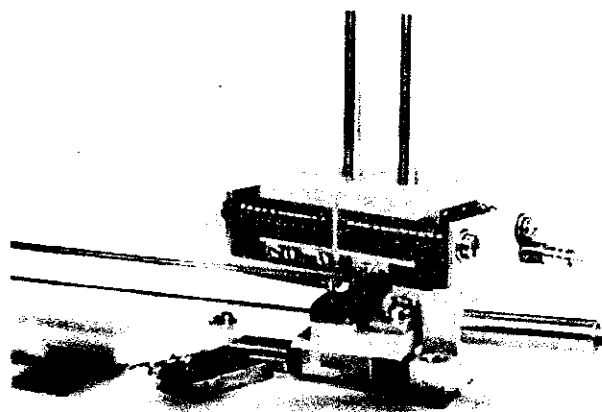


Fig. 15 – Atuador e pinça de Ni-Ti com EMF (REYNAERTS, 1998)

O elemento ativo é constituído de três fios de Nitinol paralelos cujas dimensões da secção transversal são 0,18x1,75mm, treinados para exercer uma contração de 3 pontos percentuais durante o aquecimento.

O elemento ativo, em suma, tem as seguintes características: (i) volume de 378mm³; (ii) massa de 2 gramas; (iii) uma superfície (de arrefecimento) de 4,29 milímetros; (iv) e uma resistência elétrica de 4-6 Ω (resistência esta que é dependente do grau de transformação); (v) e temperaturas de transformação (TTRs) do elemento ativo: A_s de 80°C, A_f de 100°C, M_s de 75°C e M_f de 60°C.

A eletrônica de condução consiste em um sistema de modulação por largura de pulso (PMW = *Pulse-Width Modulation* ou MLP = Modulador por Largura de Pulso) embutido em torno de três cabos paralelos acoplados. Um gerador de função origina uma onda triangular de 7,7 kHz. Este sinal é comparado a uma tensão de referência variável. O resultado é uma onda quadrada com largura de pulso variável cujo sinal serve de entrada para o consumo de energia. A tensão de referência pode ser controlada diretamente a partir de uma saída analógica ou através da entrada manual, via potenciômetro.

No contexto industrial, uma versão de atuador para óleo arrefecido é descrito por Reynaerts (1998, p. 651). Como mostrado na figura 16, o atuador é envolvido por uma caixa que permite o resfriamento do óleo. A corrente de aquecimento é controlada pelo PWM, previamente ligado a um computador equipado com uma placa de aquisição de dados. Os deslocamentos são medidos com um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), ou seja, por um Transformador Diferencial Variável Linear.

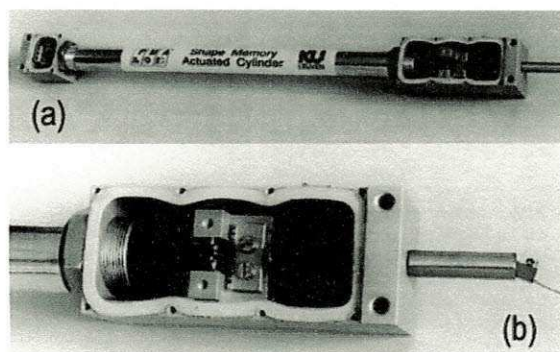


Fig. 16 – Atuador cilíndrico com EMF para fluido líquido (REYNAERTS, 1998)
(a) Visão geral de atuador; (b) visão aproximada da caixa

Para este protótipo, um dos objetivos do projeto era ter o atuador completamente hermético (fechado). O sistema de arrefecimento foi testado usando um óleo leve (SAE 30) bombeado através do atuador com um fluxo de $30 \text{ cm}^3/\text{s}$. O óleo é arrefecido num reservatório aberto com a capacidade de 5000 cm^3 . As tampas e os anexos dos tubos de refrigeração são selados com teflon. Os movimentos lineares do atuador são protegidos por uma borracha e o elemento com *efeito de memória de forma* ativo, que neste caso é um fio de composição não-especificada, é internamente ligado à fiação elétrica.

No que se refere à simulação computacional, Roh e Bae (2010, p. 770-772) discriminam um modelo matemático de fita Ni-Ti SMA capaz de mensurar os níveis de tensão x deformação sob efeito de temperaturas variadas.

A fita SMA é ligada à superfície da estrutura de acolhimento constituída por alumínio. A estrutura é integralmente modelada com o auxílio de elementos finitos de casca, que são apoiados pelo programa ABAQUS. De acordo com a figura 17, a fita virtual SMA tem uma tensão inicial na direção z. A suposta fita SMA é ativa quando a temperatura se eleva acima da temperatura austenita inicial, e, a partir deste ponto, a fita SMA ativada digitalmente provoca uma deformação por deflexão.

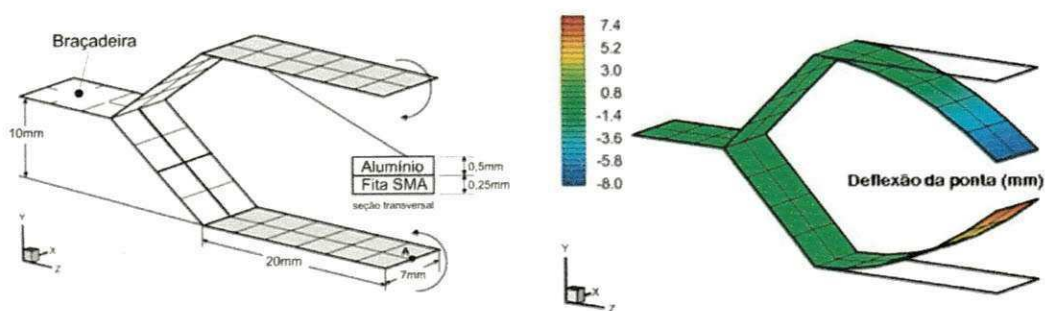


Fig. 17 – Modelo matemático de uma pinça atuadora com fita de Ni-Ti SMA (ROH e BAE, 2010)

Foi possível mostrar a partir desta fita SMA que a simulação numérica pode ser feita com sucesso para um atuador de pinça. Além disso, usando a um modelo SMA 2D, é possível projetar, avaliar e padronizar um atuador SMA com um tipo de filme rígido, antes de ser confeccionado de forma propriamente dita.

Roh e Bae (2010) consideram que, usando-se uma fita de SMA com uma deformação de 4,5%, pode-se obter uma deflexão da ponta de 7,6 mm e gerar uma força de 4,6 N quando atingida a temperatura de 120°C.

Outro dispositivo projetado para manipulação de peças usadas no trabalho de reconstrução óssea é mencionado por Zhan (2004 *apud* Bellouard, 2008, p. 587), conforme é mostrado na 18. A matéria-prima é um fio de Ti-Ni-Cu (5% em Cu) com *efeito de memória de forma* recozido à laser usando um aparelho Nd-Laser YAG laje.

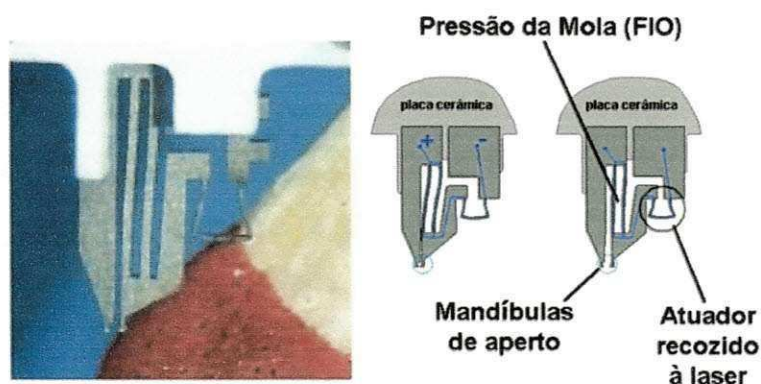


Fig. 18 – micro-pinça monolítica recozida à laser: integração de múltiplas funções num substrato

O efeito do laser no recozimento define bem os picos de transformação (endotérmico e exotérmico) no gráfico DSC. A corrente elétrica (aplicada e retirada) que percorre a fiação faz que com haja mudança de temperatura até que sejam atingidos os níveis das TTRs.

O desenvolvimento de pinças robóticas é um importante pré-requisito para o sucesso da automação na montagem de sistemas micrométricos. Mertmann (1998) apresenta, conforme é ilustrado na figura 19, dois protótipos de micropinças que desempenham a função de atuadores com garras. Além disso, devido a uma relação entre a *resistência elétrica* e a *mudança de fase* de fios (obtidos pelo processo *cold drawn*) e fitas (obtidas por *melt spun*) SMA, respectivamente, de Ni-Ti e $Ni_{50}Ti_{50-x}Cu_x$, ambas podem funcionar como sensores. Conforme Mertmann (1997), as propriedades funcionais do fio e da fita são afetadas de acordo com o TTM (Tratamento Termo-Mecânico) e a adição de cerca de 9 a 10% de cobre na liga

binária Ni-Ti proporciona melhorias nas propriedades de controle porque a diferença de histerese da resistência vs mudança de fase é reduzida. Isto se deve principalmente à ausência de uma fase pré-martensítica-R nas ligas Ti-Ni-Cu. A histerese térmica pode ser diminuída mais ainda por um tratamento termomecânico que consiste num trabalho a frio de 15%, subsequente às temperaturas de recozimento, entre 350°C e 450°C.

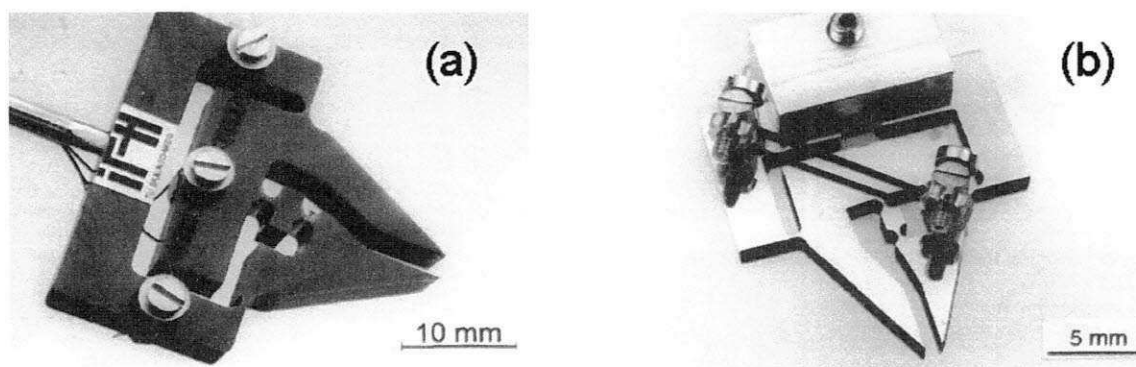


Fig. 19 – Pinças para micro-montagem contendo atuadores com memória de forma e sensores (MERTMANN, 1997, p. 622)

(a) Protótipo de uma micropinça com dobradiças de curvatura usando duas molas helicoidais em um modelo diferente de atuador (fio Ni-Ti)

(b) Protótipo de uma micropinça usando uma fita de Ti-Ni-Cu como atuador e sensor, ao mesmo tempo

Esse referencial panorâmico baseado em trabalhos realizados por pesquisadores ao longo dos últimos anos nos permite destacar a importância da aplicação acadêmica e industrial de fios e fitas com EMF, enquanto sensores e atuadores, nos diversos microssistemas criados para as mais variadas funções e distintas áreas de emprego. Isso indica que há uma importante vertente de estudos e aplicações que ainda podem ser feitos no que diz respeito ao emprego de fios de fitas SMA em produtos miniaturizados.

4.5.2 Microválvulas

Nas microválvulas, tipo especial de microssistemas, são consideradas produtivas quando processadas com tecnologias de micro-usinagem, tendo o potencial para alcançar o controle de gás de grande porte de fluxos e de diferenças de pressão relativamente grandes, inclusive com o tempo de resposta rápido e consumo baixo de energia demandada. Além disso, a perspectiva do lote de produção promete uma abordagem custo-eficiência única para a fabricação de microválvulas e abre a integração de diversos dispositivos para controle de fluidos,

permitindo assim uma abordagem modular na concepção de sistemas microfluídicos. (CLAUSI, 2008)

Diversas microválvulas que usam diferentes mecanismos de atuação têm sido investigados por muitas pesquisas acadêmicas e grupos de pesquisas nos últimos anos. Conforme Clausi (*idem, ibidem*), apesar de a variedade de dispositivos que foram construídos e testados, a configuração básica das microválvulas pode ser dividida em dois principais grupos: válvulas de assento ou válvulas de gaveta, conforme ilustrado na figura 20:

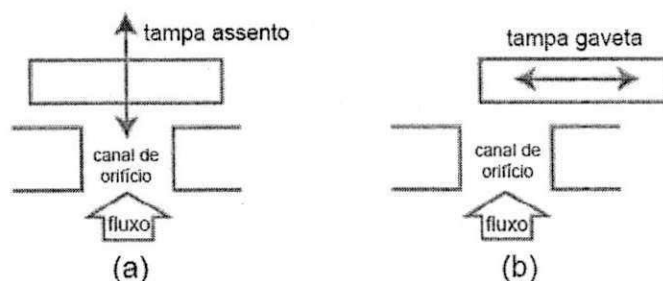


Fig. 20 – Princípio de funcionamento da: (a) válvula de assento e (b) válvula tipo gaveta

De acordo com Clausi (*id., ibid.*), ligas com EMF apresentam geralmente maior densidade de energia, o que faz possível reduções de tamanho à escalas microscópicas, permitindo benefício de transporte de calor melhorado e aumentando a sua velocidade de resposta. Outras notáveis vantagens do EMF para microaplicações são a sua simplicidade e a exigência de baixa tensão.

As microbombas são capazes de manipular precisamente volumes consideráveis de fluidos que têm o potencial para revolucionar as aplicações de entrega de droga, injeção de combustível e sistemas de análise química. Segundo Bernard (1998, p. 248) e Vandelli *et al* (1998) *apud* Ribas (2011, p. 15), a resistividade da película fina SMA é adequada para aquecimento por efeito Joule, pois permite o controle elétrico direto do atuador. Conforme figura 21, dois desenhos de microbombas foram fabricados, sendo que a taxa máxima de fluxo de água atingida foi de 50ml/min.

A parte superior representa a parte de atuação propriamente dita. O aquecimento, para dilatação térmica, e o esfriamento de um determinado material permitem o movimento. Este material é colocado em ambos os lados do atuador e excitado de forma complementar: quando um lado aquece e se dilata, o outro esfria e retorna ao seu tamanho original, sugando ou bombeando o líquido através da cavidade central. (RIBAS, 2011, p. 15)

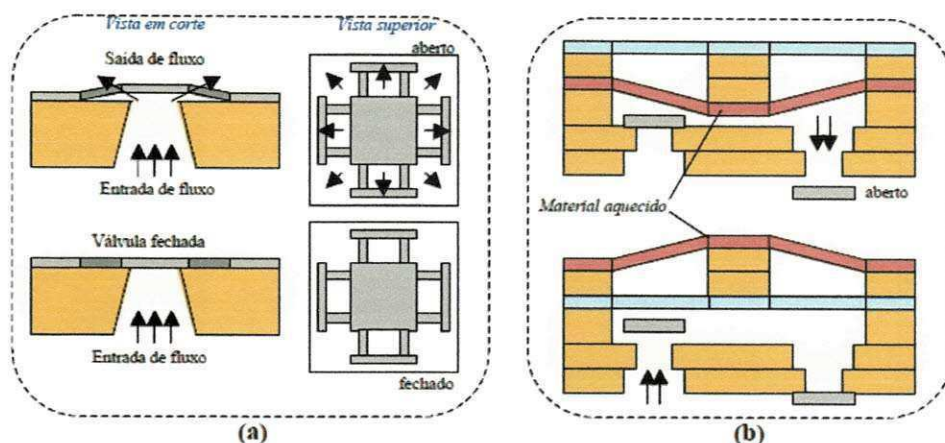


Fig. 21 – Estruturas funcionais Micro-fluídicas: (a) microválvula e (b) micro-bomba (BERNARD, 1998, p. 248) e (VANDELLI *et al*, 1998) *apud* (RIBAS, 2011, p. 15)

Vandelli *et al* (1998), especificamente, faz uma série de considerações acerca dos modelos fluídicos existentes nas microválvulas a partir dos números de Reynolds e das equações de Navier-Stokes, pois elas são fundamentais no controle de variáveis como pressão, viscosidade, temperaturas, forças gravitacionais e conservação de massa.

Uma microválvula constituída com SMA e dotada de sensor de fluxo é apresentada por Piccini (2006, p. 345-346). Um fio de Nitinol atuador é acoplado numa estrutura de silicone e combinado com um termopar, formando um sistema integrado para o controle e medição dos volumes gasosos. Conforme é ilustrado na figura 22, o dispositivo integrado tem um design fechado com uma pressão de ruptura de 68,9 kPa (517 mmHg), dimensões na ordem de 1x2x2mm e superfícies inertes de contato com fluidos.

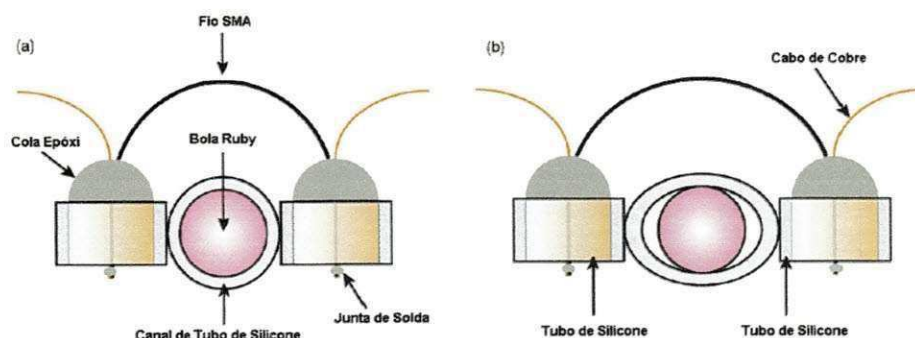


Fig. 22 – (a) Válvula no seu estado não-atuado (fechado); (b) no estado atuado (aberto)

Pulsos de energia de 213mW são necessários para 2,5s de resposta. A abertura da válvula é provocada por uma temperatura de transição induzida

metalurgicamente num pequeno pedaço de fio de Nitinol com um diâmetro aproximado de 75 μ m, cuja temperatura austenita é de 70°C.

Para o ensaio, um tanque de ar comprimido foi utilizado com um regulador ajustável para efeito de propulsão do fluido através da válvula nas pressões definidas. Um segmento longo de 100 milímetros com 101 μ m de sílica fundida ID (*Polymicro Technologies, LLC*) foi a tubagem resistiva utilizada em série na entrada da microválvula como um limitador de fluxo. O fluxo foi observado visualmente na saída microválvula medindo-se a passagem fluídica através de um tubo de vidro de diâmetro capilar utilizando uma régua métrica e uma lupa (PICCINI, 2006).

Uma microválvula biestável foi apresentada por Menning (2011), com a co-autoria de Barth (*ibidem*), cuja atuação de fechar/abrir é promovida nas partes superior e inferior da mesma, conforme ilustra a figura 23.

A disposição de um pedaço de fita SMA é baseada numa estrutura cortada em forma de roda de quatro feixes que se juntam em uma placa central comum. A passagem da corrente elétrica gera um aquecimento que produz, por efeito Joule, uma alteração na temperatura desta micro-fita.

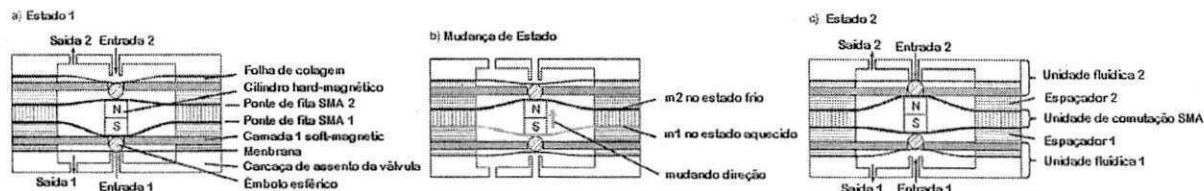


Fig. 23 – Vistas seccionais longitudinais: (a) Entrada-2 aberta e Entrada-1 fechada; (b) Entradas 1 e 2 abertas; (c) Entrada-1 aberta e Entrada-2 fechada

A figura 24 mostra uma vista superior da micro-fita SMA cujo tipo específico de corte não foi mencionado. O comprimento, largura e espessura de cada feixe são, respectivamente: 1,5 mm; 0,18 mm; e 0,017 mm. O diâmetro da placa central é de 0,8mm. Para entrar em contato elétrico, duas bandeiras de contacto são fornecidas em ambas as extremidades da superfície SMA.

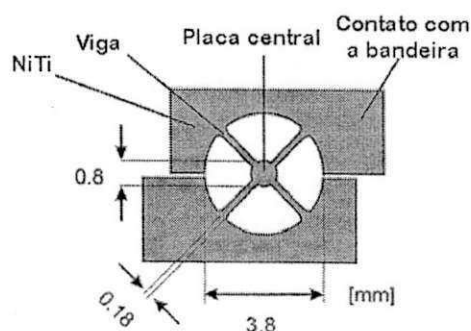


Fig. 24 – Dimensões gerais do atuador Ni-Ti SMA (MEGNIN, 2011)

A pré-deflexão é dada pela diferença entre a espessura do cilindro rígido-magnético e a espessura do substrato polimérico. Para evitar efeitos de fadiga, a deflexão preliminar limita-se a 400 μm , devido à tensão de transformação máxima permitida de 0,8%. Neste caso, aquecimento e arrefecimento alternados resultam num curso máximo de cerca de 100 μm . A transferência de calor entre os dispositivos é evitada por camadas térmicas isolantes utilizadas para a colagem do cilindro e da massa térmica do cilindro. A força máxima de comutação que pode ser gerada pela unidade de comutação SMA após aquecimento (deflexão) é determinada para atingir precisamente os 290 mN.

Depois de afinar a espessura dos espaçadores de 1 e 2 para uma dada diferença de pressão, a pilha da microválvula é finalmente ligada. A figura 25 mostra a microválvula SMA 3/2-vias biestável com mais dimensões de 11 mm \times 6 mm \times 4 mm, sem as ligações fluidicas no lado superior e inferior.

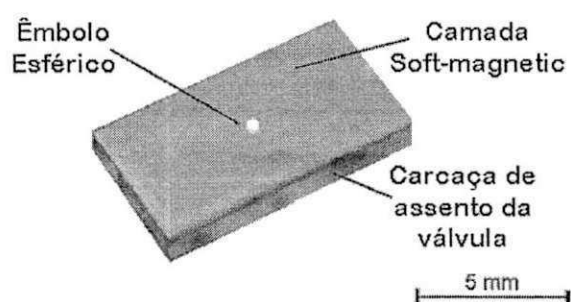


Fig. 25 – Aspecto tridimensional panorâmico da microválvula (MEGNIN, 2011)

Posteriormente, em um artigo mais denso, englobando as engenharias elétrica, mecânica e de materiais, Barth (2012) reapresenta, em parceria com Megnin (*ibidem*), o leiaute de fabricação da microválvula SMA biestável (ou bidirecional) com travas magnetostáticas, além de outros atributos. As dimensões globais do dispositivo são 11x6x3 mm. As simulações são feitas usando o método dos elementos finitos e o funcionamento biestável é mostrado para pressões diferenciais até 300 kPa para o gás (N_2) com altas taxas de fluxo de 2200 sccm. A potência elétrica utilizada no chaveamento entre os estados fechado/aberto foi determinada por osciloscópio.

O sistema proposto, de acordo com a figura 26, constitui-se de outros materiais como ímãs permanentes NdFeB (terras-raras) e um material magneticamente mole (*soft magnetic material*) especificado apenas pela indução remanescente (B_r) e permeabilidade magnética relativa igual a 800.

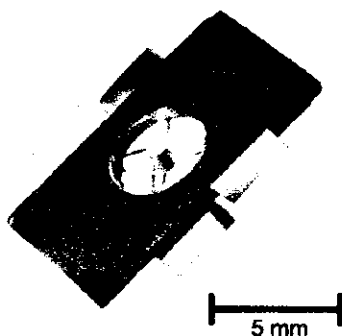


Fig. 26 – Foto ilustrativa do microatuador SMA bidirecional (BARTH, 2012, p. 81)

A microfita de $Ni_{51}Ti_{49}$ tem 20 μm de espessura. O efeito de comutação biestável (flexão e deflexão) é baseado em uma transformação estrutural entre a fase romboédrica e as temperaturas mais baixas, assim como entre a fase austenita e as temperaturas mais elevadas. O uso da transformação da fase-R oferece vantagens em termos de desempenho de comutação, constantes de tempo, fadiga e histerese térmica.

De acordo com a figura 27, a microválvula é formada dos seguintes elementos:

(a) fotografias dos componentes desmembrados da válvula:

1 - camada-I *soft-magnetic*; 2 - calor folha de ligação ativado; 3 – espaçador 1; 4 - microatuador bidirecional SMA (ímã com 0,75 mm); 5 – espaçador 2; 6 - êmbolo esférico; 7 - parte fluidica que consiste de camada-II *soft-magnetic*, membrana e carcaça da válvula de assento;

(b) Foto da microválvula SMA biestável montada, com as ligações fluidicas na parte inferior.

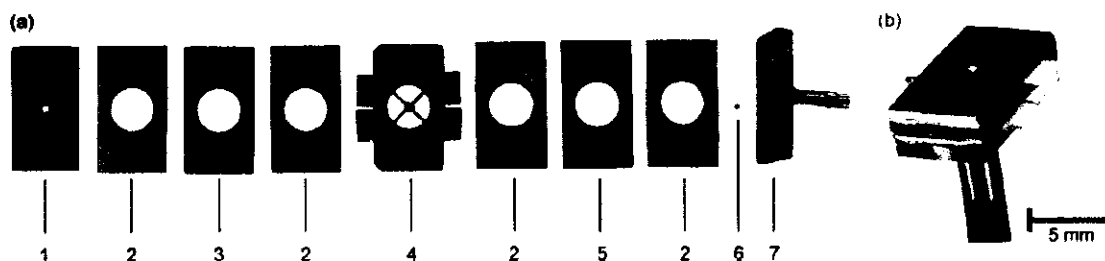


Fig. 27 – Microválvula SMA bidirecional: (a) desmontada; (b) montada (BARTH, 2012, p. 82)

Vemos também que as microválvulas são produtos que têm um importante potencial de aplicação de fios e fitas SMA e que são capazes de oferecer possibilidades de pesquisas acadêmicas e também de aplicações industriais.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Fabricação da liga Ti-Ni-Cu

As porções fundidas da liga de $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ foram produzidas pela técnica PSPP (*Plasma Skull Push-Pull*) usando a máquina *Discovery All*, apresentada na figura 28. Cada porção dessa liga, pesando cerca de 40 g, foi fundida nesse equipamento com a potência de fusão variando de 15-17 kW, com pressão interna da câmara 10^{-2} Pa. Essa máquina utiliza o plasma térmico como meio de transmissão de energia para fundir a maioria dos metais (exceto metais com alto teor de zinco), inclusive titânio, níquel, cromo e cobalto. Nesse equipamento, o gás de arrasto utilizado é o argônio, que pertence à classe dos gases nobres, cuja característica principal é a de ser inerte, ou seja, não se combinar com nenhum outro elemento químico, sendo encontrado na natureza em pequenas proporções. Atmosferas de argônio permitem fundir metais e suas ligas totalmente livres de oxidação. Para evitar a contaminação do metal fundido pelo material do cadinho, é utilizado o processo *Skull* de fusão, em que o material é fundido sobre uma fina camada dele mesmo. O equipamento *Discovery* é utilizado nos processos de fundição e de conformação através do sistema *Push-Pull* (empurra-puxa, injeção de metal fundido no molde), onde o molde é submetido a uma pressão de 0,2 MPa (2 kg/cm²) na parte superior e vácuo na parte inferior, resultando em uma fundição de alta qualidade e total segurança.

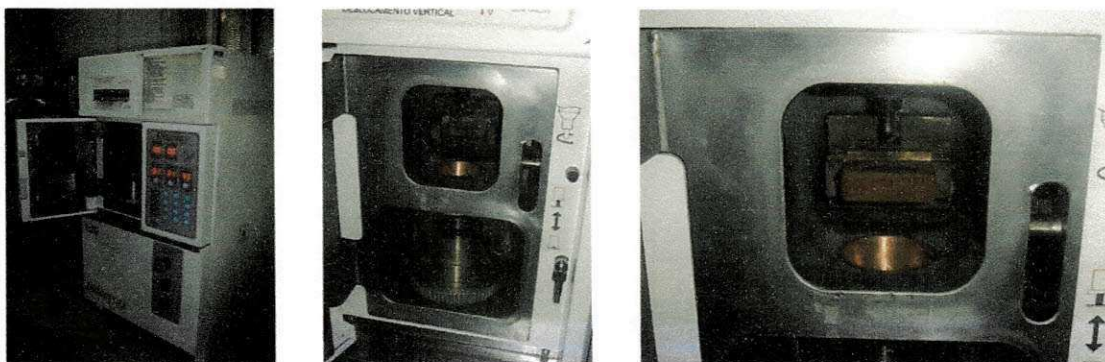


Fig. 28 – Máquina *Discovery All* (Departamento de Engenharia Mecânica da UFCG)

5.2 Obtenção das fitas de Ti-Ni-Cu com EMF por *Melt Spinning*

O *Melt Spinning* é um método de solidificação rápida em que o metal fundido é resfriado em contato com um substrato de alta condutividade térmica que gira em velocidade controlada, como mostrado na figura 29. Nesse processo, a solidificação do metal fundido se dá de forma rápida de tal forma que não há tempo suficiente

para que ocorra uma cristalização completa, ou seja, para que haja 100% de organização atômica. Porções de ligas foram previamente colocadas no interior de um cadinho, o qual é alojado no interior de uma bobina de indução que se encontra numa câmara com atmosfera inerte de gás argônio. A ejeção da liga líquida ocorreu na temperatura de aproximadamente 1350°C, com uma pressão de 200 mbar, sobre um volante de cobre em movimento com velocidades de 38 m/s e 50 m/s. A distância da ponta de ejeção do cadinho para o volante foi de 0,5 mm e o ângulo entre o cadinho e o vetor normal à roda foi de 5°.

Nesse método, a liga é fundida por indução em um cadinho de quartzo. O metal fundido é ejetado sob pressão de gás elevada a uma velocidade controlada, contra um disco de cobre rotativo resfriado (resfriamento *splat*). Esse é o método usado para obtenção da fita de Ti-Ni-Cu.



Fig. 29 – Foto ilustrativa de um equipamento *Melt Spinning*² em funcionamento

Dependendo da velocidade escolhida no processo de obtenção da fita resfriada, as dimensões resultantes podem ser alteradas, pois tanto a espessura como a largura dependem da velocidade. O comprimento varia de acordo com a massa total da porção fundida usada.

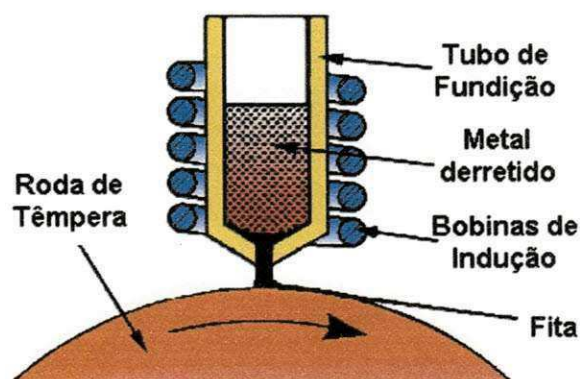


Fig. 30 – Desenho esquemático do método *Melt Spinning*

² http://www.psiltd.co.uk/Portals/0/Images/1_8RapidSolid/WirecastingLarge.jpg

As fitas obtidas por este processo de solidificação rápida têm a aparência semelhante à mostrada na figura 31, variando-se, esporadicamente, o brilho, a porosidade e o comprimento, entre outras características.

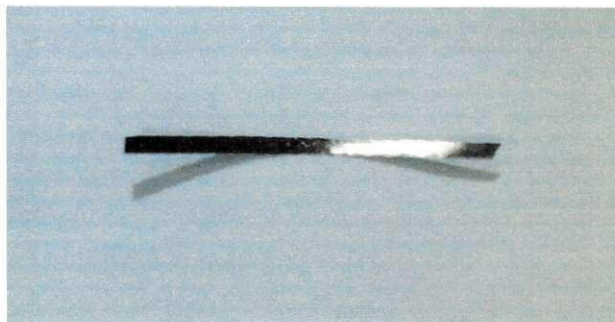


Fig. 31 – Exemplo de fita de Ti-Ni-Cu obtida pelo método de solidificação *Melt Spinning*

5.3 Tratamento térmico das fitas

A fita Ti-Ni-Cu obtida depois do processo de solidificação rápida foi submetida a um tratamento térmico para eliminar defeitos e tensões internas. As amostras foram tratadas em forno elétrico modelo *Platinum Quartz – Titan*, conforme figura 32, a uma temperatura de 750°C e por 3 horas (RAMOS, 2011).



Fig. 32 – Equipamento *Platinum* usada para efeito de tratamento térmico

Este tratamento foi necessário para eliminar os defeitos provenientes da solidificação rápida e consequentemente devolver ao material a característica de *memória de forma* registrada através da subsequente técnica termoanalítica de caracterização DSC.

5.4 Caracterização das fitas por DSC

A caracterização da liga de Ti-Ni-Cu com Efeito Memória de Forma é feita por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), a qual consiste na medição da quantidade de energia térmica absorvida ou liberada por uma amostra ao ser submetida a um ciclo térmico de aquecimento e resfriamento que ultrapasse as temperaturas de transformação (TTRs). Isso permitirá a determinação específica das temperaturas inicial e final das fases austenita e martensita, respectivamente no aquecimento e no resfriamento.

Foram utilizadas no experimento com o DSC duas fitas específicas: uma obtida por *melt-spinning* com a velocidade de 38 m/s e a outra obtida com a velocidade de 50 m/s. Em ambas, tanto sem tratamento como com tratamento térmico, foram observadas as curvas características das TTRS, com maior acentuação dos picos nas curvas obtidas a partir das fitas tratadas.

O aparelho DSC, pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, é da Marca *TA Instruments*, modelo Q20 (conforme figura 33), com especificações térmicas: faixas mínima e máxima de temperatura de -60°C a 450°C e taxas de aquecimento usuais de 5°C ou 10°C por minuto.

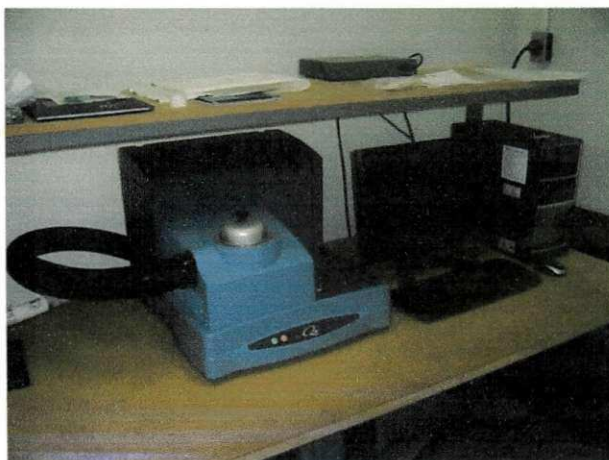


Fig. 33 – Calorímetro Exploratório Diferencial (DSC) - DEM

5.5 Análise Mecânica-Dinâmico (DMA)

O TA *Instruments* Q-800 - Analisador Dinâmico Mecânico (DMA) foi usado para testar as variações percentuais dos módulos de elasticidade da fita de Ti-Ni-Cu submetida à variação crescente de temperatura. Basicamente, a deformação é aplicada à amostra a fim de avaliar a relação do módulo de elasticidade com a mudança térmica. As grandezas atribuídas são medidas utilizando tecnologia de

codificador ótico que fornece sensibilidade e resolução. O aparelho fornece medições da viscoelasticidade em materiais a partir de 1000 Pa a 1000 GPa, com um intervalo de temperatura de operação entre -150°C a 600°C e faixa de frequência de operação em torno de 0,01 a 200 Hz. A gama de força é 0,0001-18 Newtons, assim como a amplitude é de 0,5 a 10.000 microns. A taxa de aquecimento mais usada é a de $5^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$.

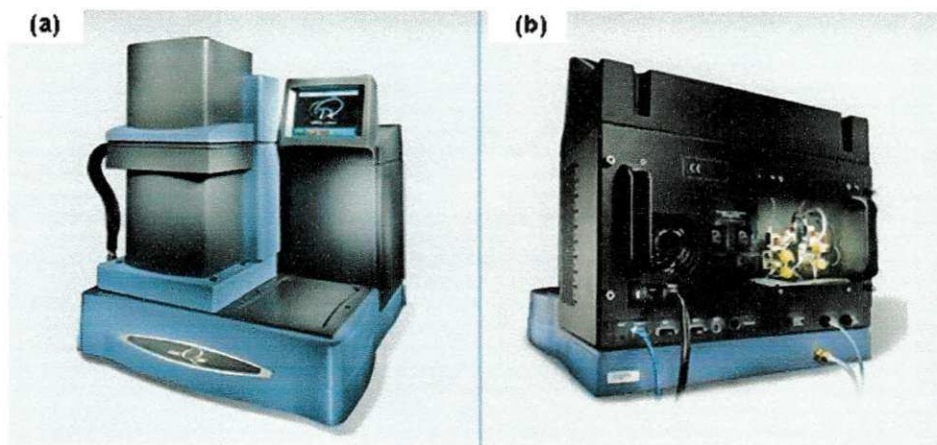


Fig. 34 – Máquina Q-800 TA Instruments para testes DMA: (a) vista frontal; (b) vista posterior

5.6 Teste de Resistência Elétrica em função da Temperatura

O equipamento térmicorregulável (ou termorregulável) é da marca Cole-Parmer, modelo 12101-56CE. Acoplado ao equipamento é interligado um banho que consiste em um componente de sistema de medição onde é possível trabalhar entre -20°C a 200°C . A faixa térmica com a qual se trabalhou no experimento da fita foi de 0°C a 90°C .

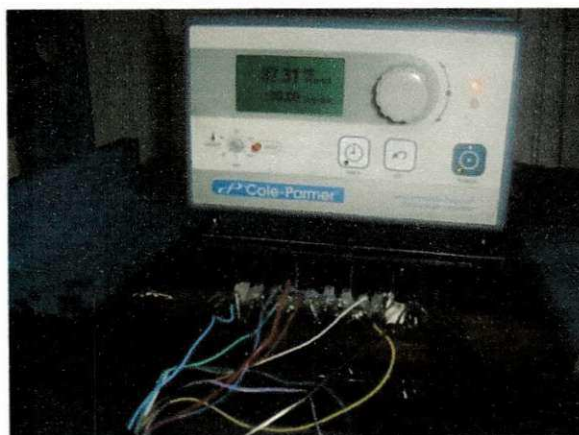


Fig. 35 – Aparelho usado para captação de dados (DDP e Temperatura)

O sistema possui um reservatório de 13 litros do fluido que imergiu a amostra da fita Ti-Ni-Cu. O fluido no qual a fita fica imersa é o óleo de silicone Rhodorsil

47V50, da Rhodia Silicones. A fonte de alimentação em corrente contínua é da marca Agilent, modelo E3633A. A corrente elétrica constante usada foi de 0,3A. A tensão elétrica varia de acordo com a temperatura.

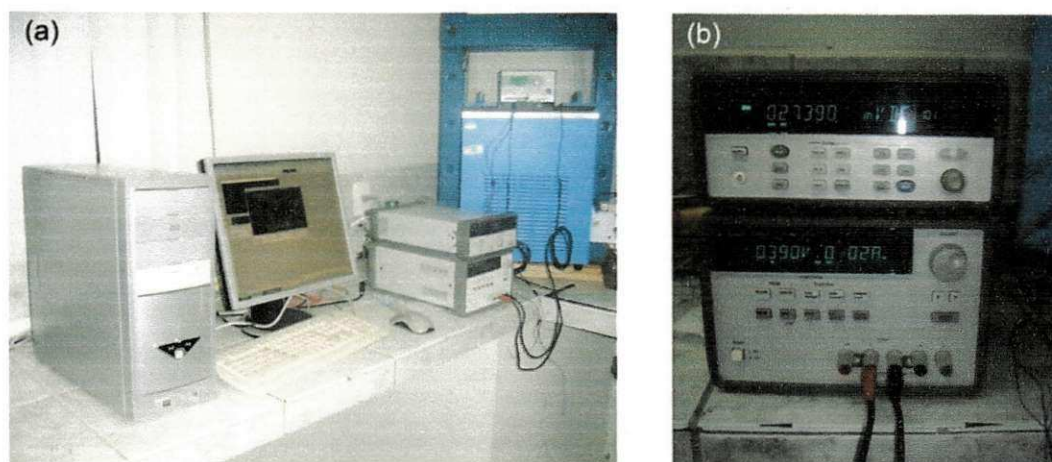


Fig. 36 – (a) Aparato para medição da Resistência Elétrica (Ω) em função da Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); (b) Fonte de Corrente Contínua 0,302A e intensidade de tensão variável

O sistema de aquisição de dados é da marca Agilent, modelo 34970A, equipado com um módulo multiplexador de 20 canais, com precisão de leitura de até 6 dígitos. Esse sistema de aquisição permite fazer a medição da resistência elétrica de forma direta e indireta através do método de dois ou quatro pontos. (REIS, 2010)

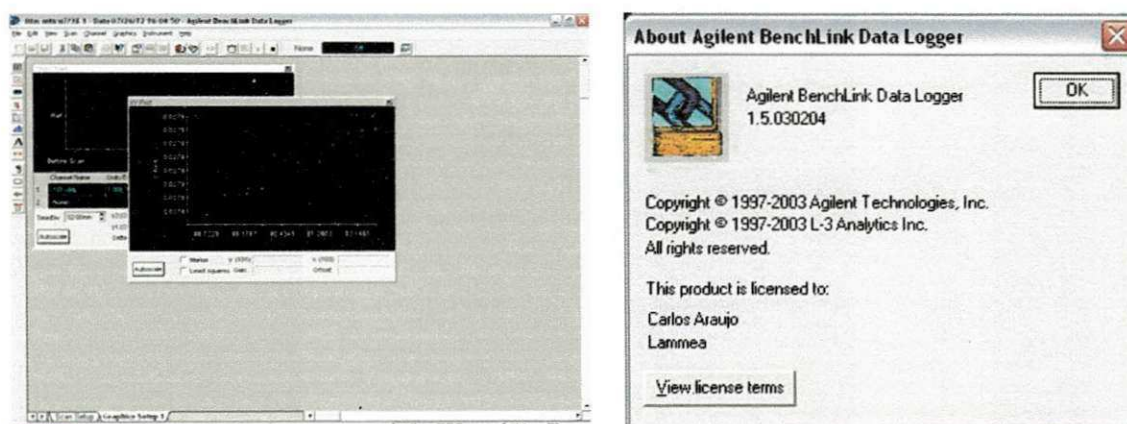


Fig. 37 – Telas ALT + Print Screen Sys Rq do software usado na obtenção dos dados Res x Temp

5.7 Projeto tridimensional da microválvula (dimensões: 2 x 5 x 8 mm)

O projeto da microválvula foi desenvolvido no AutoCAD em nível bi e tridimensional a partir das vistas ortográficas cotadas e depois representado em várias perspectivas e cortes transversal e longitudinal, com otimização dos componentes internos, materiais e dimensões. As especificações técnicas foram feitas mediante a adoção teórica dos dados experimentais obtidos em laboratório bem como a partir dos testes práticos e das caracterizações realizadas.

5.8 Particularidades da Microválvula

Embora existam microssistemas que funcionem exclusivamente como sensor ou como atuador, a fita usada no microssistema que será tema do desenvolvimento deste projeto terá as funções simultâneas de sensor e atuador. Podemos afirmar que os sensores fornecem parâmetros sobre o comportamento do componente, geralmente em termos de posição e velocidade dos *links* em função do tempo e do modo de interação entre o sistema e o ambiente de operação, enquanto que os atuadores convertem energia elétrica, hidráulica ou pneumática, em potência mecânica. Através dos sistemas de transmissão, a potência mecânica gerada pelos atuadores é enviada aos *links* para que se movimentem.

A microválvula é um tipo de microssistema que controla abertura ou fechamento para fluxo de fluidos, ou seja, impede ou permite a passagem destes num domínio ou subdomínio, por efeito de atuação mecânica. Quando a microválvula incorpora elementos eletro-eletrônicos em seu *design* é porque a atuação mecânica é medida, controlada, acionada e temporizada.

O projeto da microválvula que foi desenvolvido se baseia na configuração esquemática do microssistema apresentado por *Bellouard* (2008, p. 586). A válvula miniaturizada é mostrada na figura 38 em corte longitudinal vertical. As dimensões da caixa de montagem são 8 mm (comprimento), 5 mm (largura) e 2 mm (altura).

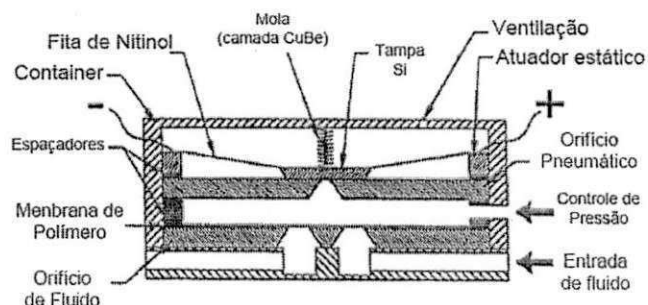


Fig. 38 – Microválvula com sensor/atuador SMA em fita Ni-Ti – sugerida por *Bellouard* (2008)

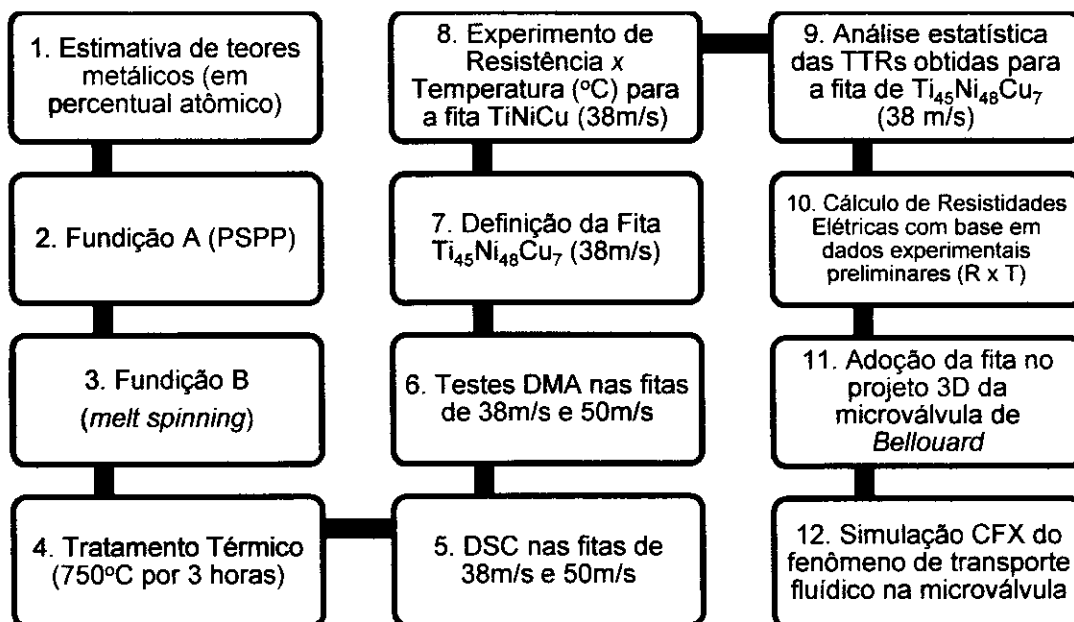
A fita metálica presente na microválvula recebe uma corrente elétrica controlada que modifica a estabilidade térmica e permite conseqüentemente uma alteração geométrica da fita, por efeito de movimentação atômica adifusional. Isso causa tensão por tração que pressiona a mola superior de contenção. No orifício em que a tampa está posicionada, haverá o controle de passagem do fluido que emana do vão inferior. (BELLOUARD, 2008)

Na fase martensita, a tampa presa à fita fechará temporariamente o orifício por causa da ausência de corrente. Quando houver condução elétrica na fita, a

mesma aumentará a temperatura, por efeito Joule, até a fase austenita. Isso é exigido para que haja mudança de comprimento capaz de fazer com que a fita de Ti-Ni-Cu diminua e, portanto, permita a passagem de fluido em sua abertura.

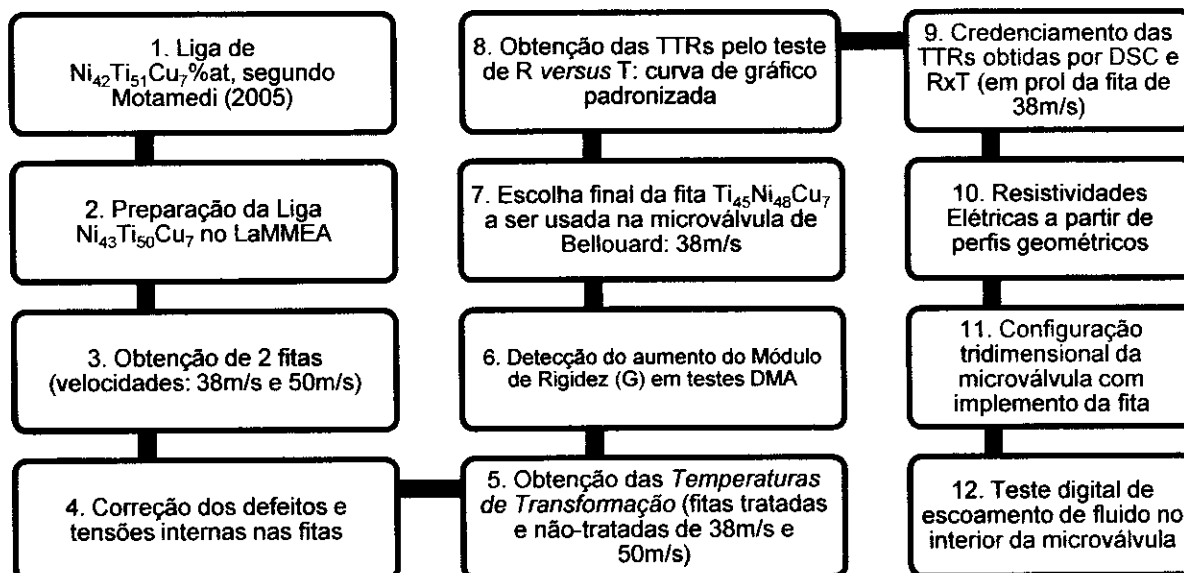
5.9 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Em nosso estudo, a metodologia adotada pode ser visualizada nos quadros 3 e 4, nos quais se ordenam as atividades a serem desenvolvidas durante a pesquisa.



Quadro 3 – Organograma das atividades desenvolvidas

De acordo com a sequência a partir da qual as atividades foram elencadas no organograma anterior, podem assim serem discriminadas:



Quadro 4 – Organograma com detalhamento das atividades realizadas

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em nosso trabalho, as porções obtidas mediante fundição simultânea dos três elementos metálicos, a fim de se obter uma maior homogeneidade, têm uma aparência escura devido à ocorrência de deposição de óxidos na superfície, conforme demonstra a figura 39 em escala milimétrica. Contudo, foi feita uma limpeza superficial da porção, que neste exemplo tem cerca de 3 centímetros de comprimento.



Fig. 39 – Porção da liga $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ obtida por fundição, utilizando a máquina *Discovery All*

A liga obtida tem, em termos de peso, 43% de Níquel, 50% de Titânio e 7% de Cobre. Posteriormente, a mesma foi processada por *melt-spinning* na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) a fim de se obter as fitas de liga ternária policristalina com velocidades de 38 m/s e 50 m/s e sob a supervisão do Professor Dr. Walman Benício de Castro. Depois disso, as fitas obtidas foram submetidas a um processo de tratamento térmico com o forno *Platinum Quartz*, do Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas – LaMMEA, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UFCG), com o objetivo de eliminar os defeitos e tensões internas. Houve a caracterização DSC das fitas tratadas e não-tratadas a fim de se obter as temperaturas de transformação de fase no estado sólido. Essas fases são chamadas de *martensita* (sob resfriamento) e *austenita* (sob aquecimento) e resumem através desses termos, o movimento adifusional dos átomos submetidos a uma variação controlada de temperaturas.

6.1 Caracterização DSC

A caracterização por DSC das fitas de $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ cujas massas foram de 0,8 mg (\pm massa do cadinho) determinou as energias capazes de propiciar as transformações dos arranjos atômicos que distinguem as fases Martensita e Austenita. Neste caso, o que ocorre é uma distorção da rede cristalina cujas temperaturas características estão associadas diretamente às energias demandadas. Foram feitas as caracterizações de duas fitas obtidas por *Melt Spinning* com velocidades de 38 m/s e 50 m/s, tratadas termicamente a 750°C por 3 horas. Escolhemos essas duas fitas pelo fato de preencherem melhor aos requisitos de possuírem registros térmicos de transformações acima da temperatura ambiente. Esta condição se adequa às situações de uso na microválvula, observando-se também as menores energias de entalpia e histerese térmica.

Na figura 40, as energias máximas registradas para a fita $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ solidificada rapidamente na velocidade de 38 m/s e tratada termicamente por 3 horas a uma condição térmica de 750°C , foram: $H_A=7,4$ J/g (para a fase martensita) e $H_M=7,4$ J/g (para a fase austenita). Obteve-se no gráfico da fita tratada as temperaturas $A_p=58,2^\circ\text{C}$ e $M_p=41,8^\circ\text{C}$ para os picos endotérmico e exotérmico, respectivamente. No aquecimento, as temperaturas austeníticas inicial e final foram, respectivamente, $A_s=53,2^\circ\text{C}$ e $A_f=63,4^\circ\text{C}$. Já no resfriamento, as temperaturas martensíticas obtidas foram, respectivamente, $M_s=50,9^\circ\text{C}$ e $M_f=36,4^\circ\text{C}$. A amplitude térmica de aquecimento ($e_h = A_f - A_s$) é igual a $10,2^\circ\text{C}$ enquanto que a amplitude térmica de resfriamento ($e_c = M_s - M_f$) é igual a $14,4^\circ\text{C}$.

A histerese térmica de transformação de fase é um dado muito importante para se obter precisão da amplitude de temperatura demandada. A histerese pode ser calculada com a seguinte fórmula:

$$\Delta_H = A_{50} - M_{50} \quad (1)$$

Para a fita tratada de $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ obtida com a velocidade de 38 m/s, a histerese foi de aproximadamente $14,6^\circ\text{C}$.

Observemos também no gráfico da figura 40 que a fita não-tratada não apresenta picos tão acentuados quanto aos apresentados pela fita tratada, porém isso não aponta estado amorfo, mas apenas o fato de que a fita não-tratada contém muitos defeitos em virtude do processo de solidificação rápida. Registrou-se para esta as energias de entalpia de $H_A=10,5$ J/g (austenita) e $H_M=13,1$ J/g (martensita).

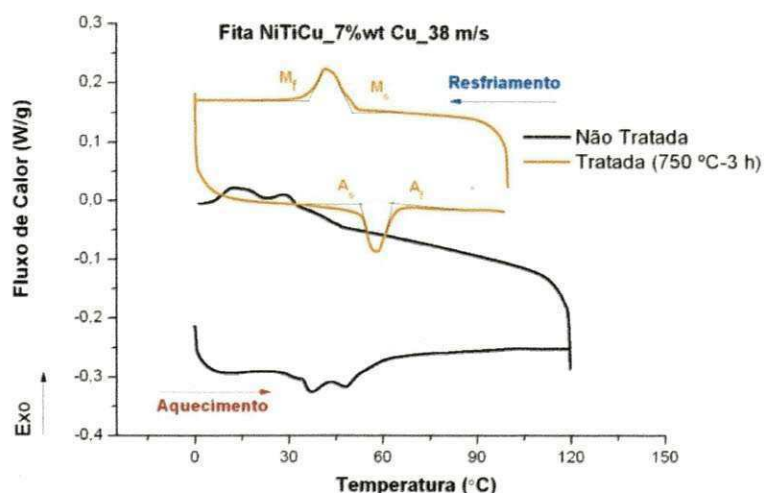


Fig. 40 – Resultado da caracterização DSC sobre as TTRs da fita $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ obtida por 38 m/s

Na segunda fita de $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$, de acordo com a figura 41, as energias de entalpias registradas para a fita solidificada rapidamente na velocidade de 50 m/s e tratada termicamente por 3 horas a uma condição térmica de 750°C foram: 21,5 J/g (para a transformação da fase austenita) e 21,5 J/g (para a transformação da fase martensita). Obteve-se para a fita tratada as temperaturas extremas M_p (45,4°C sob resfriamento) e A_p (60°C sob aquecimento). A temperatura A_p é o pico endotérmico onde foi absorvida pela fita a energia necessária para a transformação da fase austenita enquanto que a temperatura M_p é o pico exotérmico onde houve liberação de calor por efeito de transformação da fase martensita.

Na figura 41, observamos que, quando no aquecimento, as temperaturas austeníticas inicial e final foram, respectivamente, $A_s=55,1^\circ C$ e $A_f=64,4^\circ C$. No resfriamento, as temperaturas martensíticas verificadas foram, respectivamente, $M_s=51,7^\circ C$ e $M_f=38,2^\circ C$. A amplitude térmica de aquecimento ($e_h = A_f - A_s$) é igual a 9,3°C enquanto que a amplitude térmica de resfriamento ($e_c = M_f - M_s$) é exatamente igual a 13,5°C.

Para a fita tratada de $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ obtida com a velocidade de 50 m/s, a histerese térmica de transformação de fase foi 14,78°C.

Fazendo uma comparação entre as duas histereses obtidas nas fitas tratadas de $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ obtidas em velocidades de 38 m/s ($H_T=14,6^\circ C$) e 50 m/s ($H_T=14,8^\circ C$), entendemos que a diferença entre estes valores (0,18°C) é favorável à esta primeira, pois a menor histerese demanda energia mínima e menos tempo de sensibilidade e atuação.

No gráfico ilustrado na figura 41, a fita não-tratada é desprovida de picos bem definidos devido a ocorrências dos defeitos internos que são gerados pela rapidez da solidificação. No processo *Melt Spinning* há um cilindro giratório de cobre que, devido ao seu alto poder de condutividade térmica, absorve rapidamente a temperatura da liga fundida que é vertida sobre a superfície cilíndrica, evitando assim a integralização da cristalização. Para esta fita não-tratada foram registradas as energias de entalpia de $H_A=14,4$ J/g (aquecimento) e $H_M=14,6$ J/g (arrefecimento).

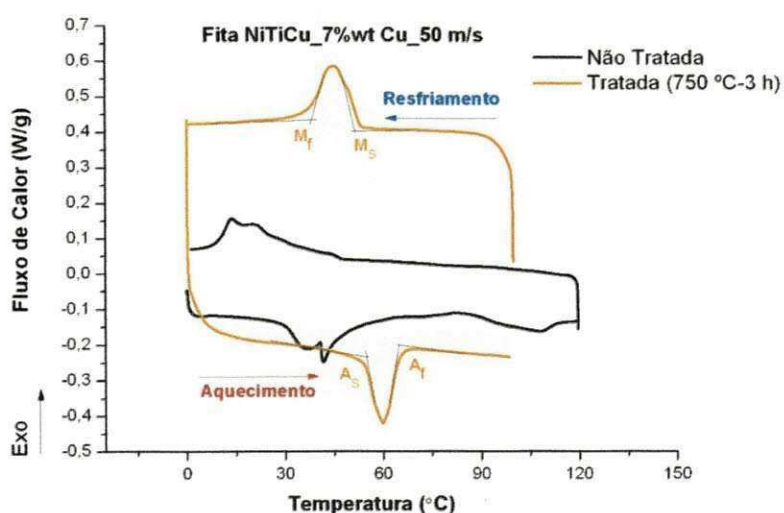


Fig. 41 – Resultado da caracterização DSC sobre as TTRs da fita $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ obtida por 50 m/s

Na tabela 2 os valores encontrados para as duas fitas tratadas de $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ são:

	(Melt Spinning)	Aquecimento			Resfriamento		
	Velocidades de obtenção	A_s	A_p	A_f	M_s	M_p	M_f
TTRs	38 m/s	53,2°C	58,2°C	63,4°C	50,9°C	41,8°C	36,4°C
	50 m/s	55,1°C	60°C	64,4°C	51,7°C	45,4°C	38,2°C

Tabela 2 – Temperaturas de Transformação (TTRs) para ambas as fitas estudadas

Fazendo-se um resumo dos dados experimentais obtidos, de acordo com a tabela 3, podemos chegar à conclusão de que a fita de $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ escolhida para aplicação na microválvula de *Bellouard* é a obtida por *melt-spinning* a um velocidade de 38 m/s e tratada termicamente, devido a quatro fatores básicos:

- Menores temperaturas de transformação (TTRs) registradas;
- Menores energias de entalpia nos picos austeníticos e martensíticos: tensão elétrica mais baixa exigida ao circuito;
- Menores histereses térmicas nas fases austenita e martensita: a diferença média de temperatura é mínima, para obtenção da transformação de fase;
- Maiores amplitudes térmicas (no aquecimento e no resfriamento): o circuito elétrico a ser projetado para a microválvula não tem necessidade de grande precisão energética, pois a faixa de intervalo para se atingir a temperatura necessária à transformação é maior do que na fita de 50 m/s.

Fitas <i>Melt-Spun</i> Velocidades	Energias de Entalpia		Histerese Térmica	Amplitudes Térmicas	
	H _A	H _M	H _T	e _h (austenita)	e _c (martensita)
38 m/s	7,4 J/g	7,4 J/g	14,6°C	10,2°C	14,4°C
50 m/s	21,5 J/g	21,5 J/g	14,8°C	9,3°C	13,5°C

Tabela 3 – Comparação de valores experimentais obtidos por DSC

Observou-se também, no manuseio das duas fitas de Ti-Ni-Cu tratadas, que a menos quebradiça foi a fita obtida por *melt spinning* a uma velocidade de 38 m/s, o que reforça a ideia de que esta, comparando-se com a de 50 m/s, é a mais adequada à aplicação na microválvula estudada.

6.2 Análise Mecânica Dinâmica (DMA)

A análise mecanodinâmica (testes DMA) foi feita nas fitas de $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ obtidas por solidificação rápida, com velocidades de 38 m/s e 50 m/s, sob as mesmas condições de tratamento térmico (750°C por 3 horas). O aparelho usado foi o Universal V4.5A TA *Instruments* e os dados foram processados pelo *software* DMA Q800 num intervalo de 20 min. Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 5°C/minuto. O resultado gráfico para a fita obtida por *Melt Spinning* (38 m/s), cujas dimensões registradas com paquímetro foram 11,54 x 1,35 x 0,08 mm, de acordo com a figura 42, demonstra um aquecimento que se inicia em 30°C e termina em 130°C, ou seja, $\Delta T=100^\circ C$. Nota-se que, enquanto a temperatura cresce no eixo das abscissas, o Módulo de Elasticidade (E) aumenta até chegar a um valor máximo de 23%. Todavia, retomando-se as TTRs já detectadas por meio de DSC e observando-se a $A_f=63,4^\circ C$, o módulo de elasticidade para esta faixa térmica não ultrapassa o crescimento percentual de 6%.

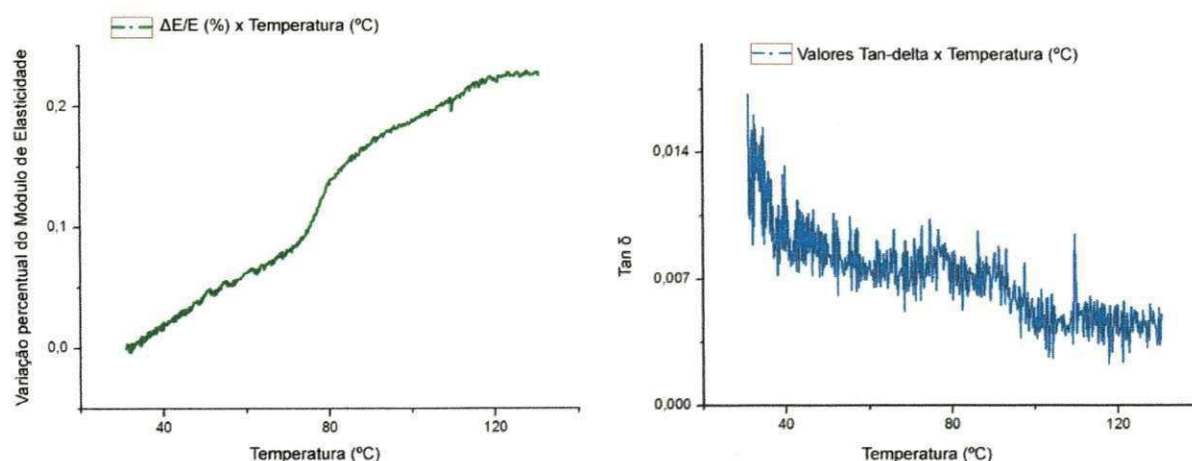


Fig. 42 – Resultado do teste DMA para fita tratada de $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ obtida por *Melt Spinning* (38 m/s)

O módulo de elasticidade ou módulo de Young (*storage modulus*) é a razão entre a tensão aplicada e a deformação elástica medida.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

Na fórmula, E é o módulo de elasticidade (unidades em pascal = Pa), σ é a tensão (medida em pascal) e ε é a deformação longitudinal do corpo de prova (em unidade arbitrária).

A linha $\tan \delta$ (delta) representa a variação da frequência em que ocorre o ensaio de tração como parâmetro arbitrário de medição. De acordo com Chaplin (2012), o valor $\tan(\delta)$ quantifica o equilíbrio entre a perda e o armazenamento de energia, conforme ilustra a figura 43:

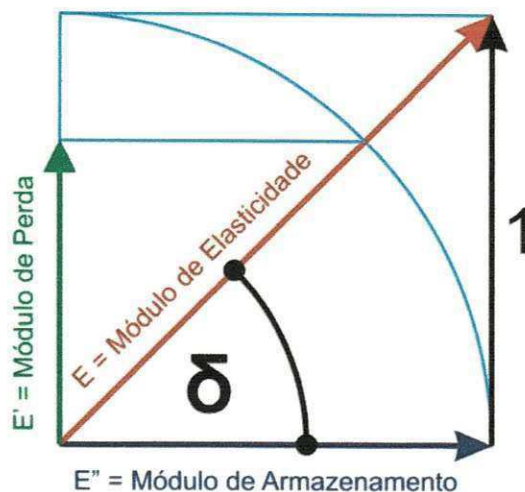


Fig. 43 – Relação trigonométrica entre os módulos E, E' e E'' (CHAPLIN, 2012)

Assim, o valor de $\tan \delta$ é calculado em função da relação fracionária:

$$\tan(\delta) = \frac{\text{sen } \delta}{\text{cos } \delta} = \frac{E'}{E''} \quad (3)$$

Como a tangente de 45° é igual a 1, um valor para $\tan \delta$ próximo a esta unidade indica propriedade de rigidez menor ao passo que um valor próximo de 0 (zero) indica propriedade de rigidez maior. A figura 42 comprova essa ideia, pois a fita apresenta boa resistência à deformação e tem um módulo de elasticidade alto ao mesmo tempo que registra um valor de $\tan \delta$ baixo, o que corresponde ao fato de ter boa resistência e pouca tendência para dissipação de energia por deformação.

O teste DMA para a fita de $\text{Ti}_{45}\text{Ni}_{48}\text{Cu}_7$ tratada termicamente, obtida por solidificação rápida a uma velocidade de 50 m/s, cujas dimensões foram 18,24 x 2,00 x 0,07mm, registrou, de acordo com a figura 44, um valor máximo do módulo de elasticidade E igual a 0,75%. Em relação aos valores iniciais $\tan \delta$ observados na fita de 38 m/s, registraram-se valores no início do teste iguais para a fita de 50 m/s, ou seja, $\pm 0,015$, mas encerram nesta fita com valor dobrado de 0,010 em relação ao valor final $\tan \delta$ observado na fita de 38 m/s, que foi de 0,005. Isso significa que ambas as fitas possuem valores iguais $\tan \delta$ para temperatura

ambiente (início do teste $\sim 30^\circ\text{C}$), porém a fita obtida a 38 m/s possui maior elasticidade do que a fita obtida por *melt spinning* a uma velocidade de 50 m/s, ao fim do teste (sob temperatura de $\pm 130^\circ\text{C}$).

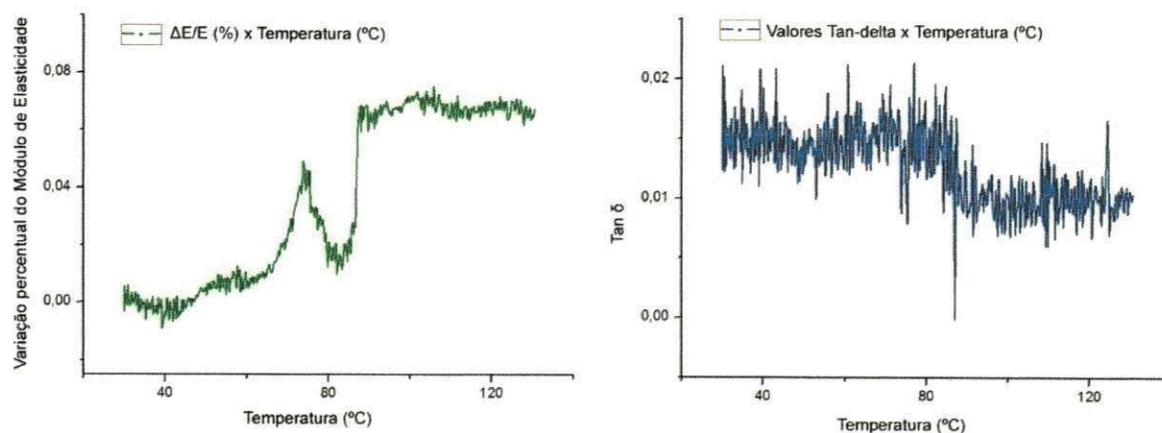


Fig. 44 – Resultado do teste DMA para fita tratada de $\text{Ti}_{45}\text{Ni}_{48}\text{Cu}_7$ obtida por *Melt Spinning* (50 m/s)

O percentual de crescimento do módulo de elasticidade $(1 - \frac{E_s}{E_f})$ é maior na fita obtida na velocidade de 38 m/s, pois se considerando os módulos inicial e final (E_s e E_f), temos para as fitas de 50 m/s e 38 m/s, respectivamente 1,2% e 17,8%. Esse resultado comparativo torna evidente uma diferença de 16,6% para o aumento percentual do módulo de elasticidade na fita obtida com a velocidade de 38 m/s, ou seja, mesmo tendo módulos menores, o crescimento percentual do módulo de elasticidade nesta última é maior do que na 50 m/s. Isso reforça a escolha da fita de 38 m/s a ser aplicada na microválvula de *Bellouard*.

6.3 Experimentos Elétricos

A fita de $\text{Ni}_3\text{Ti}_{50}\text{Cu}_7$ é um condutor do tipo resistor elétrico não-*ôhmico* (não-linear) porque oferece resistência R (expressa em *ohms* [Ω]) à passagem da corrente elétrica submetida, provocando liberação de energia em forma de calor. Em virtude disso, nesta fita com EMF, a tensão elétrica, expressa pelos acrônimos DDP ou E ou ΔV ou U ou V (cuja unidade é *volts* ou *Joules/Coulomb*) e a intensidade I da corrente elétrica (cuja unidade é *ampère*) não são diretamente proporcionais. Essa relação é expressa segundo a fórmula $V = R \cdot I$, de modo que V é tensão (em volts [V]); R é resistência (em ohms [Ω]) e I é corrente elétrica (em ampère [A] ou Coulomb/segundo).

A potência, seja elétrica ou não, é uma grandeza física que relaciona energia por unidade de tempo, ou seja, é a relação de J/s (Joules *por* segundo). A potência elétrica P é expressa pela unidade watts (W).

A unidade fornecida por DSC é J/g (Joules *por* grama), o que não se relaciona diretamente com potência elétrica, pois se trata de unidade energética por unidade de massa. Porém, sabendo-se que a energia necessária para mudança de fase cristalina em estado sólido é de ± 8 J/g, é possível especificar em quanto tempo é desejável fornecer essa energia calorífica para a fita Ti-Ni-Cu escolhida, a de 38 m/s. Digamos, por exemplo, que essa densidade energética de ± 8 J/g seja para cada segundo. Nesse caso, precisa-se fornecer ± 8 J/s por grama. Supondo-se que a massa total da amostra seja de ± 1 g, precisa-se apenas fornecer $8 \text{ J} \cdot 1\text{g} = 8 \text{ J}$ por segundo. Assim, teríamos uma potência elétrica aproximada de $P = 8 \text{ W} \rightarrow (P = 8 \text{ J/s})$.

Essa ideia de se mensurar a potência elétrica (em watts [W]) a partir de uma energia por unidade de massa (J/g) nos serve de referência para teorizar um circuito elétrico que seja próximo àquele suficiente para a realização do experimento com a fita de Ti-Ni-Cu (38 m/s), em suas condições próximas ao contexto de uso na Microválvula de *Bellouard*. A potência elétrica em corrente contínua é calculada através do produto entre a resistência (em Ohms) e a corrente elétrica I (em ampéres) ao quadrado, ou ainda, pela multiplicação da tensão (volts) pela Corrente:

$$P = R.I^2 \equiv P = V.I \quad (4)$$

A corrente contínua (CC) é o tipo simplificado para movimentação unidirecional de elétrons que se mantém constante através do tempo (em segundos), ou seja, a amplitude (em ampére), seja negativa ou positiva, é fixa.

Energia é uma função de estado num intervalo de tempo. Nesse sentido, pode-se calcular a energia total (em joule) fornecida por um sistema através do produto entre a potência elétrica (em watt) e o tempo (em segundos). Assim, tem-se:

$$E = P.t \quad (5)$$

Sabendo-se que (Energia Total) = (Energia Ativa) + (Energia Reativa), ou seja, $E_{\text{entrada}} = E_{\text{saída}} + \text{Perdas}$, é preciso num sistema (ou rede), ter um Fator de Potência F_p mínimo de 0,92, ou seja, 92% de energia fornecida transformada em trabalho. Esse fator recomendado garante a eficiência energética η e conserva a integridade de um sistema. Logo,

$$F_p = \frac{P_{at}}{P_{ap}} = \frac{P}{S} \equiv \cos \varphi \quad (6)$$

Dessa forma, entende-se que há pequenas perdas em virtude do campo elétrico que é criado automaticamente num sistema, pois a quantidade total de energia de entrada não é a mesma quantidade de energia de saída. Assim, pode-se expressar a eficiência energética como sendo o percentual de:

$$\eta = \frac{E_{entrada} - Perdas}{E_{entrada}} \quad (7)$$

Entre outras propriedades elétricas que se necessita mencionar, a *Resistência* é também um atributo crucial para que se perceba as grandezas físicas envolvidas nesse projeto. Ela depende da geometria tridimensional do condutor e é recíproca da Condutância G , cuja unidade é o *siemens* (S ou Ω^{-1}). A condutância é dada por:

$$G = Y - jR \quad (8)$$

Onde Y é a Admitância (*siemens*), $j = \sqrt{-1}$ e B é a Susceptância (*siemens*). A Resistência (unidade: Ω) se difere da Resistividade (unidade: Ωm) por se tratar de uma grandeza inconstante. Para se ter uma noção, no quadro 5, vê-se individualmente a Resistividade ρ dos elementos constituintes da liga Ti-Ni-Cu:

Elemento	Coefficiente de Resistividade ($\Omega.m$) a 20°C
Níquel	$6,99 \times 10^{-8}$
Titânio	43×10^{-8}
Cobre	$1,72 \times 10^{-8}$

Quadro 5 – Resistividades dos elementos Ni, Ti e Cu (GRIFFITHS, 1999)

A resistividade elétrica ρ , por se tratar de uma característica físico-química, depende apenas do material pelo qual é constituído. Porém, ela pode se alterar de acordo com a variação de temperatura, assim como a resistência. A *resistividade elétrica* ρ também pode ser definida como sendo o inverso da *condutividade elétrica* σ [$(\Omega m)^{-1}$], ou seja:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (9)$$

Os resistores ôhmicos (ou fixos) têm uma Resistência constante dada pela intensidade de corrente elétrica que se mantém sempre proporcional à tensão

elétrica, ou seja, a divisão de V (ou U) sobre I é um valor constante. Isso faz com que a temperatura do condutor se mantenha constante ao longo do tempo, o que não ocorre com a fita SMA de Ti-Ni-Cu. Essa relação constante materializa a primeira Lei de Ohm. Assim,

$$R_{fixa} = \frac{V}{I} = \frac{U}{I} \quad (10)$$

Na segunda Lei de Ohm, a Resistência elétrica é diretamente proporcional ao comprimento L do condutor, ou seja, $R \propto L$. Todavia, a Resistência é inversamente proporcional à área de secção transversal do condutor, ou seja, $R \propto \frac{1}{A}$. O condutor é um resistor variável que transforma energia elétrica em energia térmica através do Efeito Joule. A alteração de temperatura da fita SMA causa a mudança da fase cristalina martensita para austenita, através da absorção e da liberação de energia. Para este caso, a resistência elétrica tem três incógnitas que podem influenciar em seu cálculo, de acordo com o dispositivo: ρ (resistividade, intrínseco ao material [Ωm a $20^\circ C$]), l (comprimento do condutor/resistor [metros]) e A (área da secção transversal do condutor/resistor [m^2]).

$$R = \rho \frac{l}{A} \Leftrightarrow \rho = R \frac{A}{l} \quad (11)$$

A partir dessa exploração que se constitui como fundamental para a compreensão de nosso projeto, pode-se calcular as resistividades associadas aos dados obtidos através do banho termo-regulável (resistência x temperatura). O referido banho, de 33,5 minutos de duração, foi descrito no capítulo referente aos materiais e métodos. A fita de massa igual a $\pm 24,5 \times 10^{-6}$ kg foi submetida a uma microsoldagem para efeito do experimento $R \times T$, conforme vemos na figura 45.



Fig. 45 – Máquina de soldagem Kernit SMP 3000 Gold e fita Ti-Ni-Cu $\pm 24,5$ mg em teste de 4 pontos

Conforme visualizamos na figura 46, os pontos de interseção das retas tangentes às curvas determinam as temperaturas de transformação que são, neste resultado, extremamente semelhantes às TTRs obtidas por DSC.

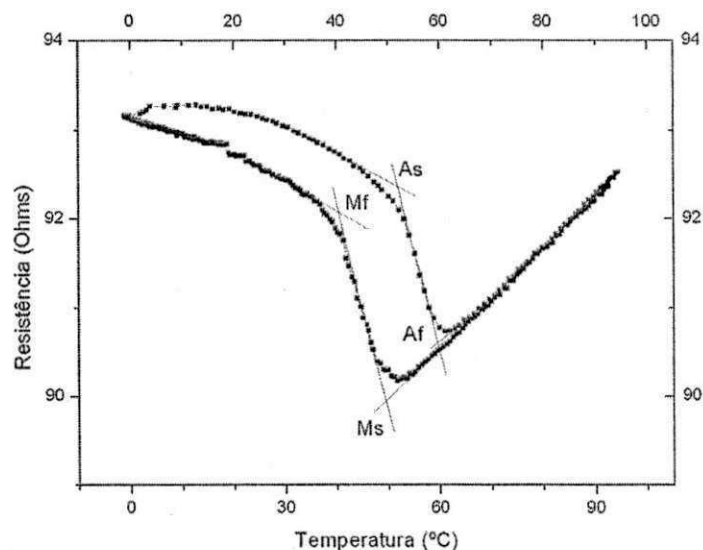


Fig. 46 - Resultado do Banho Térmico [Resistência(Ω) versus $T(^{\circ}\text{C})$] como duração de 33 min e 30 s (para a fita obtida por 38 m/s, tratada termicamente a 750°C por 3 h)

Foi verificada uma resistência mínima de $90,17 \Omega$ e uma resistência elétrica máxima de $93,28 \Omega$ no decurso do experimento. Para a resistividade elétrica ρ , houve um valor máximo registrado de $0,000208 \Omega \cdot \text{m}$ ($20,8 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$) e um mínimo de $0,000201 \Omega \cdot \text{m}$ ($20,1 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$). Com base nessas primeiras propriedades, foi possível fazer o cálculo de outras grandezas elétricas tais como condutância, condutividade e potência elétrica, com valores mínimo e máximo de, respectivamente: $0,0107 \Omega^{-1}$ e $0,0110 \Omega^{-1}$; $4785,74 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ e $4950,74 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$; $8,22 \text{ W}$ e $8,50 \text{ W}$.

A resistência em função do tempo gera uma curva característica que demonstra, de acordo com a figura 47, o declínio dos valores, tanto no resfriamento como no aquecimento, ou seja, no intervalo em que houve transformação de fase no estado sólido por meio de movimentação atômica adifusional.

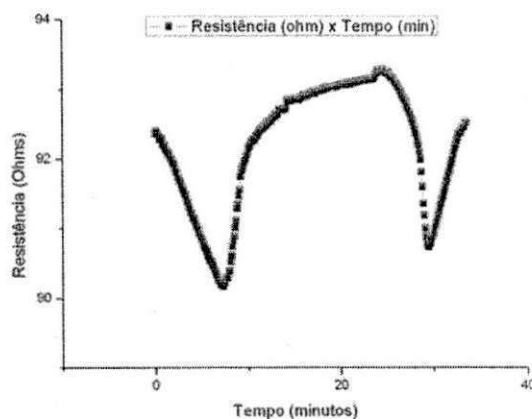


Fig. 47 – Picos de diminuição da resistência elétrica durante o experimento R x T

O resultado da histerese térmica (H_T) obtida pelo banho térmico para a fita de 38 m/s foi de $11,12^\circ\text{C}$, um pouco menor que o valor de $14,16^\circ\text{C}$ registrado por DSC. Para tanto, usou-se a fórmula:

$$H_T = \left(\frac{A_s + A_f}{2} - \frac{M_s + M_f}{2} \right) \quad (12)$$

Após o experimento do banho termo-regulável na fita de $\pm 24,5 \times 10^{-3}$ g, foi possível comparar estatisticamente os dados térmicos das TTRs obtidos por DSC e banho R x T, de acordo com a tabela 4. Assim, conhecendo-se as Temperaturas de Transformação (TTRs) que foram obtidas através do experimento com banho térmico, fez-se o cálculo da média aritmética (\bar{X}), à luz de Borges (1993), onde o somatório de todas as temperaturas para cada fase inicial e final foi dividido pelo número total de dados da amostra (duas temperaturas, a saber: a obtida por DSC e a obtida por R x T).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \text{ ou seja, } \bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (13)$$

COMPARAÇÃO	Melt Spinning	Aquecimento		Arrefecimento	
		Velocidade	A_s	A_f	M_s
DSC	38 m/s	$53,2^\circ\text{C}$	$63,4^\circ\text{C}$	$50,9^\circ\text{C}$	$36,4^\circ\text{C}$
R (Ω) x T($^\circ\text{C}$)	38 m/s	$51,4^\circ\text{C}$	$59,7^\circ\text{C}$	$49,4^\circ\text{C}$	$39,5^\circ\text{C}$
Média Aritmética das TTRs →		$52,3^\circ\text{C}$	$61,5^\circ\text{C}$	$50,2^\circ\text{C}$	$38,0^\circ\text{C}$

Tabela 4 - Comparativo dos valores obtidos experimentalmente versus média aritmética

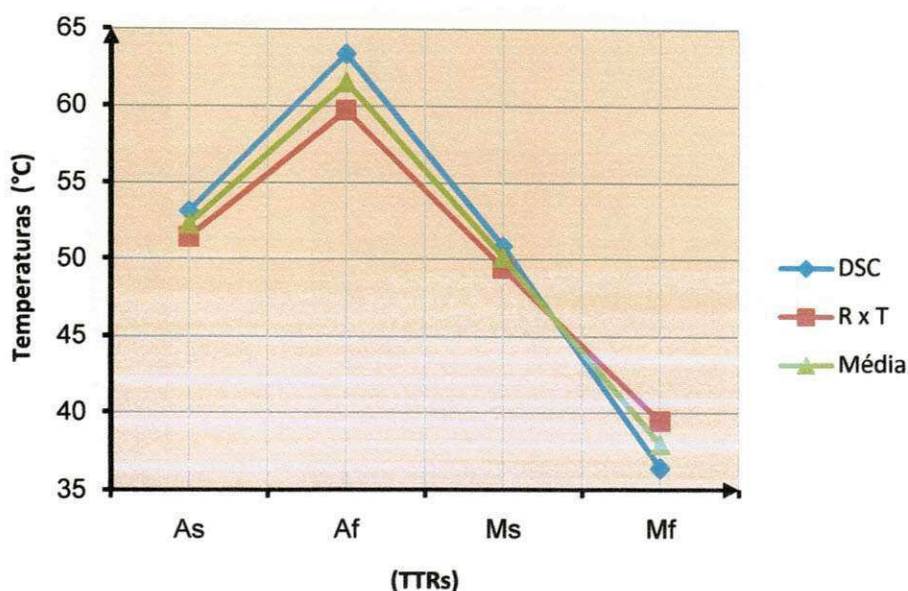


Fig. 48 - Temperaturas de Transformação (experimentos e médias)

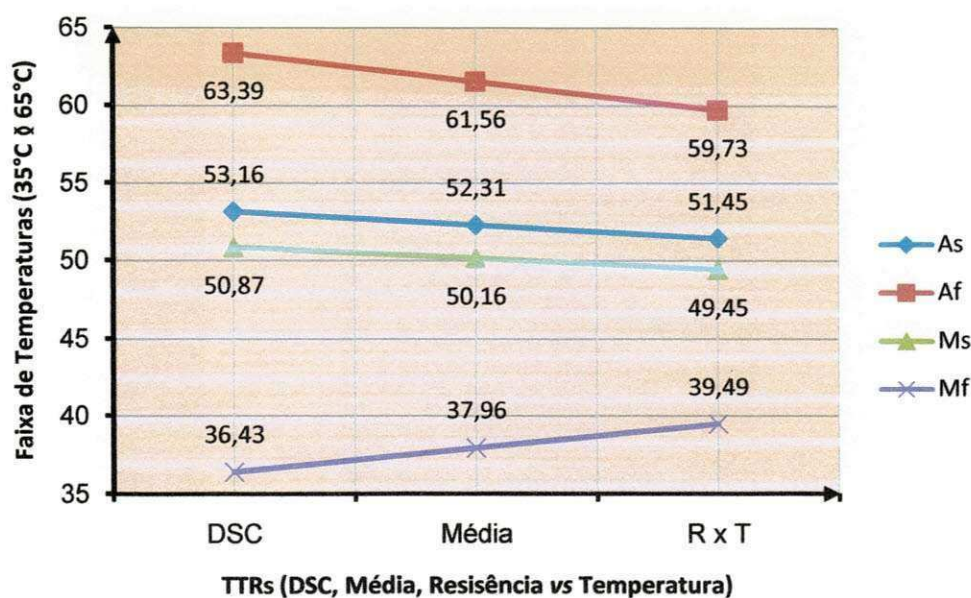


Fig. 49 - Temperaturas de Transformação (°C) versus Experimentos

Para melhor avaliar a variabilidade das TTRs, fez-se uso de quatro medidas de dispersão. Muito usada para dados não-agrupados, a Amplitude Total (AT) é a diferença entre o maior e o menor valor existente entre os dados, neste caso, entre ambas as temperaturas. Assim, $AT = X_{\text{maior}} - X_{\text{menor}}$. O desvio médio é igual ao somatório dos módulos que expressam as diferenças existentes entre cada

temperatura e a média aritmética simples da série, dividido pelo número de temperaturas (DSC e RxT).

$$DM = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n} \quad (14)$$

Em relação ao Desvio Padrão, adotou-se a raiz quadrada do somatório ao quadrado das diferenças entre cada temperatura e a média aritmética, dividida pela quantidade de dados da série, que neste caso é igual a 2:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (15)$$

A Variância (σ^2) numa série é o quadrado do desvio padrão.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n} \quad (16)$$

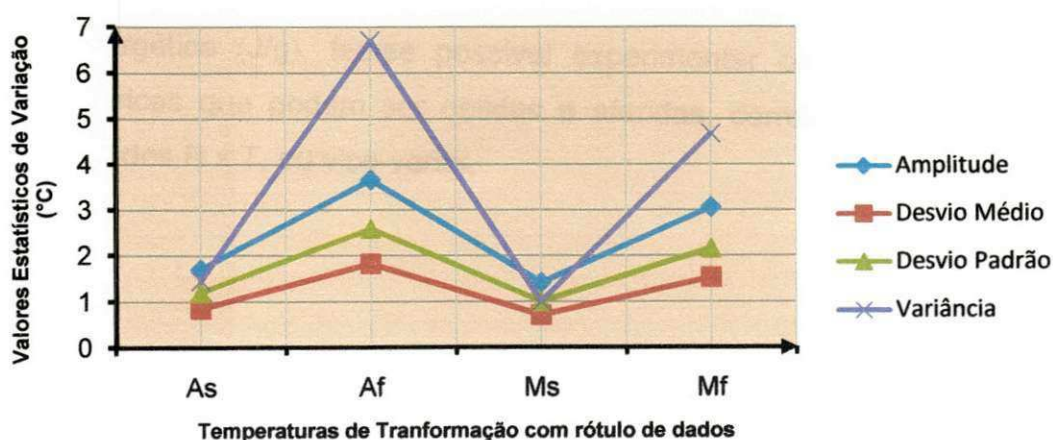


Fig. 50 - TTRs: Austenita inicial (A_s); Austenita final (A_f); Martensita inicial (M_s); Martensita final (M_f)

O coeficiente de variação é uma medida de variabilidade relativa que serve para verificar a homogeneidade entre duas amostras diferentes (DSC e RxT). Tanto serve para dados não-agrupados como para dados agrupados. Considera-se aqui cada temperatura de transformação separadamente e depois, uma em relação às outras.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \cdot 100 \Rightarrow (\text{UNIDADE})\% \quad (17)$$

Após efetuar todos os cálculos estatísticos, podemos listar na tabela 5 os valores obtidos para cada TTR como forma de destacar a forma pela qual chegamos ao percentual de variação.

MEDIDAS ENVOLVIDAS	Temperaturas de Transformação (TTRs)			
	As	Af	Ms	Mf
Desvio Padrão (σ)	1,2°C	2,6°C	1°C	2,2°C
Média (\bar{X})	52,3°C	61,5°C	50,2°C	38°C
<i>Divisão numérica (σ / \bar{X})</i>	0,02311	0,04204	0,02001	0,05700
Percentual	2,3%	4,2%	2,0%	5,7%

Tabela 5 - Valores obtidos para os Coeficientes de Variação para cada TTR

Com os resultados obtidos do coeficiente de variação, conforme é mostrado a tabela 5, podemos afirmar que houve uma percentual de variância muito pequeno que aponta a consistência dos dados obtidos e reafirma a credibilidade metódica dos experimentos realizados. A partir disto, com os dados de diferença de potencial, resistência variável, temperaturas, corrente contínua, fluxo de calor (W/g) e densidade energética (J/g), faz-se possível experimentar os cálculos de outras grandezas elétricas que podem ser obtidas e aferidas, correlacionando os dados DSC com os dados R x T, ou vice-versa.

6.4 Propriedades Elétricas da fita tratada obtida a 38 m/s

Para se entender melhor o teste de *Resistência x Temperatura*, conforme figura 51a, faz-se necessário dividir a curva total gerada em duas partes: linha do resfriamento e linha do aquecimento, de acordo como nos mostra a figura 51b. A primeira ocorreu em 23,5 minutos e se refere ao percurso Martensítico. Ela registrou temperaturas máxima e mínima de 92,6°C e -1°C, respectivamente. A linha que diz respeito ao percurso Austenítico possui um intervalo de temperatura que vai de -0,35°C a 94,4°C e ocorreu em 10 minutos.

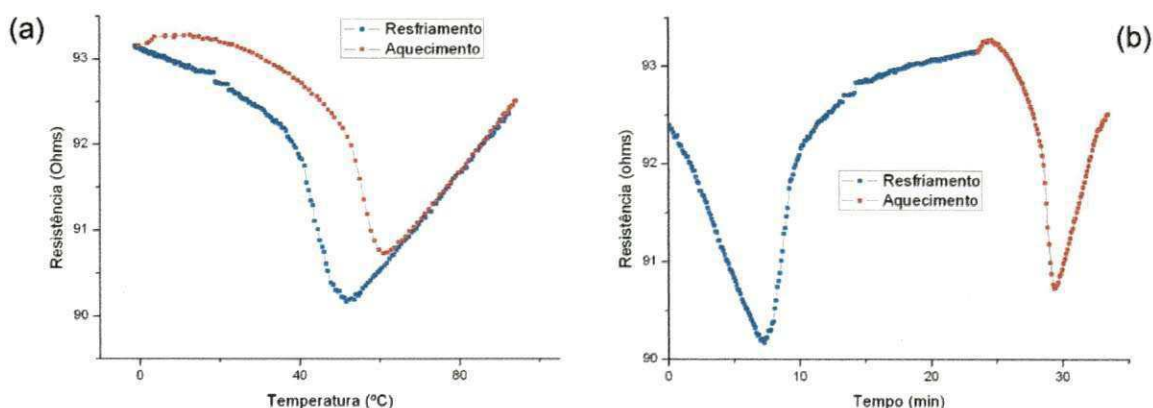


Fig. 51 – (a) Faixa temporal martensítica (resfriamento); (b) faixa temporal austenítica (aquecimento)

Assim, é possível também aferir que 70% do tempo se destinou ao resfriamento ao passo que apenas 30% ao aquecimento, nesta ordem. Isso fez com que o experimento se configure como assimétrico, conforme nos demonstra a figura 52, a qual representa a divisão do tempo em função da variação de temperatura:

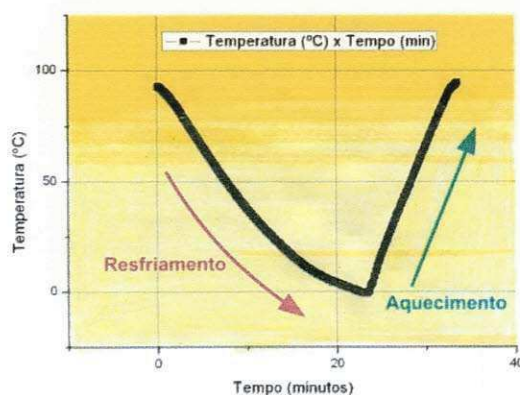


Fig. 52 – Temperatura x tempo (em minutos) para fita Ti-Ni-Cu tratada

Por consequência disto, a histerese térmica, faixa temporal e amplitude energética, entre outras grandezas, serão maiores no decorrer da linha concernente à transformação martensítica do que na linha da transformação austenítica, pois foram registrados os respectivos 26 e 11 *steps* de dados entre as TTRs. Isso

representa 142% a mais de tempo destinado ao intervalo que compreende Ms e Mf do que ao tempo compreendido entre As e Af. Na maioria dos experimentos DSC de curvas consideradas padronizadas os intervalos de tempo são equivalentes entre si. Isso faz com que essas curvas sejam simétricas e os valores de fluxo de calor associados a estes intervalos, por exemplo, sejam bem mais próximos nos resultados de calorimetria exploratória diferencial. Além dessa assimetria da resistência adjunta ao tempo, foi verificado um comportamento curvilíneo igual associado ao tempo quando se considerou a potência elétrica, assim como a resistividade e a tensão, conforme observamos na figura 53. Esse detalhe dá consistência aos dados obtidos através da proporcionalidade matemática vinculada à natureza elétrica da fita Ti-Ni-Cu, ou seja, os cálculos posteriores ao experimento RXT passam a ter credibilidade e, portanto, maior aceitação científica.

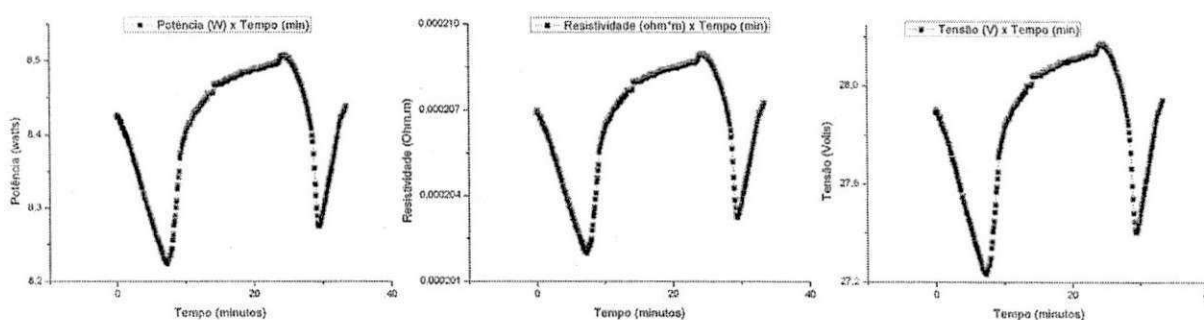


Fig. 53 - Curvas iguais para associação do tempo às grandezas elétricas da fita Ti-Ni-Cu (38 m/s)

A curva padrão obtida por efeito do registro da resistência elétrica *versus* temperatura foi também obtida igualmente quando se associou a temperatura com a potência, resistividade e tensão elétrica, de acordo com a figura 54. Isso ocorre porque a corrente é constante.

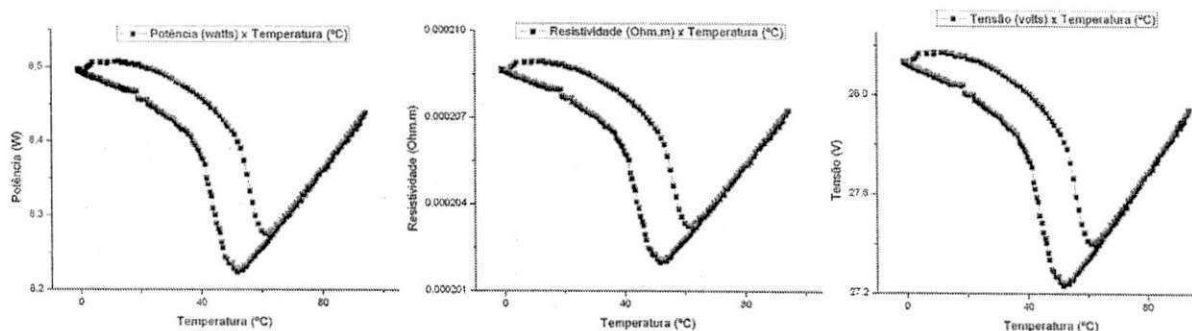


Fig. 54 - Curvas iguais para associação da temperatura às grandezas elétricas da fita Ti-Ni-Cu

Toda essa equivalência no perfil das curvas se dá por causa de proporcionalidade que existe entre: tensão elétrica e potência; tensão elétrica e

resistência; e tensão elétrica e resistividade. Isso pode ser observado graficamente na figura 55, como vemos abaixo:

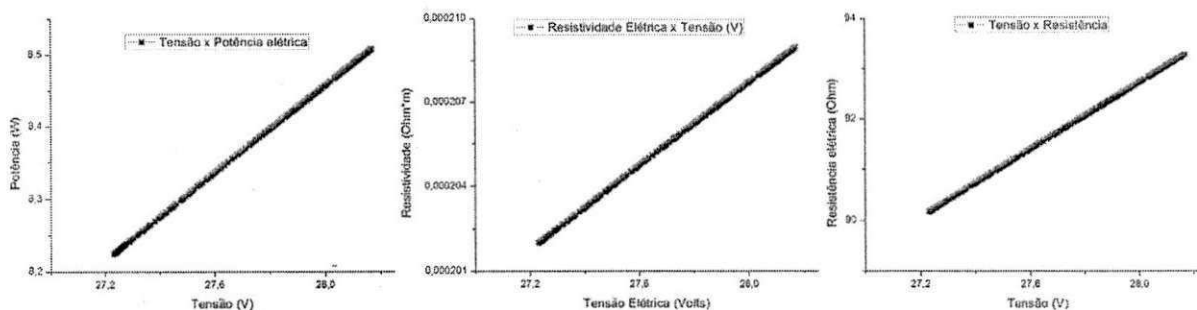


Fig. 55 - Proporção da Tensão com potência, resistividade e resistência elétricas

A densidade de energia registrada na fita tratada (38 m/s) através das curvas assimétricas do experimento RxT na transformação martensita foi de 32,74 J/g enquanto que na transformação austenítica foi de 7,01 J/g. Esses resultados são cruciais para que sejam validados esses valores calculados, pois se compará-los com os valores do experimento DSC, em cujas curvas simétricas foram marcadas densidades energéticas de 8,08 J/g e 7,89 J/g, entende-se o porquê do valor maior inicialmente registrado: a assimetria de tempo. Os valores citados no teste RxT resultam das áreas calculadas por meio de integrais das densidades energéticas.

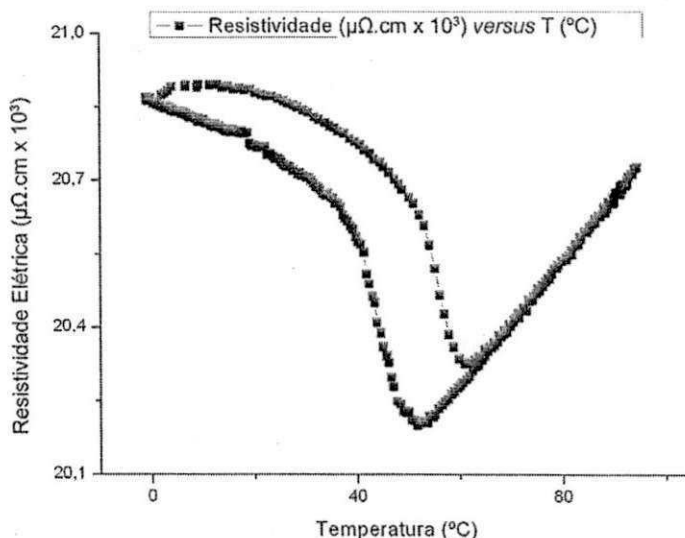


Fig. 56 – Resistividades encontradas no experimento RxT

Com base no incremento das variáveis temperatura (T) e tempo (t) versus grandezas elétricas foi possível montar gráficos típicos nos quais se observou a analogia bidimensional de tais curvas. Com isso, é possível determinar as TTRs a partir de experimentos envolvendo grandezas que prescindem da resistência elétrica, assim como é possível imaginar pontos *default* de transformação de fase em que é possível determinar as TTRs sem que se tenha, necessariamente, o

registro do desenvolvimento térmico. Na figura 57 são registradas, simultaneamente, as duas principais formas de registro de curvas: $R \times T$ e $\rho \times t$.

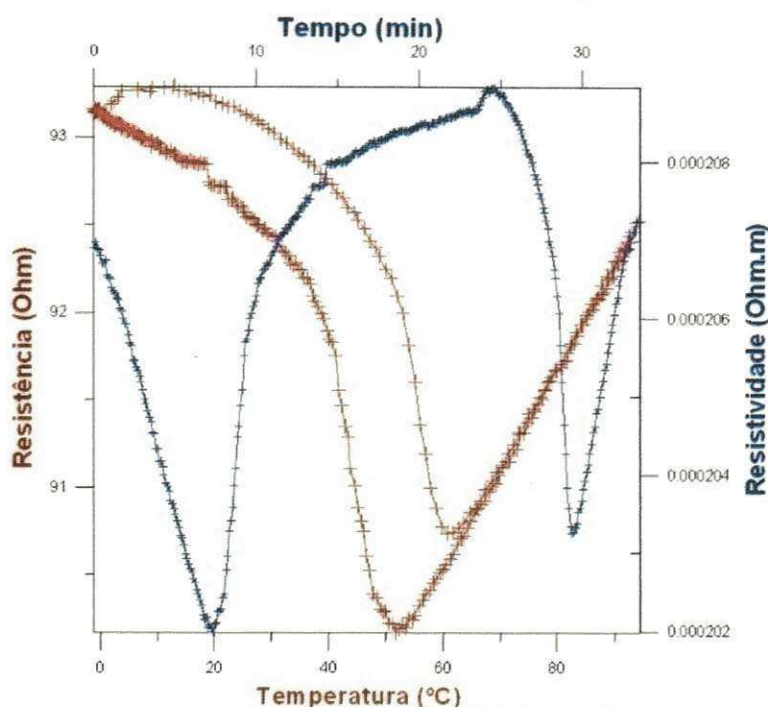


Fig. 57 – Gráfico duplo que converge os valores Resistência x Temperatura e Resistividade x Tempo

Dessa forma, chegamos ao valor máximo de resistividade elétrica ρ igual a $0,000208954 \Omega \cdot m \equiv 0,208954 \times 10^{-3} \Omega \cdot m \equiv 208,954 \times 10^{-6} \Omega \cdot m \equiv 208,954 \mu\Omega \cdot m \equiv 20.895,4 \mu\Omega \cdot cm$, ou seja, $20,8 \times 10^3 \mu\Omega \cdot cm$. Esse resultado poderia servir de ponto de partida para comparação com outros trabalhos que tratam da mesma liga. Contudo, em qualquer uma situação de caso comparativo, as distinções entre valores se dão em função de fatores adversos tais quais: proporção de mistura considerada (massa ou %), elementos envolvidos na mistura (binário ou ternário), processo(s) de obtenção da liga, existência ou não de eventuais tratamentos térmicos, tipos e tempos de exposição aos tratamentos, taxa de resfriamento, razão de aquecimento, ocorrência de impurezas, modelo teórico ou matemático adotado, geometria da liga submetida e dimensões específicas para o corpo de prova em cada um dos experimentos, entre outros. A literatura comparada é, neste caso, uma importante metodologia para reafirmar a confiabilidade dos valores apresentados em relação aos autores que têm autoridade no assunto.

Uma maneira adicional de se enxergar os pontos de transformação foi feita em nosso estudo desenhando as curvas típicas que são geradas pelas relações da Condutância G (Ω^{-1}) e Condutividade σ ($\Omega \cdot m^{-1}$) pela Temperatura T ($^{\circ}C$), conforme se vê na figura 58:

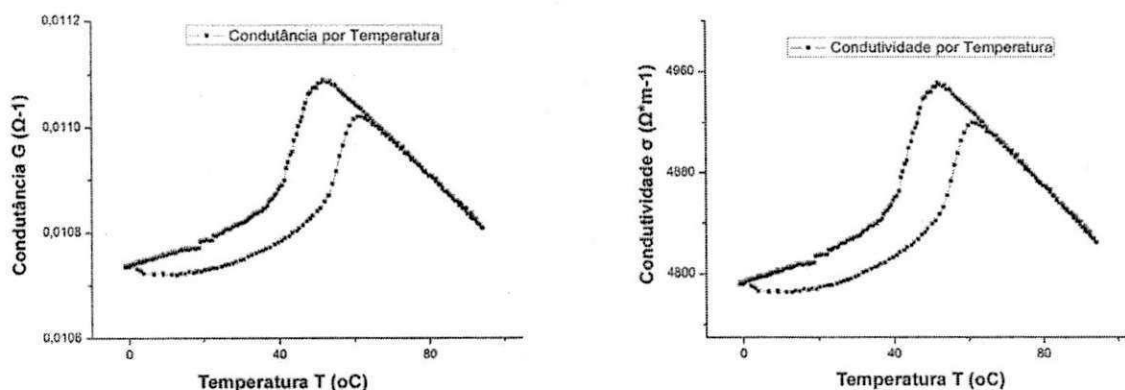


Fig. 58 - Curvas típicas inversas traçadas a partir do experimento $R \times T$

Essa visualização diferenciada das TTRs possibilita a realização de experimentos que traçam curvas-padrão a partir dessas duas grandezas elétricas (G e σ), prescindindo da resistência elétrica R e da resistividade elétrica ρ .

Ao final, foi possível chegar à tabela 6, a qual resume os valores aproximados das principais grandezas elétricas e físicas que foram possíveis ser calculadas a partir do experimento DSC e, principalmente, a partir do experimento $R \times T$. Esses números tomam como base os momentos específicos das temperaturas médias de transformação (TTRs) calculadas em função dos experimentos DSC e $R \times T$.

Valores aproximados	Médias aritméticas das temperaturas de transformação			
	Ms	Mf	As	Af
TTRs (°C)	50,16	37,96	52,31	61,56
Potência (watts)	8,23	8,39	8,39	8,27
tempo (seg)	456	594	1710	1770
tempo (min)	7,6	9,9	28,5	29,5
Resistência (Ω)	90,29	92,06	92,09	90,74
Condutância (siemens) ou Ω^{-1}	0,0110	0,0108	0,0108	0,0110
Resistividade (Ωm)	$202,26 \times 10^{-6}$	$206,22 \times 10^{-6}$	$206,28 \times 10^{-6}$	$203,26 \times 10^{-6}$
Condutividade (Ωm) ⁻¹	4943,95	4849,18	4847,57	4919,63
Corrente fixa (ampère)	0,302A	0,302A	0,302A	0,302A
DDP ou Tensão (volts)	27,26	27,80	27,81	27,40
Densidade de Energia (J/g)	90,73	123,47	351,89	358,90
Peso da Fita Ti-Ni-Cu	$\pm 0,0245g$	$\pm 0,0245g$	$\pm 0,0245g$	$\pm 0,0245g$
Energia (Joules)	3703,49	5039,83	14363,04	14649,28
Fluxo de calor (W/g)	0,201	0,205	0,205	0,202

Tabela 6 – Valores das grandezas associadas às temperaturas médias de transformação

6.5 Projeto da Microválvula

A concepção tridimensional da microválvula, onde a fita Ti-Ni-Cu será aplicada como subcomponente funcional com EMF, conforme a figura 59, foi sugerida em forma de *container* (base e tampa) a partir do *layout* apresentado por Bellouard (2008). Foram feitas modificações na geometria a fim de poder dividi-la em dois componentes herméticos. O encaixe *macho-fêmea* dos componentes é feito por pressão através de quatro pontos, onde a base é o componente *macho* e a tampa é o componente *fêmea*.

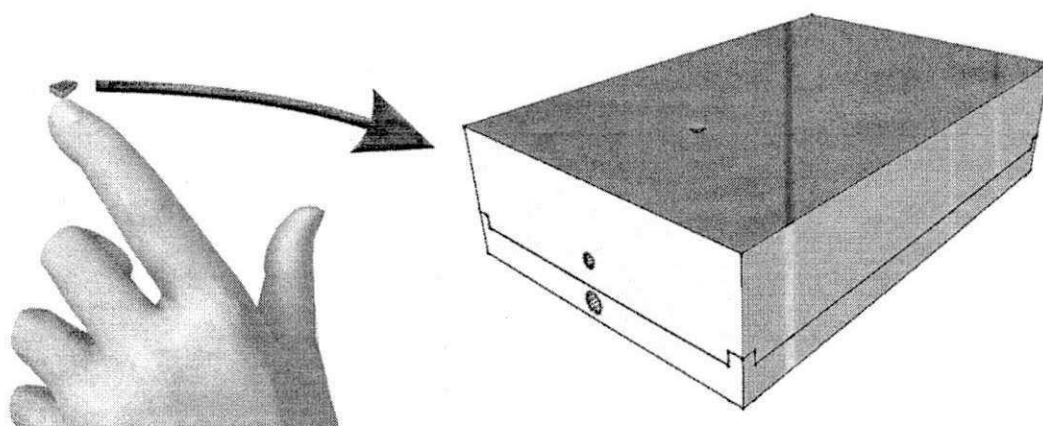


Fig. 59 – Proporção aproximada da microválvula (2 x 5 x 8 mm - *container* fechado) na escala natural com relação a uma mão adulta e sua representação tridimensional ampliada

A base não possui subcomponentes, sendo peça única onde o fluxo de oxigênio percorrerá constantemente um duto cilíndrico horizontal, armazenando-se como fluido reserva em dois sulcos centrais (figura 60). Estes últimos permitem o direcionamento do fluido corrente no sentido vertical com o objetivo de atingir o vão superior, localizado na tampa, onde a pressão do fluido é controlada.

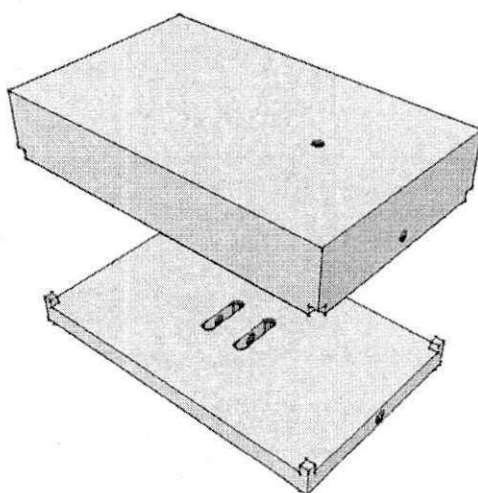


Fig. 60 – Representação 3D da microválvula (container aberto): encaixe vertical sob pressão

Observemos nas figura 61 e 62 o compartimento vazio da tampa onde serão alocados os vários subcomponentes: fita Ti-Ni-Cu sensor/atuador, micromola cilíndrica, tampa, espaçadores, membranas de polímeros, orifício pneumático, vão compacto para controle de pressão do fluido, orifício de saída do oxigênio, batente e fiação para transferência de corrente elétrica controlada.

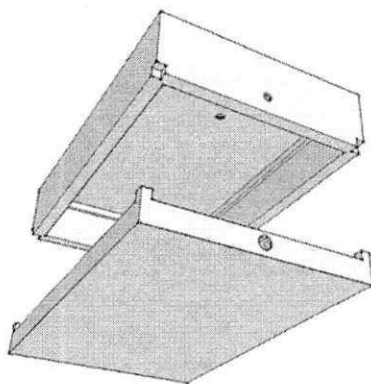


Fig. 61 – Perspectiva explodida: visão inferior da base e da tampa (sem os componentes internos)

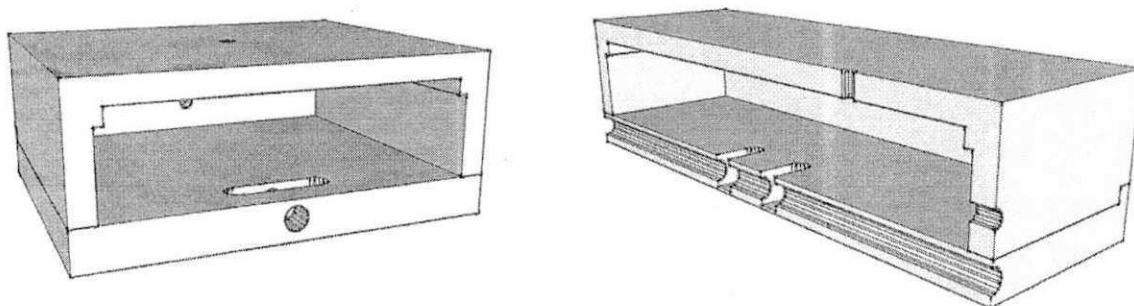


Fig. 62 – Tampa e base encaixadas (corte transversal e longitudinal): orifícios de passagem e controle do fluido; tampa sem os componentes adicionais

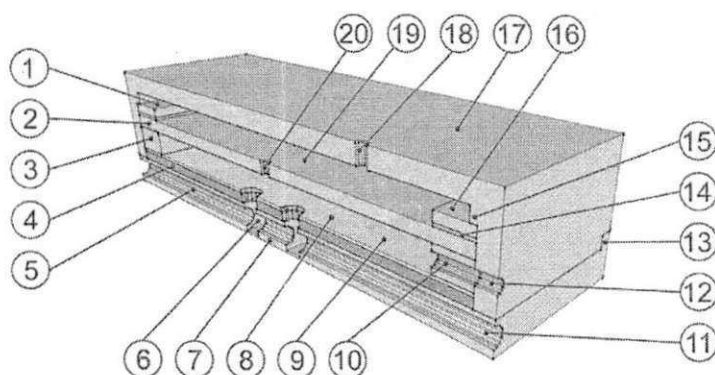


Fig. 63 – Tampa e base (corte longitudinal): com os componentes internos adicionais alocados na tampa; a base não possui componentes

Observando o projeto estrutural interno e externo apresentado na figura 62, podemos discriminar individualmente os vários componentes e subcomponentes em:

1. Anteparo onde a fita será presa
2. Bloco do orifício pneumático
3. Espaçador maior (para saída de fluido pela contra-válvula)
4. Bloco para passagem bifurcada do fluido
5. Duto horizontal para passagem direta do gás oxigênio
6. Sulcos onde será armazenada parte do oxigênio
7. Base (elemento único)
8. Membrana de Polímero (isolante)
9. Compartimento hermético de contenção fluidica (controle da pressão por intermédio de uma contra-válvula)
10. Liberação controlada dos excessos de fluido
11. Entrada do fluxo intermitente de oxigênio
12. Orifício para colocação da contra-válvula
13. Encaixe por pressão (macho-fêmea)
14. Espaçador menor (separação do bloco pneumático do anteparo da fita)
15. Batente
16. Anteparo onde a fita será presa
17. Tampa
18. Saída defini-tiva do fluido
19. Compartimento final a partir do qual o fluido liberado
20. Orifício pneumático

O compartimento 9, onde se fará o controle de pressão exercida pelo fluido, terá a contra-válvula como elemento essencial (elemento 12) para liberação controlada do fluido excessivo. Na figura 64 observamos que todos os seis subcomponentes estão alocados na tampa e que os orifícios de passagem fluidica estão alinhados com os subcomponentes vizinhos.

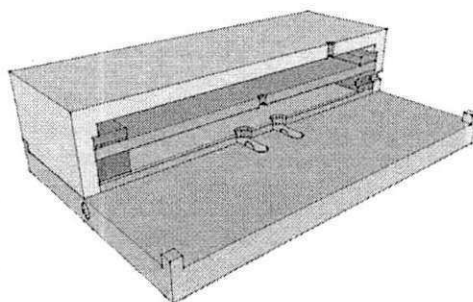


Fig. 64 – Tampa (corte longitudinal) e componentes internos; base inteira sem corte

Na figura 65 são representadas as visões superior e inferior dos subcomponentes contidos na tampa, de acordo como foram enumerados anteriormente e ilustrados na figura 66. Os acessórios tais como mangueiras e tubos externos, borrachas de vedação e botão giratório (contra-válvula) serão

determinadas com mais precisão de detalhes com a eventual confecção do modelo funcional, o que pode ocorrer posteriormente.

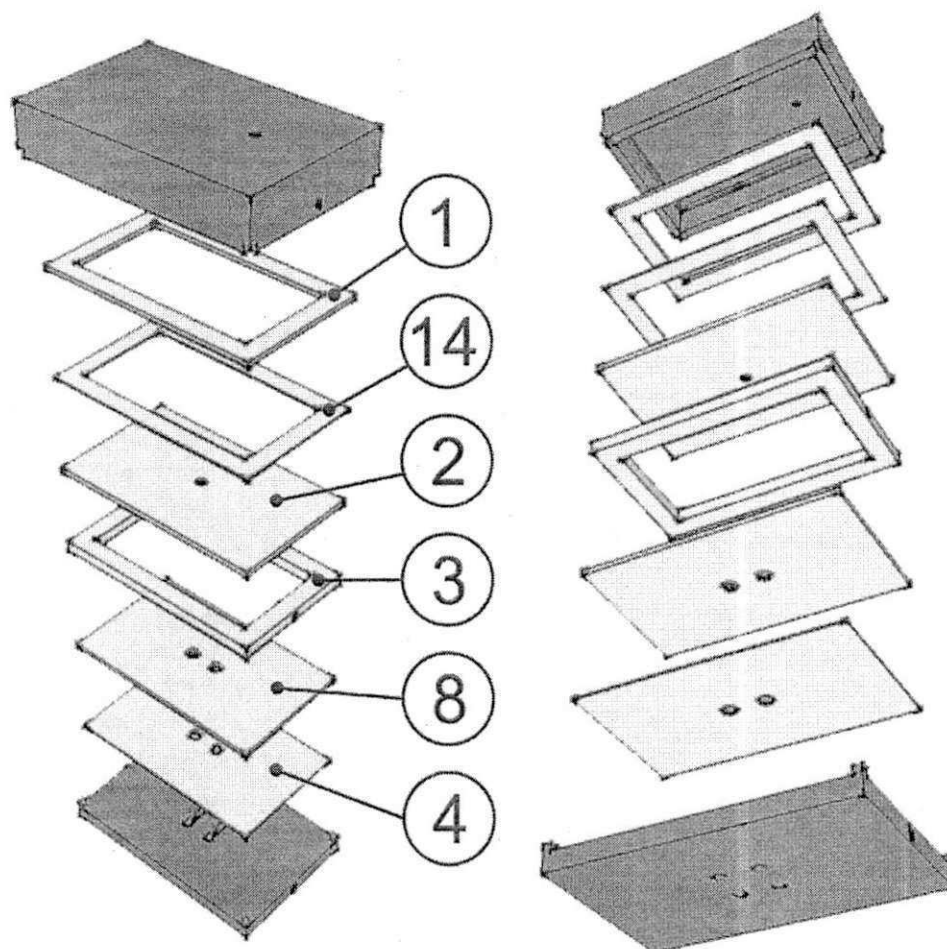


Fig. 65 – Montagem explodida da microválvula (com componentes adicionais da tampa): vistas superior e inferior

Preservando-se ainda a sequência de elementos composicionais alusivos à figura 63, os subcomponentes que fazem parte exclusivamente da tampa e que são enfatizados aqui na figura 65 são, respectivamente:

- 01 - Anteparo onde a fita será presa
- 14 - Espaçador menor (separação do bloco pneumático do anteparo da fita)
- 02 - Bloco do orifício pneumático
- 03 - Espaçador maior (para saída de fluido pela contra-válvula/válvula de registro)
- 08 - Membrana de Polímero (isolante)
- 04 - Bloco para passagem bifurcada do fluido

Quanto à fita, em estado martensítico, percebe-se inicialmente que a pressão da micromola exercida deverá ser maior do que a pressão exercida pelo fluxo de oxigênio na tampa. Conforme nos mostra secção longitudinal da figura 66, a fita

defletida inicialmente se mantém em temperaturas do estado martensita. A tampa assegura o orifício de passagem fluídica fechado por meio de pressão vertical da mola e força peso da tampa.

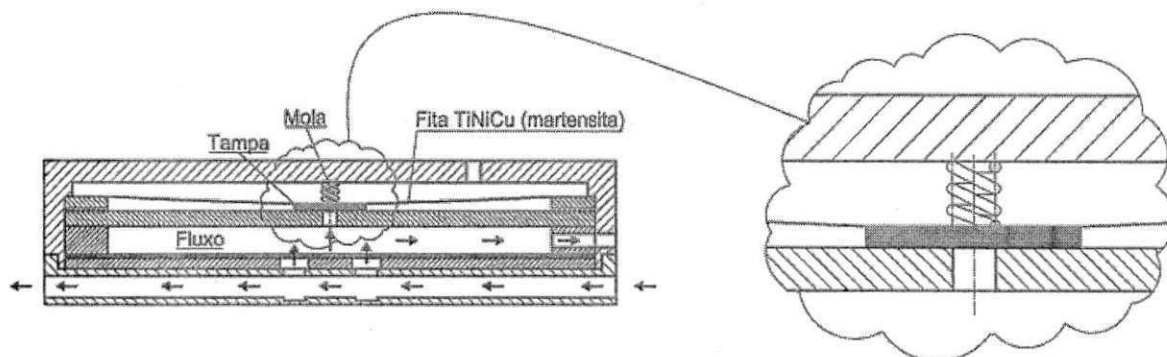


Fig. 66 – Vista seccional para análise de forças promovidas pela mola e tampa no estado martensita

Quando há liberação de corrente através da fita Ti-Ni-Cu com EMF, cuja fonte energética emana de um circuito externo hipotético, a fita muda de fase em estado sólido por efeito Joule, contraindo-se até o ponto de exercer flexão suficiente para levantar a tampa, conforme é mostrado na ampliação da figura 67. Observou-se com isso, ainda, que a pressão a ser exercida pela fita quando for contraída (em estado austenítico) é maior do que a pressões exercidas pela força-peso da tampa somada à força de expansão unidirecional exercida pela micromola.

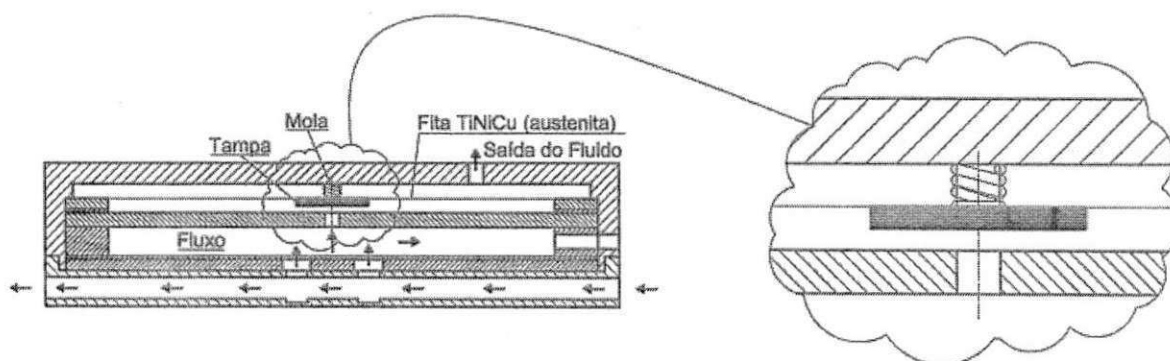


Fig. 67 – Vista seccional para análise de forças promovidas pela fita na fase austenita

6.6 Simulação CFD Ansys® Workbench 14

O método da simulação digital CFD (*Computational Fluid Dynamics*) tem sido usado desde 1995 de forma muito abrangente no campo das engenharias para favorecer uma visualização antecipada de situações tridimensionais em que haja escoamento de fluidos, a fim de se obter dados científicos que são materializados em forma de tabelas, gráficos, imagens estáticas e animações que prevêm comportamentos que antes só eram observados através de prototipagem. Além disso, foi possível aliar eficiência, rapidez, redução de custos e manipulação de variáveis ao poder de incorporar geometrias complexas que tornam o *software* ilimitado em relação à sua aplicação.

Outra vantagem de se utilizar uma ferramenta computacional desse porte é o fato dela incorporar equações que regem o fenômeno dos transportes como as de Navier-Stokes, conforme equações 18abc, do regime laminar, as quais foram usadas em nosso trabalho acrescentando as propriedades do regime turbulento e considerando-se a densidade e a viscosidade como variáveis constantes.

$$\rho \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right] + \rho g_x \quad (18a)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right] + \rho g_y \quad (18b)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \quad (18c)$$

Equação 18abc – Coordenadas cartesianas para fluidos newtonianos

A simulação do fluxo de oxigênio na microválvula de *Bellouard* foi feita adotando o modelo $k-\varepsilon$ de turbulência, o qual foi dividido em cinco etapas que resumem os módulos disponibilizados no aplicativo CFX, os quais são, de acordo com a figura 68: *Geometry*, *Mesh*, *Setup*, *Solution* e *Results*. Essas etapas resumem, respectivamente, os(as): (i) processos de modelagem geométrica; (ii) geração da malha estruturada com elementos finitos; (iii) estabelecimento das condições de contorno; (iv) soluções encontradas de convergência para o princípio de conservação de massa; e (v) resultados finais da simulação digital. Os módulos correspondentes a estas etapas exigidas pelo item *Fluid Flow* (CFX), da barra de

ferramentas CFD, são denominados, nesta mesma ordem: *Design Modeler*, *Meshing*, *CFX-Pre*, *CFX-Solver Manager* e *CFD-Post*.

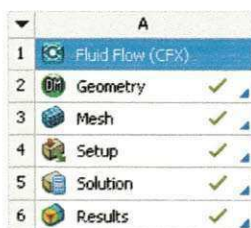


Fig. 68 – Etapas para desenvolvimento da simulação com técnicas de Fluidodinâmica Computacional

Nesta plataforma de simulação na qual foram modeladas as formas tridimensionais, necessitou-se estabelecer com precisão o “negativo” geométrico do volume interno da microválvula de *Bellouard*, tanto para versão fechada como para a versão aberta. Na versão fechada há uma redução no volume interno pelo fato da tampa não permitir a passagem do gás oxigênio para o vão superior. Assim, conforme nos mostra a figura 69, só há trânsito de fluido nos volumes abaixo.

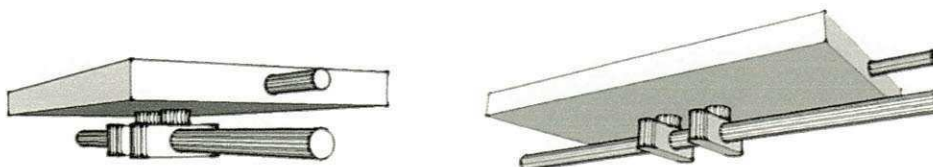


Fig. 69 – Microválvula fechada: volume total por onde o fluido transita internamente

Na versão aberta há uma forma geométrica hermética de maior volume pelo fato da tampa elevada permitir a passagem de O_2 do vão inferior para o vão superior, conforme demonstra a figura 70. Essa forma geométrica compreende exatamente os espaços vazios da microválvula completa, ou seja, resulta como sendo o “inverso” do material pelo qual a mesma é constituída.

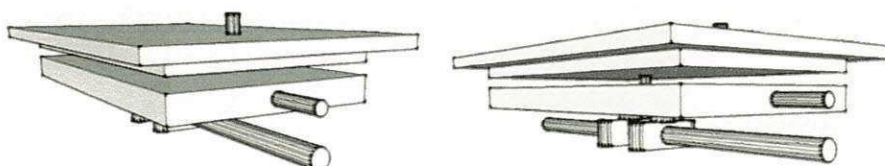


Fig. 70 – Microválvula aberta: volume total por onde o fluido transita internamente

Em ambos os casos, no que tange à troca de calor entre o bloco interno e o meio externo, as geometrias definidas como zonas de fronteiras estabelecem um sistema termodinâmico isolado conhecido como adiabático. Isso se confirma ainda pela rápida velocidade com que o fenômeno do transporte ocorre neste caso: em menos de um segundo. Não há tempo, pois, para troca de calor com a “vizinhança”.

6.6.1 Microválvula fechada

A definição das formas e dimensões é necessário para que o programa seja informado sobre as entrada(s) e saída(s) do fluido, conforme é mostrado a figura 71. O termo *inlet* é usado para indicar entrada e *outlet* é, por padrão, saída, enquanto que as outras superfícies não-indicadas dessas formas se referem às superfícies de contato onde não há entrada/saída. Com isso, mensurou-se as velocidades e temperaturas iniciais que, neste caso foram $0,05 \text{ m.s}^{-1}$ e 25°C .

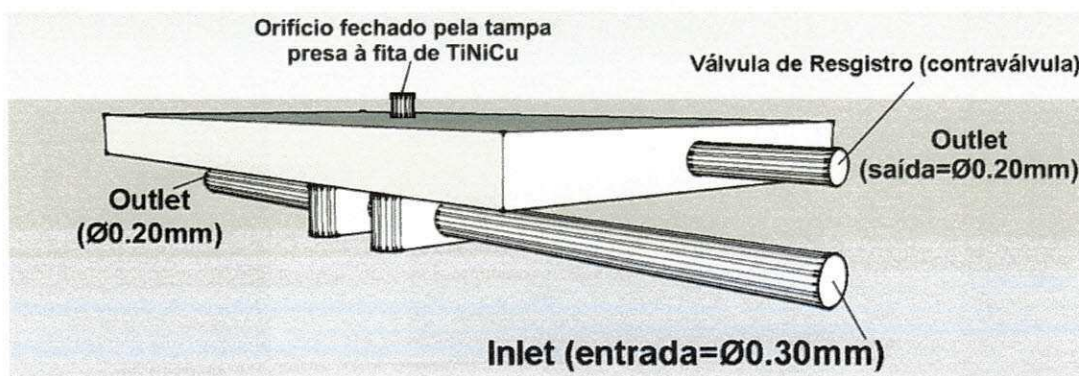


Fig. 71 – 1 entrada e 2 saídas do gás oxigênio na microválvula fechada: orifícios de passagem

A geometria interna da microválvula em sua versão fechada, conforme é apresentada na figura 72, foi gerada no módulo *DesignModeler*, a partir do qual foi possível constituir um corpo com volume de $8,8775 \text{ mm}^3$, área de superfícies que totalizam $58,928 \text{ mm}^2$, com 35 faces, 64 arestas e 44 vértices. Nesse modelador é possível importar corpos geométricos gerados através de softwares CAD como o AutoCAD, o Inventor e o Solidworks, na extensão “.sat”.

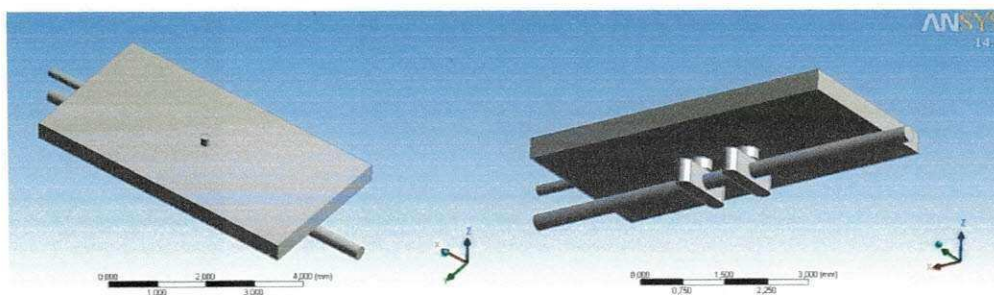


Fig. 72 – Geometria na qual há o trânsito fluido no interior da microválvula fechada

Numa segunda instância, com o módulo *Meshing V14* foi possível gerar uma malha com 96.693 nós e 94.280 elementos tridimensionais, conforme mostram as figuras 73 e 74, sendo que para estes elementos, compreendem-se 4.329 tetraedros, 1.466 prismas, 79.783 hexaedros e 8.702 pirâmides. Esse processo também é conhecido como discretização.

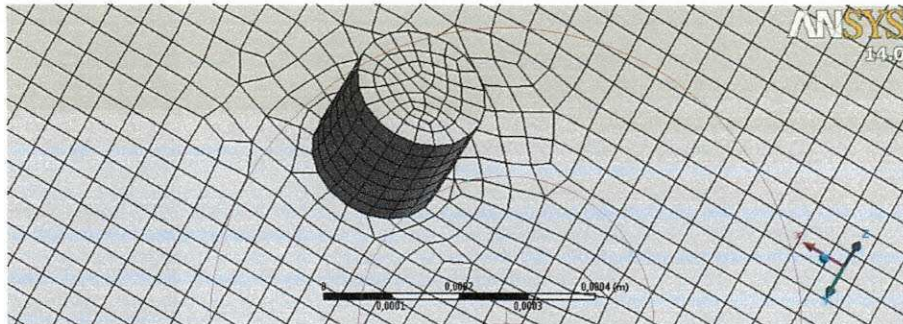


Fig. 73 – Visão superior do duto onde o fluido estanca em virtude da tampa fechada

Um exemplo prático análogo, presente no cotidiano é uma superfície de isopor. Ela apresenta uma divisão em fragmentos poligonais que geram fragmentos poliédricos no interior do corpo. Isso se assemelha com o que acontece quando dividimos o bloco tridimensional em diversos microblocos. Os elementos finitos se transformam em volumes finitos por efeito de modelagem numérica.

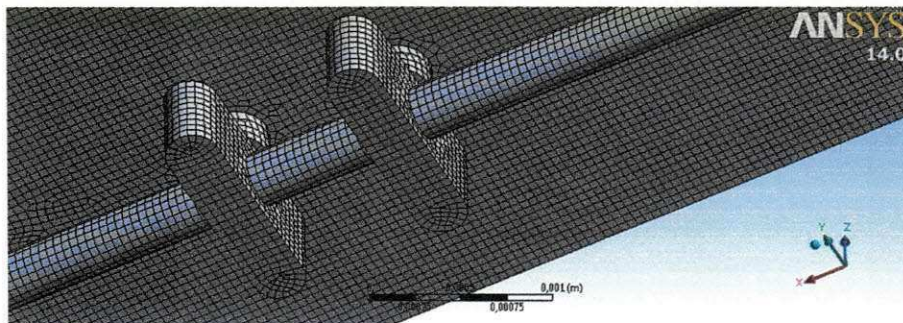


Fig. 74 – Visão inferior dos elementos finitos gerados nas superfícies internas de contato onde a velocidade de deslocamento do fluido tende a zerar

Num terceiro momento se gerou as condições que resumem as aberturas, passagens e limites por onde o fluido transita na microválvula fechada, conforme nos mostra a figura 75. Considera-se como condições de contornos todos os planos e curvas superficiais que limitam o volume interno. As velocidades e temperaturas de saídas nos dois orifícios *outlet* dependem da velocidade e temperatura iniciais definidas para o orifício de entrada *inlet*.

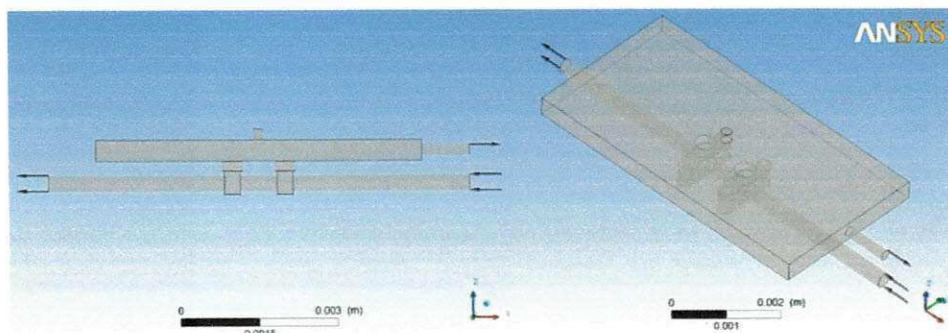


Fig. 75 – Definição das entradas e saídas por onde o fluido se desloca na microválvula fechada

A etapa 4 é processada pelo módulo CFX-Solver numa quantidade pré-definida de 100 iterações. Havendo convergência das variáveis registradas nos 3 gráficos, de acordo com a figura 76, pode-se admitir como satisfatória a simulação. Isso é um sinal que a próxima e última etapa pode ser processada normalmente.

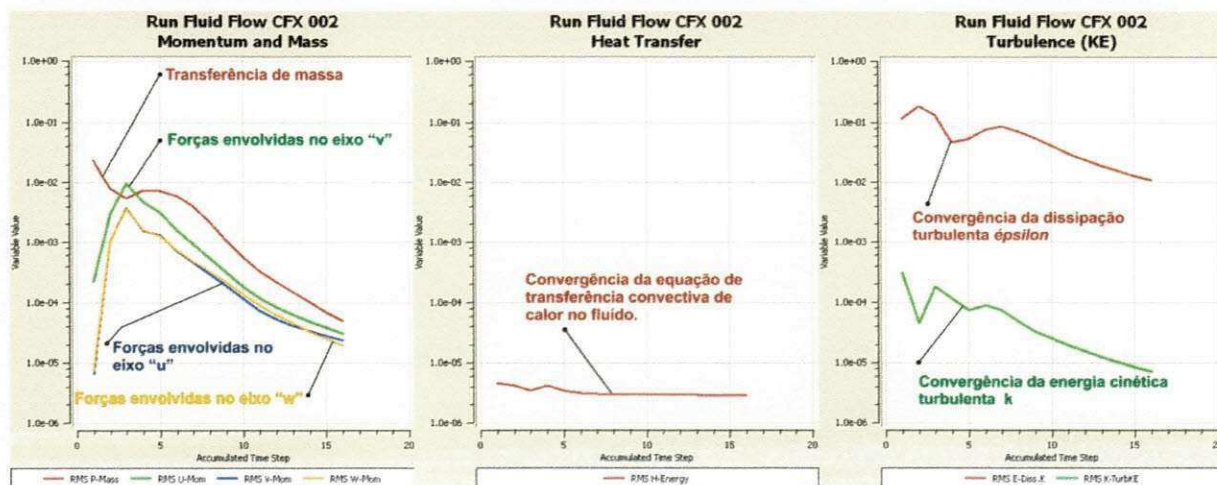


Fig. 76 – Confluência das linhas que confirmam o princípio de conservação de massa

Houve convergência de todas as variáveis: massa, momento e turbulência. A quinta etapa consistiu em observar o roteiro (*streamline*) gerado pela movimentação molecular no interior da *microválvula fechada* por efeito de simulação, conforme sugerem as figuras 77a e 77b. Um vídeo com duração de 1 minuto e 57 segundos está à disposição para visualização no portal YouTube®, cujo link é <http://youtu.be/pUHQ1r8xRjs>.

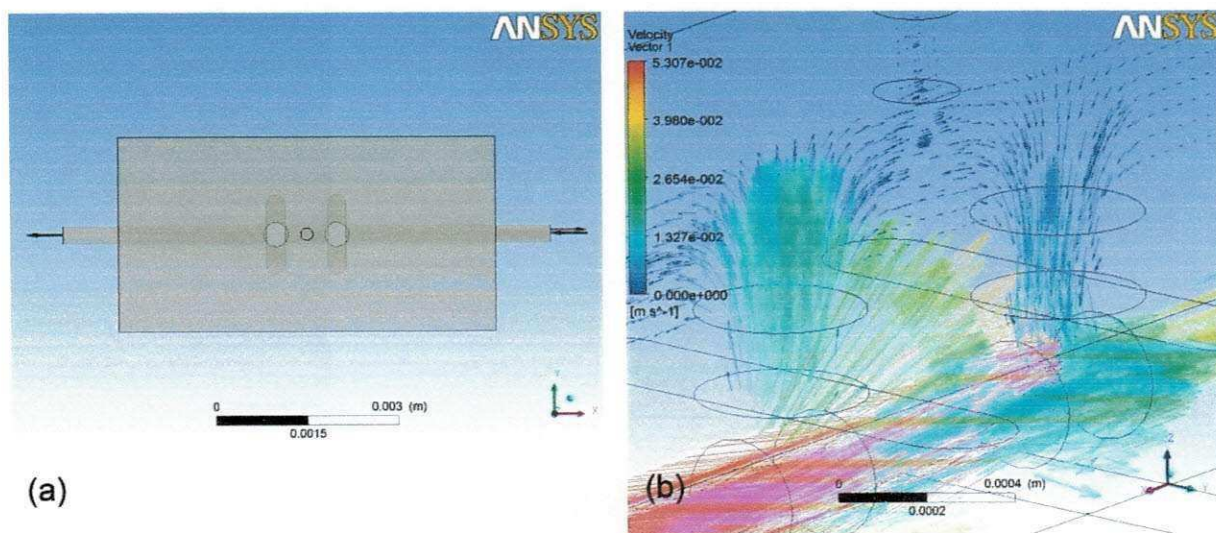


Fig. 77 – (a) Vista superior dos orifícios circulares onde há entrada, passagem, estancamento e saída do fluido no interior da microválvula fechada; (b) vetores de fluxo direcionados

Na figura 78 é possível visualizar os vetores indicando que o segundo orifício não é de entrada do fluido como é o primeiro. O que ocorre nesta ordem é que há entrada e depois, saída do fluido. Neste sentido, seria pouco provável que alguém pudesse imaginar o que de fato a simulação possibilitou concluir.

As cores quentes e frias estão associadas às velocidades calculadas e que podem ser visualizadas na legenda lateral vertical, de acordo como se segue:

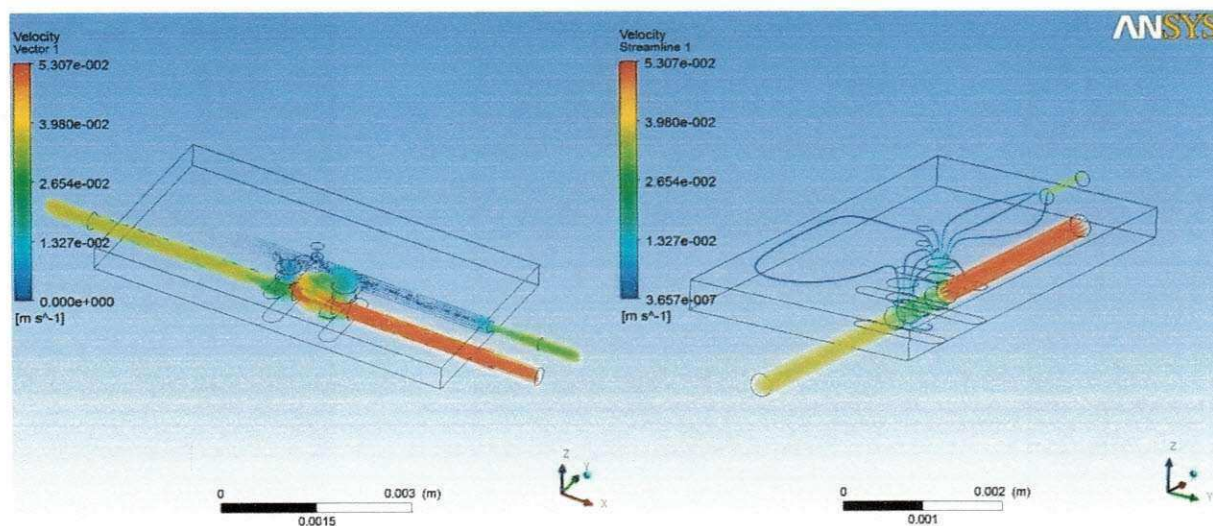


Fig. 78 – Delineamento dos caminhos por onde algumas moléculas percorrem o interior da microválvula fechada. As velocidades legendadas estão em $m \cdot s^{-1}$

6.6.2 Microválvula aberta

Antes da própria definição geométrica (formas e dimensões) é preciso estabelecer onde há entrada(s) e saída(s) do fluido, conforme mostra a figura 79. Isso é de fundamental importância para escolha experimental das velocidades e temperaturas iniciais de entrada que são $0,003 \text{ m.s}^{-1}$ e 25°C .

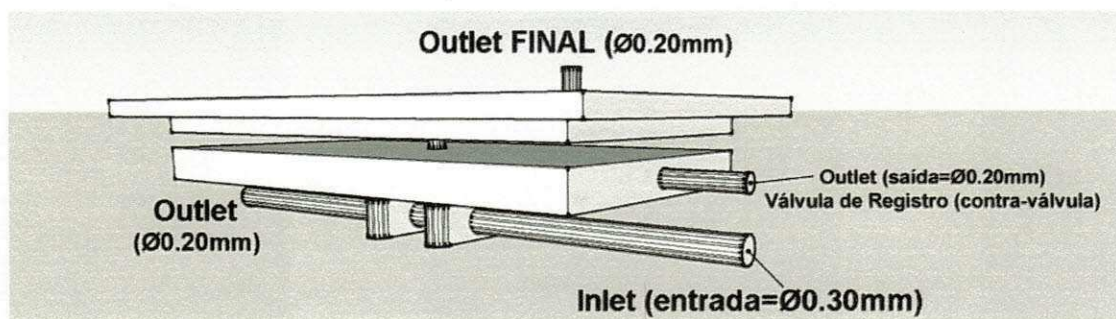


Fig. 79 – 1 entrada e 3 saídas do gás oxigênio na microválvula aberta: orifícios de passagem

Para geração da geometria interna da microválvula aberta, conforme é apresentada na figura 80, foi usada a ferramenta ANSYS® DesignModeler™ 14.0 USA, a partir da qual se gerou um corpo geométrico com volume de $18,90 \text{ mm}^3$, área de superfícies que totalizam $127,85 \text{ mm}^2$, com 47 faces, 90 arestas e 62 vértices. Através desse ambiente computacional de modelagem é possível importar superfícies NURBS aparadas, regiões e sólidos 3D para um arquivo ACIS no formato ASCII (SAT).

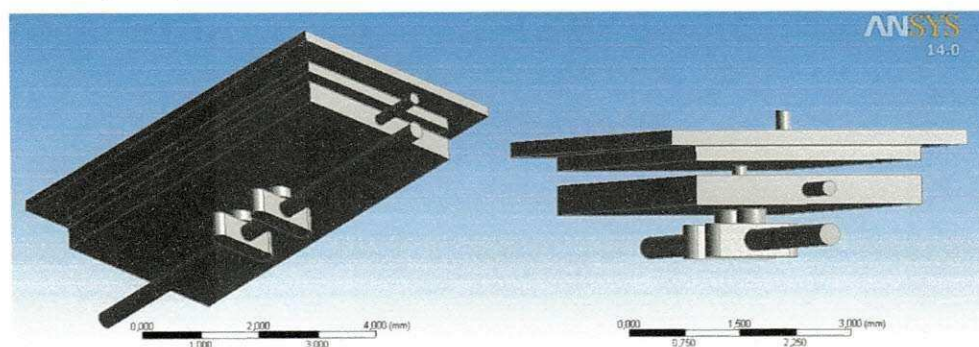


Fig. 80 – Geometria na qual há o trânsito fluídico no interior da microválvula aberta

Num segundo momento, com o módulo ANSYS® Meshing™ [Ansys ICEM CFD] foi possível gerar uma malha com 95.970 nós (incógnitas do sistema de equações tridimensionais para a variável massa fluídica) e 99.377 elementos tridimensionais, conforme mostram as figuras 81 e 82, sendo que para estes elementos, compreendem-se 8.344 tetraedros, 1.549 prismas, 73.074 hexaedros e 16.410 pirâmides.

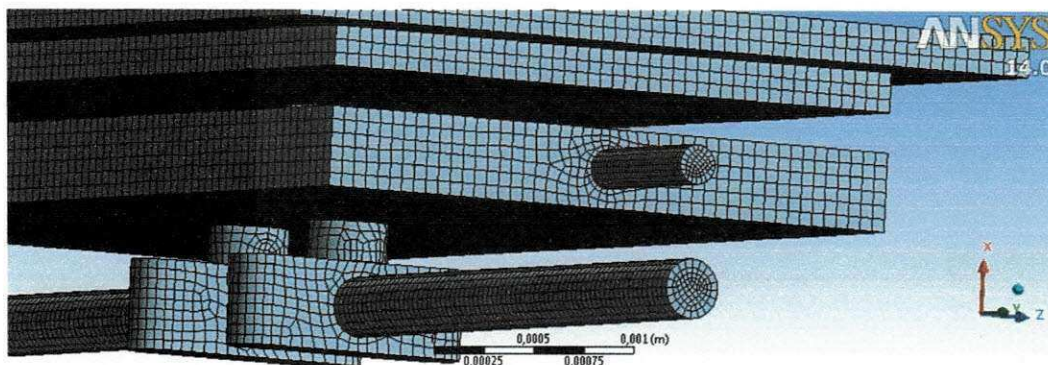


Fig. 81 – Visão dos dutos e paralelepípedos internos por onde há o escoamento do oxigênio

Externamente, a modelagem numérica feita por equações diferenciais gera figuras planas que na sua grande maioria são polígonos regulares e irregulares, mas é possível notar linhas curvas na formação da malha estruturada. Internamente há uma quantidade finita de pequenos sólidos que são originados a partir da superfície externa. Eles têm aproximadamente volumes idênticos. Esses volumes dependem das variáveis vetoriais que são criteriosamente observadas através/no do próprio *software*.

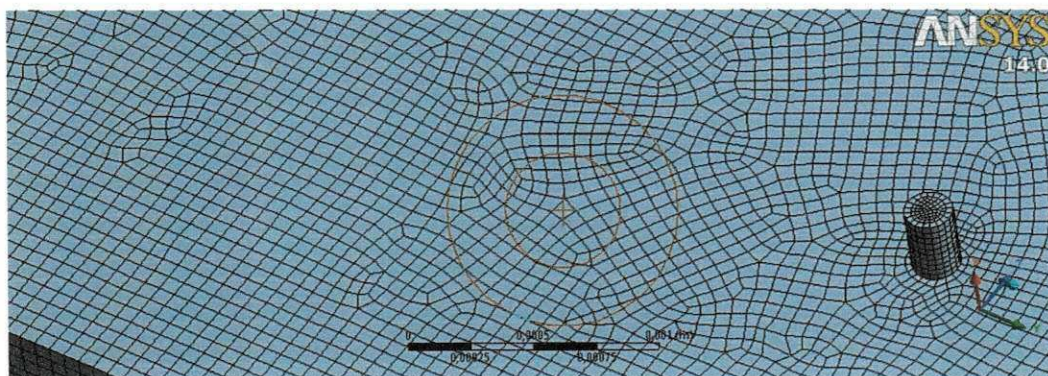


Fig. 82 – Detalhe ampliado da formação de figuras mistas na superfície plana superior e no cilindro de escapamento final da microválvula (escala gráfica expressa em "metro")

Numa terceira instância se gerou as condições de contornos que sintetizam os caminhos por onde o fluido entra, percorre e sai, conforme figuras 83a e 83b. Consideram-se como contornos todas as superfícies planas e curvas que delimitam o espaço volumétrico no interior da microválvula. As velocidades e temperaturas de saídas nos três orifícios *outlet* dependem da velocidade e temperatura iniciais definidas para o orifício de entrada *inlet*.

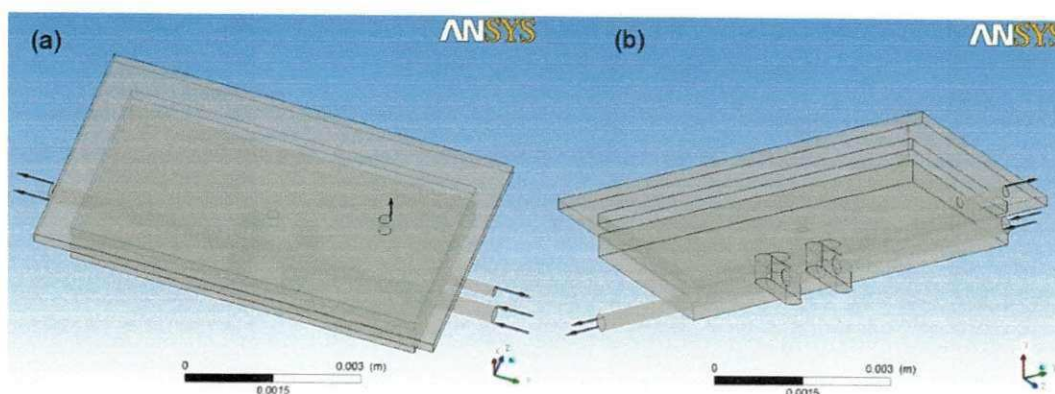


Fig. 83 – Definição das entradas e saídas por onde o fluido se desloca internamente na válvula aberta

A quarta etapa é processada pelo Ansys CFX-Solver Manager numa quantidade estabelecida de 100 iterações para que haja convergências das variáveis registradas em três gráficos que de acordo com a figura 84 são: Momento e Massa, Transferência de Calor e Turbulência *K-Épsilon*.

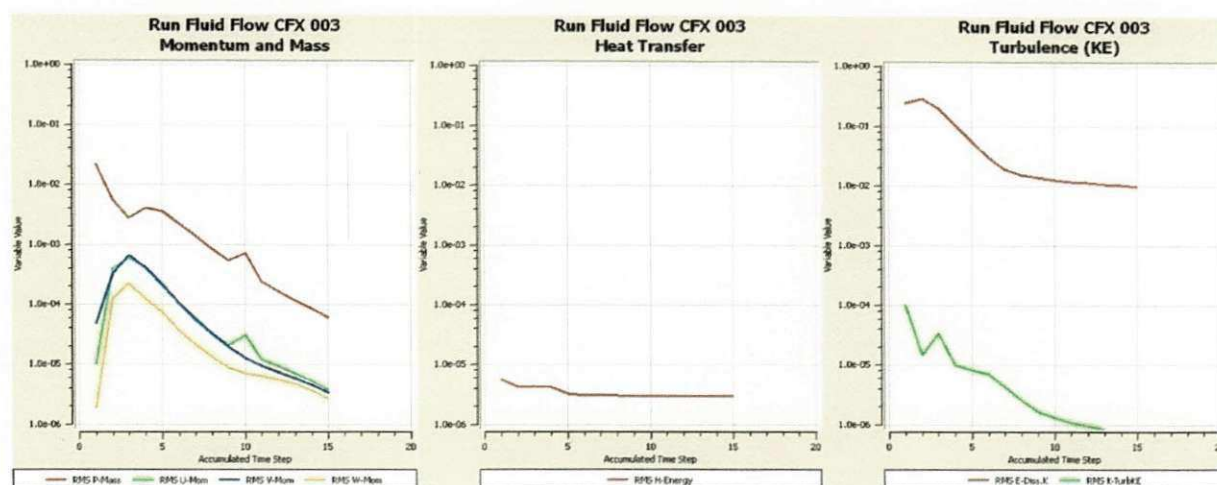


Fig. 84 – Convergência das linhas que confirmam o princípio de conservação de massa

No primeiro gráfico da figura 84, a linha vermelha é a variável da massa e se refere ao processo iterativo de convergência da transferência de massa. A linha azul é a variável de momento, ou seja, refere-se às forças envolvidas associadas às velocidades em "x" que é "u". A linha verde é a variável de momento, ou seja refere-se as forças envolvidas, associadas as velocidades em em "y" que é "v" e se refere ao processo iterativo de convergência da transferência de momento. A linha amarela é a variável de momento, ou seja refere-se às forças envolvidas, associadas às velocidades no eixo "z" que é "w" e se refere ao processo iterativo de convergência da transferência de momento. Ou seja, para que ocorra convergência, elas devem sempre tender a zero.

No segundo gráfico da figura 84, a linha vermelha refere-se à convergência da equação de transferência de calor convectiva no fluido. No terceiro gráfico da figura 84, a linha vermelha se refere à convergência da dissipação turbulenta ϵ e a linha verde se refere à convergência da energia cinética turbulenta k , do sistema de turbulência k - ϵ .

A quinta e última etapa consistiu em observar o roteiro (*streamline*) gerado pela movimentação molecular no interior da *microválvula aberta* por efeito de simulação, conforme sugere a figura 85, demonstrando pela legenda, onde os níveis de velocidade são maiores ou menores. Em decorrência disso foi feito um vídeo com duração de 1 minuto e 45 segundos que está à disposição para visualização gratuita no site YouTube, cujo link é <http://youtu.be/UNaF3NWb-ow>.

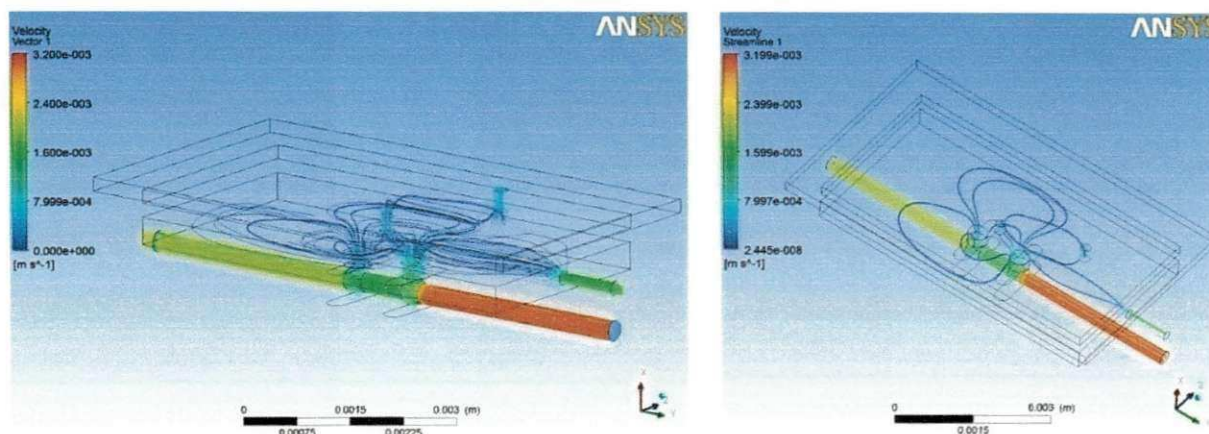


Fig. 85 – Caminhos por onde algumas moléculas percorrem o interior da microválvula aberta

Observa-se, enfim, que a velocidade média do fluido para a *microválvula fechada* foi de $1,33 \times 10^{-2}$ m/s enquanto que na *microválvula aberta* a velocidade média foi de $7,99 \times 10^{-4}$ m/s. Essa comparação indica que os níveis de pressão para a primeira são bem maiores que os diferenciais de pressão que ocorrem na segunda. Assim, os níveis de velocidade na *microválvula fechada* são maiores do que na *microválvula aberta*. Esses resultados podem ser usados como referência para futuros projetos de microválvulas.

7. CONCLUSÕES

O tratamento térmico foi eficiente para eliminar os defeitos e as tensões residuais das fitas. Essa eficiência foi comprovada pelas curvas de DSC que tornaram mais nítidos os picos das temperaturas de transformação (TTRs);

A comparação de performance entre os resultados de DMA obtidos com as fitas tratadas evidenciaram que a fita solidificada rapidamente a uma velocidade *melt-spinning* de 38 m/s possui um maior módulo de elasticidade do que a fita obtida com a velocidade de 50 m/s;

Apesar de não ser um equipamento comercial, o aparato usado para fazer as medidas no teste de *Resistência Elétrica x Temperatura* se mostrou eficiente para as medidas de temperaturas de transformação de fase quando comparadas às medidas obtidas por aparelho comercial DSC, pois os coeficientes de variação estão entre 2 e 5 pontos percentuais. Isso foi constatado por meio da análise estatística de dados não-agrupados, a saber: medidas de tendência central, separatrizes (medidas de posição) e medidas de dispersão (variabilidade);

O projeto tridimensional (feito a partir do esboço bidimensional teorizado por *Bellouard, 2008*) usou as dimensões do *container* (caixa) sugeridas inicialmente (2 x 5 x 8 mm), mas modificou dimensões internas e detalhes geométricos de encaixe e subcomponentes porque o esboço original não especifica detalhamento interno;

A modelagem do projeto tridimensional da microválvula foi fundamental para se obter o "volume vazio" da microválvula, pois só com este último é que se tornou possível importá-lo para a plataforma interna CFX a fim de se fazer a simulação com precisão geométrica e volumétrica nas superfícies de contorno;

A simulação computacional se constituiu como um meio virtual bastante eficaz para visualização antecipada do escoamento do gás oxigênio (O₂) no interior da microválvula, na qual atua a fita tratada de Ti₅₀Ni₄₇Cu₃ com *Efeito Memória de Forma*, desenvolvida para esta finalidade. Com os resultados obtidos, consideramos que a microválvula funciona e que o projeto é viável.

8. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir do trabalho dissertativo realizado é possível indicar futuros estudos que possam ser apreciados/vislumbrados por pesquisadores nas áreas das engenharias e *design*, tais como:

- Aplicação experimental de outras fitas com EMF na microválvula de *Bellouard*, com percentuais atômicos e de massas diferenciados;
- Redesenho da estrutura tridimensional projetada para efeito de otimização do transporte em diferentes fluidos gasosos e líquidos;
- Construção da microválvula de *Bellouard* (escala de ampliação) em ABS com base em tecnologia de prototipagem digital;
- Estudos de aprofundamento das propriedades elétricas em fitas Ti-Ni-Cu a partir de outros autores e enfoques variados;
- Adoção à microválvula de *Bellouard* de diferentes ligas binárias e ternárias (a partir de elementos metálicos diversos) com EMF que possam oferecer menores TTRs, histereses térmicas de transformação de fase e amplitudes térmicas;
- Simulação de escoamento fluídico na microválvula de *Bellouard* por intermédio do Workbench CFD Ansys® através de estrutura dinâmica;
- Estudo de análise termodinâmica em fitas Ti-Ni-Cu de várias composições percentuais;
- Estudo comparativo das resistividades da fita $Ti_{45}Ni_{48}Cu_7$ (38 m/s) com resistividades de uma fita de Nitinol, sob as mesmas condições de tratamento térmico e obtenção (*melt-spinning*);
- Comparar resultados experimentais de ligas com *memória de forma* aos modelos matemáticos de Dutta & Ghorbel (2005) e Song, Kurbica & Gorbet (2011);
- Fazer testes LVDT em fitas do sistema Ti-Ni-Cu com EMF para registrar performances de deslocamentos percentuais ou variações dimensionais de comprimento(s) em função de faixas de variações controladas de temperaturas.

REFERÊNCIAS

- AIROLDI, G., LODI, D. A., POZZI, M. **The Electric Resistance of Shape Memory Alloys in the Pseudoelastic Regime**. JOURNAL DE PHYSIQUE IV. Colloque C5, Supplment au Journal de Physique I, 11 de novembre 1997. 6 p.
- ANSELMO, George Carlos dos Santos. **Influência da Solidificação Rápida nas Temperaturas de Transformação de Ligas Ni-Ti com Efeito de Memória de Forma**. 2010, 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba.
- AQUINO, Alberdan Santiago de. **Controle de vibração de um sistema sob desbalanceamento rotativo utilizando atuador de liga com memória de forma**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Tese de Doutorado apresentado à Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa-PB, 2011. 135 f.
- BARTH, Johannes; MEGNIN, Christof; KOHL, Manfred. **A Bistable Shape Memory Alloy Microvalve With Magnetostatic Latches**. Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 21, N° 1, February 2012, p. 76-84.
- BELLOUARD, Yves. **Shape memory alloys for microsystems: A review from a material research perspective**. Materials Science and Engineering A. Ed. Elsevier: p. 582-589, 2008.
- BORGES, Berenice Lins Marcelino. **Simplificando a Estatística: coletânea de exercícios para estudos didáticos**. Editora da Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande-PB, 1993. 206 p.
- BERNARD, W. L.; KAHN, H. H.; HEUER, A.; HUFF, M. A. **Thin-film shape-memory alloy actuated micropumps**. Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 7, n. 2, June 1998, p. 245-251.
- CHAPLIN, Martin. **Hydrocolloid Rheology**. Creative Commons Attribution -Noncommercial-No Derivative Works 2.0 UK: England & Wales License. In: Water structure and Science. Disponível em: <<http://www.lsbu.ac.uk/water/hyrhe.html>> Acesso em: 06/05/2012.
- CHRISTOU, Aris; WEBB, Willie M. **Materials and reliability issues in MEMS and microsystems**. Rev. Materials Science and Engineering. University of Maryland College Park, MD 20742-2115. 2006.
- CLAUSI, D.; PEIRS, J.; REYNAERTS, D. **Towards Batch Integration of SMA into Microsystems: An Actuator Prototype**. Katholieke Universiteit Leuven, Department of Mechanical Engineering, Division PMA. Cardiff University, Cardiff, UK. Published by Whittles Publishing Ltd. 2008.
- DUERIG, Thomas; PELTON, Alan; TREPANIER, Christine. **Nitinol**. CHAPTER 9 - Alloying and Composition in: PART I: Mechanisms and Behavior. SMST e-Elastic newsletter, 2011. 30 p.

DUTTA, Sushant M.; GHORBEL, Fathi H. **Differential Hysteresis Modeling of a Shape Memory Alloy Wire Actuator**. IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 10, NO. 2, APRIL 2005, p. 189-197.

FILHO, B. S. Sousa; ARAÚJO, C. J.; GUASTALDI, A. C.; CARVALHO, L. H. **Caracterização de materiais com efeito memória de forma à base de Ni-Ti tratadas a laser para aplicação médica**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.6.1 (2011) p. 59-76.

GRIFFITHS, David. In: Alison Reeves (ed.). **Introduction to Electrodynamics**. 3rd edition ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1999. 286 p. (OCLC 40251748) ISBN 0-13-805326-X.

HANLON, JE; SR Butler and RJ Wasilewski. Trans. AIME 239, (1967) 1323.

HARRISON, J. **Private communication**. [S.l.: s.n.]

HENNY, Fred. **Nitinol as a sensing and actuating material**. Disponível em <http://www.wikid.eu/index.php/Nitinol_as_a_sensing_and_actuating_material> Acesso em: 11/11/2011.

KOHL, M. **Shape Memory Microactuators**. Ed. Springer. Kalsruhe, Germany: 2004. 205 p.

MATTH, Johnson. **Measuring Transformation Temperatures in Nitinol Alloys**. Disponível em: <<http://jmmedical.com/resources/211/Measuring-Transformation-Temperatures-in-Nitinol-Alloys.html>> Acesso: 15/11/2011.

MEGNIN, C.; BARTH, J.; KOHL, M.. **A bistable SMA microvalve for 3/2-way control**. Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute of Microstructure Technology (IMT), Karlsruhe, Germany, 2011. 7 p.

MERTMANN, M.; HORNBOGEN, E. **Grippers for the Micro Assembly Containing Shape Memory Actuators and Sensors**. J. Phys. IV France 7 (1997). Colloque C5, Supplément au Journal de Physique III de novembre 1997, p. 621-626.

MOTAMEDI, Edward M. **Micro-opto-electro-mechanical Systems**. SPIE Press, 2005 - 614 páginas.

NASCIMENTOa, Adriana Bispo do. **Ligas com Memória de Forma para aplicações em Microssistemas**. 2011. 45 f. Monografia (Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba.

NASCIMENTOb, Fabiana Cristina; MEI, Paulo Roberto; OTUBO, Jorge. **Estudo do efeito de memória de forma em ligas inoxidáveis usando ensaio de compressão**. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 63, n. 3, Set. 2010.

OTSUKA, K; WAYMAN, C. M. Shape Memory Materials in: **Reliability and Quality in Microelectronic Manufacturing**. Cambridge University Press, Cambridge, UK 1998, 19 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

PEIRS, J.; REYNAERTS, D.; BRUSSEL, H. Van. **Shape memory alloy micro-actuators for medical applications**. K.U.Leuven - P.M.A. Celestijnenlaan 300B, 3001 Heverlee. Proceedings of the 4th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, 1997: p. 389-392.

PEREIRA, Leonardo Leite. **Dispositivo de ensaio de ligas com efeito de memória de forma**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Mecânica-Aeronáutica. São José dos Campos-SP: 2000, 5 p.

PICCINI, Matthew E.; TOWE, Bruce C. **A shape memory alloy microvalve with flow sensing**. Sensors and Actuators A 128. Rev. Science Direct. Received 4 January 2005; received in revised form 18 January 2006; accepted 18 January 2006. Ed. Elsevier: 2006, p. 344-349.

RAMOS, Alana Pereira; CASTRO, Walman Benício de. **Caracterização de ligas à base Ni-Ti com efeito de memória de forma resfriadas rapidamente**. VIII congresso de iniciação científica da Universidade Federal de Campina Grande. 14 p. 2011.

REIS, Rômulo Pierre Batista dos. **Desenvolvimento de um equipamento para caracterização térmica de atuadores de ligas com memória de forma usando o efeito termoelétrico**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, da UFCG. Campina Grande-PB, 2010: 73 f.

REYNAERTS, Dominiek; BRUSSEL, Hendrik Van. **Design aspects of shape memory actuators**. Katholieke Universiteit Leuven, Department of Mechanical Engineering, Division PMA, Celestijnenlaan 300 B, B-3001 Heverlee, Belgium. Ed. Pergamon. Mechatronics 8 (1998) 635-656.

RIBAS, Renato P. **Microssistemas Integrados (MEMS)**. Disponível em: <<http://dc118.4shared.com/doc/wSN4NvDt/preview.html>> Acesso em: 12/11/2011. [s.n.].

ROH, Jin-Ho; BAE, Jae-Sung. **Thermomechanical behaviors of Ni-Ti shape memory alloy ribbons and their numerical modeling**. Revista Mechanics of Materials 42. School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, 100 Hwajeon, Goyang, Gyeonggi 412-791, Republic of Korea. Ed. Elsevier Ltda. 2010.

SONG, Hunter.; KUBICA, Eric.; GORBET, Rob. **Resistance Modelling of SMA Wire Actuators**. International Workshop SMART MATERIALS, STRUCTURES & NDT in AEROSPACE. Conference NDT in Canada 2011, 2-4 November 2011, Montreal, Quebec, Canadá. 10 p.

VANDELLI, N.; WROBLEWSKI, D.; VELONIS, M.; BIFANO, T. **Development of a MEMS microvalve array for fluid control**. Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 7, n. 4, Dec. 1998, p. 395-403.

APÊNDICES (dimensões da microválvula de *Bellouard*: 2 x 5 x 8 mm)

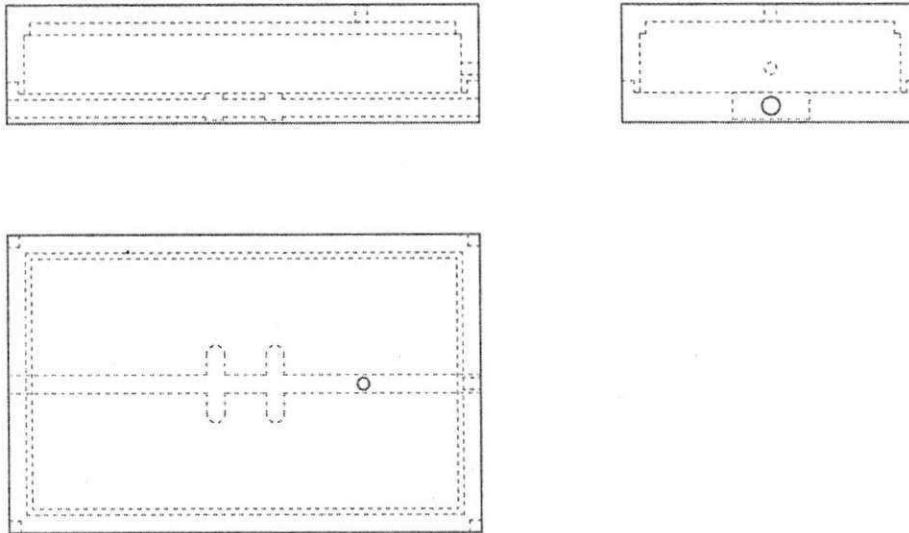


Fig. 86 - Vistas ortográficas da microválvula (tampa e base): vistas frontal, superior e lateral

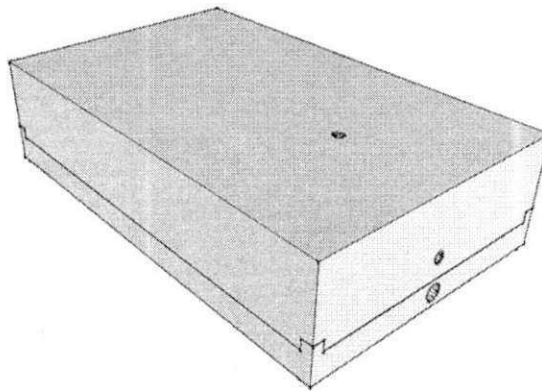


Fig. 87 - Perspectiva superior da microválvula (tampa e base encaixadas): encaixe por pressão

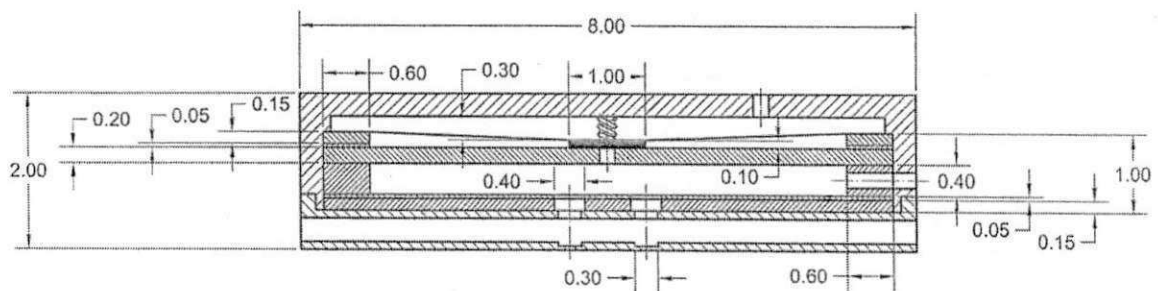


Fig. 88 - Vista seccional da microválvula (tampa e base em corte longitudinal): medidas em milímetros

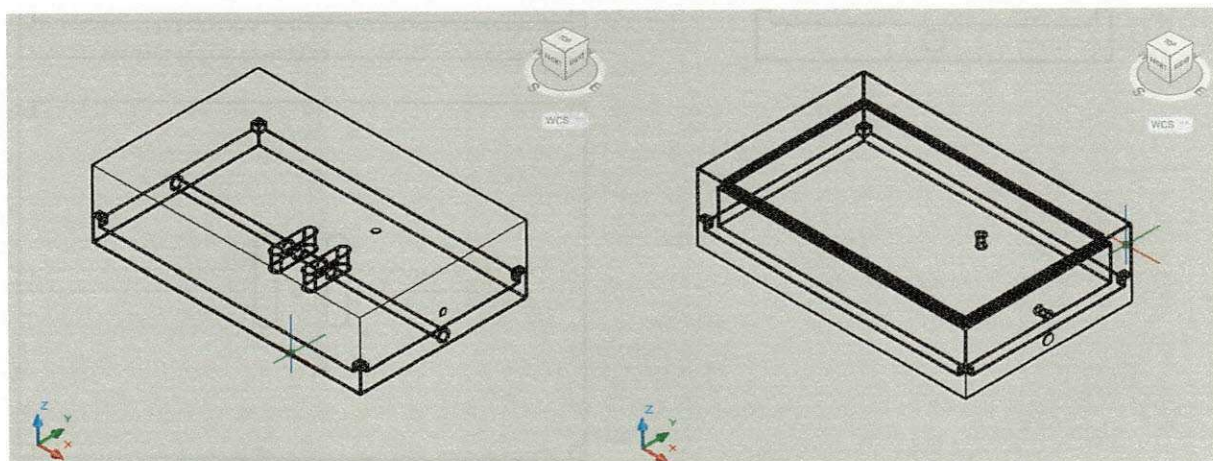


Fig. 89 - Destaques das geometrias da base e da tampa, respectivamente

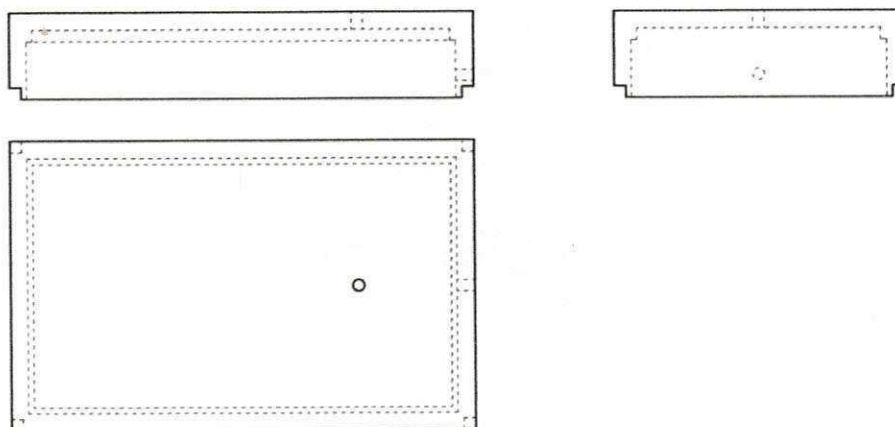


Fig. 90 - Vistas ortográficas da tampa (com detalhes dos contornos invisíveis)

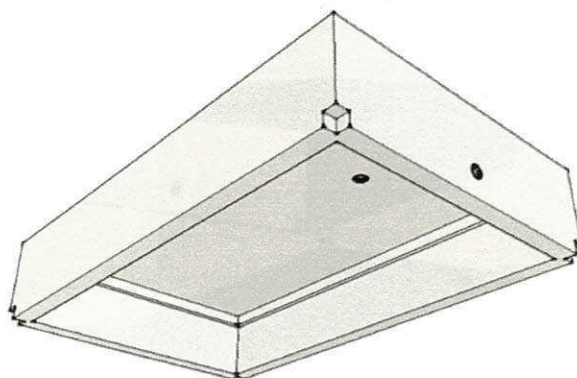


Fig. 91 - Perspectiva da tampa (vista inferior)

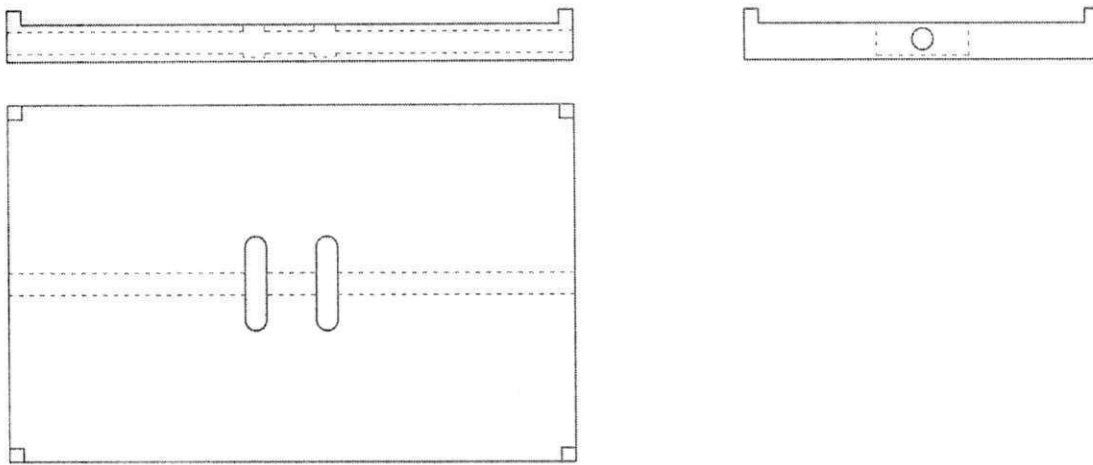


Fig. 92 - Vistas ortográficas da base (peça única)

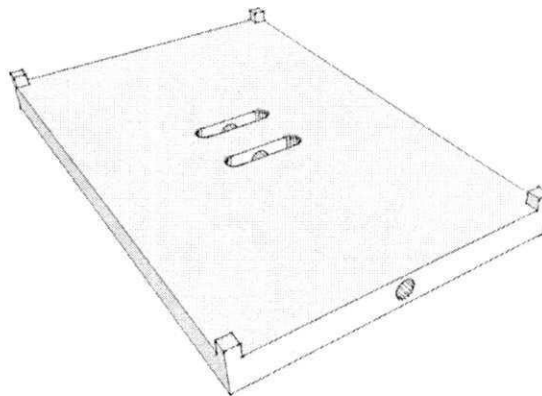


Fig. 93 - Perspectiva da base (vista superior)

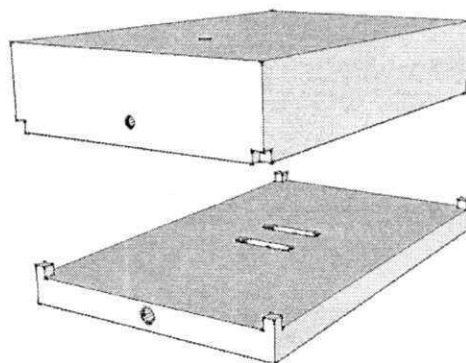


Fig. 94 - Perspectiva da tampa e base (montagem do encaixe)

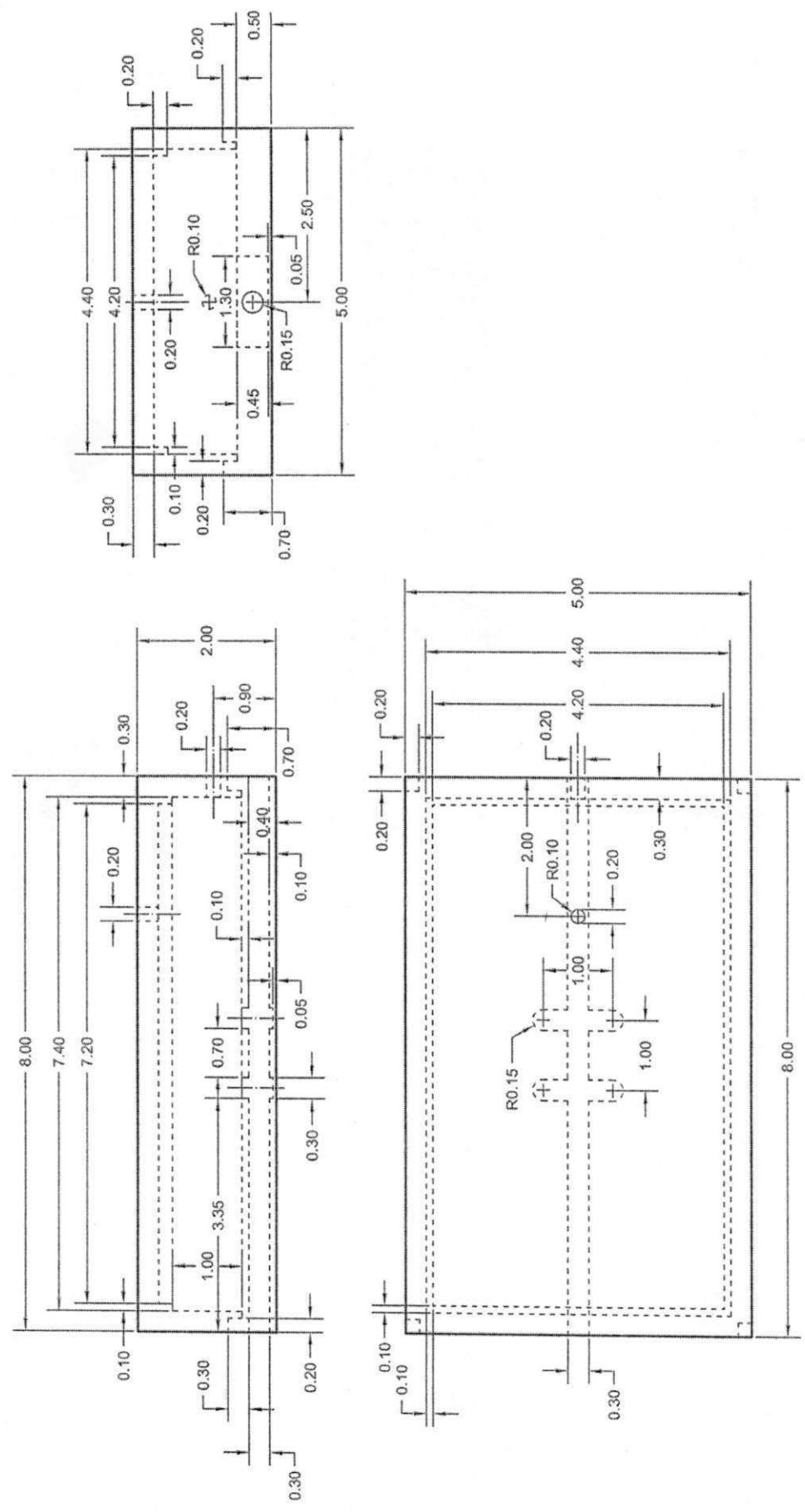


Fig. 95 - Vistas ortográficas da microválvula: dimensionamento completo (cotas em milímetros)