

FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM TUBO DE LIGA DE MEMÓRIA DE FORMA Ni-Ti

Railson de Medeiros Nóbrega Alves, railson.nobrega@gmail.com¹

Paulo César Sales da Silva, paulocesarsales@outlook.com¹

Carlos José de Araújo, carlos.araujo@ufcg.edu.br¹

¹Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Av. Aprígio Veloso, 882, Bloco BR, Bairro Universitário, Campina Grande - PB, CEP: 58429-140, Brasil.

Resumo: Os metais clássicos da engenharia, juntamente com suas ligas, desempenham um papel de extrema importância como materiais estruturais durante muitos séculos. Com o passar do tempo, os produtos foram melhorando a sua eficiência, se fazendo necessário o desenvolvimento dos materiais clássicos para que tivessem um melhor desempenho em suas aplicações. Assim, se deu origem aos materiais inteligentes e dentre esses materiais inteligentes estão as Ligas com Memória de Forma (LMF), que apresentam dois fenômenos principais: o Efeito de Memória de Forma (EMF) e a Superelasticidade (SE). Estas propriedades de EMF e SE, aliadas a biocompatibilidade das LMF de Ni-Ti levaram à sua utilização na biomecânica e no desenvolvimento de dispositivos para amortecimento de impacto. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar a fabricação, análise dimensional e a caracterização térmica e mecânica de um tubo de LMF Ni-Ti. Os corpos de provas tubulares com diâmetro externo de 15 mm, espessura de 1 mm e comprimento de 4 mm foram obtidos usando um processo de fundição de precisão. Os resultados obtidos revelaram que os tubos fundidos apresentam boa deformabilidade com histerese mecânica, indicando que podem ser utilizados como amortecedores para impactos devido ao seu comportamento superelástico verificado nos testes de compressão.

Palavras-chave: Ligas com memória de forma, Ligas Ni-Ti, Tubos, Fundição de Precisão.

1. INTRODUÇÃO

As Ligas com Memória de Forma (LMF) são ligas metálicas caracterizadas por apresentarem propriedades funcionais importantes, correspondentes a recuperação de deformações pseudoplásticas, quando aquecidas a uma temperatura crítica característica de cada LMF. Esta propriedade ocorre devido a existência de uma transformação de fase do tipo sólido-sólido, adifusional e reversível entre duas estruturas cristalinas, austenita (cúbica de corpo centrado) e martensita (geralmente monoclinica).

Essas LMF podem apresentar dois fenômenos principais: a Superelasticidade (SE) e o Efeito de Memória de Forma (EMF). A SE, também conhecida por pseudoelasticidade, ocorre quando a LMF está no estado austenítico de mais alta temperatura e demonstra capacidade de recuperação de grandes deformações (da ordem de 8%) quando sujeita a carregamento e descarregamento mecânico. Já o Efeito Memória de Forma ocorre quando o material sofre uma deformação “plástica” em fase martensítica e recupera a sua forma original com um aquecimento simples, suficiente para transformar a LMF para a fase austenítica (Otsuka & Wayman, 1998; Lagoudas, 2008).

Recentemente, as LMF vem sendo avaliadas para o desenvolvimento de estruturas celulares, como os *honeycombs* (estruturas do tipo “favo de mel”). Estas estruturas geralmente são fabricadas em alumínio, sendo bastante utilizadas nas indústrias naval e aeronáutica. Porém, o alumínio apresenta uma grande desvantagem que é o fato de se deformar plasticamente quando do aumento do carregamento mecânico, contrariamente as LMF que podem se deformar “superelasticamente” (Marcadon, 2012).

Honeycombs e telas de LMF Níquel-Titânio (Ni-Ti) foram fabricados pelo processo de fundição de precisão por cera perdida recentemente por Simões (2016) e Montenegro (2016), realizando a caracterização mecânica destes componentes em tração e compressão. É possível também fabricar estruturas do tipo *honeycombs* tubulares superelásticos de Ni-Ti a partir da junção de tubos de parede fina usando processo de soldagem por resistência elétrica. Nesse caso é possível recuperar a forma inicial das estruturas tubulares durante o processo de compressão (Machado et al, 2015).

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo realizar a fabricação e a caracterização termomecânica de um tubo de LMF Ni-Ti usando tecnologia de fundição de precisão, mais especificamente as técnicas de *Plasma Skull Push-Pull (PSPP)* (De Araújo et al., 2009) e Fusão por Indução com Injeção por Centrifugação (FIC) (Simões, 2016).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Processo de Fabricação

Foi selecionada uma LMF Ni-Ti cuja composição é 55,3% Ni - 44,7% Ti (% em massa) para a fabricação dos tubos. A obtenção das pastilhas de LMF Ni-Ti necessárias à fabricação dos tubos foi realizada na máquina *Discovery All Metal* da marca EDG Equipamentos e Controles, por meio do processo *Plasma Skull Push Pull*. Na Figura 1 o processo de fabricação da pastilha Ni-Ti é ilustrado.

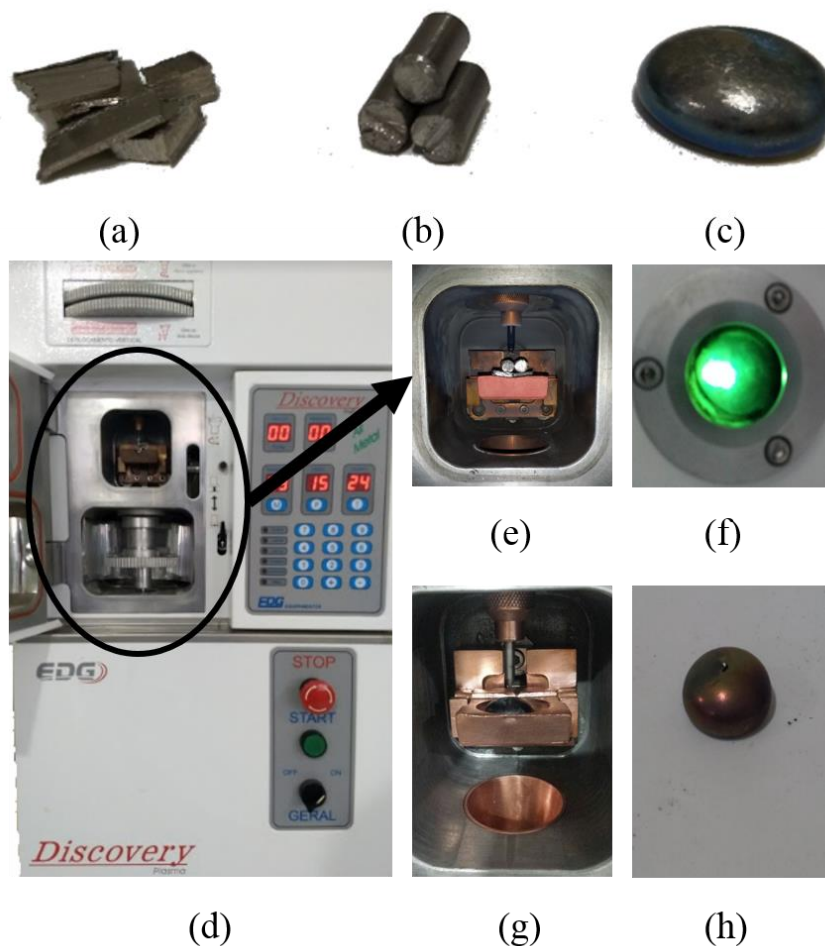


Figura 1. Processo de fabricação da pastilha Ni-Ti. (a) Níquel; (b) Titânio; (c) Pastilha Ni-Ti; (d) Máquina Discovery All Metal; (e) Ni-Ti bruto; (f) Fusão a plasma do Ni-Ti; (g) Pastilha Ni-Ti após o término da fusão; (h) Resultado final da pastilha Ni-Ti.

Para a fabricação dos tubos foi utilizada a técnica de fundição de precisão por cera perdida. Os modelos foram obtidos por prototipagem rápida na impressora *Replicator 2X* da marca *MakerBot* e o material usado na impressão foi o polímero Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS). Todos os modelos foram fabricados com um diâmetro externo de 15 mm e com 1 mm de espessura de parede.

A partir dos modelos preparados foi realizada a etapa da obtenção dos moldes sólidos. Foi utilizado um revestimento cerâmico ultrafino à base de fosfatos sem grafite (*Calibra Express*). Na preparação do revestimento utilizou-se um líquido especial de mistura diluído em água destilada (na proporção de 21 ml do líquido especial + 5 ml de água destilada), junto com 90g do pó de revestimento, tendo como resultado uma lama cerâmica. Inicialmente essa lama é misturada manualmente (espátula) por 10 segundos aproximadamente, depois é levada a um misturador a vácuo por 1 minuto para uma melhor homogeneização do revestimento.

Após a etapa de homogeneização, o revestimento é vertido em um anel metálico que dá formato ao molde. O anel metálico junto com o modelo do material em ABS foram levados para um equipamento vibratório (durante 1 minuto) capaz de eliminar as bolhas de ar presentes na lama cerâmica. Em seguida o molde é deixado em separado à temperatura ambiente durante 35 minutos para secagem.

Após a preparação do molde, o mesmo é submetido a um tratamento térmico em um forno com temperatura inicial de 25 °C e final de 900 °C, com taxa de aquecimento 20°C/min e patamar de 30 minutos na temperatura final. Esse processo é utilizado para que se tenha a fabricação por completo do molde, ou seja, o material ABS e a cera que

constitui os canais de alimentação e de entrada são evaporados, formando assim o molde desejado. Com o término desse processo, o molde é retirado do forno e colocado em um local separado para que seja resfriado até uma temperatura de 400°C (medição com a pistola de térmica), com o intuito de diminuir as chances de defeitos de fundição. Essa preparação pode ser visualizada na Figura. 2.

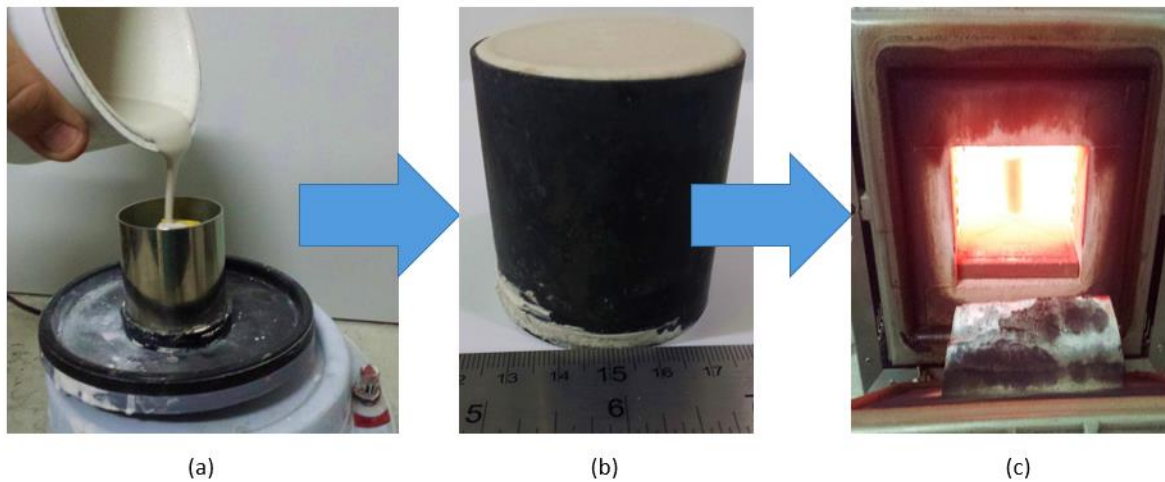


Figura 2. Preparação do molde cerâmico. (a) Colocação da lama cerâmica sobre o modelo. (b) Molde preparado. (c) Molde no forno.

Por meio de jateamento com pó de alumina fez-se a limpeza por completo dos tubos que depois seguem para a fase de corte utilizando o processo de usinagem de corte por eletroerosão a fio. Os tubos depois de cortados foram submetidos a tratamento térmico de homogeneização e envelhecimento (850°C por 1 hora e depois 500°C por 2 horas) (Simões, 2016). Na Figura 3 é possível visualizar o modelo em ABS e o tubo de Ni-Ti.



Figura 3. Modelo de tubo em ABS e tubo de Ni-Ti fabricado.

2.2. Análise Dimensional

Antes da realização do processo de obtenção dos moldes cerâmicos, um modelo de tubo em ABS foi levado a um equipamento de medição ótica para avaliar as dimensões principais, permitindo assim fazer uma comparação com os tubos de Ni-Ti já com o tratamento térmico realizado. Essas análises foram realizadas em um microscópio ótico da marca OLYMPUS e modelo BX51.

Foram analisadas basicamente as espessuras de parede dos tubos em ABS e em Ni-Ti, com o objetivo de avaliar eventuais variações dimensionais entre o modelo e o produto. Foram realizadas 15 aferições em diferentes locais, com uma ampliação de 50 x.

2.3. Análise Térmica (DSC)

Para a realização da análise térmica utilizou-se o método da Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), com o objetivo de determinar as temperaturas críticas das transformações de fase do tubo de Ni-Ti. As amostras retiradas dos

tubos foram submetidas à varredura na faixa de temperatura de -60°C até 100°C com uma taxa de aquecimento e resfriamento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Com a aplicação do método das tangentes aos picos de DSC pode-se obter estas temperaturas, seguindo a norma internacional ASTM F2005-05.

2.4. Ensaios Mecânicos de Compressão

Os tubos de LMF Ni-Ti foram submetidos à ensaios quase-estáticos de compressão (carga-descarga) utilizando uma máquina de ensaios eletrodinâmica da marca *Instron*, modelo *Electropuls* E10000, conforme montagem indicada na Fig. 4. Estes ensaios foram realizados a temperatura ambiente, de $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

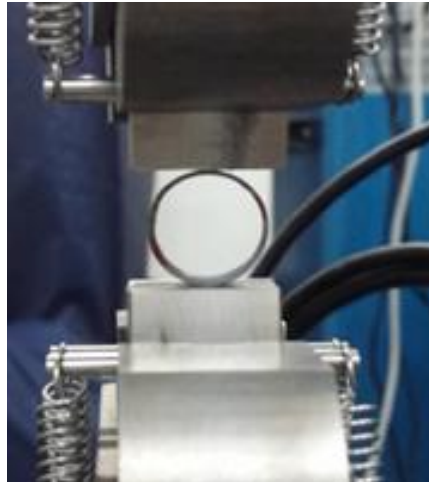


Figura 4. Detalhe do tubo de LMF Ni-Ti instalado para o ensaio de compressão radial.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise Dimensional

Foram avaliadas as dimensões da espessura dos tubos em ABS e posteriormente em Ni-Ti. Foram escolhidas as regiões mostradas na Figura 5 devido a presença de material para ambos os tubos observados. Na Tabela 1 são resumidas as dimensões para a espessura do tubo.



Figura 5. Imagens para avaliação dimensional da espessura dos tubos em ABS e Ni-Ti.

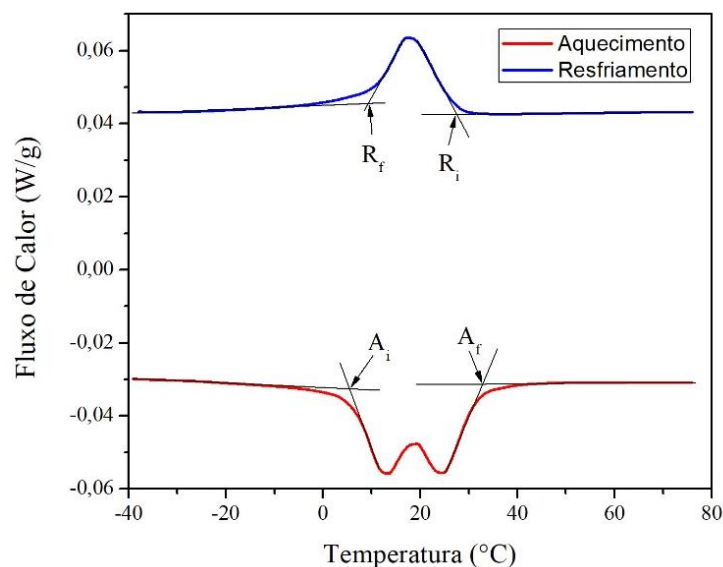
Tabela 1. Comparação de medições realizadas no microscópio ótico para a espessura dos tubos.

	Espessura do Tubo
Dimensão em ABS (mm)	1,011 ± 0,025
Dimensão Ni-Ti (mm)	0,849 ± 0,034
Redução Dimensional (%)	16,02%

Constata-se uma contração do material após a fabricação do tubo de Ni-Ti. Analisando a espessura do tubo, observa-se uma redução dimensional superior a 15%. Esta redução está relacionada a diversos fatores como o trabalho de fundição por precisão com molde cerâmico e a contração do metal solidificado.

3.2. Análise Térmica

Na Figura 6 é possível observar o gráfico de DSC obtido para um dos tubos de Ni-Ti produzidos. A Tabela 2 resume as temperaturas de transformação obtidas. O reduzido valor da histerese em temperatura, da ordem de 5 °C, calculado como a diferença entre as temperaturas dos picos de aquecimento e resfriamento, indica que se trata de uma transformação parcial, da austenita em fase R (A – R) e sua reversão (Otsuka & Wayman, 1998).

**Figura 6. Análise térmica do tubo de Ni-Ti.****Tabela 2. Temperaturas de transformação de fase para o tubo Ni-Ti.**

Resfriamento		Aquecimento	
R_s (°C)	R_f (°C)	A_s (°C)	A_f (°C)
27,5	9,3	5,4	32,8

Analisando a Tabela 2 nota-se que a temperatura ambiente está no intervalo das temperaturas A_s e A_f . Com isso, depois de aquecidos a uma temperatura superior a A_f e resfriados até a temperatura ambiente, os tubos podem apresentar o efeito da superelasticidade.

3.3. Ensaios Mecânicos de Compressão

Os ensaios mecânicos foram realizados com uma pré-carga de 3,5 N e variações de deformações de 1% para compressão/descompressão nos corpos de provas dos dois tubos distintos fabricados. A Figura 7 permite visualizar os resultados obtidos em termos de curvas de Força vs Deformação, com destaque para o comportamento Força Máxima vs Deformação Máxima.

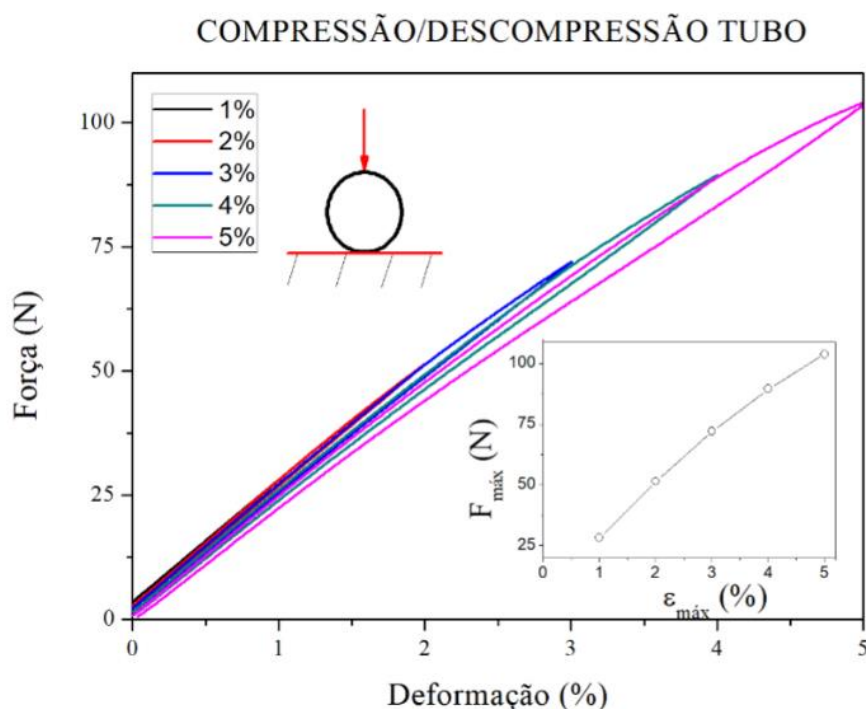


Figura 7. Curvas Força (N) vs Deformação (%) para o tubo de LMF Ni-Ti sob compressão radial.

Ainda na Figura 7 pode-se observar que a deformação máxima foi de 5 %, para uma força máxima de aproximadamente 103 N. O tubo Ni-Ti apresentou comportamento SE, como já era previsto da caracterização térmica do material.

4. CONCLUSÃO

Diante dos resultados preliminares obtidos neste estudo experimental, conclui-se que:

- É possível fabricar tubos e estruturas tubulares de LMF Ni-Ti pelo processo de fundição de precisão utilizando moldes impressos em ABS;
- A partir dos ensaios mecânicos de compressão, verificou-se que os tubos apresentaram comportamento superelástico com histerese mecânica, podendo ser utilizados como absorvedores de energia em regime de grandes deformações, superiores a 4% em compressão radial.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pela concessão da Bolsa de Mestrado ao primeiro autor e ao CNPq pelo financiamento dos seguintes projetos: INCT de Estruturas Inteligentes em Engenharia (Proc. 574001/2008-5), Universal 01/2016 (Proc. 401128/2016-4), CT-Aeroespacial 22/2013 (Proc. 402082/2013-3) e PQ 1D (Proc. 304658/2014-6).

6. REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials, ASTM F2005-05. 2015. “Standard Terminology for Nickel-Titanium Shape Memory Alloys”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- De Araujo, C.J.; Gomes, A. A. C.; Silva, J.A.; Cavalcanti, A. J. T.; Gozalez, C. H. “Fabrication of shape memory alloys using the plasma skull push-pull process”. Journal Of Materials Processing Technology, v. 209, n. 7, p.3657-3664, 2009. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.08.025.
- Lagoudas, D. C., “Shape memory alloys – modeling and engineering application”. Ed. Springer, Texas, USA, 2008.
- Machado, G; Louche, H; Alonso, T; Favier, D. “Superelastic cellular NiTi tube-based materials: Fabrication, experiments and modeling. Materials & Design”, Vol. 65, pp. 212–220, 2015.
- Marcadon, V. “Mechanical behaviour of hollow-tube stackings: Experimental characterization and modelling of the role of their constitutive material behavior”. Onera – The French Aerospace Lab, Chatillon, France. 2012.
- Montenegro, E. O. S. “Estudo do comportamento termomecânico de telas com memória de forma Ni-Ti obtidas por fundição de precisão”. 2016. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- Otsuka, K.; Wayman, C. M. “Shape Memory Materials”. First ed. Cambridge: Cambridge University Pres, 1998.

Simões, J. B., 2016. “Fabricação de Componentes Miniaturizados de Ligas com Memória de Forma NiTi Usando Fundição de Precisão”. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande – PB, 192p.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MANUFACTURE AND CHARACTERIZATION OF A Ni-Ti SHAPE MEMORY ALLOY TUBE

Railson de Medeiros Nóbrega Alves, railson.nobrega@gmail.com¹

Paulo César Sales da Silva, paulocesarsales@outlook.com¹

Carlos José de Araújo, carlos.araujo@ufcg.edu.br¹

¹Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Av. Aprígio Veloso, 882, Bloco BR, Bairro Universitário, Campina Grande - PB, CEP: 58429-140, Brazil.

Abstract. *Classical engineering metals along with their alloys play an extremely important role as structural materials for many centuries. Over time the products were improved their efficiency, which made it necessary to develop these classic materials to have a higher performance in their applications. This led to the emergence of intelligent materials and among these intelligent materials are the shape memory alloys (SMA's), which present two phenomena, the shape memory effect (SME) and the superelasticity (SE). These SME and SE properties combined with the biocompatibility of Ni-Ti SMA led to their use in biomechanics and for the development of impact damping devices. In this context, the present work had as objective to make the manufacture, dimensional analysis and the thermal and mechanical characterization of a tube of Ni-Ti SMA. Tubular specimens with external diameter of 15 mm, thickness of 1 mm and length of 4 mm were obtained using a investment casting process. The obtained results revealed that the cast tubes have good deformability with mechanical hysteresis, indicating that they can be used as shock absorbers due to their superelastic behavior verified in the compression tests.*

Keywords: Shape Memory Alloys, Ni-Ti alloys, Tubes, Investment casting.