

## FABRICAÇÃO DE HONEYCOMBS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA CU-AL-MN USANDO FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

Yann Navarro de Lima Santana, yannsantaa22@gmail.com<sup>1</sup>

Paulo César Sales da Silva, paulocesarsales@outlook.com<sup>1</sup>

Raimundo Nonato Duarte Calazans, raimundo.duarte@ufcg.edu.br<sup>1</sup>

Carlos José de Araújo, carlos.araujo@ufcg.edu.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM), Av. Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, CEP: 58429-140, Campina Grande – PB, Brasil

**Resumo:** Em comparação aos metais e ligas metálicas convencionais, as ligas com memória de forma (LMF) apresentam a capacidade de recuperar grandes deformações (3 a 10%). Essa e outras características peculiares desses materiais, tal como sua superelasticidade, os tornam bastante promissores para muitas aplicações nas mais diversas áreas da Engenharia. Com esta motivação, o presente trabalho tem por objetivo estudar a possibilidade de fabricação de componentes mecânicos do tipo honeycombs a partir de uma LMF de Cu-Al-Mn. Os honeycombs com células hexagonais e circulares foram fabricados utilizando um processo de fundição de precisão por centrifugação a partir de moldes gerados por impressão 3D. As propriedades térmicas e mecânicas destes componentes foram avaliadas para determinar o comportamento funcional relacionado aos fenômenos de efeito de memória de forma (EMF) e superelasticidade (SE).

**Palavras-chave:** Ligas com Memória de Forma, Fundição de Precisão, Ligas Cu-Al-Mn, Transformação de fase.

### 1. INTRODUÇÃO

Ligas com memória de forma (LMF) são classificadas como materiais inteligentes capazes de suportar grandes deformações inelásticas, as quais podem ser recuperadas por aquecimento ou descarregamento mecânico (Cisse et al, 2016). Nestes metais especiais, comportamentos funcionais surgem a partir de modificações microestruturais quando são submetidos a estímulos externos não-mecânicos, tais como variação de temperatura ou alterações do campo magnético (Rao, et al. 2015). Essas LMF podem apresentar, na faixa de temperatura da aplicação, o fenômeno de efeito de memória de forma (EMF), referente à capacidade de retornar para uma forma ou dimensão pré-determinada quando submetida a um ciclo termomecânico apropriado (deformação plástica seguida de aquecimento). Adicionalmente, as LMF podem apresentar também uma característica definida como superelasticidade (SE), quando uma deformação imposta por aplicação de carga à temperatura constante na fase de mais alta temperatura (austenita) é totalmente recuperada no descarregamento. Enquanto o EMF está associado a uma transformação de fase induzida pela temperatura, a SE relaciona-se a uma transformação semelhante, mas induzida pela tensão mecânica aplicada à LMF de forma isotérmica.

Com essas habilidades especiais, as LMF têm sido usadas para desenvolver aplicações em alguns campos de engenharia de alta tecnologia, como os setores aeroespacial, biomédico, automotivo, petróleo e gás, energia elétrica e outros. Na maioria deles, são usados na fabricação de atuadores termomecânicos (Otsuka & Wayman, 1998).

As LMF a base de cobre e alumínio (Cu-Al-Ni, Cu-Al-Be, Cu-Al-Mn) podem ser consideradas bronzes ao alumínio e vem originando uma ampla gama de investigações relacionadas aos fenômenos de EMF e SE. Isso ocorre devido ao fato de tais ligas apresentarem, comparativamente as LMF de Ni-Ti (níquel e titânio), possibilidade de temperaturas superiores de transformação de fase, menor custo de produção, facilidade em processos de fabricação e capacidade de alcançar as propriedades desejadas por meio de adições de elementos químicos ternários (Ni, Mn, Nb e outros). Estas ligas são muito sensíveis à adição de outros elementos químicos quanto às propriedades obtidas e à formação das fases necessárias (austenita e martensita) para o desenvolvimento de propriedades de EMF e SE (Kumar et al, 2015).

Do ponto de vista de componentes mecânicos, estruturas celulares como os *honeycombs*, que apresentam alta rigidez, baixo peso e características de absorção de energia, são de interesse para aplicações na engenharia. No entanto, essas estruturas são normalmente fabricadas em alumínio, apresentando elevadas deformações permanentes após carregamento mecânico. Desta forma, estruturas celulares fabricadas a partir de LMF são particularmente interessantes devido ao seu potencial de apresentar comportamentos funcionais de EMF e/ou SE, associando-as às características típicas dessas estruturas prismáticas (Shaw et al., 2007).

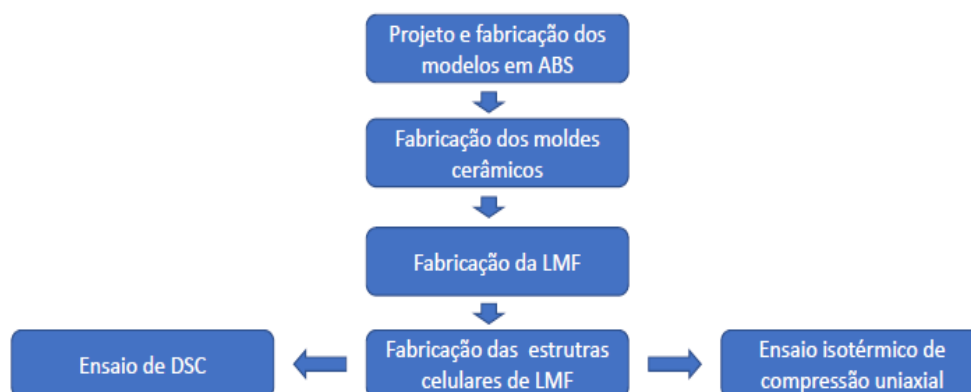
Gong et al. (2011) investigaram a fabricação de estruturas porosas com LMF Cu-Al-Mn pelo processo de sinterização para aplicação nos campos de absorção sonora e amortecimento. Constatou-se que o processo utilizado foi adequado para obtenção das estruturas celulares porosas, sendo possível controlar o tamanho, a forma e a direção da porosidade. Quanto à fabricação de componentes mecânicos, ressalta-se que praticamente não existem trabalhos na literatura internacional relatando estudos sobre aplicação de processos de fundição de precisão para a obtenção de peças de LMF à base de Cu-Al.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade de fabricar componentes mecânicos do tipo *honeycombs* com uma LMF 83Cu-12Al-5Mn (% em massa) utilizando um processo de fundição de precisão por centrifugação.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Processo de fabricação

O processo de fabricação e caracterização das estruturas celulares do tipo *honeycombs* está esquematizado na Figura 1.



**Figura 1. Etapas de manufatura e caracterização das estruturas celulares tipo *honeycombs*.**

Inicialmente, foram fabricados os modelos dos *honeycombs* de interesse em plástico ABS utilizando uma impressora 3D da marca Stratasys, modelo Dimension Elite. Estes modelos foram recobertos com revestimento cerâmico (Calibra Express) para obtenção de moldes dos componentes desejados. Após a solidificação do revestimento em torno do modelo, este conjunto foi levado para um forno elétrico, onde foi aquecido até a temperatura de 900°C a uma taxa de 20°C/min, permanecendo nesta temperatura por 30 minutos. Após esta etapa, o polímero ABS é evaporado originando o molde em revestimento cerâmico do componente desejado.

Para a confecção da LMF 83Cu-12Al-5Mn (% em peso) foram utilizados elementos de pureza comercial, superior a 95%. As ligas foram fabricadas por meio da técnica *Plasma Skull Push Pull* (PSPP), validada por de Araújo et al. (2009) para a produção de LMF de base Cu-Al e Ni-Ti.

Após a fabricação dos moldes e da preparação das cargas de LMF, a fabricação foi realizada utilizando o equipamento PowerCAST 1700, da marca EDG Equipamentos e Controles, que utiliza o processo de fundição por centrifugação em atmosfera inerte. A temperatura do molde neste processo foi de 250°C, enquanto a rotação e temperatura de injeção do metal líquido foram, respectivamente, 425 rpm e 1350°C. Todo esse processo se completa em aproximadamente 3 minutos. Logo após a conclusão do processo de fundição, foi realizado o desmolde das estruturas e a limpeza utilizando o processo de jateamento com alumina em pó.

### 2.2. Avaliação dimensional

As peças obtidas após a fundição foram analisadas quanto as dimensões e comparadas com os modelos em ABS, utilizando um projetor de perfil da marca Huatec, modelo HB-16. Foram realizadas cinco medições de espessura em cada estrutura.

### 2.3. Caracterização térmica

As temperaturas de transformação de fase dos *honeycombs* de LMF foram determinadas usando a técnica de calorimetria diferencial de varredura (DSC) utilizando um calorímetro da marca TA Instruments, modelo Q20. Seguindo

a norma ASTM F2004-05, os ensaios foram realizados a uma taxa de 10 °C/min durante o aquecimento e resfriamento na faixa de temperatura de -50 a 150°C. A massa média das amostras empregadas foi da ordem de 20 mg.

## 2.4. Caracterização mecânica

Os *honeycombs* fabricados foram submetidos a ensaios de compressão, em diferentes temperaturas (30°C, 50°C, 70°C, 90°C, 110°C e 130°C), selecionadas em função das temperaturas de transformação da LMF. O ensaio foi realizado em uma máquina de ensaios universal da série 5582, da marca Instron.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Fabricação das estruturas celulares (*Honeycombs*)

Conforme mostrado na Figura 2, as estruturas celulares com células hexagonal e circular foram fabricadas com sucesso a partir do processo de fundição de precisão. Os parâmetros de fundição utilizados foram satisfatórios, uma vez que houve total preenchimento dos moldes, com boa reprodução do modelo em ABS.

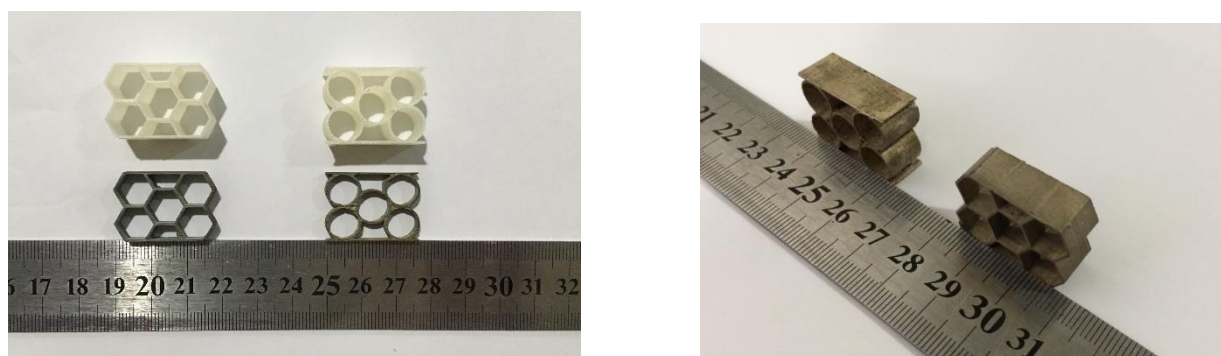


Figura 2. Imagens dos *honeycombs* em ABS e depois de fabricados em LMF Cu-Al-Mn pelo processo de fundição de precisão.

### 3.2. Avaliação dimensional

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise dimensional da espessura dos modelos e peças fundidas. Pode-se observar que houve contração nas peças fundidas, uma vez que suas dimensões são inferiores em relação aos modelos em ABS. A estrutura circular apresentou uma maior contração, uma vez que a redução dimensional foi de 8,9%. Esta redução acontece devido a contração do metal durante a solidificação no interior do molde cerâmico. Observa-se que o desvio padrão foi muito baixo, comprovando a eficácia do processo de fundição de precisão.

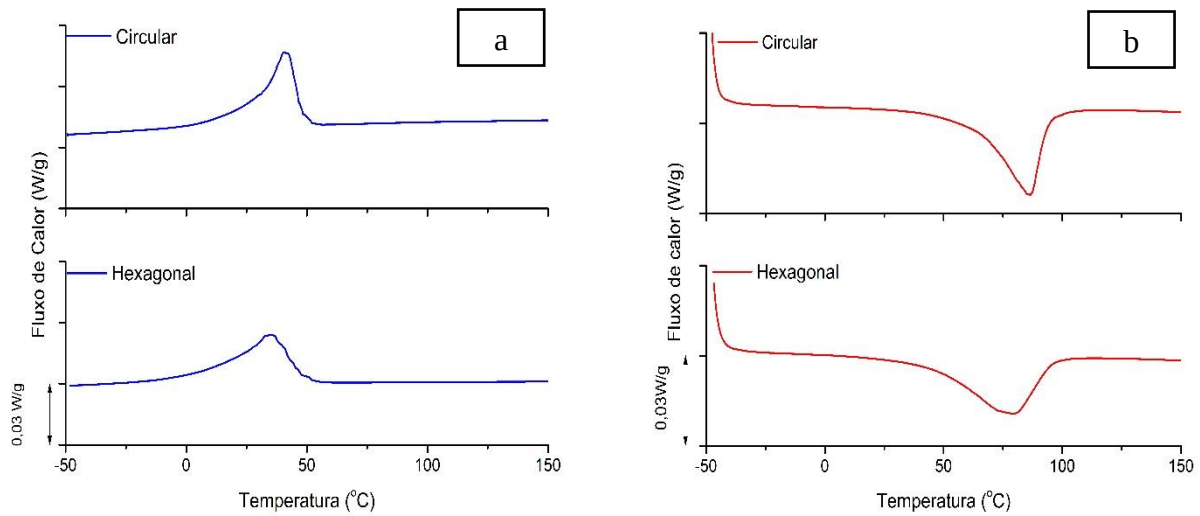
Tabela 1. Análise dimensional das espessuras dos modelos e peças fundidas

| Geometria                     |  |  |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Dimensão do modelo (mm)       | 0,661 ± 0,022 mm                                                                    | 0,745 ± 0,008 mm                                                                      |
| Dimensão da peça fundida (mm) | 0,624 ± 0,007 mm                                                                    | 0,678 ± 0,028 mm                                                                      |
| Redução dimensional (%)       | 5,6%                                                                                | 8,9%                                                                                  |

### 3.3. Caracterização térmica

As temperaturas de transformação de todas as estruturas foram determinadas pelo ensaio de DSC. Pequenas amostras de material foram retiradas dos canais de alimentação dos *honeycombs* em localidades próximas às estruturas finais. Na Figura 3, é possível observar as curvas de DSC das amostras retiradas das estruturas celulares. A partir destas curvas, foi possível determinar as temperaturas de transformação pelo método das tangentes aos picos. Estas temperaturas estão apresentadas na Tabela 1. Pode-se observar que todas as estruturas apresentaram transformação de fase, revelando um potencial de EMF aplicando deformações na temperatura ambiente (da ordem de 25 °C). Uma comparação entre as

temperaturas de transformação de ambas as estruturas permite constatar, de forma indireta, um bom controle de composição química nas duas fundições.



**Figura 3.** Curvas obtidas por análise de DSC nas amostras retiradas dos *honeycombs*. (a) curvas de resfriamento. (b) curvas de aquecimento.

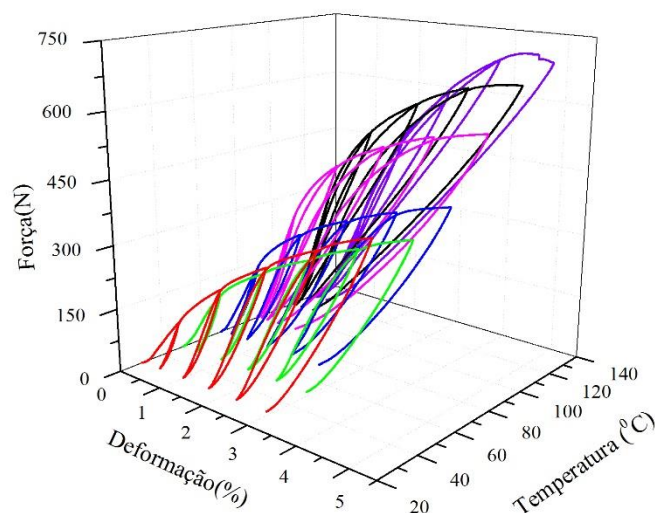
**Tabela 2.** Temperaturas de transformação de fase das estruturas celulares tipo *honeycombs*.

| Estrutura | $M_s(^{\circ}\text{C})$ | $M_f(^{\circ}\text{C})$ | $A_s(^{\circ}\text{C})$ | $A_f(^{\circ}\text{C})$ |
|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Hexagonal | 57,2                    | 23,4                    | 76,2                    | 100,8                   |
| Circular  | 48,7                    | 28,7                    | 61,7                    | 94,6                    |

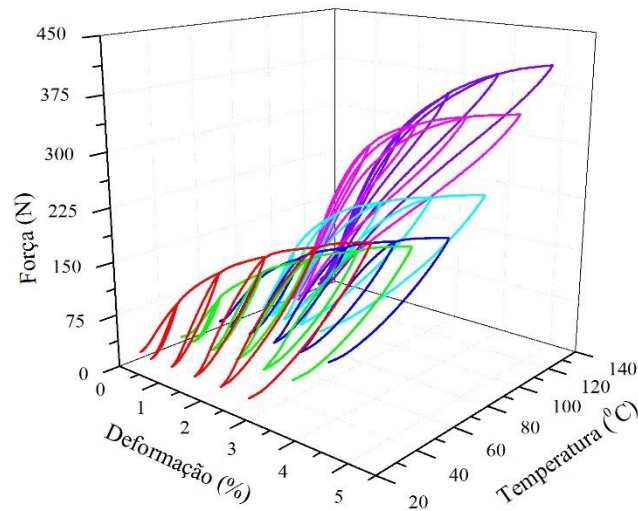
$M_s$  – Temperatura de início de formação da fase martensítica;  $M_f$  – Temperatura de término de formação da fase martensítica;  $A_s$  – Temperatura de início de formação da fase austenítica;  $A_f$  – Temperatura de término de formação da fase austenítica.

### 3.4. Caracterização mecânica

As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados dos ensaios de compressão realizados nas estruturas celulares em diferentes temperaturas (30°C, 50°C, 70°C, 90°C, 110°C e 130°C). A deformação imposta variou de 1% à 5% em relação ao comprimento das estruturas, com incremento de 1% de deformação a cada novo ciclo.



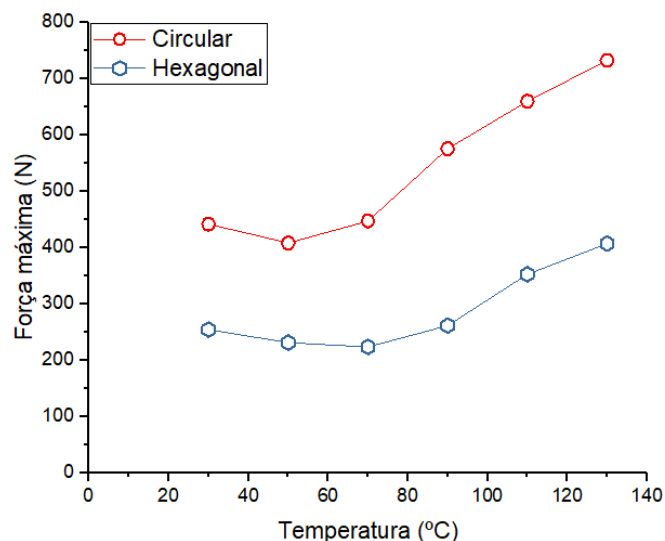
**Figura 4.** Comportamento força-deformação nos ciclos de deformação na estrutura circular, em diferentes temperaturas.



**Figura 5. Comportamento força-deformação nos ciclos de deformação na estrutura hexagonal, em diferentes temperaturas.**

Pode-se observar que as estruturas apresentaram estabilidade mecânica ao longo dos ciclos de deformação estabelecidos. Percebe-se também que, com o início da formação da estrutura ordenada austenítica, acima de 70 °C, houve um aumento das forças para deformar a estrutura e a deformação residual diminuiu, levando ao fenômeno da superelasticidade a partir dessa temperatura. Após descarregamento em temperaturas inferiores a 70 °C, as estruturas apresentam uma deformação residual que pode ser recuperada por meio de um simples aquecimento (EMF).

A Figura 6 apresenta a relação entre a força máxima necessária para se atingir 5% de deformação nas estruturas analisadas, em diferentes temperaturas. Foi possível observar que a força necessária para atingir-se 5% de deformação foi superior na estrutura circular, em todas as temperaturas analisadas. Enfatizando a maior temperatura analisada, 130 °C, a força necessária para se atingir a máxima deformação foi de 725 N para a estrutura circular e 400 N para a estrutura hexagonal, uma diferença de 45%. Esse comportamento ocorre provavelmente devido ao fato da estrutura com células hexagonais ser formada por partes retilíneas inclinadas em relação a direção de aplicação da carga, contrariamente a estrutura com células circulares. Um comportamento semelhante foi observado no estudo de Simões (2016) em *honeycombs* de LMF Ni-Ti.



**Figura 6. Força necessária para se atingir 5% de deformação em diferentes temperaturas, nas duas estruturas.**

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi investigada a viabilidade de fabricação e caracterização de *honeycombs* de LMF Cu-Al-Mn obtidos pelo processo de fundição de precisão. A fabricação das duas geometrias celulares (circular e hexagonal) foi realizada com êxito, validando assim o processo de fundição de precisão por centrifugação aplicado à fabricação de estruturas celulares de LMF de base Cu-Al. O *honeycomb* circular apresentou maior contração dimensional. A partir da caracterização térmica foi possível confirmar que as estruturas produzidas apresentaram a transformação de fase que permite potencializar o aparecimento do efeito de memória de forma e da superelasticidade. Com a caracterização termomecânica em compressão foi possível observar que a força necessária para se atingir 5% de deformação foi superior na estrutura circular e aumenta com o aumento da temperatura, levando a obtenção do fenômeno de superelasticidade a partir de 70°C.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem 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). Um agradecimento especial ao apoio propiciado pelo Programa de Educação Tutorial de Engenharia Mecânica da UFCG (PETMEC-CG), por meio da bolsa de estudos concedida ao primeiro autor.

#### 6. REFERÊNCIAS

- American Society For Testing And Materials, 2010, “ASTM F2004-05: Standard Test Method for Transformation Temperature of Nickel-Titanium Alloys by Thermal Analysis”, West Conshohocken: Astm International.
- De Araújo, C. J. et al., 2008, “Fabrication of shape memory alloys using the plasma skull push-pull process”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 3657-3664.
- Cisse, C., Tarak, W. Z., Zineb, B., 2016, “A review of constitutive models and modeling techniques for shape memory alloys”, International Journal of Plasticity, Vol. 76, pp. 244-284.
- GONG, S. et al., 2011, “Fabrication, microstructure and property of cellular CuAlMn shape memory alloys produced by sintering–evaporation process”, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 509, pp. 2924-2928.
- Kumar, P. et al., 2014, “Changes in the properties of Cu-Al-Mn shape memory alloy due to quaternary addition of different elements”, Revista Matéria, Vol. 20, Rio de Janeiro, n. 1, pp. 284-292.
- Otsuka, K., Wayman, C. M., 1998, “Shape Memory Materials”, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 284.
- Rao, A.; Srinivasa, A. R.; Reddy, J. N., 2015 “Introduction to Shape Memory Alloys. Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators”, Texas: Springer, pp. 137.
- Shaw, J. A., Grummon, D., Foltz, J., 2007, “Superelastic NiTi honeycombs: fabrication and experiments”, Smart Materials and Structures, Vol. 16, n. 1, pp. 170.
- Simões, J. de B., 2016, “Fabricação de componentes miniaturizados de ligas com memória de forma ni-ti usando fundição de precisão”, Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, pp. 270.

#### 7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

## FABRICATION OF CU-AL-MN SHAPE MEMORY ALLOY HONEYCOMBS USING INVESTMENT CASTING

Yann Navarro de Lima Santana, [yannsantaa22@gmail.com](mailto:yannsantaa22@gmail.com)<sup>1</sup>

Paulo César Sales da Silva, [paulocesarsales@outlook.com](mailto:paulocesarsales@outlook.com)<sup>1</sup>

Raimundo Nonato Duarte Calazans, [raimundo.duarte@ufcg.edu.br](mailto:raimundo.duarte@ufcg.edu.br)<sup>1</sup>

Carlos José de Araújo, [carlos.araujo@ufcg.edu.br](mailto:carlos.araujo@ufcg.edu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM), Av. Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, CEP: 58429-140, Campina Grande – PB, Brazil.

**Abstract.** *Comparatively to conventional metal and alloys, shape memory alloys (SMA) exhibits the capacity to recover large deformations (3 to 10%). These and other unique characteristics, such as superelasticity, led to their use in different areas of engineering. In this context, the present research aims to analysis the possibility of fabricate mechanical components, specifically honeycombs, from a Cu-Al-Mn SMA. Honeycombs with hexagonal and circular cells, were fabricated using investment casting by centrifugation, from ABS molds made by 3D impression. Mechanical and thermal properties of those components were evaluated to determine the functional behavior related to the phenomenon of shape memory effect (SME) and superelasticity (SE).*

**Keywords:** *Shape Memory Alloys, Investment Casting, Cu-Al-Mn Alloys, Phase Transformation.*