

CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA E MECÂNICA DE UMA CÉLULA AUXÉTICA 2D OBTIDA POR MICRO-SOLDAGEM TIG DE FIOS DE LMF Ni-Ti

Pedro Luiz Lima dos Santos, pedroluizcsc@gmail.com¹

Paulo Cesar Sales da Silva, engenheiropcsales@gmail.com¹

Carlos José de Araújo, carlos.araujo@ufcg.edu¹

¹Universidade Federal de Campina Grande, Rua Aprígio Veloso, 882 - Bairro Universitário, Campina Grande, PB.

Resumo: O comportamento mecânico de estruturas arquitetadas ou celulares pode ser modificado a partir de alterações na morfologia de suas unidades básicas de repetição, ou seja, células unitárias. Materiais auxéticos são uma classe de materiais que exibem um comportamento contraintuitivo; devido a um coeficiente de Poisson negativo, quando deformados, podem se expandir lateralmente quando tracionados longitudinalmente e vice-versa. Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento térmico e mecânico de uma célula bidimensional (2D) re-entrant fabricada por micro-soldagem de fios de ligas com memória de forma (LMF) Ni-Ti exibindo efeito de memória de forma (EMF). As temperaturas de transformação de fase do fio íntegro e da célula 2D foram determinadas por meio de ensaios de calorimetria diferencial de varredura (DSC) e de resistência elétrica com a temperatura (RET), respectivamente. O comportamento mecânico da célula foi avaliado por meio de ensaios de tração e extensometria via análise de imagens. Observou-se uma histerese térmica da ordem de 10 °C entre os picos de aquecimento e resfriamento no DSC, o que corrobora a existência da transformação de fase entre a austenita e a fase-R durante o resfriamento da liga. Foi verificado que a micro-soldagem não foi capaz de alterar significativamente as temperaturas características na qual ocorre a transformação de fase, visto que as dimensões da região soldada são irrelevantes quando comparadas com o tamanho total da célula. Uma deformação máxima de 52% antes da ruptura foi observada, além da mudança do comportamento de deformação da célula, a qual passa de um coeficiente de Poisson de -0,09 para 0,04, o que está de acordo com a premissa de que o comportamento auxético de uma estrutura também é função de seu nível de deformação.

Palavras-chave: Materiais auxéticos, Ligas com memória de forma, Efeito de memória de forma, Micro-soldagem, TIG.

1. INTRODUÇÃO

Estruturas arquitetadas ou celulares são estruturas que possuem unidades básicas, denominadas de células unitárias, arrançadas tridimensionalmente de modo a preencher o espaço, originando resistência a solicitações mecânicas adequada à sua aplicação, com redução de peso total do componente (Gibson & Ashby, 1997). Sabe-se que o comportamento mecânico dessas estruturas está diretamente relacionado com o material e a morfologia de suas células unitárias, além do seu processo de fabricação (Gibson & Ashby, 1997; Choy et al., 2017). Enquanto que a composição química, estrutura do material (em diversas escalas) e processamento influenciarão suas propriedades mecânicas intrínsecas, tais como módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tenacidade à fratura, a morfologia, por sua vez, ditará o seu modo de deformação (Gibson & Ashby, 1997).

Por outro lado, devido a sua capacidade de reconhecer e responder à estímulos não-mecânicos externos em suas adjacências (e.g., temperatura, campo magnético), as ligas com memória de forma (LMF) vem sendo utilizadas em uma ampla gama de aplicações, tais como nas áreas biomédica, automotiva e aeroespacial (Rao et al., 2015; Duerig et al., 1999; Van Humbeeck et al., 1999). Este comportamento típico das LMF decorre de transformações de fase no estado sólido, de natureza displaciva, sem difusão atômica, que ocorrem entre as fases austenita e a martensita. Portanto, as LMF exibem comportamentos distintos quando submetidas a diferentes temperaturas e níveis de carregamento mecânico, o que dá origem a duas propriedades funcionais importantes: efeito de memória de forma (EMF) e superelasticidade ou pseudo-elasticidade (SE) (Otsuka & Wayman, 1998; Lagoudas, 2008).

Para um mesmo material, a resistência à esforços mecânicos externos de uma estrutura exibindo hierarquia estrutural pode ser modificada a partir de mudanças na morfologia e parâmetros geométricos de sua célula unitária (Lantada et al., 2016; Saxena et al., 2016). Em geral, materiais convencionais quando tracionados longitudinalmente apresentam uma tendência a reduzir suas dimensões na direção transversal. Todavia, materiais e estruturas auxéticas

exibem um comportamento contrário. Devido ao seu coeficiente de Poisson negativo, estes materiais e estruturas podem se expandir lateralmente quando tracionados na direção longitudinal e vice-versa (Elípe et al., 2012). Consequentemente, estes materiais vem ganhando espaço em diversas áreas em virtude da superioridade de suas propriedades mecânicas, relacionadas a elevada capacidade de amortecimento, alto módulo de cisalhamento transversal e resistência à indentação (Saxena et al., 2016; Elípe et al., 2012; Ingrole et al., 2017).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo geral realizar a caracterização térmica e mecânica de uma célula auxética bidimensional (2D) do tipo *re-entrant* fabricada por meio de micro-soldagem TIG de fios de LMF Ni-Ti exibindo EMF.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As atividades desenvolvidas para a realização deste trabalho encontram-se resumidas no fluxograma da Figura 1. Durante a fabricação das células 2D foram utilizados fios de uma LMF Ni-Ti de composição equiatômica com diâmetro de 0,9 mm e comprimentos de 70 mm. Um tratamento térmico em forno elétrico VRC Millenium, a 450 °C por 20 minutos, foi realizado para liberar a transformação de fase no material e eliminar a curvatura dos fios proveniente do seu processo de fabricação e armazenamento. A Figura 2 permite visualizar o dispositivo utilizado na fixação dos fios de Ni-Ti durante o tratamento térmico. O resfriamento dos fios após o tratamento térmico se deu ao ar corrente. Após esta etapa, os fios foram lixados com lixas metalográficas de carbeto de silício com granulometria de 1200 para retirada da camada de óxido formada durante o tratamento térmico.

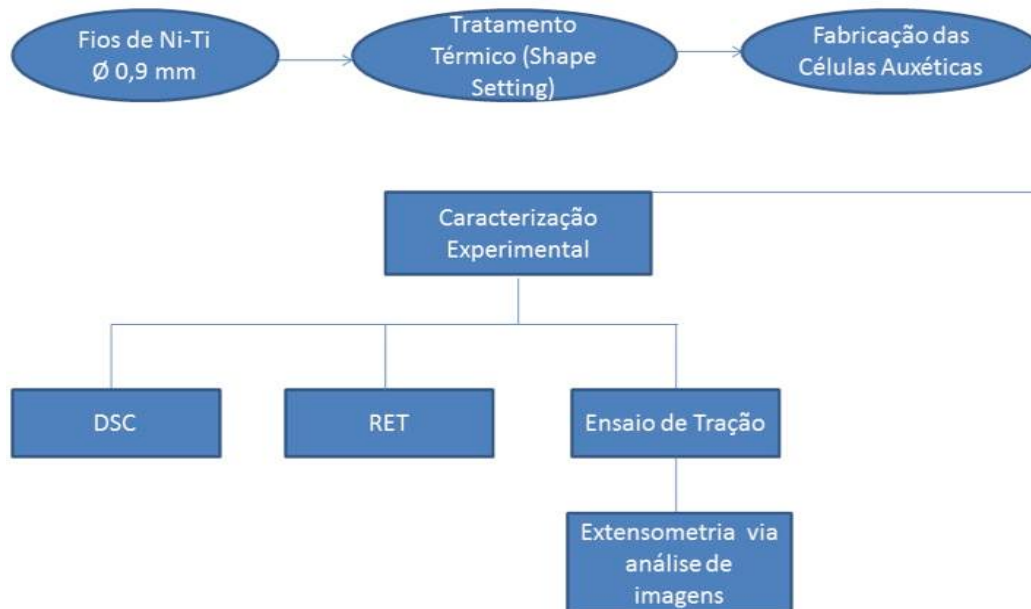


Figura 1. Fluxograma representativo das etapas desenvolvidas ao longo da pesquisa.



Figura 2. Dispositivo de fixação dos fios de Ni-Ti para tratamento térmico.

Devido a geometria não-convencional da célula, utilizou-se um molde fabricado em ABS usando uma impressora 3D, o qual foi eficaz no momento da soldagem, permitindo manter os fios na posição e angulação desejadas. A

soldagem autógena dos fios foi realizada por meio de um equipamento de micro-soldagem por pulsos controlados TIG (*Tungsten Inert Gas*), modelo PUK-U4, da empresa *Lampert*, que possui uma potência máxima de 400 VA e um eletrodo não-consumível de tungstênio com 0,5 mm de diâmetro. Os parâmetros de soldagem utilizados durante o processo estão resumidos na Tab. 1.

Tabela 1. Parâmetros de soldagem TIG utilizados para a fabricação da célula auxética de LMF Ni-Ti.

Vazão do Gás de Proteção (Argônio)	5 l/min
Potência	65% Pot _{máx}
Tempo de Pulso	6 ms

Com o objetivo de conferir um coeficiente de Poisson negativo à célula, esta foi fabricada com parâmetros geométricos específicos. Na Figura 3 observa-se a célula fabricada com suas dimensões assinaladas na Tab. 2.

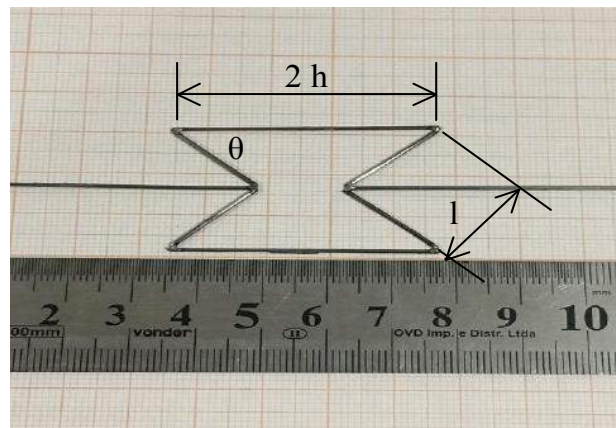


Figura 3. Célula de LMF Ni-Ti fabricada por meio de micro-soldagem autógena TIG.

Tabela 2. Dimensões características da célula de LMF Ni-Ti

2h	43 mm
l	19 mm
θ	45°

A caracterização térmica da célula da Fig. 3 se deu em duas etapas: caracterização do fio íntegro de LMF Ni-Ti e caracterização da célula completa. O ensaio de calorimetria diferencial de varredura (DSC) foi empregado na determinação das temperaturas de transformação de fase do fio íntegro de Ni-Ti. Neste ensaio, variou-se a temperatura de - 60 a 120 °C a uma taxa de 10 °C/min de um corpo de prova com 5,2 mg de massa e 5 mm de comprimento, aproximadamente. De modo análogo, utilizou-se do ensaio de resistência elétrica com a temperatura (RET) para avaliar a influência do processo de soldagem nas temperaturas de transformação de fase da liga. Neste ensaio, a célula de LMF Ni-Ti foi imersa em um banho termo regulável e, a partir de um sistema de aquisição de dados, monitorou-se a queda de tensão elétrica resultante da passagem de uma corrente elétrica constante através do corpo de prova. A temperatura do banho foi variada de - 60 a 110 °C. O método utilizado na determinação das temperaturas de transformação de fase em ambos os ensaios foi o método do cruzamento de tangentes nos pontos de inflexão das curvas obtidas.

A caracterização mecânica da célula de LMF Ni-Ti foi feita a temperatura ambiente (~ 25 °C) usando uma máquina de universal de ensaios modelo BME, da marca Oswaldo Filizola, com capacidade máxima de 10 kN e célula de carga de 200 N. Acoplado ao sistema de ensaio mecânico, utilizou-se um sensor de deslocamento linear LVDT (*linear variable differential transformer*). Todos os parâmetros e dados de ensaio foram controlados por intermédio do software *Dynaview Standard Pro M*. Foram realizados sucessivos carregamentos e descarregamentos na célula, os quais estavam associados com uma deformação residual ao final de cada ciclagem. Após cada ensaio de carregamento e descarregamento, por intermédio de um soprador térmico de 1400 W de potência, da marca STEINEL, modelo HL 1500, a célula foi aquecida e, por efeito de memória de forma, retornou a sua condição inicial, dando-se início um novo ciclo de teste. Na Figura 4 observa-se a montagem do sistema mecânico utilizado para a realização do ensaio de tração da célula.

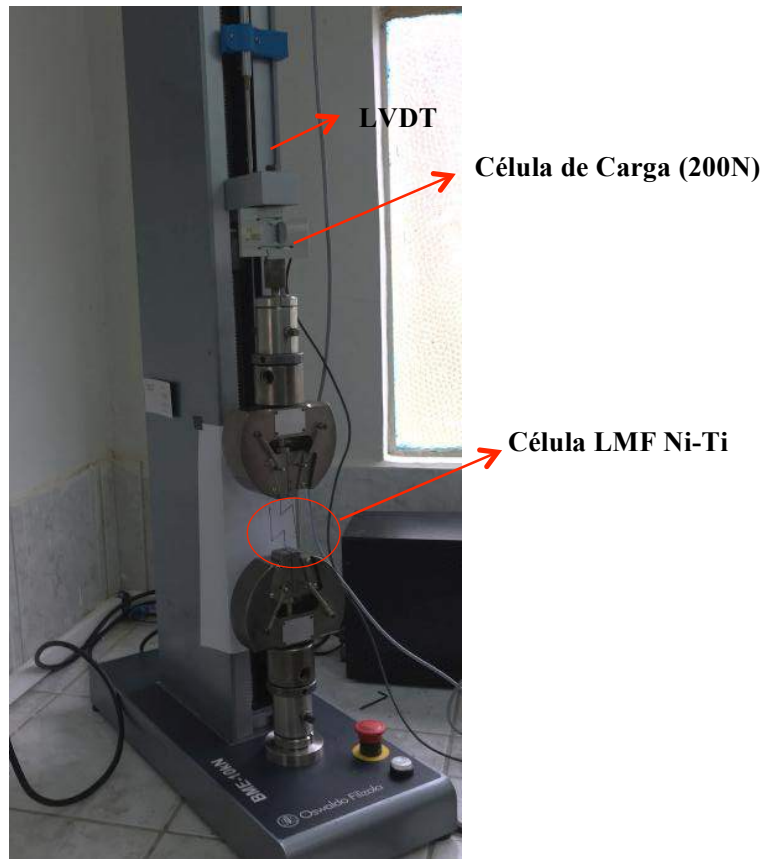


Figura 4. Montagem utilizada para a caracterização mecânica da célula auxética de LMF Ni-Ti.

À medida que os ensaios de tração eram realizados, uma câmera em posição estática filmava a deformação gradativa que a célula assumia para diferentes valores de força aplicados. Terminado o ensaio, foram extraídos os quadros (*frames*) do vídeo para posterior determinação das deformações via análise de imagens. O procedimento foi realizado em diferentes instantes do ensaio e teve como resultado gráficos de força em função do deslocamento longitudinal e do coeficiente de Poisson em função da deformação longitudinal localizada da célula. A Figura 5 ilustra a montagem do sistema de filmagem utilizado.

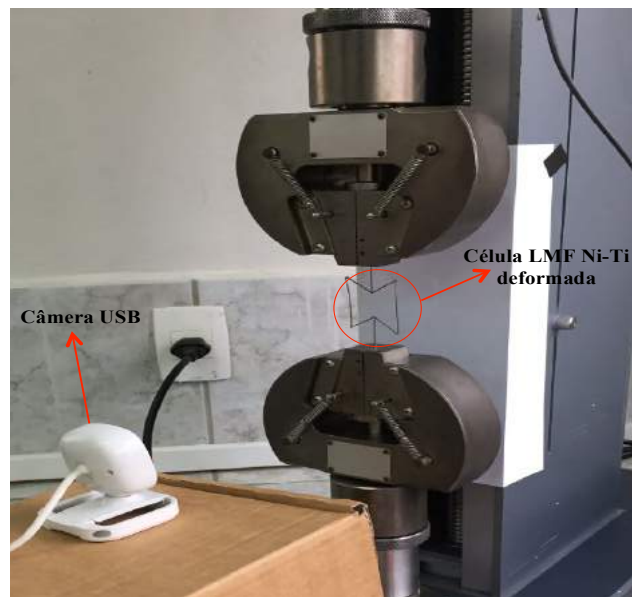


Figura 5. Sistema de filmagem para determinação da deformação via análise de imagens.

As medições foram realizadas nas direções longitudinal e transversal com a finalidade de avaliar o coeficiente de Poisson da célula produzida. Por meio do *software ImageJ*, o qual permite o tratamento de imagens para fins científicos, realizaram-se medições nas direções transversal e longitudinal a cada três segundos de vídeo, partindo do estado "não-deformado" da célula (instante $t = 0$). Três medidas são inicialmente conhecidas, comprimento inicial em milímetros, comprimento inicial em *pixels* e comprimento em *pixels* num instante de tempo t . A quarta medida, que é o comprimento de interesse no instante de tempo t em milímetros foi obtida por meio de uma relação de proporcionalidade com os três valores supracitados. A Figura 6 permite visualizar a região onde as medições foram realizadas.

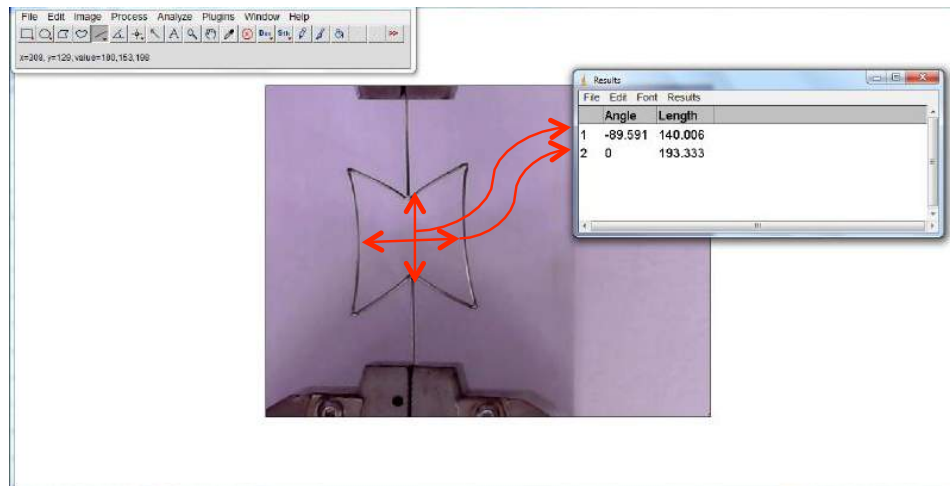


Figura 6. Regiões de medição das deformações via análise de imagens para validação do comportamento auxético da célula de LMF Ni-Ti.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterizações térmicas

A partir dos ensaios de calorimetria diferencial de varredura (DSC) e de resistência elétrica com a temperatura (RET) foi possível determinar as temperaturas de transformação de fase do material e verificar a eventual influência do processo de fabricação nestas temperaturas. Na Figura 7 observa-se o gráfico de DSC do fio íntegro após o tratamento térmico e antes do processo de micro-soldagem. Verifica-se uma histerese térmica da ordem de 10 °C entre os picos de aquecimento e resfriamento da liga, o que indiretamente indica a presença da transformação de fase austenita/fase-R durante o resfriamento. Esta transformação de fase no estado sólido é caracterizada pelo cisalhamento da estrutura cristalina da austenita, o qual ocorre sem difusão atômica de longo e médio alcance, e resulta numa fase possuindo estrutura cristalina romboédrica, daí sua denominação fase-R (Otsuka & Wayman, 1998).

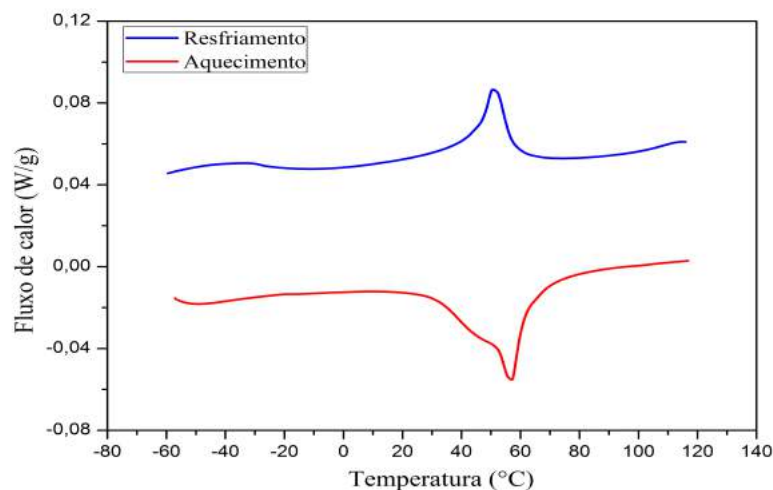


Figura 7. Gráfico de DSC do fio íntegro de LMF Ni-Ti.

Na Figura 8 verifica-se o comportamento de RET da célula de LMF Ni-Ti completa. As temperaturas de transformação de fase obtidas pelo método das tangentes para as duas análises térmicas são resumidas na Tab. 3. A partir da comparação entre as temperaturas críticas de transformação de fase do fio íntegro e da célula de LMF Ni-Ti,

percebe-se uma ligeira variação entre os resultados, sendo mais expressiva apenas para as temperaturas de início e fim da transformação austenítica (A_s e A_f , respectivamente). Assim, constata-se que a micro-soldagem não foi capaz de alterar de maneira significativa as temperaturas de transformação de fase da liga, tendo em vista que as dimensões da região afetada pela soldagem (ZTA + Zona fundida) são muito pequenas em comparação ao tamanho da célula completa.

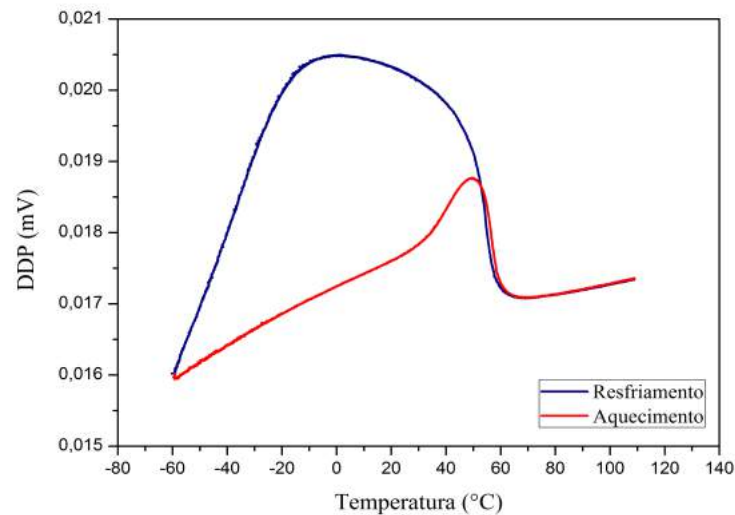


Figura 8. Gráfico de RET da célula de LMF Ni-Ti.

Tabela 3. Temperaturas de transformação de fase do fio íntegro e da célula de LMF Ni-Ti.

	R_s	R_f	M_s	M_f	A_s	A_f
DSC	59,4 °C	51,5 °C	-	-	45 °C	63,2 °C
RET	59,2 °C	47,7 °C	- 16,4 °C	-	31,5 °C	62 °C

3.2 Caracterizações mecânicas

Por meio da análise do gráfico força versus deslocamento longitudinal da célula de LMF Ni-Ti, mostrado na Fig. 9, observa-se a presença de deformação residual ao final de cada ciclo (ϵ_r). Este comportamento está de acordo com as ligas de Ni-Ti que exibem efeito de memória de forma, as quais, quando sob a ação de nenhum esforço externo, retornam a seu formato inicial após deformação, por meio de aquecimento a uma temperatura superior à temperatura em que toda a martensita (ou fase R, nesse caso) se transforma em austenita, ou seja, A_f . Para esta célula, A_f é da ordem de 62 °C, indicando que ϵ_r pode ser recuperada por um aquecimento acima desta temperatura.

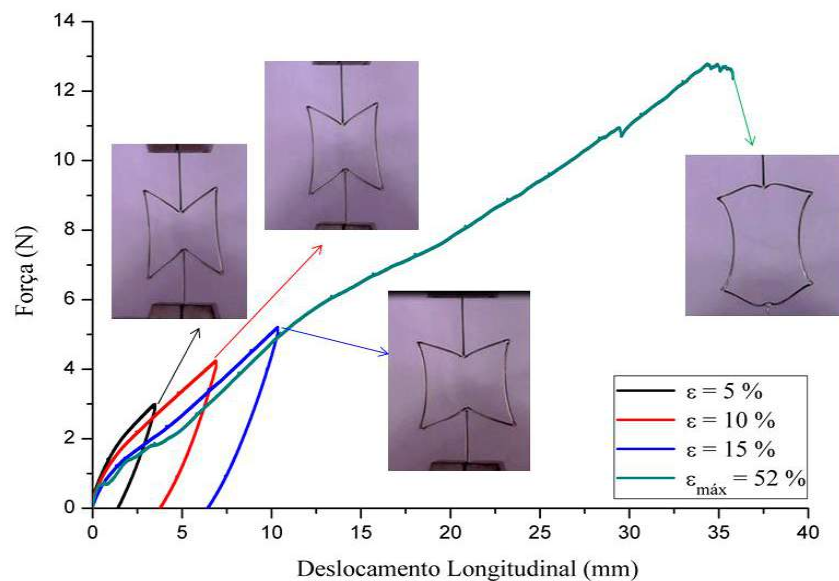


Figura 9. Gráfico força versus deslocamento longitudinal da célula de LMF Ni-Ti.

Com o objetivo de avaliar a conformidade ou não da célula de LMF Ni-Ti no tocante à auxeticidade, realizou-se o cálculo do coeficiente de Poisson a partir das medidas de deformação obtidas via análise de imagens. A partir da análise do gráfico do coeficiente de Poisson em função da deformação localizada longitudinal, mostrado na Fig. 10, observa-se que o valor é inicialmente negativo e foi calculado, para o estado inicial não-deformado, a partir de fórmulas desenvolvidas por Smith et. al. (2000) em função dos parâmetros geométricos da célula. O coeficiente, que é inicialmente negativo e de - 0,09 aumenta gradativamente à medida que a célula se deforma, assumindo um valor de 0,05 antes da ruptura. Esta variação do coeficiente de Poisson está relacionada com a flexão a que estão submetidas as paredes inclinadas da célula, as quais durante a deformação modificam a geometria da célula e, conseqüentemente, seu coeficiente de Poisson. Portanto, no momento em que a célula atinge um coeficiente de Poisson nulo, quando tracionada na direção longitudinal, seu comportamento de deformação é modificado, deixando de ser auxético. Este comportamento confirma o fato de que a auxeticidade depende, além da morfologia e dos parâmetros geométricos da célula unitária, do nível de deformação o qual a célula e/ou estrutura está submetida.

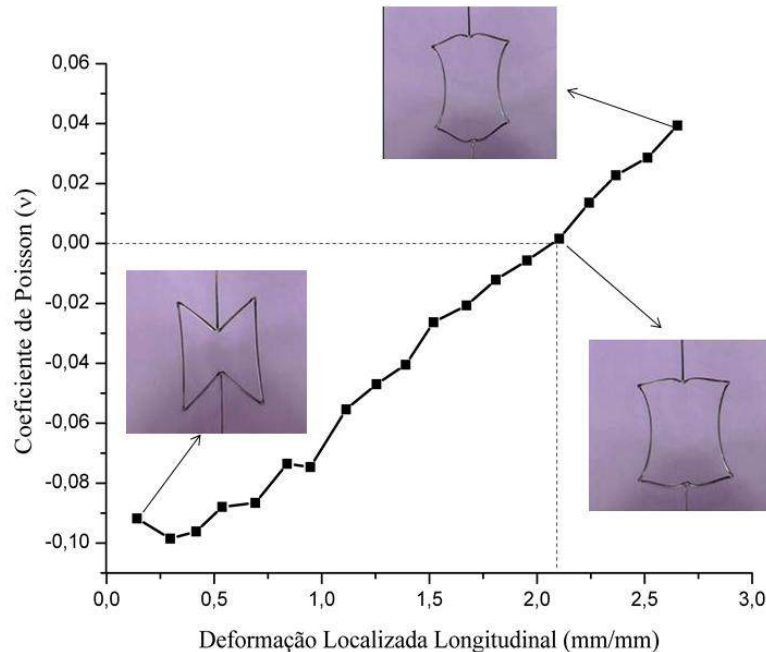


Figura 10. Gráfico do coeficiente de Poisson *versus* deformação localizada longitudinal da célula de LMF Ni-Ti.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho o comportamento térmico e mecânico de uma célula auxética fabricada pelo processo de micro-soldagem TIG de fios de uma liga com memória de forma Ni-Ti foi caracterizado. Por meio de análises térmicas de DSC e RET, comprovou-se a presença de uma transformação de fase envolvendo a presença da fase-R durante o resfriamento da célula. Além disso, foi constatado que o processo de fabricação exerceu um papel secundário no que concerne à alteração das temperaturas críticas em que ocorrem as transformações de fase, quando se comparam os resultados de DSC (material) com os de RET (célula inteira). A caracterização mecânica confirmou o comportamento auxético da célula para os primeiros estágios de deformação, o qual modificou-se conforme a célula foi deformada longitudinalmente, com valores de coeficiente de Poisson variando de - 0,09 a 0,05.

5. 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), Projeto Casadinho UFCG-UFRJ-ITA (Proc. 552199/2011-7), Universal 14/2012 (Proc. 474524/2012-4) e PQ 1D (Proc. 304658/2014-6).

6. REFERÊNCIAS

- Choy, S. Y., Sun, C., Leong, K.F. and Wei, J., 2017, "Compressive properties of Ti-6Al-4V lattice structures fabricated by selective laser melting: design, orientation and density", *Additive Manufacturing*, Vol. 16, pp. 213-224.
- Duerig, T. M., Pelton, A., Stöckel, D., 1999, "An overview of nitinol medical applications", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 273-275, pp. 149-160.
- Elipe, J. C. A., Lantada, A. D., 2012, "Comparative study of auxetic geometries by means of computer-aided design and engineering", *Smart Materials Structures*, Vol. 21, No. 10.
- Gibson, L. J.; Ashby, M. F., 1997, "Cellular solids: structure and properties", Ed. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 510 p.
- Ingrole, A., Hao, A., Liang, R., 2017, "Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement", *Materials and Design*, Vol. 117, pp. 72-83.
- Lagoudas, D. C., 2008, "Shape memory alloys - modeling and engineering applications", Ed. Springer, Texas, Estados Unidos, 433p.
- Lantada, A. D., Romero, A. B., Schwentenwein, M., Jellinek, C., Homa, J., 2016, "Lithography-based ceramic manufacture (lcm) of auxetic structures: present capabilities and challenges", *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, pp. 1-10.
- Otsuka, K., Wayman, C. M., 1998, "Shape memory materials", Ed. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 284 p.
- Rao, A., Srinivasa, A. R., Reddy, J. N., 2015, "Design of shape memory alloy", Ed. Springer, Texas, Estados Unidos, 130 p.
- Saxena, K. K., Das, R., Calius, E. P., 2016, "Three decades of auxetics research - materials with negative Poisson's ratio: a review", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 18, pp. 1847 - 1870.
- Smith, C. W., Grima, J. N., Evans, K. E., 2000, "A novel mechanism for generating auxetic behaviour in reticulated foams: missing rib foam model", *Acta Materialia*, Vol. 48, pp. 4349 - 4356.
- Van Humbeeck, J., 1999, "Non-medical applications of shape memory alloys", *Materials Science and Engineering A*, v. 273-275, pp. 134-148.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

THERMAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF A 2D AUXETIC CELL OBTAINED BY TIG MICROWELDING

Pedro Luiz Lima dos Santos, pedroluizcsc@gmail.com¹
Paulo Cesar Sales da Silva, engenheiropcsales@gmail.com¹
Carlos José de Araújo, carlos.araujo@ufcg.edu¹

¹Federal University of Campina Grande, Rua Aprígio Veloso, 882 - Bairro Universitário, Campina Grande, PB.

Abstract. *The mechanical behavior of architected structures can be tailored by changing the morphology of their unit cells. Auxetic materials are a novel type of material that exhibits a counter-intuitive behavior; due to their negative Poisson's ratio (NPR), they expand laterally when stretched longitudinally and vice-versa. This study assesses the thermal and mechanical behavior of a 2D planar auxetic unit cell manufactured by means of TIG micro welding of Ni-Ti shape memory alloys (SMA) wires. Transformation temperatures of the wire and the cell were evaluated using differential scanning calorimeter (DSC) and electrical resistance as a function of temperature (RET) tests, respectively. Its mechanical behavior was studied through tensile tests and video extensometry. A thermal hysteresis of the order of 10° C between the cooling and heating peaks was found, which indicates the presence of the austenite to R-phase transformation upon cooling. Furthermore, there was a small deviation on temperatures found on DSC and RET, hence showing the minor role that micro welding plays on changing transformation temperatures of the alloy, since welded joint dimensions are negligible compared to the size of the cell. A maximum deformation of 52% prior failure was observed, besides modification Poisson's ratio of the cell, which increased from - 0,09 to 0,04 corroborating the fact that auxeticity also relies on the magnitude of deformation of the cell.*

Keywords: *Auxetic materials, Shape memory alloys (SMA), Micro welding, TIG.*