

# AVALIAÇÃO TÉCNICA DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE PRECISÃO PARA FABRICAÇÃO DE ATUADORES DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA\*

Jackson de Brito Simões<sup>1</sup>  
Carlos José de Araújo<sup>2</sup>

## Resumo

As ligas com memória de forma (LMF) apresentam características funcionais de recuperação de deformações plásticas aparentes e mudança de suas propriedades mecânicas quando submetidas a variações de temperatura, proporcionando um crescente interesse para aplicações de engenharia e originando uma nova maneira de projetar sistemas mecânicos. Nesse contexto, é importante desenvolver novos métodos de fabricação de componentes e dispositivos a partir de LMF. Infelizmente essa fabricação pode ser ainda extremamente complexa e dispendiosa, principalmente para LMF do sistema Níquel-Titânio (Ni-Ti). No final do século XX, a fundição de precisão se tornou uma alternativa eficaz para a conformação de componentes de titânio e suas ligas em aplicações de alta tecnologia. Entretanto, não existem informações da utilização desse processo para fabricação de componentes mecânicos de LMF. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o processo de fundição de precisão para o desenvolvimento de novos, produtos principalmente miniatuadores ativos de LMF Ni-Ti. Para isso, foi realizada a fabricação de diferentes formatos de miniatuadores de LMF Ni-Ti (de composição nominal em peso de 54,9Ni-45,1Ti) pelo processo de fundição de precisão com molde sólido, e ainda sua caracterização térmica e por ensaios não destrutivos. Foram obtidos quatro miniatuadores distintos, nos formatos de minitubo duplo, arruela Belleville, mola e parafuso, com bom acabamento superficial. A presença da transformação de fase característica das LMF foi avaliada por técnicas de calorimetria diferencial exploratória (DSC) e resistência elétrica em função da temperatura (RET) nos quatro tipos de miniatuadores. As técnicas não destrutivas de raios X e tomografia computadorizada foram empregadas para avaliar a qualidade dos miniatuadores produzidos, sendo importantes na detecção da presença de defeitos de processo. Ficou evidente a eficiência do novo processo proposto, porém ainda se faz necessário mais investigações principalmente com relação ao comportamento termomecânico dos miniatuadores obtidos por esse processo.

**Palavras-chave:** Ligas com memória de forma; Fundição de precisão; Atuadores de LMF; Ligas de Ni-Ti.

## TECHNICAL EVALUATION OF THE INVESTMENT CASTING PROCESS TO MANUFACTURING SHAPE MEMORY ALLOY ACTUATORS

### Abstract

Shape memory alloys (SMA) present functional characteristics of recovering apparent plastic strains and change of mechanical properties when subjected to temperature variations, providing an increasing interest for engineering applications and creating a new way of designing mechanical systems. In this context, it is important to develop new methods of manufacturing mechanical components and devices from SMA. Unfortunately, this production may be even extremely complex and expensive, especially for the Nickel-Titanium (Ni-Ti) SMA system. At the end of the 20th century, investment casting has become an effective alternative to forming titanium components for high-tech applications. However, there are not reports on the use of this process for the manufacture of mechanical components from SMA. The objective of this study was to evaluate the investment casting process for the development of new products, mainly active SMA Ni-Ti mini actuators. For this one, the manufacture of different formats of miniaturized Ni-Ti SMA actuators (nominal composition by weight of 54,9Ni-45,1Ti) by investment casting process was performed with solid molds, and also their thermal characterization and nondestructive testing. Four different mini actuators were obtained with the shapes of double mini tube, Belleville washer, spring and bolt, with good surface finish. The presence of the phase transformation, characteristic of SMA, was evaluated by techniques of differential scanning calorimetry (DSC) and electric resistance as a function of temperature (ERT) in the four shapes of mini actuators. The nondestructive techniques, computed tomography and X-ray pictures, were employed to assess the quality of the produced miniature actuators. These techniques are important for the detection of process failures. It was evident the efficiency of the proposed new process, but still need more investigations mainly related to the thermomechanical behavior of mini actuators obtained by this process.

**Keywords:** Shape memory alloys; Investment casting precision; SMA Actuators; Ni-Ti Alloy.

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico, Mestre, professor Assistente I, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, Caraúbas, Rio Grande do Norte, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Doutor, professor Associado I, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

As ligas com memória de forma (LMF) têm sido foco de muitas pesquisas e estudos nas últimas décadas devido a suas características incomuns e as grandes possibilidades de utilização em diversas áreas do desenvolvimento tecnológico. Esse tipo de liga metálica possui a capacidade de recuperar a sua forma inicial, anterior a aplicação de uma deformação pseudoplástica, através de um mecanismo termoativo que se beneficia das transições de fase no estado sólido presentes nesse tipo de material. As LMF possuem dois fenômenos principais associados, denominadas de efeito memória de forma (EMF) e superelasticidade (SE), que são determinados por temperaturas de transformação de fase, do tipo martensítica termoelástica [1]. Considerando que o fenômeno de EMF desses materiais pode ser usado para produzir trabalho mecânico em função da temperatura, essas LMF podem ser consideradas atuadores termomecânicos por natureza.

O EMF pode ser visualizado quando a LMF é deformada pseudoplasticamente a uma temperatura mais baixa, em que o material está na fase martensita ( $T < M_f$ ) e, após ser aquecida acima de uma determinada temperatura em que o material se transforma para a fase austenita ( $T > A_f$ ), de mais alta temperatura, retomando a sua forma inicial anterior a deformação. Por outro lado, a característica da SE corresponde ao retorno da LMF a sua forma inicial, recuperando grandes deformações, logo após o carregamento mecânico ser aplicado ao material completamente na fase austenita ( $T > A_f$ ) ter sido removido, sem a necessidade de aquecimento. Dentre as LMF existentes, aquelas do sistema Ni-Ti se destacam por apresentar propriedades funcionais de EMF e SE mais expressivas do que os sistemas de ligas de base cobre (Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al e outros), além de ser biocompatível [2].

Devido as propriedades características das LMF, tais como recuperação de grandes deformações (da ordem de 8% em tração uniaxial), variação de rigidez e amortecimento em função da temperatura e histerese térmica, esses materiais especiais podem proporcionar a engenheiros e pesquisadores a oportunidade de criar uma variedade de novos produtos, melhorar e/ou desenvolver novos processos/procedimentos a partir desses metais [3].

O principal problema para a difusão de novas aplicações a partir dessas LMF está no processamento dos semiprodutos (chapas, barras, fios, etc.) para obtenção do produto final (Atuador LMF). Os processos convencionais, mesmo que otimizados, esbarram nos altos custos envolvidos. As LMF de Ni-Ti, por exemplo, são de difícil usinabilidade e proporcionam um desgaste excessivo das ferramentas, e estudos tem relatado que a usinagem via eletroerosão degradam o EMF [4-6]. Assim, é importante desenvolver novos métodos de obtenção de componentes e dispositivos a partir de LMF, que infelizmente ainda apresenta aspectos problemáticos na sua preparação, sendo ainda extremamente complexo e dispendioso, principalmente para LMF do sistema Ni-Ti.

Desde sua aplicação comercial na década de 70 a partir de uma liga equiatômica de NiTi, inúmeros foram os processos adaptados/desenvolvidos para a obtenção de LMF (fusão por indução à vácuo, arco eletrodo, feixe de elétrons, plasma) tendo cada qual sua particularidade e limitação tecnológica. Entretanto, a fabricação de produtos a partir das LMF atualmente é bastante restrita as empresas detentoras da tecnologia; poucos países no mundo dominam o processamento dessas materiais e a fabricação de componentes (que tem caráter de alta tecnologia) [7].

No final do século XX, a fundição de precisão se tornou uma alternativa eficaz para a conformação de componentes de titânio e suas ligas em aplicações de alta tecnologia [8]. Entretanto, não existem informações da utilização desse processo para fabricação de componentes de LMF.

Nesse cenário, é ainda de grande importância o desenvolvimento de novos métodos de obtenção de produtos a partir de LMF. Portanto, o objetivo deste trabalho foi fabricar atuadores miniaturizados de LMF Ni-Ti, utilizando o processo de fundição de precisão via fusão a plasma seguida de injeção do metal fundido, utilizando a máquina Discovery All Metals tanto para fabricação da liga quanto dos miniatuadores, que foram injetados em molde de revestimento cerâmico.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

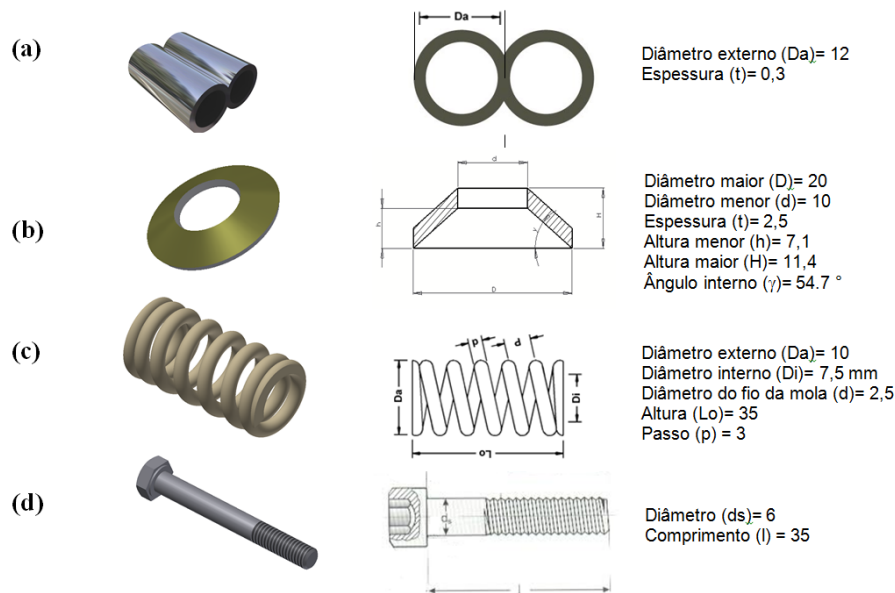
As atividades desenvolvidas nesse trabalho seguiram as seguintes etapas: fabricação da LMF Ni-Ti, preparação dos moldes sólidos de revestimento cerâmico, injeção dos miniatuadores de LMF, caracterização térmica e realização de ensaios não destrutivos dos miniatuadores.

### 2.1 Fabricação das LMF

Para fabricar a LMF utilizada neste trabalho, foi selecionada uma liga do sistema Ni-Ti de composição nominal em peso correspondente a 54,9Ni-45,1Ti. Os elementos selecionados (Ni e Ti) foram fundidos em uma máquina de fusão a plasma Discovery All Metals, da EDG Equipamentos e Controles (São Carlos, Brasil) pelo processo denominado de Plasma Skull Push-Pull (PSPP). Esse processo foi validado por De Araújo et al (2009) [9] para fabricação de diversas composições de LMF dos sistemas Ni-Ti e Cu-Al [9]. As LMF são fundidas sobre um cadinho de cobre não refrigerado usando uma tocha rotativa de arco de plasma, levando a obtenção de um semiproduto no formato de botão com massa da ordem de 25 gramas.

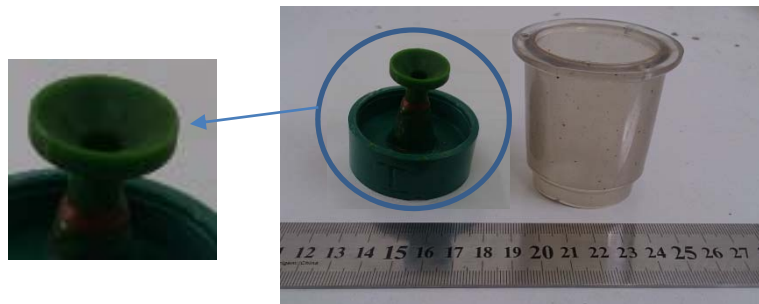
### 2.2 Fabricação dos Moldes Sólidos

O primeiro passo para fabricação dos moldes de revestimento cerâmico para injeção da LMF Ni-Ti no estado líquido foi a definição das geometrias a serem obtidas pelo novo processo, visando avaliar a sua eficiência. Assim, os formatos e dimensões definidos para os miniatuadores de LMF são apresentados na (Figura 1): um tubo duplo (Figura 1a), uma arruela Belleville (Figura 1b) uma mola helicoidal (Figura 1c) e um parafuso M6 x 35 (Figura 1d).



**Figura 1.** Formatos e dimensões em milímetros dos atuadores de LMF selecionados para os testes de fabricação. (a) Tubo duplo. (b) Arruela Belleville. (c) Mola helicoidal. (d) Parafuso M6.

Após a definição das geometrias desejadas partiu-se para a confecção dos modelos em cera. Os procedimentos a seguir foram realizados para todos os formatos de miniatuadores. Para a inclusão dos modelos encerados, foram fixados canais condutores de alimentação de diâmetro de 2,5 mm para escoamento do metal fundido. Todos os atuadores foram primeiramente montados em um conjunto formado por infraestrutura encerada e condutos de alimentação, conforme mostrado na (Figura 2) para o modelo do tipo arruela Belleville, que foi fixado em uma base do anel de silicone usado para inclusão do revestimento.



**Figura 2.** Modelo de arruela Belleville em cera utilizado para confecção de molde cerâmico.

Para a realização da inclusão das infraestruturas utilizou-se o revestimento Microfine 1700 da Talmax, seguindo todas as recomendações do fabricante. A obtenção da lama cerâmica foi preparada na proporção de 32 ml de líquido e 12 ml de água destilada para 180 g de pó. Essa quantidade é suficiente para preencher o anel de silicone utilizado, cujas dimensões foram compatíveis com o tamanho das infraestruturas enceradas. O pó foi incorporado manualmente ao líquido por 10 s, e posteriormente levados a uma máquina de espatulação a vácuo (Espatulador/Inclisor Elétrico a vácuo, marca EDG) por um período de tempo de 60 s. Antes da inclusão foi aplicada em toda a infraestrutura de cera um líquido para eliminação e bolhas de ar e um melhor escoamento da lama e redução da tensão superficial. O revestimento foi incluído sob vibração mecânica. A técnica de inclusão

utilizada teve como propósito evitar a incorporação de ar, e consequente formação de bolhas, o que poderia resultar em falhas na infraestrutura fundida.

Após o período de secagem do revestimento incluso no anel com o modelo, por 45 minutos, o anel de revestimento foi levado a um forno elétrico para cura do revestimento e evaporação da cera, em dois patamares de temperatura. O ciclo de cura está representado graficamente na (Figura 3). No primeiro ciclo, o material é aquecido da temperatura ambiente até 750 °C, mantendo essa temperatura durante 20 minutos. Em seguida (segundo ciclo) a temperatura do anel é aumentada para 950 °C por 20 minutos, sem riscos de trincas ou rachaduras nos anéis. A taxa de aquecimento até atingir o patamar em ambos os ciclos foi de 30 °C /min.

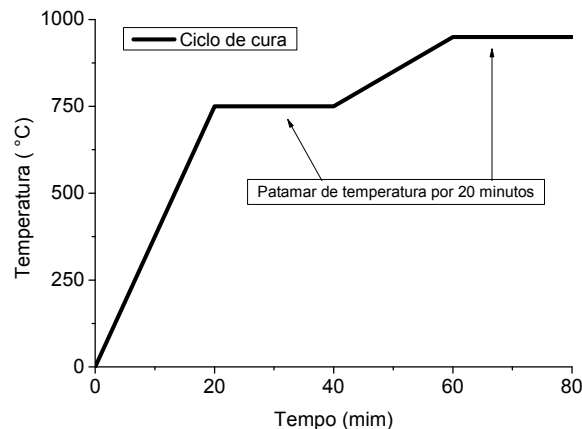


Figura 3. Ciclo de cura do revestimento Microfine 1700.

Posteriormente, o bloco de revestimento foi retirado e levado a máquina de fusão e injeção Discovery All Metals, para a obtenção do atuador de LMF. Com o auxílio de um termômetro digital infravermelho foi estimada uma temperatura de 300 °C na superfície do molde de revestimento cerâmico no momento da injeção da LMF.

### 2.3. Fabricação dos Atuadores pelo Processo PSPP

De posse dos botões de LMF Ni-Ti (25 g) pré-fabricados e dos moldes de revestimento cerâmico, os mesmos foram levados a máquina Discovery All Metals para fusão seguida de injeção do metal fundido nos moldes. O processo segue a mesma sequência descrita por De Araújo et al (2009) [9], acrescentando-se a etapa de injeção do metal líquido no molde cerâmico contendo a cavidade com a geometria desejada para o miniatuador de LMF. Para o início do processo de fabricação, o bloco de revestimento foi instalado na câmara inferior da máquina (com temperatura aproximada de 300°C) e na câmara superior foi posicionado o botão de LMF Ni-Ti em um cadinho de cobre.

A máquina de fundição foi previamente programada para fundir pastilhas de titânio na função 01, sugerida pelo fabricante. O gás argônio é injetado automaticamente na câmara superior, criando uma atmosfera saturada prevenindo a oxidação da LMF durante o processo de fusão. Posteriormente, o gás argônio é energizado através do eletrodo de tungstênio não consumível formando a tocha plasma que provoca a fusão do botão de LMF. O metal líquido foi injetado na câmara inferior devido à formação de vácuo na mesma e a pressão do gás argônio na câmara superior.

Após a finalização do processo de fusão e injeção, o molde foi removido e deixado resfriar ao ar. Em seguida, com auxílio de um desincludor pneumático foram

desmoldados os atuadores. Os condutos de alimentação foram seccionados com disco de corte e removidos os excessos de revestimento por meio de jateamento com óxido de alumínio de granulação 100  $\mu\text{m}$  e pressão de 4,5  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Posteriormente realizou-se um polimento nos atuadores de LMF Ni-Ti obtido para retirada superficial de alguma oxidação remanescente. Para todos os atuadores definidos na (Figura 1) foram usados os mesmos procedimentos descritos nessa etapa.

#### 2.4. Caracterização dos Atuadores LMF

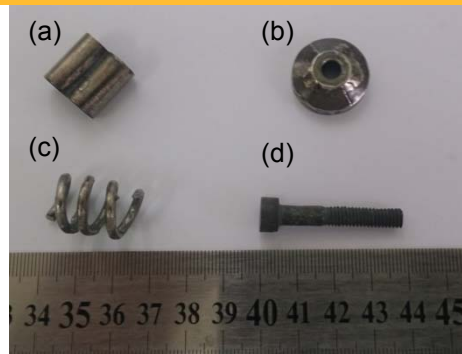
A caracterização dos miniatuadores de LMF obtidos pelo novo método de fabricação foi realizada primeiramente por meio de calorimetria diferencial de varredura (DSC), para verificar a presença de transformação de fase e obtenção das temperaturas de transformação (TT). Esse procedimento foi realizado utilizando um calorímetro DSC modelo Q20, da TA Instruments, na faixa de temperatura de 100  $^{\circ}\text{C}$  a -60  $^{\circ}\text{C}$ , com uma taxa de aquecimento e resfriamento de 5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

Uma outra técnica utilizada para determinação das temperaturas de transformação de fase dos atuadores de LMF Ni-Ti foi a variação de resistência elétrica em função da temperatura (RET). Essa técnica é baseada em medidas de queda de tensão elétrica no material durante aquecimento e resfriamento com uma corrente elétrica constante e de baixa intensidade. O ensaio de RET foi realizado usando um banho termo regulável equipado com fluido especial, permitindo o aquecimento até 100  $^{\circ}\text{C}$  e resfriamento até aproximadamente -60  $^{\circ}\text{C}$ , com correspondente acompanhamento da queda de tensão no miniaturador de LMF Ni-Ti para obtenção da variação da resistência elétrica. Uma fonte de corrente contínua de 200 W (marca AGILENT, modelo E3633A), um sistema de aquisição de dados com módulo multiplexador de 20 canais (marca AGILENT, modelo 34970) e um banho termo regulável Hubber CC-902 foram utilizados para realização dessa caracterização térmica.

Posteriormente, para determinação de eventuais imperfeições no preenchimento do molde pelo metal líquido, foram empregadas duas técnicas não-destrutivas: Raios-X e Tomografia Computadorizada 3D. Para a realização desses procedimentos utilizou-se um equipamento de raios-X odontológico disponível na área de próteses odontológicas da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) e um tomógrafo do Centro de Metrologia e Instrumentação (CMI) da Fundação CERTI da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), respectivamente.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O principal resultado do desenvolvimento desse novo processo foi a obtenção de todos os formatos de miniatuadores de LMF Ni-Ti propostos (Figura 1), conforme mostrado na (Figura 4). Esses atuadores mostraram a presença da transformação de fase em seu estado bruto de conformação, com bom acabamento superficial. Assim, constata-se a viabilidade do processo de fundição de precisão para obtenção de novos formatos de miniatuadores de LMF, sendo necessário apenas um pequeno trabalho adicional de polimento para obter um melhor acabamento superficial, que pode ainda ser melhorado através da confecção de modelos em cera ainda mais precisos.



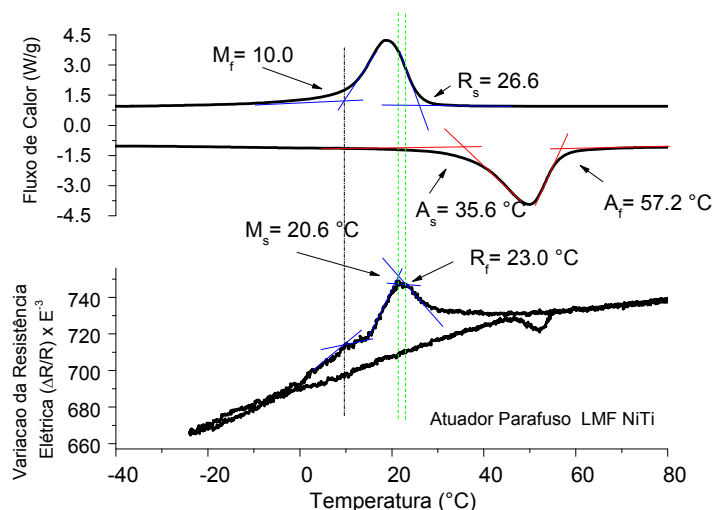
**Figura 4.** Miniaturadores de LMF Ni-Ti obtidos através do novo método de fabricação. (a) Tubo Duplo. (b) Arruela Belleville. (c) Mola helicoidal. (d) Parafuso M6.

A partir dos produtos acabados da (Figura 4), foram realizadas a caracterização térmica de todos os atuadores, os quais apresentaram transformação de fase, ainda que no seu estado bruto de fabricação. A (Tabela 1) apresenta os resultados da combinação da técnica de caracterização DSC com RET.

**Tabela 1.** Temperaturas de Transformação dos miniaturadores LMF de Ni-Ti obtidos.

Miniaturador LMF	Temperatura Transformação (°C)	$M_f$	$M_s$	$R_f$	$R_s$	$A_s$	$A_f$
Tubo duplo		-46,9	-32,1	-7,6	24,3	-0,6	25,3
Arruela Belleville		-	-	-	9,3	-14,0	31,4
Mola		-	-	-1,4	22,7	20,3	48,6
Parafuso		10,0	20,6	23,0	26,6	35,6	57,2

A (Figura 5) apresenta a superposição das curvas de DSC e RET para o caso do atuador parafuso M6 de LMF Ni-Ti, revelando a determinação das temperaturas de transformação resumidas na (Tabela 1).

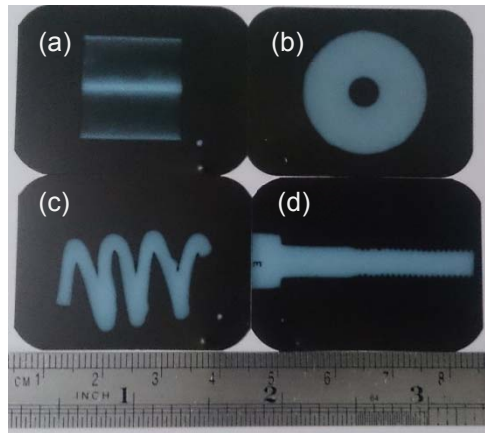


**Figura 5.** Curvas DSC e RET obtidas para o atuador Parafuso M6 de LMF Ni-Ti.

Observa-se na (Figura 5) que para a caracterização térmica dos atuadores, se faz necessário a utilização das duas técnicas, DSC e RET, de forma combinada, uma vez que se complementam. Nota-se que a chamada fase R (Romboédrica) frequentemente presente nas LMF de Ni-Ti [1], não é observada na curva DSC. Diferentemente, o pico visualizado na curva RET durante o resfriamento indica

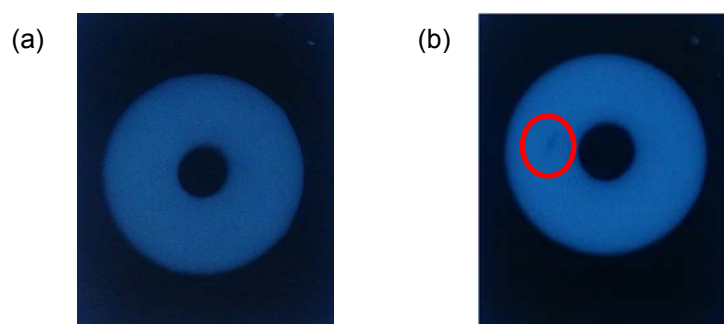
claramente a presença da fase R. Nos atuadores LMF do tipo mola e arruela Belleville não foi possível a realização do ensaio RET.

De acordo com o ensaio não-destrutivo de raios-X, os atuadores não apresentaram falhas aparentes (vazios), conforme pode-se perceber nas radiografias apresentadas na (Figura 6).



**Figura 6.** Imagens de raios-X dos atuadores Ni-Ti injetados. (a) Tubo Duplo. (b) Arruela Belleville. (c) Mola helicoidal. (d) Parafuso M6.

A (Figura 7) apresenta o comparativo de imagens de raios-X realizados em atuadores LMF do tipo arruela Belleville de geometrias idênticas injetados em moldes distintos (metálico e de revestimento cerâmico). O atuador LMF Belleville fabricado por Simões (2012) [10] usando molde metálico foi utilizado neste trabalho apenas para comparação com aquele obtido pelo mesmo processo com molde de revestimento cerâmico, mais simples de ser obtido. Nota-se claramente que quando se utilizou um molde de revestimento cerâmico durante a injeção, obteve-se um preenchimento completo do molde sem a presença de vazios (Figura 7a). Diferentemente, quando se utiliza molde metálico, a presença de um vazio é claramente observada. A falha é caracterizada pela região mais escura no centro do atuador (em destaque, círculo vermelho, (Figura 7b). Esse vazio pode ser explicado pelo aprisionamento do gás argônio (presente no processo PSPP), devido à rápida solidificação do metal líquido que é favorecida quando se utiliza molde metálico.

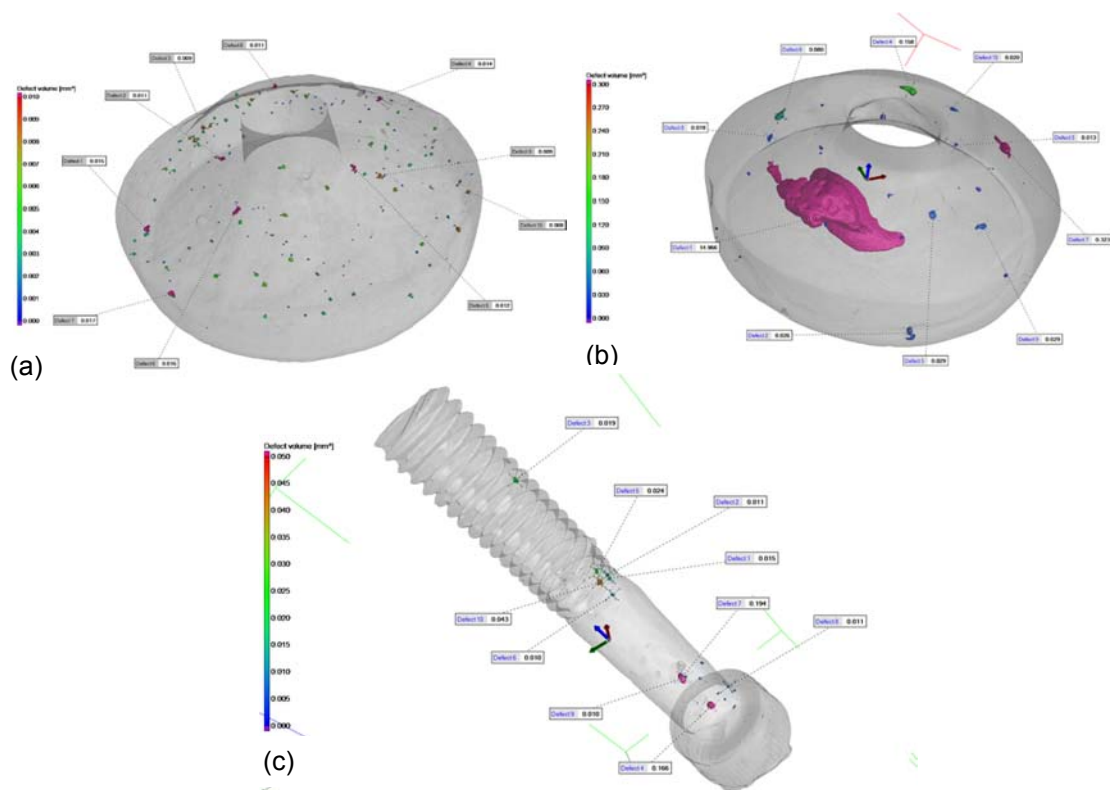


**Figura 7.** Imagens de raios-X dos atuadores do tipo arruela Belleville de LMF Ni-Ti injetados. (a) Molde de revestimento cerâmico. (b) Molde metálico.

A presença do vazio no miniaturador LMF de Ni-Ti tipo arruela Belleville foi confirmado pela realização de um ensaio de tomografia computadorizada. A (Figura



8) apresenta o resultado desse ensaio não destrutivo que, devido aos custos envolvidos, somente foi realizado nos atuadores LMF tipo arruela Belleville e parafuso M6x35.



**Figura 8.** Imagens de tomografias computadorizadas realizadas em miniatuadores LMF de Ni-Ti apresentando os defeitos internos. (a) Arruela Belleville obtida em molde de revestimento cerâmico. (b) Arruela Belleville obtida em molde metálico. (c) Parafuso obtido em molde de revestimento cerâmico.

Na (Figura 8a) nota-se a presença de defeitos do tipo vazios uniformemente distribuídos ao longo de toda superfície do componente. Os volumes destes defeitos em sua maioria estão numa faixa de 0,01 a 0,05 mm<sup>3</sup>, com volumes máximos da ordem de 0,1 mm<sup>3</sup>. Esses vazios são característicos de fundição sob gás (caso do PSPP). A distribuição desses vazios pode ser explicada pelo escape do gás de proteção (argônio, presente nesse processo) pelos poros do molde de revestimento cerâmico que é submetido a sucção pelo vácuo na câmara inferior. Na (Figura 8b), no atuador injetado em molde metálico (aço), verificou-se vazios em menor quantidade, porém o atuador tem sua estrutura comprometida pela presença marcante de um vazio com volume de 0,30 mm<sup>3</sup>, ou seja, 30 vezes superior que o maior defeito encontrado no atuador obtido em molde de revestimento cerâmico. Esse fato demonstra que o molde metálico proporciona altos gradientes de temperatura favorecendo uma solidificação mais rápida e desta forma não permitindo o escape dos gases presentes na fundição via PSPP. Na (Figura 8c) que apresenta o resultado da tomografia para o atuador tipo parafuso LMF (fabricado em molde de revestimento), também apresentam pequenos vazios com volumes da ordem de 0,05 mm<sup>3</sup>. A presença desses defeitos pode ser corrigida pelo reprojeto do molde, principalmente dos canais alimentadores.

As diferenças verificadas nas temperaturas de transformação de fase determinadas por DSC e RET de todos os quatro tipos de miniatuadores obtidos (Tabela 1), mostra que uma possível contaminação da LMF por parte do material do molde pode ser um fator importante durante o processamento e deve ser investigado.

#### 4 CONCLUSÃO

Ao final deste trabalho é possível concluir que o novo processo de fabricação para obtenção de miniatuadores LMF utilizando fundição de precisão em molde de revestimento cerâmico a partir de modelos em cera, possibilita a obtenção de formatos diversos para atuadores de LMF Ni-Ti. Desta forma, foram obtidos com sucesso quatro atuadores distintos: minitubo duplo, arruela Belleville, mola helicoidal e parafuso M6, demonstrando a versatilidade e a potencialidade do processo, que terá seu estudo aprofundado em trabalhos futuros.

Para avaliar se o processo proporcionaria um atuador com a presença de transformação de fase que caracteriza os fenômenos de memória de forma (EMF ou SE) foram realizadas análises térmicas via DSC e RET. É importante destacar que a utilização em conjunto dessas duas técnicas de caracterização térmica foi uma ferramenta importante no processo de caracterização dos miniatuadores LMF, pois são complementares e permitem definir todas as temperaturas. Todos os atuadores apresentaram transformação de fase no seu estado bruto de fabricação (fusão e injeção).

Os ensaios não destrutivos utilizados, principalmente a tomografia computadorizada, se mostraram eficientes na determinação dos defeitos internos na forma de porosidade.

Por fim, é preciso que se aperfeiçoe esse processo de fabricação a partir da confecção de outros modelos em cera, e da técnica aqui utilizada como forma de consolidar o novo processo proposto para que se torne uma ferramenta eficaz para o desenvolvimento tecnológico de miniatuadores de LMF no Brasil. Adicionalmente investigações devem ser realizadas para avaliar a influência desse processamento nas características das LMF injetadas, e ainda suas propriedades termomecânicas devem ser investigadas.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento dos projetos: INCT de Estruturas Inteligentes em Engenharia (Processo no 574001/2008-5), Casadinho UFCG-UFRJ-ITA (Processo no 552199/2011-7), Universal 14/2012 (Processo no 474524/2012-4) e PQ2 (Processo no 302320/2011-3). A CAPES pela concessão da bolsa de Doutorado ao primeiro autor (J. B. Simões).

#### REFERÊNCIAS

- 1 Otsuka K, Wayman CM. Shape Memory Materials. Cambridge: University Press, Cambridge UK; 1998.
- 2 Lagoudas DC. Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications. Texas: Springer; 2008.
- 3 Jani, JM, Leary, M, Subic, A and Gibson, MA. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. Materials and Design. 2014;56: 1078-1113.
- 4 Weinert, K and Petzoldt, V. Machining of NiTi based shape memory alloys. Materials Science and Engineering A. 2004;378: 180-184.

- 5 Chen, SL, Hsieh, SF, Lin, HC, Lin, MH, Huang, JS. Electrical discharge machining of TiNiCr and TiNiZr ternary shape memory alloys. *Materials Science And Engineering A*. 2007;445-446: 486-492.
- 6 Frotscher, M, Kahleyss, F, Simon, T, Biermann, D, and Eggeler, G. Achieving Small Structures in Thin NiTi Sheets for Medical Applications with Water Jet and Micro Machining: A Comparison. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2007; 15: 776-782.
- 7 Elahinia, MH, Hashemia, M, Tabesha, M, Bhaduria, SB. Manufacturing and processing of NiTi implants: A review. *Progress in Materials Science*. *Progress in Materials Science*. 2012;57: 911-946.
- 8 Leyens, C. and Peters, M. *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. Ed. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim. 2003.
- 9 De Araújo CJ, Gomes AAC, Silva JA, Cavalcanti, AJT, Reis RPB, Gonzalez CH. Fabrication of shape memory alloys using the plasma skull push-pull process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;20: 3657-3664.
- 10 Simões, J.B, 2012. *Caracterização termomecânica de atuadores Belleville de ligas com memória de forma*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, Brasil, 115p.