

FABRICAÇÃO DE ESTRUTURAS CELULARES DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA NI-TI USANDO FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

Jackson de Brito Simões, jackson.simoes@ufersa.edu.br¹
Carlos José de Araújo, carlos.araujo@ufcg.edu.br²

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), RN 233, Km 01, Caraúbas, RN, Brasil, CEP: 59780-000.

²Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Av. Aprígio Veloso, 882, Campina Grande, PB, Brasil, CEP: 58429-140.

Resumo: No final do século 20, a fundição de precisão se tornou uma alternativa eficaz para a fabricação de componentes de titânio e suas ligas em aplicações de alta tecnologia. Entretanto, não existem informações da utilização desse processo para a obtenção de componentes mecânicos de Ligas com Memória de Forma (LMF), principalmente aquelas do sistema Níquel – Titânio (Ni-Ti). Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o processo de fundição de precisão para o desenvolvimento de novos produtos, principalmente estruturas celulares bidimensionais (2D, telas) e tridimensionais (3D, honeycombs) de LMF Ni-Ti. Para isso, foi realizada a fabricação de diferentes formatos de telas e honeycombs de uma LMF Ni-Ti pelo processo de fundição de precisão por centrifugação com molde sólido, como também sua caracterização térmica e mecânica. A presença da transformação de fase característica das LMF foi avaliada por calorimetria diferencial exploratória (DSC) enquanto que a resistência mecânica dos produtos obtidos foi testada por ensaios de tração (telas) e compressão (honeycombs), em regime cíclico. Os resultados obtidos tornaram evidente a eficiência do processo proposto, permitindo a fabricação de estruturas celulares 2D e 3D de LMF Ni-Ti com transformação de fase e boa resistência mecânica que potencializam o desenvolvimento de uma série de aplicações futuras, principalmente na área biomédica.

Palavras-chave: Ligas com memória de forma; Ligas Ni-Ti; Estruturas celulares; Fundição de precisão.

1. INTRODUÇÃO

A obtenção de componentes mecânicos a partir de Ligas com Memória de Forma (LMF) do sistema Ni-Ti é extremamente complexa, sendo restrita a um pequeno grupo de empresas detentoras da tecnologia, de forma que poucos países no mundo dominam uma rota de fabricação de produtos com esses materiais (Elahinia, 2016; Jani *et al.*, 2014 e Szurman *et al.*, 2014).

Os processos de fabricação que envolvem a remoção de material, que vão desde as técnicas convencionais de usinagem até outras mais modernas (usinagens por eletroerosão e a laser) quando utilizados para dar forma final as LMF de Ni-Ti apresentam uma série de inconvenientes que têm limitado a utilização dessas tecnologias em larga escala (Elahinia, 2016; Jani *et al.*, 2012 e Lecce e Concilio, 2014). Dentre as principais limitações estão: dificuldade de usinagem somada a um alto desgaste de ferramentas, desperdício de matéria-prima, baixas taxas de remoção de material e degradação das propriedades e dos efeitos funcionais associados a essas ligas (transformação de fase, efeito de memória de forma e superelasticidade) (Lin *et al.*, 2000; Weinert e Petzold, 2004 e Wu *et al.* 1999).

Apesar de outras técnicas de fabricação, como a metalurgia de pós e a manufatura aditiva, ter recebido a atenção de pesquisadores nos últimos anos, atualmente essas técnicas de manufatura avançada ainda não chegam a despertar o interesse de pesquisadores e da indústria, devido aos altos custos iniciais envolvidos somados as pobres e indesejáveis propriedades mecânicas e funcionais obtidas com essas técnicas (Elahinia, 2016 e Jahadkbar *et al.*, 2016). Contudo, alguns produtos, a exemplo de algumas próteses ortopédicas de Ni-Ti, têm sido obtidos por sinterização a altas temperaturas (Kim, *et al.* 2012 e Yamauchi *et al.*, 2011). Nesse contexto, percebe-se a importância de continuar a busca pelo desenvolvimento de rotas alternativas de fabricação de componentes mecânicos de LMF, principalmente do sistema Ni-Ti, de maneira a promover a difusão de novas aplicações.

O processo de fundição de precisão que se apresentou atraente para o processamento do titânio e suas ligas durante a segunda guerra mundial, até então ainda não havia sido explorado para fabricar componentes mecânicos de LMF Ni-Ti. Desta forma, visando promover uma alternativa as tecnologias utilizadas para obtenção de produtos em LMF Ni-Ti na sua forma final, este trabalho teve o objetivo de avaliar o processo de fundição de precisão para o desenvolvimento de novos produtos, principalmente estruturas celulares bidimensionais (2D, telas) e tridimensionais (3D, honeycombs) de LMF Ni-Ti.

Para isso, foi realizada a fabricação de diferentes formatos de telas e *honeycombs* (estruturas do tipo “favo de mel”) a partir de uma LMF Ni-Ti pelo processo de fundição de precisão que consistiu de fusão por indução e injeção do metal líquido por centrifugação em um molde cerâmico. Inicialmente, as estruturas foram submetidas a caracterização térmica para verificar a presença da transformação de fase que caracteriza as LMF. Em seguida, os produtos obtidos foram testados mecanicamente sob diversos níveis de deformação global em regime cíclico de carregamento e descarregamento.

2. MATERIAS E MÉTODOS

2.1. Processo de Fabricação

Neste trabalho, foi selecionado como o material de partida uma LMF Ni-Ti de composição $\text{Ni}_{50.2}\text{-Ti}_{49.8}$ (at.%), o que deve conferir superelasticidade (SE) as estruturas celulares na temperatura ambiente (entre 25°C e 30°C). A fabricação de botões dessa LMF Ni-Ti foi realizada usando o processo *Plasma Skull Push Pull* (PSPP), seguindo a metodologia descrita em um trabalho anterior (De Araújo *et al.*, 2009).

A partir dos botões produzidos por PSPP foi utilizada a técnica de fundição de precisão por cera perdida para a fabricação das estruturas celulares de LMF Ni-Ti (Tela, 2D e *honeycombs*, 3D). Nesta técnica, um modelo (em cera ou resina) com geometria e dimensões aproximadas do produto final desejado é utilizado para confecção dos moldes cerâmicos que receberão o metal líquido. Desta forma, foram selecionadas duas geometrias de células distintas (circular e hexagonal) para cada estrutura. Assim, telas (em cera) e *honeycombs* (em Acrilonitrila Butadieno Estireno - ABS) foram utilizados como modelos para obtenção dos moldes. A escolha dessas geometrias buscou avaliar e comparar a influência do formato dessas células no comportamento mecânico dos componentes, assim como mostrar a versatilidade da técnica empregada para fabricação de estruturas celulares. Os modelos em cera (tela, 2D) foram adquiridos comercialmente por serem utilizadas na fabricação de próteses dentárias. Já os modelos em ABS (3D, *honeycombs*) foram obtidos utilizando uma impressora 3D, modelo Dimension Elite, marca Stratasys. Na Figura 1 são apresentadas as geometrias com as dimensões dos modelos utilizados.

Para a obtenção dos moldes sólidos, aos modelos da Fig. 1 foram adicionados canais de alimentação em cera e utilizado revestimento cerâmico indicado para ligas de titânio em aplicações da odontologia, seguindo sempre as recomendações do fabricante. Assim, os moldes obtidos com o revestimento foram levados a um forno, sendo submetidos a uma rampa de aquecimento a partir da temperatura ambiente até 950°C, a uma taxa de 20°C/min, permanecendo nessa temperatura durante 20 minutos para que fosse realizada a sinterização do revestimento cerâmico e a completa remoção do modelo (cera ou ABS).

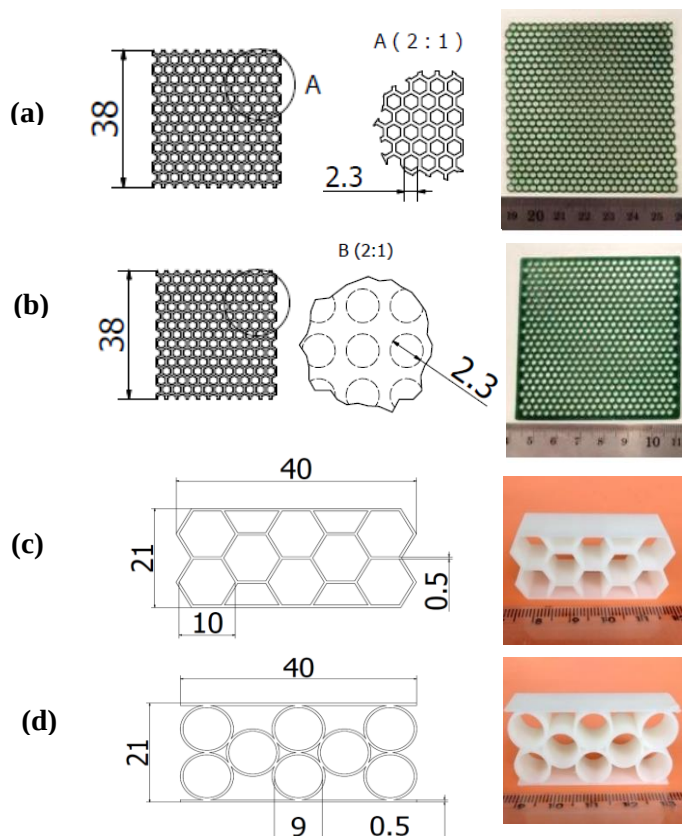


Figura 1. Geometrias e dimensões (em milímetros) de modelos utilizados para fabricação dos moldes. (a) Tela com célula hexagonal. (b) Tela com célula circular. (c) *Honeycomb*, com célula hexagonal. (d) *Honeycomb*, com célula circular.

Em seguida, o molde cerâmico e a LMF Ni-Ti foram levados para o equipamento de fundição (Power CAST 1700, EDG Equipamentos e Controles, Brasil). Nesse equipamento o processo de fundição ocorre da seguinte forma: o metal é colocado em um cadinho refratário, submetido a um fluxo de gás argônio enquanto a fusão é feita por indução e a injeção do metal líquido no molde cerâmico realizada por centrifugação. Para esse trabalho o processo foi denominado de FIC. Após a fundição, o molde é retirado da máquina e então levado para remoção total do revestimento cerâmico (molde) e obtenção da peça fundida. Essa operação é realizada manualmente e depois mecanicamente utilizando o processo de jateamento de alumina em pó. Um fluxograma simplificado do processo para obtenção das estruturas celulares de LMF Ni-Ti por FIC pode ser verificado na Fig. 2. Ainda, as estruturas celulares foram tratadas termicamente a 850°C por 1 hora após a fundição.

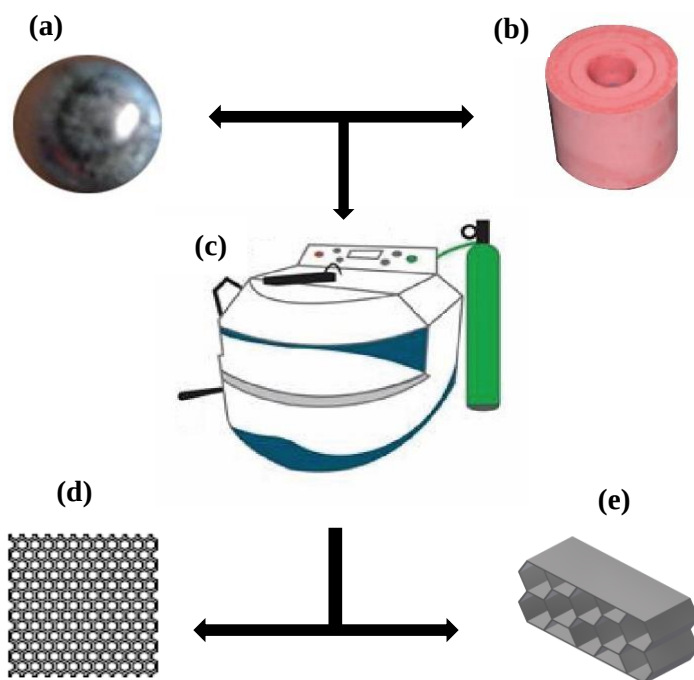


Figura 2. Fluxograma simplificado do processo de fundição de precisão FIC para fabricação de estruturas celulares de LMF Ni-Ti. (a) Botão de LMF Ni-Ti. (b) Molde cerâmico. (c) Máquina de fundição por FIC. (d) Estrutura celular LMF tipo tela. (e) Estrutura celular LMF tipo *Honeycomb*.

2.2. Caracterização Térmica

As temperaturas de transformação de fase das estruturas celulares de LMF Ni-Ti obtidas por FIC foram determinadas usando a técnica de calorimetria diferencial de varredura (DSC). Os ensaios foram realizados a uma taxa de 10 °C/min durante o resfriamento e aquecimento, segundo a norma ASTM F2004-05, com o intervalo de temperatura de -60 a 100 °C.

2.3. Ensaios Mecânicos

Para realizar os ensaios cíclicos de caracterização mecânica nas estruturas celulares de LMF Ni-Ti, foi utilizada uma máquina universal de ensaios, modelo Electropuls E10000, da marca Instron. Foi estabelecido que 6 ciclos de deformação global seriam realizados, nos níveis de 1, 2, 3, 4, 5 e 6%, deixando em cada ciclo de descarregamento uma força residual de aproximadamente 15 N. Essa deformação global corresponde a deformação relativa aos comprimentos e alturas das estruturas celulares submetidas a tração, no caso das telas (2D), e compressão, no caso dos *honeycombs* (3D), respectivamente. Nos testes foi utilizada uma velocidade de carregamento e descarregamento de 1%/min. Antes dos ensaios mecânicos, todas as estruturas celulares foram aquecidas a temperaturas superiores à sua temperatura A_f para que fosse garantido que estivessem no regime SE.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Fabricação das Estruturas Celulares: 2D e 3D

A obtenção de estruturas celulares de LMF Ni-Ti a partir de modelos com geometrias distintas utilizando o processo de fundição de precisão foi realizada com sucesso. Os parâmetros para a fundição utilizados foram eficientes e garantiram total preenchimento do molde cerâmico. Nas Figuras 3 e 4 é possível visualizar, respectivamente, as

estruturas celulares 2D-Tela e 3D-*Honeycomb* de LMF Ni-Ti em seus formatos finais, após a remoção do revestimento e dos canais alimentadores.

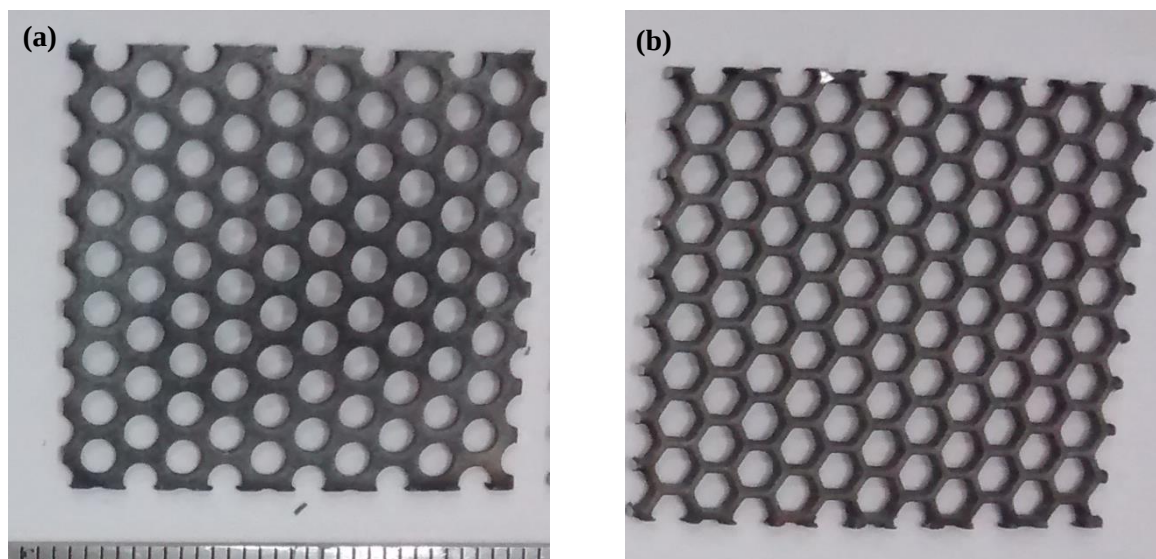


Figura 3. Estruturas Celulares de LMF Ni-Ti 2D-tela. (a) Circular. (b) Hexagonal.

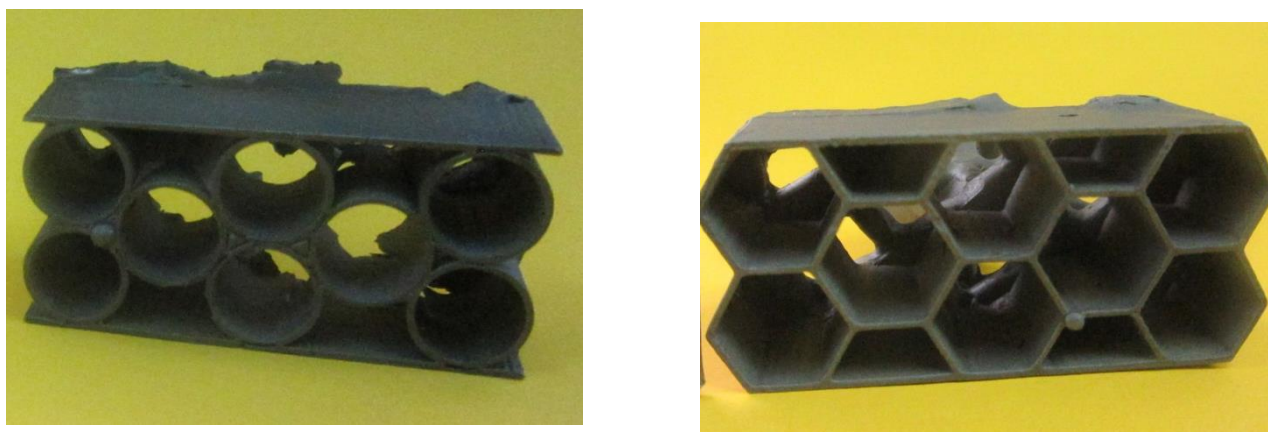


Figura 4. Estruturas Celulares de LMF Ni-Ti 3D-honeycomb. (a) Circular. (b) Hexagonal.

O aspecto fosco observado nas estruturas celulares LMF Ni-Ti é resultado de uma reação superficial que ocorre na interface molde-metal durante a solidificação, mas que não chega a comprometer as propriedades funcionais. Defeitos de fundição do tipo bolha superficial puderam ser observados em algumas das estruturas celulares 3D (Fig.4).

3.2. Caracterização Térmica das Estruturas Celulares: 2D e 3D

A verificação da existência da transformação de fase e a determinação das respectivas temperaturas de transformação das estruturas celulares de LMF Ni-Ti foram realizadas a partir da aplicação de tangentes aos picos de transformação observados nos ensaios de calorimetria DSC. Na Tabela 1 são apresentados os valores das temperaturas de transformação para cada uma das estruturas celulares mostradas nas Figs. 3 e 4.

Tabela 1. Temperaturas de transformação das estruturas celulares de LMF Ni-Ti 2D e 3D.

Estrutura Celular LMF Ni-Ti / Temperatura (°C)	M_f	M_s	A_s	A_f
2D-Tela Circular (TC)	-34.1	-1.1	-5.8	15.9
2D-Tela Hexagonal (TH)	-14.0	16.2	-5.7	50.5
3D- <i>Honeycomb</i> Circular (HC)	6.5	22.6	26.4	53.4
3D- <i>Honeycomb</i> Hexagonal (HH)	-9.7	16.9	13.9	38.6

Verifica-se na Tab.1 que todas as estruturas celulares devem apresentar níveis de superelasticidade caso sejam aquecidas a uma temperatura superior a A_f e resfriadas até a temperatura ambiente. Isso deve ocorrer pelo fato da temperatura de início de transformação martensítica (M_s) ser sempre inferior a temperatura ambiente na qual foram realizados os ensaios mecânicos (aproximadamente 25°C).

Os ensaios de tração e compressão foram realizados a temperatura ambiente (25°C), partindo de uma deformação de 1% até 6% da deformação global das estruturas celulares LMF Ni-Ti. O comportamento mecânico das estruturas 2D e 3D podem ser observados nas Figs. 5 e 6, respectivamente. No geral, verifica-se o fenômeno de superelasticidade com alguma deformação residual após o descarregamento mecânico. As estruturas celulares (2D-Telas e 3D-Honeycombs) mostraram-se estáveis a deformações de até 6%, sem qualquer rompimento.

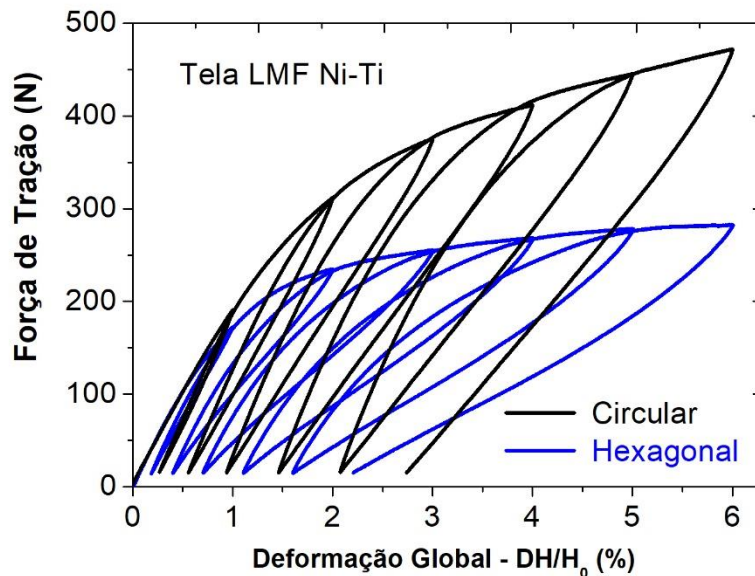


Figura 5. Comportamento mecânico de força – deformação global para os ciclos de deformação da estrutura 2D-Tela LMF Ni-Ti.

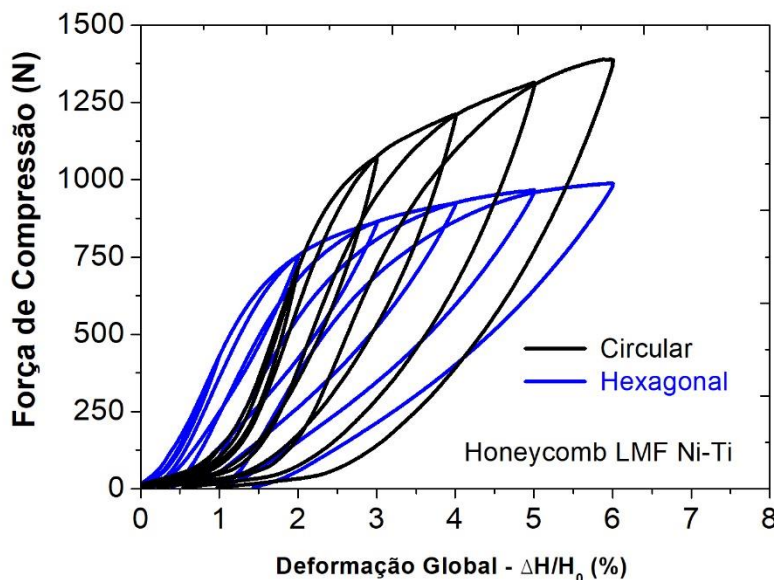


Figura 6. Comportamento mecânico de força – deformação global para os ciclos de deformação da estrutura 3D-Honeycombs LMF Ni-Ti.

Na Figura 7 apresenta-se comparativamente o comportamento da força máxima para um mesmo nível de deformação nas estruturas celulares 2D e 3D, obtido das Figs 5 e 6.

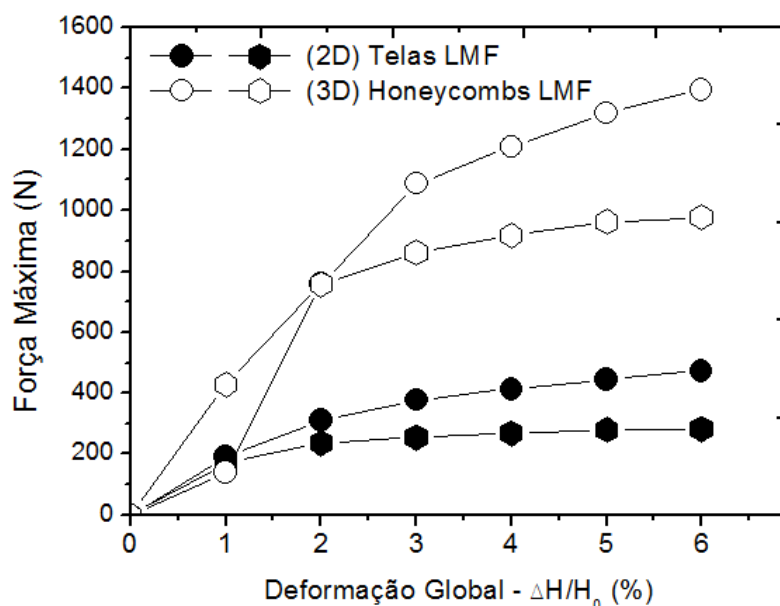


Figura 7. Comportamento da força máxima em função da deformação global para cada ciclo nas estruturas celulares.

Verifica-se na Fig. 7 que as estruturas celulares 2D e 3D de geometria circulares necessitam de uma força maior para atingir um mesmo nível de deformação. A tela de geometria celular circular exige uma força máxima da ordem de 473N, o maior valor encontrado para atingir o nível de deformação máximo (6%). Contrariamente, a tela de célula hexagonal apresentou o menor nível de força necessário para atingir a deformação máxima, de aproximadamente 282N. Comportamento semelhante é observado na estrutura celular tipo 3D-*Honeycomb*, revelando que a célula de geometria circular necessita de uma força da ordem de 1392N, para atingir o nível de deformação máximo (6%). O *Honeycomb* hexagonal para atingir a deformação máxima imposta de 6%, exige aproximadamente 975N. A hipótese que explica a diferença entre esses valores é a de que a distribuição do campo de tensão em cada geometria se comporta de maneira particular. As estruturas de células hexagonais possuem trechos retilíneos mais alinhados com a carga externa aplicada, exigindo uma menor força para orientar a deformação no sentido da carga. Assim, com o projeto da célula é possível determinar qual geometria melhor se adequa uma aplicação específica através de uma relação força/deformação global.

4. CONCLUSÕES

A fabricação de estruturas celulares 2D (telas) e 3D (*honeycombs*) de LMF do sistema Ni-Ti em duas geometrias distintas (circular e hexagonal) usando o processo de fundição de precisão por cera perdida FIC foi possível e realizada com bastante sucesso. Essa fabricação potencializa o desenvolvimento de diversos componentes mecânicos a partir de LMF Ni-Ti.

As estruturas celulares fabricadas por FIC apresentaram transformação de fase entre -35 °C e +55 °C, além de níveis de superelasticidade situados entre 2,6 % e 4,2 % após carregamento e descarregamento a temperatura ambiente para as estruturas 2D. Já para as estruturas 3D os níveis de SE não apresentaram qualquer deformação residual para o nível de deformação imposto no ensaio de compressão, com uma completa recuperação da deformação imposta.

O comportamento mecânico global avaliado nos ensaios de tração (estrutura 2D) e compressão (estrutura 3D) mostram que as estruturas celulares de LMF Ni-Ti suportaram ciclos de deformações de até 6% sem rompimento. Esses resultados levam esses componentes ao encontro da inovação e ao avanço tecnológico, devido a diversas possibilidades de aplicações, principalmente na área da biomedicina.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento dos seguintes projetos: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Estruturas Inteligentes em Engenharia (INCT-EIE, Proc. 574001/2008-5), UFCG-UFRJ-ITA Casadinho Projeto (Proc. 552199/2011-7), Universal 14/2012 (Proc. 474524/2012-4) e ao Projeto de Pesquisa UFRSA PEG0001-2017 e a cooperação técnica número 07/2017 UFRSA-UFCG.

5. REFERÊNCIAS

- De Araújo, C.J., Gomes, A.A. C., Silva, J.A., Cavalcanti, Reis, R.P B. and Gonzalez, C.H., 2009, “Fabrication of shape memory alloy using the plasma skull push-pull process”, *Journal of materials processing technology*, Vol. 209, pp. 3657-3664.
- Elahinia, M., 2016, “Shape Memory Alloy Actuators: Design, Fabrication and Experimental Evaluation”, Ed. Wiley, University of Toledo, USA, 304 p.
- Jahadakbar, A., Moghaddam, A.S., Amerinatanzi, A., Dean, D., Karaca, H.K. and Elahinia, M., 2016, “Finite Element Simulation and Additive Manufacturing of Stiffness-Matched NiTi Fixation Hardware for Mandibular Reconstruction Surgery”, *Journal Bioengineering*, Vol.3, 36 p.
- Jani, J.M., Leary, M., Subic, A. and Gibson, M.A., 2014, “A review of shape memory alloy research, applications and opportunities”, *Materials & Design*, Vol.56, pp. 1078-1113.
- Kim, Y.W., Chung, Y.S., Choi, E. and Nam, T.H., 2012, “Microstructure and Shape Memory Characteristics of Powder-Metallurgical-Processed Ti-Ni-Cu Alloys”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 43, pp. 2932-2938.
- Lecce, L. and Concilio, A., 2014, “Shape Memory Alloy Engineering: For Aerospace, Structural and Biomedical Applications”, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, , 448 p .
- Lin, H., Lin, K. and Chen, Y., 2000, “A study on the machining characteristics of TiNi shape memory alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol., pp. 327-332.
- Szurman, I., Kocich, R. and Kurska, M., 2012, “Shape Memory Alloys: Fabrication and processing”, Academic Publishing Lap Lambert, Berlin, Germany, 112p.
- Weinert, K. and Petzoldt, V., 2004, “Machining of NiTi based shape memory alloys”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 378, pp.180-184.
- Wu, S.K., Lin, H.C., Chen, C.C., 1999, “A study on the machinability of a Ti 49.6 Ni 50.4 shape memory alloy”, *Materials letters*, Vol.40, pp. 27-32.
- Yamauchi, K., Ohkata, I., Tsuchiya, K. and Miyazaki, S., 2011, “Shape memory and superelastic alloys: applications and technologies”, Woodhead Publishing, Philadelphia, USA, 232 p.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MANUFACTURE OF NI-TI SHAPE MEMORY ALLOY CELLULAR STRUCTURES USING INVESTMENT CASTING

Jackson de Brito Simões, jackson.simoes@ufersa.edu.br¹ (Times New Roman, negrito, tamanho 10)
Carlos José de Araújo, carlos.araujo@ufcg.edu.br² (Times

¹Federal Rural University of the Semi-Arid (UFERSA), RN 233, Km 01, Caraúbas, RN, Brazil, zip code: 59780-000

²Federal University of Campina Grande (UFCG), Av. Aprígio Veloso, 882, Campina Grande, PB, Brazil, zip code: 58429-140

Abstract. *In the late 20th century, the investment casting became an effective alternative for the manufacture of titanium components and their alloys in high-tech applications. However, there is no information on that process for obtaining mechanical components of shape memory alloys (SMA), especially those of the nickel - titanium (Ni - Ti) system. Thus, the objective of this work was to evaluate the investment casting process for the manufacture of new products, mainly Ni-Ti SMA bidimensional (2D, meshes) and tridimensional (3D, honeycombs) cellular structures. For this, the fabrication of different mesh formats and honeycombs of Ni-Ti SMA was carried out using the investment casting process by centrifugation with solid mold, as well as its thermal and mechanical characterization. The presence of the characteristic phase transformation of the SMA was evaluated by differential scanning calorimetry (DSC), while the mechanical strength of the obtained products was tested by cyclic tensile (mesh) and compression (honeycombs) tests. The obtained results made evident the efficiency of the proposed process, allowing the fabrication of 2D and 3D Ni-Ti SMA cell structures with phase transformation and good mechanical behavior that can lead to the development of future applications, mainly in the biomedical area.*

Keywords: Shape Memory Alloys, Ni-Ti Alloys, Cellular Structures, Investment Casting.