

FABRICAÇÃO E TESTES DE UMA MALHA FLEXÍVEL DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA Ni-Ti USANDO PULSOS DE SOLDAGEM MICRO TIG

Marcos de Araújo Silva Filho, marcos.araujosf@gmail.com¹

Aline Michelly do Nascimento, alinemichellyn@gmail.com¹

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

¹Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Av. Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, CEP: 58.429140. Campina Grande – PB, Brasil.

Resumo: O objetivo deste trabalho foi avaliar a soldagem de fitas de Ligas com Memória de Forma (LMF) Níquel-Titânio (Ni-Ti) pelo processo Micro TIG para a fabricação de malhas flexíveis que possam ser ativadas por variação de temperatura, na faixa de 30 a 100 °C. Inicialmente, fios Ni-Ti com diâmetro de 1,15 mm foram laminados a frio para obtenção de fitas finas e flexíveis (0,15 mm de espessura) a serem soldadas usando um processo micro TIG controlado. Após testes preliminares para determinar os melhores parâmetros de soldagem (potência e tempo de pulso) que levam a uma boa resistência mecânica da fita soldada, a malha de LMF Ni-Ti foi fabricada. As temperaturas de transformação da malha foram determinadas por medidas de variação de resistência elétrica com a temperatura (RET). Foram realizados experimentos para monitoramento da temperatura da malha utilizando uma câmera termográfica quando submetida a ativações térmica e elétrica. Foi observado que, comparando a fita de Ni-Ti soldada com a fita íntegra, o processo de soldagem modifica consideravelmente as temperaturas de transformação no ponto de solda. No entanto, os testes de ativação permitiram demonstrar que a malha de LMF Ni-Ti apresenta boa deformabilidade e suficiente resistência mecânica, com sua recuperação por efeito memória de forma ocorrendo na faixa de 30 °C a 60 °C, revelando assim um potencial para aplicações diversificadas.

Palavras-chave: Ligas com memória de forma; Ligas Ni-Ti; Malhas flexíveis; Soldagem; TIG.

1. INTRODUÇÃO

Ligas com Memória de Forma (LMF), internacionalmente conhecidas por *Shape Memory Alloys* (SMA), são materiais metálicos particulares, que se diferenciam das ligas metálicas convencionais por proporcionar uma recuperação de forma após sofrer uma deformação pseudoplástica. Essa deformação é realizada na fase martensítica, de baixa temperatura, e a recuperação ocorre por intermédio de um aquecimento para uma temperatura mais alta, em que aparece a sua fase austenítica. Este fenômeno, denominado Efeito de Memória de Forma (EMF), está intimamente associado a uma transformação de fase no estado sólido do tipo martensítica, cristalograficamente reversível (Otsuka & Wayman, 1998).

Outra característica importante das LMF é a superelasticidade (SE) ou pseudoelasticidade, que pode ocorrer quando o material é mantido em sua fase mais quente (austenítica) e é submetido a um carregamento mecânico suficientemente forte para induzir o aparecimento da fase martensítica por tensão mecânica. Essa propriedade faz com que o material sofra grandes deformações (entre 4 e 8%) reversíveis sem que ocorra o regime plástico.

Nas últimas décadas as análises para aplicações de LMF, principalmente aquelas do sistema Ni-Ti, se tornaram cada vez mais específicas, com tendências a estudos sobre micro e nano atuadores visando aplicações em dispositivos médicos e em microsistemas eletromecânicos (MEMS) (Chang-Jun *et al*, 2004; Fischer *et al*, 1999). Entretanto, a fabricação de macro ou microcomponentes de geometrias complexas a partir desses materiais usando processos convencionais de usinagem é bastante complexa. Desta forma, procura-se desenvolver processos efetivos de união com o objetivo de reduzir as barreiras existentes para a fabricação de estruturas com LMF. Dentre esses processos de união, está a soldagem de LMF e alguns estudos já foram realizados para fios de LMF Ni-Ti unidos por esta tecnologia. O processo de soldagem a laser tem se mostrado mais eficaz por apresentar uma alta precisão e uma zona termicamente afetada (ZTA) mais reduzida (Falvo *et al*, 2005). No entanto, em comparação com a soldagem a laser, o processo de soldagem do tipo TIG (*Tungsten Inert Gas*) é mais simples e barato. Apesar disso, existe uma carência de estudos de uniões de LMF Ni-Ti por este processo.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a soldagem de fitas de LMF Ni-Ti pelo processo Micro TIG para a fabricação de malhas flexíveis que possam ser ativadas por variação de temperatura, na faixa de 30 a 100 °C.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para este trabalho foram usados fios comerciais de uma LMF Ni-Ti com diâmetro de 1,15 mm. Desses fios foram cortados corpos de prova que foram tratados termicamente a 450 °C por 20 minutos para iniciar o processo de laminação a frio, visando a obtenção de fitas finas e flexíveis. Para isso, foi utilizado um laminador elétrico aplicando-se deformações da ordem de 10% por passe, com a finalidade de reduzir o encruamento da fita produzida. Após cada passe de laminação foi realizado um tratamento térmico a 450 °C por 20 minutos para aliviar as tensões impostas pelo processo. Foram realizados 22 passes de laminação e 23 tratamentos térmicos resultando em uma espessura final da fita obtida de 0,15 mm (redução total de 87%).

Para a soldagem das fitas, foi utilizado o processo de solda por pulsos controlados de TIG com a micro soldadora PUK U4 (Lampert, Alemanha). As soldagens são realizadas sem material de adição (solda autógena) usando um eletrodo não consumível de tungstênio com diâmetro de 0,5 mm. As regiões soldadas foram lixadas com uma lixa 1200 para retirar a oxidação proveniente dos tratamentos térmicos e melhorar o aspecto da solda. Durante as soldagens foi utilizado gás argônio comercial com uma vazão de 5 l/min como atmosfera de proteção da poça de fusão.

Para a fabricação da malha de LMF Ni-Ti foi construído um suporte em plástico ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) por meio de impressão 3D. Esse suporte, mostrado na Fig. 1, tem o formato e dimensões desejadas para a malha, de 50 x 50 mm e célula quadrada de 10 x 10 mm. A base do suporte foi feita de alumínio, por ser um material mais barato que o cobre, mas ainda assim com uma alta condutividade térmica.

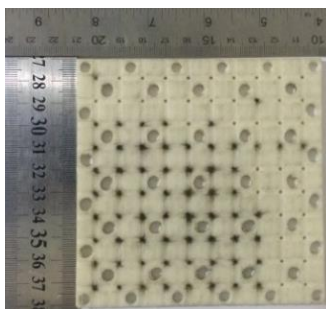


Figura 1. Suporte de soldagem impresso em ABS, com região interna no formato da malha projetada.

Com testes preliminares de micro soldagem TIG realizados variando a potência, o tempo, a quantidade e a forma como seriam realizados os pulsos nas fitas de LMF Ni-Ti, além da temperatura do tratamento térmico pós-soldagem, foram obtidos os parâmetros de fabricação com os quais se verificou a maior resistência mecânica da junta soldada. Estes parâmetros foram: pulso com 45% da potência da máquina, 5 ms de tempo de aplicação do pulso, um único ponto de solda em cada lado da fita (esses pontos de solda são coincidentes, ou seja, se encontram), e um pós tratamento térmico à temperatura de 600 °C por 20 minutos.

As fitas laminadas de LMF Ni-Ti íntegras e soldadas foram analisadas termicamente por calorimetria diferencial de varredura (DSC) utilizando um equipamento modelo Q20 da TA Instruments. A resistência mecânica das fitas foi avaliada usando uma máquina universal de ensaios de bancada, modelo BME 10kN, da marca Oswaldo Filizola, com uma velocidade de deslocamento de 0,5 mm/min.

A análise da transformação de fase na malha inteira foi realizada usando ensaios de resistência elétrica em função da temperatura (RET). Foi usado um sistema de medição específico baseado em um banho termoregulável da Huber, modelo CC902, que foi associado a um sistema de aquisição de dados Agilent 34970A, que permite acompanhar a variação da queda de tensão elétrica obtida com a passagem de uma corrente constante na malha de LMF submetida a variação de temperatura (-60 a 110°C). Com esse método é possível determinar as temperaturas de transformação da malha de LMF Ni-Ti inteira, aplicando o método do cruzamento das tangentes no gráfico gerado.

Visando observar o comportamento da malha de LMF Ni-Ti ao ser ativada, experimentos de ativação térmica e elétrica foram concebidos e realizados. Para a ativação térmica uma base metálica foi aquecida à 100 °C (valor superior a temperatura A_f da malha) e a malha deformada foi colocada sobre a mesma. A recuperação da malha por efeito memória de forma foi monitorada com uma câmera termográfica modelo FLIR E60, possibilitando analisar o comportamento da transferência de calor pela sua superfície. Um experimento semelhante, de ativação elétrica sobre a base metálica fria, foi realizado fazendo passar uma corrente elétrica localizada na malha deformada para aquecimento resistivo (efeito Joule). Os parâmetros utilizados na câmera termográfica foram: índice de emissividade (ϵ) = 0,95; distância do objeto = 1 m; temperatura do ambiente = 25°C; umidade relativa do ar = 50%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Malha Soldada de LMF Ni-Ti

Após os testes preliminares, foi possível fabricar uma malha de LMF Ni-Ti a partir de fitas laminadas, com efeito memória de forma, soldada, flexível e com uma boa resistência mecânica. Este produto pode ser visualizado na Figura 2, com destaque para o ponto de solda TIG. É possível verificar três aspectos distintos na região onde foi aplicado o pulso de TIG: (1) região da poça de fusão, (2) zona termicamente afetada (ZTA) e (3) metal de base (região que não foi afetada pelo aporte de calor). A região mais escura, onde se encontra a ZTA (2), ficou com a aparência mostrada na Fig. 2 devido ao aquecimento local da região do furo no molde de ABS acima da sua temperatura de fusão, originando uma deposição de material nessa área, de forma superficial, levando a um aspecto de “queimado”.

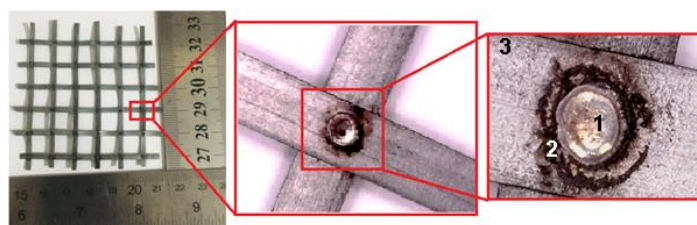


Figura 2. Malha soldada de LMF Ni-Ti com detalhes do ponto de solda TIG.

3.2. Análises Térmicas

A partir de ensaios de calorimetria DSC, foi possível observar, qualitativamente, o efeito da microsoldagem TIG sobre a transformação de fase da fita laminada de LMF Ni-Ti, conforme indicado na Fig. 3. Para a fita íntegra constata-se inicialmente três picos DSC, sendo 2 no resfriamento. No ponto de solda estes picos estão sobrepostos formando um único pico. Na fita soldada os picos representam: (1) no aquecimento (transformação endotérmica), a transformação inversa, da martensita para a austenita ($B19' - B2$); (2) no resfriamento (transformação exotérmica), a transformação direta, da austenita para fase R ($B2 - R$) e praticamente no mesmo instante ocorre a transformação da fase R para martensita $B19'$. Já para a fita íntegra os picos representam: (1) no aquecimento (transformação endotérmica), a transformação da martensita em austenita ($B19' - B2$); (2) no resfriamento (transformação exotérmica), o primeiro pico, da direita para a esquerda, a transformação da austenita para fase R ($B2 - R$) e o segundo pico do resfriamento a transformação martensítica ($R - B19'$) (Otsuka & Wayman, 1998).

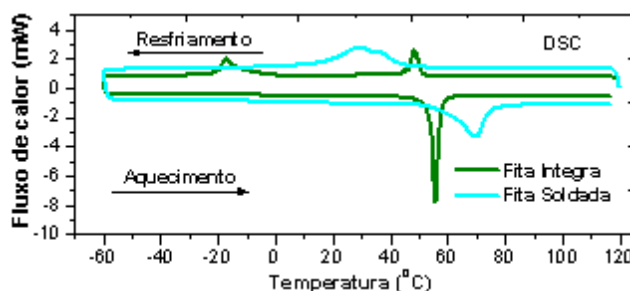


Figura 3. Análise térmica DSC das fitas de LMF Ni-Ti.

A significativa modificação no comportamento da transformação ocorre devido ao fato de que a solda redefine os efeitos do trabalho a frio e dos tratamentos térmicos realizado sobre o material (Falvo *et al*, 2005).

Na Figura 4 observa-se a curva de RET para uma medição realizada na malha inteira (Fig. 2). A partir do método das tangentes (Otsuka & Wayman, 1998) aplicado as curvas das Figuras 3 e 4, foi possível determinar as temperaturas de transformação tanto das fitas como da malha inteira. Estas temperaturas estão resumidas na Tab. 1.

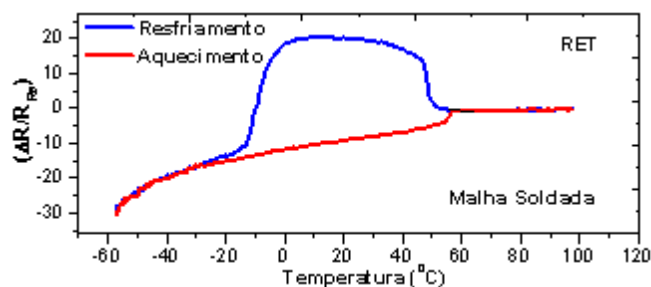


Figura 4. Análise térmica RET da malha de LMF Ni-Ti.

Tabela 1. Temperaturas de transformação de fase das fitas e malha Ni-Ti.

Temperatura (°C)	M_s	M_f	A_s	A_f	R_s	R_f
Fita Inteira (DSC)	-10,5	-20,5	53	57,8	51,8	46,0
Fita Soldada (DSC)	---	15,3	60,2	75,2	45,1	---
Malha (RET)	-3,7	-13,1	54,1	56,7	49,7	45,8

Comparando a fita de Ni-Ti soldada com a fita íntegra, pode-se perceber que o processo de soldagem modifica consideravelmente as temperaturas de transformação no ponto de solda. Na Figura 4, observa-se que a malha inteira apresenta temperaturas mais próximas da fita íntegra, tendo em vista que as regiões com pontos de solda na malha são muito pequenas e não interferem nas temperaturas de transformação da estrutura inteira (malha). Verifica-se que a fase ativa à temperatura ambiente é a fase R, que ao ser deformada pode dar origem ao efeito memória de forma quando a malha for aquecida a temperaturas superiores a 60 °C.

3.3. Ensaio de Tração das Fitas Ni-Ti

Para avaliar a resistência mecânica da junta soldada de fita Ni-Ti, foi realizado um ensaio de tração uniaxial à temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C) até a ruptura. Esse ensaio foi feito também para a fita íntegra, tomando-a como referência para fins comparativos. A partir das curvas tensão – deformação da Fig. 5 é possível fazer uma análise comparativa entre as fitas. Os resultados de tensão máxima e deformação máxima (ruptura) são resumidos na Tab. 2.

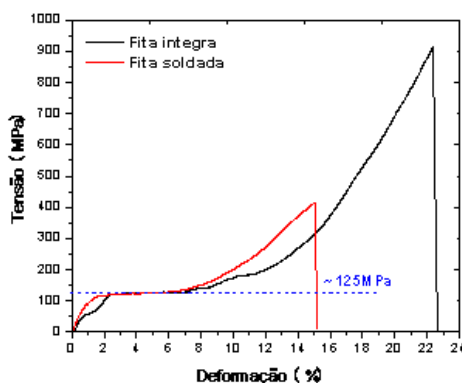


Figura 5. Comportamento tensão-deformação das fitas de LMF Ni-Ti íntegra e soldada.

Tabela 2. Valores máximos de tensão e deformação das fitas Ni-Ti íntegra e soldada.

	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
Fita Inteira	914,6	22,4
Fita Soldada	412,9	15,1

É possível verificar que houve uma redução da tensão máxima da fita soldada em relação à íntegra, da ordem de 55% e uma redução da deformação máxima de aproximadamente 33%. Apesar das reduções verificadas, pode-se perceber um comportamento dúctil para ambas as fitas, íntegra e soldada, confirmado pela elevada deformação até a sua ruptura. As curvas revelam também que a soldagem não afeta o patamar de deformação correspondente a tensão de orientação da estrutura martensítica (da ordem de 125 MPa). No caso da fita íntegra, aparece um primeiro patamar de tensão a aproximadamente 70 MPa que corresponde a orientação da fase R, em acordo com os resultados de DSC da Fig. 3.

3.4. Termografia

3.4.1. Acionamento Térmico

Neste experimento, cujo resultado é mostrado na sequência de imagens da Fig. 6, observa-se que a transferência de calor por condução entre a parte inferior e superior da malha ocorreu de forma rápida. Devido a espessura delgada da fita (0,15mm), a temperatura na superfície superior (sem contato com a placa aquecida) foi praticamente a mesma da superfície em contato com a placa quente.

Apesar do Ni-Ti ter uma relativamente baixa condutividade térmica, se comparado a outros metais condutores como o alumínio e o cobre, essa condutividade é responsável por distribuir o calor pela malha, fazendo aumentar a sua temperatura para valores superiores a A_f e ativando o efeito memória de forma.

Observou-se que algumas regiões da malha chegaram a atingir 80 °C durante a recuperação da forma, especialmente nos pontos de solda, que apresentam uma maior resistência térmica de contato.

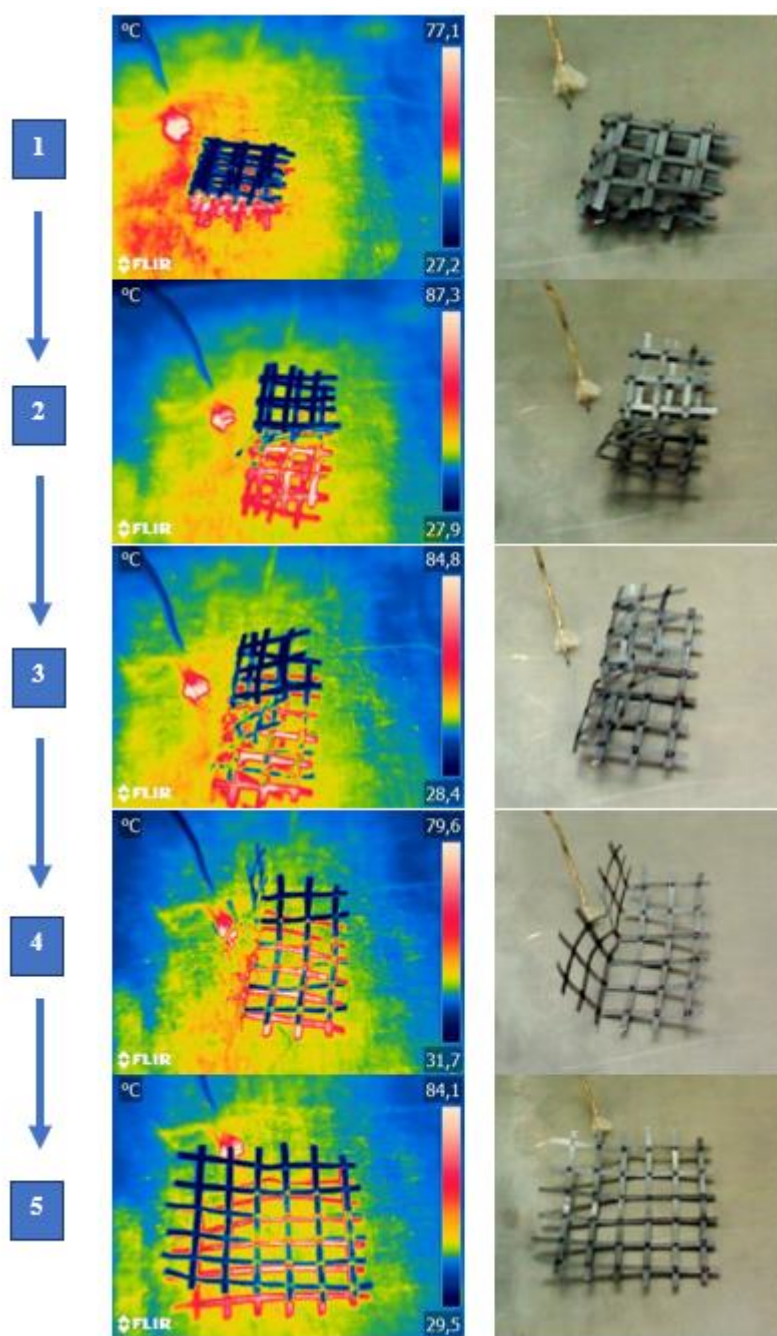


Figura 6. Sequência da recuperação de forma por aquecimento em placa quente (100 °C) da malha de LMF Ni-Ti previamente deformada.

3.4.2. Acionamento Elétrico

Para o teste de ativação por aquecimento resistivo da malha de LMF Ni-Ti, eletrodos foram instalados próximos as regiões onde a deformação é realizada, como pode ser visto na Fig. 7. Foi aplicada uma corrente constante de 15A, a uma baixa tensão (aproximadamente 1 V) e observou-se que houve a recuperação e abertura por completo da malha previamente deformada. Analisando a sequência de imagens termográficas da Fig. 7, pode-se observar a distribuição da corrente elétrica e como consequência o aquecimento da malha por efeito Joule nas regiões dos eletrodos de ativação, que chegam a ultrapassar 60 °C.

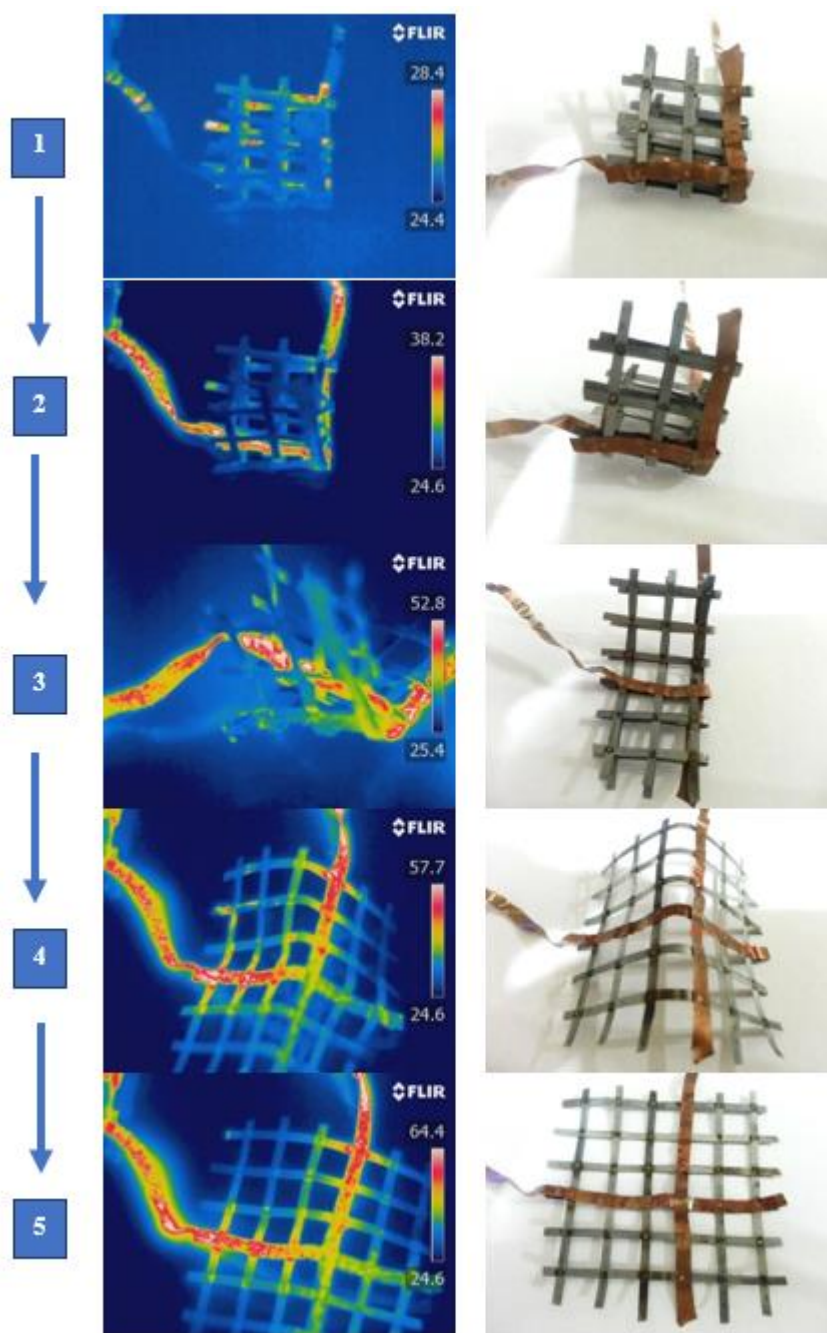


Figura 7. Sequência da recuperação de forma por aquecimento resistivo (efeito Joule) da malha de LMF Ni-Ti previamente deformada.

Semelhantemente as imagens termográficas da Fig. 6, os locais que apresentaram maior temperatura na malha foram as regiões dos pontos de solda devido à maior resistência de contato. Após a aplicação da corrente, a distribuição do aquecimento pela superfície da malha aumentou fazendo com que a recuperação ocorresse de forma rápida, em aproximadamente 40 segundos.

4. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos neste estudo experimental, em que se fabricou uma malha flexível de LMF Ni-Ti microsoldada pelo processo TIG, conclui-se que:

- É possível obter juntas soldadas de LMF Ni-Ti com uma boa resistência mecânica pelo processo micro TIG apesar das suas limitações se comparado à soldagem a laser (processo mais estudado para a união soldada de LMF);
- É possível fabricar uma malha de LMF pelo processo micro TIG, com comportamento flexível e com boa resistência mecânica;
- Deve-se levar em conta quatro observações para se realizar uma boa solda micro TIG em fitas finas de LMF Ni-Ti:
 - (1) Área de contato entre as fitas, pois quanto maior for essa área, melhor será a distribuição de calor sobre o material, fazendo assim que se diminua a ZTA;
 - (2) A pressão sobre as fitas, pois as fitas são colocadas uma por sobre a outra, e se não houver uma pressão forte o suficiente para uni-las, ocorrerá que a transferência de calor será ineficiente devido à resistência de contato entre elas e causará o rompimento do material;
 - (3) Limpeza da área de soldagem para retirar a oxidação proveniente do tratamento térmico e;
 - (4) A forma como deve ser aplicado o pulso TIG na fita, pois como a fita apresenta uma pequena largura e uma espessura ainda menor, o pulso deve ser o mais centralizado possível. Se o mesmo for deslocado para as laterais, formará uma grande ZTA, fazendo com que a resistência mecânica da solda diminua significativamente, podendo ocorrer a fratura da fita pela própria solda;
- A recuperação por efeito memória de forma da malha deformada ocorreu de forma rápida (aproximadamente 30 segundos) devido à pequena espessura do produto;
- No aquecimento por efeito Joule localizado, a transformação microestrutural teve grande importância na distribuição de calor pela malha, fazendo com que a recuperação por efeito memória de forma da mesma ocorresse em um curto intervalo de tempo, de aproximadamente 40 segundos;
- Os locais que apresentaram as maiores temperaturas na malha foram as regiões onde realizaram-se as soldas, devido à maior resistência de contato entre as fitas;

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de ITI ao primeiro autor e 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

- Chang-Jun, Q., Pei-Sun, M., Qin, Y., 2004, "A prototype micro-wheeled-robot using SMA actuator", *Sensors and Actuators A: Physical*, 133: 94- 99.
- Falvo, A., Furgiuele, F.M., Maletta, C., 2005, "Laser welding of a Ni-Ti alloy: Mechanical and shape memory behavior", *Materials Science and Engineering: A*, 412: 235-240.
- Fischer, H., Vogel, B., Pflöging, W., Besser, H., 1999, "Flexible distal tip made of NiTiNol (Ni-Ti) for a steerable endoscopic camera system", *Materials Science and Engineering: A*, 273 275: 780-783, 1999.
- Otsuka, K., Wayman, C.M., 1998, "Shape Memory Materials", Cambridge University Press.

7. RESPONSABILIDADE AUTORMAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

FABRICATION AND TESTING OF A FLEXIBLE MESH OF SHAPE MEMORY ALLOY Ni-Ti USING MICRO TIG WELDING PULSES

Marcos de Araújo Silva Filho, marcos.araujosf@gmail.com¹
Aline Michelly do Nascimento, alinemichellyn@gmail.com¹
Carlos José de Araújo, carlos.araujo@ufcg.edu.br¹

¹Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Av. Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, CEP: 58.429140. Campina Grande – PB, Brazil.

Abstract. *The purpose of this paper was to evaluate the welding of Shape Memory Alloys (SMA) Nickel-Titanium (Ni-Ti) by the Micro TIG process for the fabrication of flexible meshes that can be activated by temperature variation, in the range of 30 at 100 ° C. Initially, Ni-Ti wires with a diameter of 1.15 mm were cold rolled to obtain thin and flexible ribbons (0.15 mm thick) to be welded using a controlled micro TIG process. After preliminary tests to determine the best welding parameters (power and pulse time) that lead to a good mechanical resistance of the welded ribbon, the SMA Ni-Ti mesh was manufactured. The mesh transformation temperatures were obtained by measures of variation of electrical resistance with temperature (RET). Experiments were performed to monitor the temperature of the mesh when subjected to thermal and electrical activations using a thermographic camera. It was observed that, by comparing the welded Ni-Ti ribbon with the integral ribbon, the welding process considerably modifies the transformation temperatures at the welded point. However, the activation tests allowed to demonstrate that the LMF Ni-Ti mesh presents good deformability and sufficient mechanical resistance, with its shape memory effect occurring in the range of 30 °C to 60 °C, thus revealing a potential for diverse applications.*

Keywords: *Shape Memory Alloys; Ni-Ti Alloys; Flexible Meshes; Welding; TIG.*