

COMPORTAMENTO TERMOMECAÂNICO DE FIOS NiTiNOL MICROSOLDADOS POR DESCARGA CAPACITIVA: UM ESTUDO EXPERIMENTAL

José Geraldo Vicente da Silva, jgeraldoufcg@gmail.com¹
Carlos José de Araujo, carlos@dem.ufcg.edu.br¹
Esthaphanie Nobre Dantas Grassi, end.grassi@hotmail.com¹

¹Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Rua Aprígio Veloso, 882 – UAEM – Bairro Universitário – CEP 58429-140 – Campina Grande - PB,

Resumo: *A operação de soldagem de fios de ligas com memória de forma (LMF) pode permitir a fabricação de atuadores de formatos complexos, que seriam difíceis de obter por técnicas de usinagem convencionais. Neste trabalho fios atuadores de NiTi com propriedade de memória de forma, de diâmetros de 0,290 e 0,450 mm, foram soldados por descarga capacitiva usando uma microsoldadora digital SMP 3000 GOLD (Kernit). O comportamento termomecânico e as propriedades de módulo de armazenamento e amortecimento dos fios atuadores soldados foram avaliadas sob carregamento dinâmico com uma frequência de oscilação de 1,0 Hz e variação de temperatura, usando como referência ensaios realizados com fios contínuos, isentos de solda. Para esta caracterização foram utilizados os equipamentos de análise dinâmico-mecânica (DMA) Q800 da TA Instruments e uma máquina universal de ensaios eletromecânicos INSTRON 5582. Os resultados obtidos demonstraram a boa resistência mecânica dos fios soldados e o potencial da técnica de microsoldagem por descarga capacitiva para a obtenção de atuadores de LMF de diferentes formatos.*

Palavras-chave: *Soldagem; NiTiNOL; Caracterização Termomecânica; Análise Dinâmico-Mecânica.*

1. INTRODUÇÃO

Ligas com memória de forma (LMF) são materiais metálicos que podem sofrer transformações de fase no estado sólido como resultado da aplicação de um carregamento termomecânico. Estes materiais metálicos especiais, internacionalmente conhecidos como *Shape Memory Alloys (SMA)*, depois de submetidos a uma deformação plástica, em uma temperatura relativamente baixa, são capazes de recuperar sua forma original por meio da imposição de um campo de temperatura mais alta. Este fenômeno, designado por Efeito de Memória de Forma (EMF), está intimamente associado a uma transformação de fase do tipo martensítica, cristalograficamente reversível (Otsuka & Wayman, 1998). Em baixas temperaturas tem-se a fase martensita, na qual se introduz a deformação, enquanto que, aquecendo-se o material, a fase austenita aparece gradualmente, resultando na recuperação da forma anterior a deformação imposta. Esta resposta em deslocamento quando do seu simples aquecimento, acima de uma temperatura perfeitamente programável, torna essas ligas metálicas bastante interessantes para o desenvolvimento de aplicações em diversas áreas industriais (Silva, 2009).

Algumas ligas que apresentam o fenômeno de EMF estão disponíveis comercialmente, a exemplo das ligas do sistema NiTi. As pesquisas em LMF são dirigidas com o intuito de adequar suas propriedades termomecânicas às aplicações propostas. LMF de NiTi com memória de forma são atualmente utilizadas em uma ampla variedade de aplicações técnicas. Dentre algumas de suas limitações está a dificuldade no processo de obtenção e difícil execução de formas complexas por técnicas de usinagem convencionais, exigindo ferramentas e procedimentos especiais. Portanto, existe ainda a necessidade do desenvolvimento de tecnologias que otimizem a utilização de LMF NiTi. Uma dessas tecnologias é o processo de união das ligas NiTi entre si ou com outros materiais, de tal forma que o conjunto apresente novas propriedades e condições adequadas à determinadas aplicações.

Nesse contexto, o estudo de técnicas de união por soldagem de ligas de NiTi têm despertado grande interesse nas últimas décadas, sendo tratado em alguns trabalhos (Gugel et al. 2008; Falvo et al. 2008; Casper et al. 2008; Sevilla et al. 2008; Casper et al. 2003; Ming, 2001 e Beyer, 1989), usando soldagem a laser, a plasma, TIG (Tungsten Inert Gas), por resistência, entre outras, preservando boa parte das características do material.

A técnica de soldagem por resistência das LMF NiTi tem se mostrado bastante promissora, sendo realizada de forma satisfatória, como foi reconhecido e evidenciado pelo instituto de soldagem norte-americano EWI Joining Innovation (EWI, 2010), revelando-se com forte potencial aplicativo.

Este trabalho será focado no processo de microsoldagem por descarga capacitiva de fios de uma LMF NiTi (NiTiNOL). Trata-se de um método de solda a ponto, ou seja, por resistência, ou ainda, por fusão de parte de dois materiais, em um tempo muito curto e através de uma corrente elétrica de alta intensidade. A vantagem deste processo, além do baixo custo, é de não produzir óxidos indesejáveis no local da solda, não destemperar o material, mantendo as suas características mecânicas (KERNIT, 2008).

Portanto, os objetivos deste trabalho são de realizar a caracterização termomecânica, por meio de ensaios de tração uniaxial e ensaios de resistência elétrica em função da temperatura (RET), além da caracterização dinâmico-mecânica (DMA), de fios NiTiNOL de diferentes diâmetros, microsoldados por descarga capacitiva, usando como referência fios contínuos, isentos de solda.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Material

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram empregados fios de NiTiNOL com diâmetros de 0.290 e 0.450 mm, adquiridos junto a empresa Memory-Metalle GmbH (Alemanha). São fios da liga M com temperatura de transformação A_f de aproximadamente 65°C (338 K). Os fios brutos de fabricação foram submetidos a um tratamento térmico a 700°C (973 K) por 20 min num forno de resistência elétrica da marca EDG, modelo Titan Platinum Quartz. Esse tratamento visa eliminar as tensões residuais oriundas do processo de fabricação e liberar a transformação martensítica que origina os fenômenos de memória de forma.

2.2. Processo de União: Microsoldagem por Descarga Capacitiva

Os fios de NiTi foram soldados por descarga capacitiva (soldagem por resistência) usando uma microsoldadora digital da marca KERNIT, modelo SMP 3000 GOLD, apresentada na Fig. (1). Para isso foi utilizada a combinação de eletrodos para soldagem de fio + fio paralelo (KERNIT, 2008).



Figura 1. Microsoldadora digital SMP 3000 GOLD, KERNIT.

Para assegurar a perfeita fusão dos materiais durante a soldagem, os fios foram submetidos a um processo de decapagem utilizando-se uma lixa de 1200 mesh e solução decapante para ligas NiTi de composição 3% HF+15% HNO₃+82% H₂O (% em vol.) para a remoção da camada de óxidos existente na sua superfície.

Este procedimento permitiu a obtenção de amostras para a realização dos ensaios de resistência elétrica em função da temperatura (RET), de tração uniaxial, além da caracterização dinâmico-mecânica (DMA).

2.3. Ensaio de Resistência Elétrica em função da Temperatura (RET)

A caracterização térmica dos fios NiTi foi realizada através de um sistema de medição da resistência elétrica em função da temperatura, denominado SMRT, desenvolvido no próprio LaMMEA (Reis et al. 2008). Esse sistema permite aquecer e resfriar, de forma controlada, uma amostra de LMF, e captar as variações da resistência elétrica do material à medida que a temperatura varia. Essa caracterização permite determinar as temperaturas de transformação desses atuadores lineares.

Para a realização dos ensaios de RET, amostras de fios NiTi foram cortadas com aproximadamente 60 mm de comprimento e soldadas a conectores elétricos de cobre para serem montadas no SMRT. Estes conectores têm por objetivo realizar a passagem de uma corrente elétrica na amostra e medir a queda de tensão elétrica durante a variação de temperatura. Em seguida, os mesmos ensaios foram realizados com amostras soldadas, para que fosse possível observar a influencia da solda sobre as temperaturas de transformação do material.

2.4. Caracterização Mecânica dos Fios: Ensaios de Tração Uniaxial

A caracterização da resistência mecânica dos fios NiTi de 0,290 e 0,450 mm soldados e isentos de solda, foi realizada através do ensaio tração uniaxial, à temperatura ambiente, utilizando-se uma máquina universal de ensaios eletromecânica, marca INSTRON, modelo 5582. Na máquina de ensaios foi gerado um método para controle de deslocamento durante o carregamento, limitando em 9% a deformação relativamente ao comprimento útil da amostra, usando uma velocidade de 1,0 mm/min. Em seguida foi realizado o descarregamento controlado a 1,0 mm/min até zerar a deformação sobre a amostra. Os detalhes da montagem do fio nas garras da máquina de ensaios são apresentados na Fig. (2).

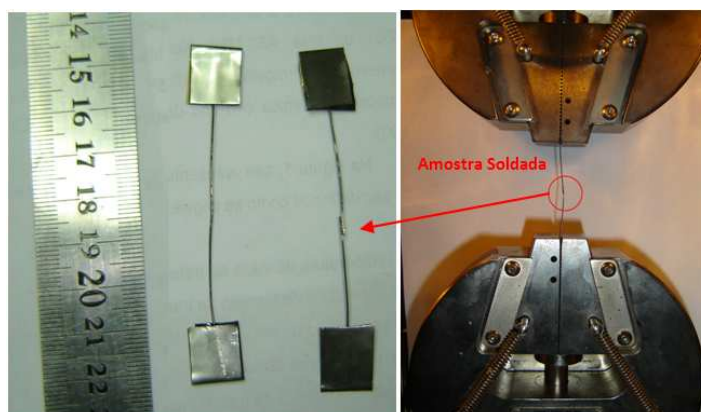


Figura 2. Fotos da amostra e de sua montagem nas garras da máquina de ensaios.

2.5. Caracterização termo-dinamico-mecânica: DMA

As propriedades dinâmicas de LMF são de grande interesse tecnológico, principalmente aquelas das ligas de base NiTi, que apresentam forte dependência da temperatura e frequência de aplicação de carregamento mecânico (Silva, 2009).

A análise dinâmico-mecânica dos fios soldados e isentos de solda foi realizada em um equipamento de DMA (Dynamic Mechanical Analysis) da marca TA INSTRUMENTS, apresentado na Fig. (3). O experimento em DMA consistiu na aplicação de uma força oscilatória em uma amostra em modo de tração uniaxial e o estudo da resposta do material a esta carga aplicada. Para se conhecer as características termo-dinâmico-mecânicas de uma amostra, faz-se uma varredura em determinada faixa de temperatura na qual se espera encontrar um evento térmico associado com a transformação de fase da amostra de NiTi.

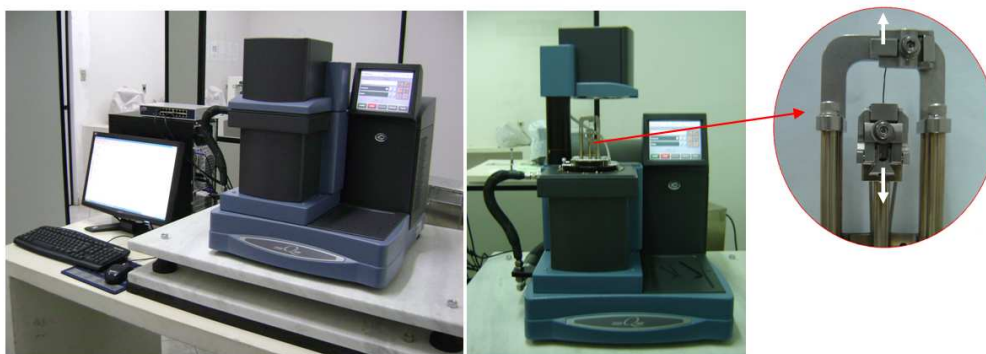


Figura 3. Fotos do DMA e montagem da amostra nas garras do equipamento.

Os ensaios foram realizados no modo de tração uniaxial, com amostras de 30 mm de comprimento e diâmetros diferentes, 0,290 e 0,450 mm. Antes de cada ensaio as amostras foram submetidas a um resfriamento, de aproximadamente -40°C (-313 K) com um spray congelante (Implastec), com a finalidade de garantir que o ensaio se iniciasse com a amostra no estado martensítico.

Segundo recomendações da literatura e visando o mínimo de dependência dos resultados obtidos em função das condições de medição, os parâmetros utilizados para a realização dos ensaios dinâmicos foram: frequência de 1,0 Hz, taxa de aquecimento de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (4.6 K/s) e amplitude de oscilação de $3\ \mu\text{m}$ (Van Humbeeck, J., 2003; Chang & Wu, 2008, Silva, 2009). Portanto, os ensaios realizados contaram com uma rampa de aquecimento partindo da temperatura ambiente, com frequência e amplitude fixada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Processo de União: Microsoldagem por Descarga Capacitiva

A soldagem dos fios NiTiNOL de diâmetros de 0,290 e 0,450 mm foi realizada com sucesso utilizando a técnica de microsoldagem por descarga capacitiva. Na Figura (4), pode ser constatada a união entre os fios NiTi de 0,450 mm, verificando a fusão entre as partes envolvidas no processo.

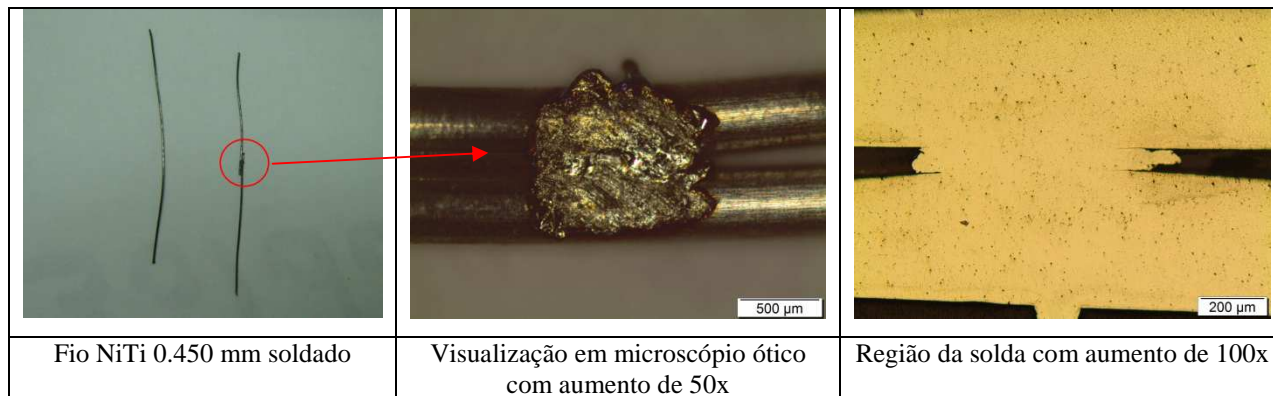


Figura 4. Fio NiTi de 0,450 mm soldado.

3.2. Ensaio de Resistência Elétrica em função da Temperatura (RET)

As Figuras (5) e (6) mostram as curvas de RET obtidas com os fios 0,290 e 0,450 mm, respectivamente, isentos de solda (Fig. 5a e Fig. 6a) e soldados (Fig. 5b e Fig. 6b). As temperaturas de transformação foram obtidas através do método das tangentes. Em ambos os casos verifica-se a presença da transformação da austenita em fase R e depois em martensita, responsável por um pico de resistência elétrica durante o resfriamento (Otsuka & Wayman, 1998).

Uma comparação entre as curvas do fio isento de solda com o fio soldado permite verificar que o processo de soldagem altera qualitativamente a curva de RET, e leva a uma redução de todas as temperaturas de transformação, tanto direta (M_s e M_f) quanto reversa (A_s e A_f) do fio de 0,290 mm, conforme revela a Fig. (5). Por outro lado, para o fio de 0,450 mm, observa-se na Fig. (6) uma diminuição das temperaturas de transformação direta (M_s e M_f) e um aumento daquelas correspondentes a transformação reversa (A_s e A_f). Esse aumento das temperaturas A_s e A_f no fio de 0,450 mm, pode estar associado à introdução de defeitos devido ao processo de soldagem, sendo necessário mais energia para finalizar a transformação de fase durante o aquecimento. Como se trata de uma técnica de soldagem a ponto, a região fundida do fio de maior diâmetro será menor, tornando a fusão das partes envolvidas menos homogênea e susceptível a defeitos de fusão na região.

Na Figura (7), verifica-se a influência da soldagem nas curvas de variação da resistência elétrica em função da temperatura para os fios de 0,290 (Fig. 7a) e 0,450 mm (Fig. 7b), tomando como referência os fios isentos de solda. Nota-se que, com a soldagem, o pico da curva de resfriamento (fase R) torna-se mais evidenciado.

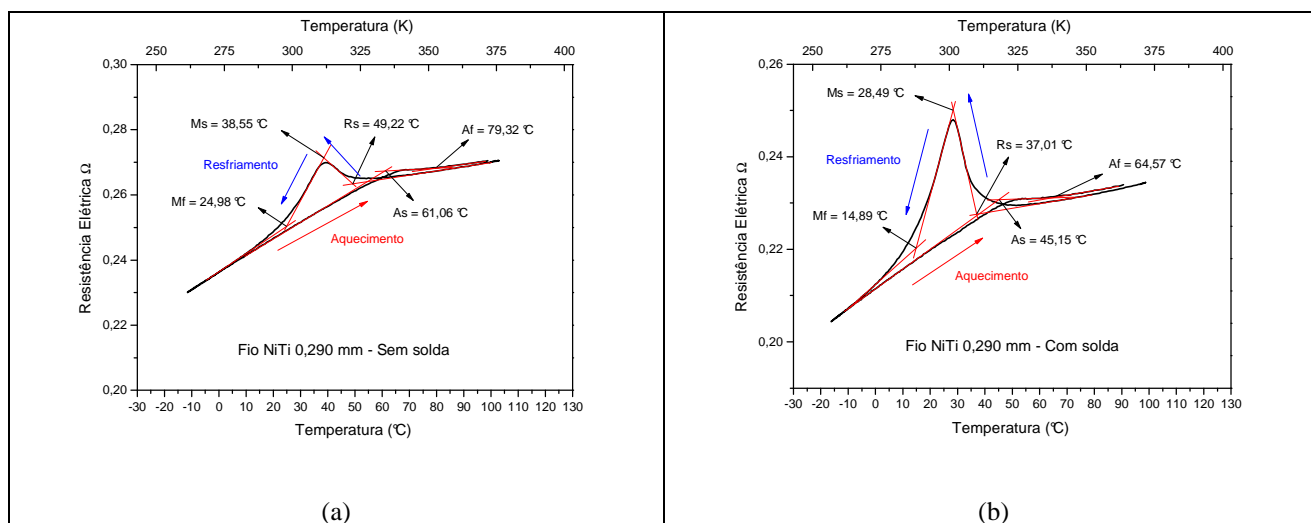


Figura 5. Curvas de RET com as temperaturas de transformação determinadas pelo método das tangentes.
(a) Fio de 0,290 mm sem solda. (b) Fio de 0,290 mm com solda.

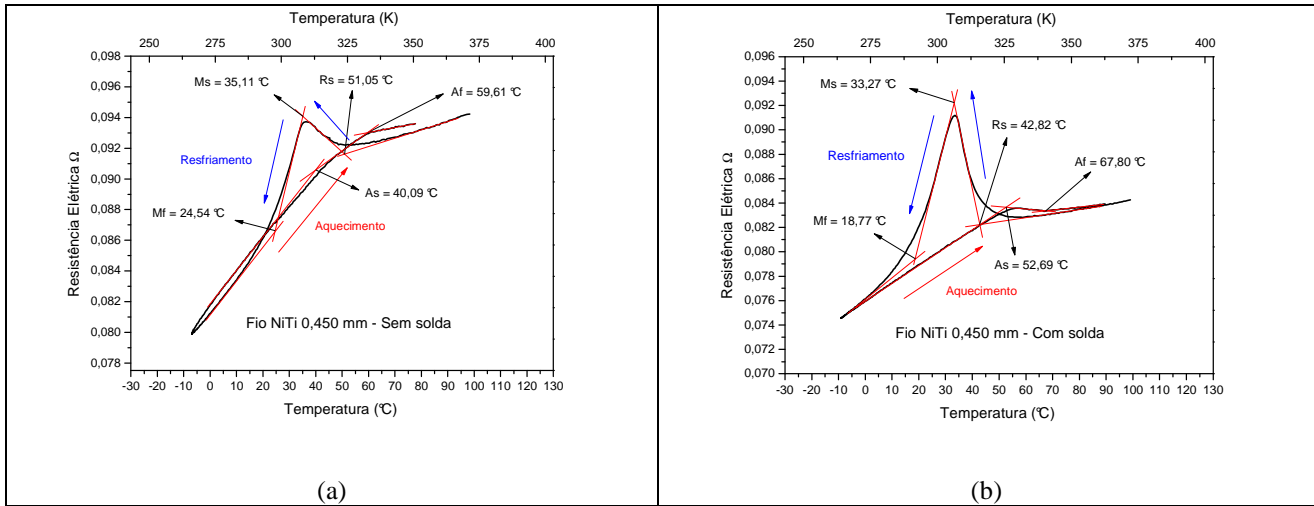


Figura 6. Curvas de RET com as temperaturas de transformação determinadas pelo método das tangentes. (a) Fio de 0,450 mm sem solda. (b) Fio de 0,450 mm com solda.

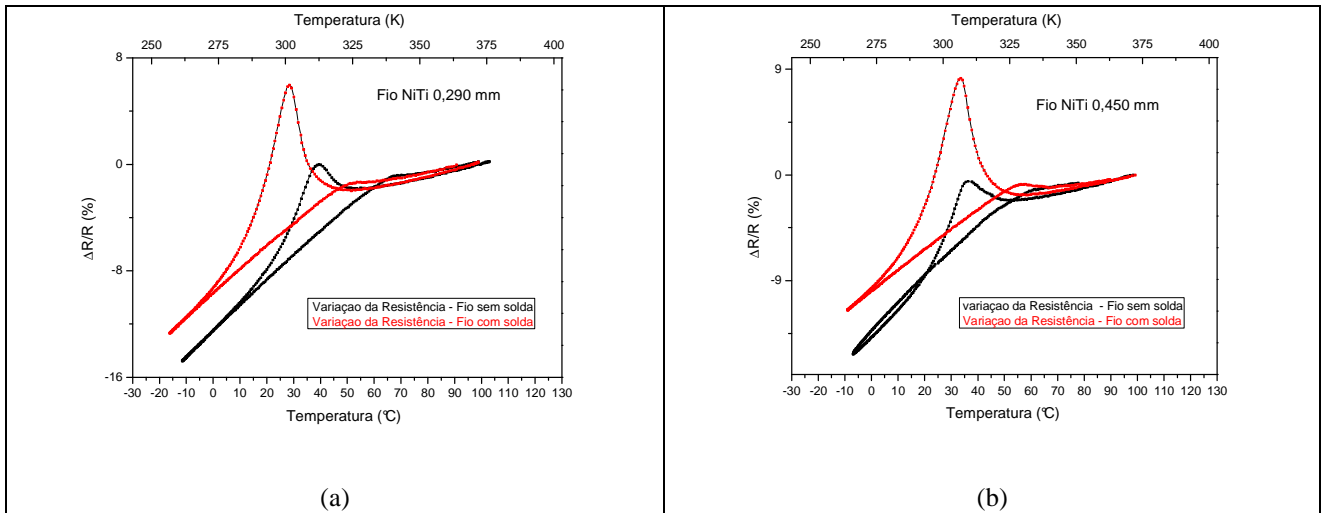


Figura 7. Evolução da curva de variação da Resistência Elétrica em função da Temperatura para os fios com e sem solda. (a) Fio de 0,290 mm. (b) Fio de 0,450 mm.

Na Figura (8), apresentam-se as curvas da variação da resistência elétrica em função da temperatura para os fios soldados. Constata-se a amplificação do pico de transformação de fase com o efeito da soldagem em fios de diferentes diâmetros, tornando-se mais evidenciada para o fio de maior diâmetro.

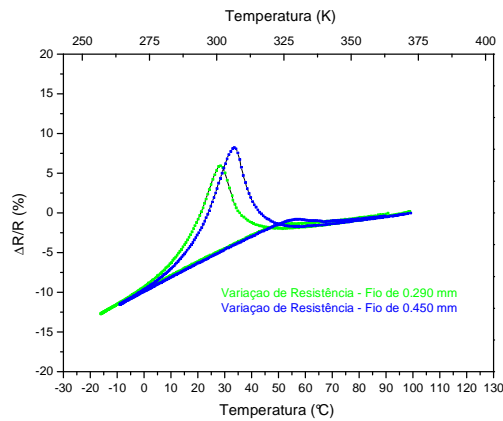


Figura 8. Curvas da variação da Resistência Elétrica em função da Temperatura para os fios soldados de 0,290 e 0,450 mm.

Como pode ser observada, a transformação de fase nesses fios ocorre em duas etapas, em conformidade com a literatura (Otsuka & Wayman, 1998). Durante o resfriamento inicia-se a transformação da austenita na fase R a temperatura R_s , responsável pelo aparecimento de um pico de resistência elétrica, e posteriormente a fase R, com estrutura romboédrica, se transforma na estrutura martensítica monoclinica. Durante o aquecimento ocorre a transformação reversa martensita – austenita que causa apenas uma inflexão na curva de aquecimento. Portanto, as temperaturas de transformação direta e reversa podem ser obtidas destas curvas. As Tabelas (1) e (2) resumem as temperaturas de transformação obtidas para os fios isentos de solda e com solda.

Tabela 1. Temperaturas de transformação dos fios isentos de solda.

Fio (mm)	Temperaturas de Transformação (°C)				
	R_s	M_s	M_f	A_s	A_f
0,290	49,2	38,5	25,0	61,1	79,3
0,450	51,0	35,1	24,5	40,1	59,6

Tabela 2. Temperaturas de transformação dos fios com solda.

Fio (mm)	Temperaturas de Transformação (°C)				
	R_s	M_s	M_f	A_s	A_f
0,290	37,0	28,5	14,9	45,1	64,6
0,450	42,8	33,3	18,8	52,7	67,8

3.3. Ensaio de Tração Uniaxial

As Figuras (9) e (10) mostram as curvas de tensão-deformação obtidas com os fios de 0,290 mm e 0,450 mm, respectivamente, soldados e isentos de solda. Verifica-se a influência da soldagem sobre o comportamento tensão – deformação, na temperatura ambiente, tomando como referencia o fio isento de solda. Foi verificada a ruptura dos fios com solda e a conseqüente redução da região de tensão quase constante (região onde ocorre o processo de reorientação da martensita), o que implica em redução do efeito de memória de forma devido à solda (Pértile, 2005).

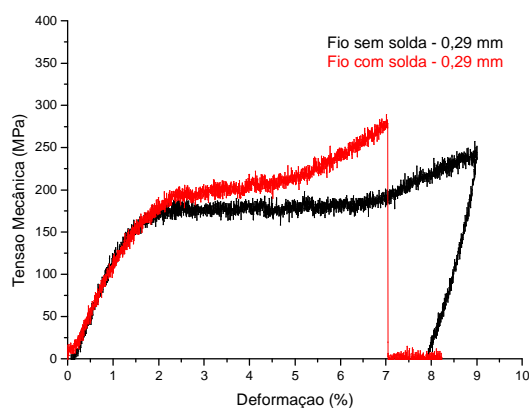


Figura 9. Curvas de Tensão em função da Deformação dos fios de 0,290 mm, soldado e sem solda.

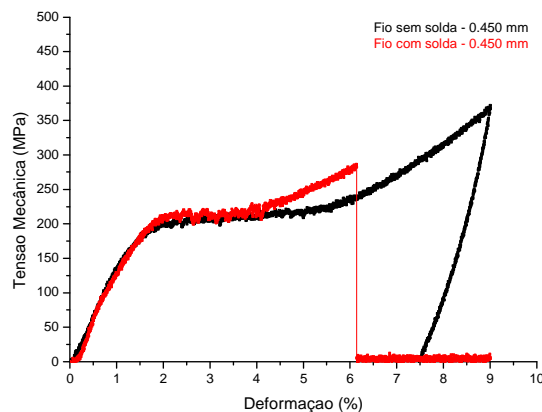


Figura 10. Curvas de Tensão em função da Deformação dos fios de 0,450 mm, soldado e sem solda.

A Figura (11) mostra as curvas de tensão-deformação dos fios soldados, onde se verifica maior resistência mecânica para o fio de 0,290 mm, pois como se trata de uma solda a ponto, a região fundida do fio de menor diâmetro será maior e mais uniforme, conferindo a junta maior resistência mecânica. A ruptura do fio de 0,290 mm se deu com aproximadamente 7,8% de deformação, apresentando maior alongamento final que o fio de 0,450 mm com aproximadamente, 6,1%.

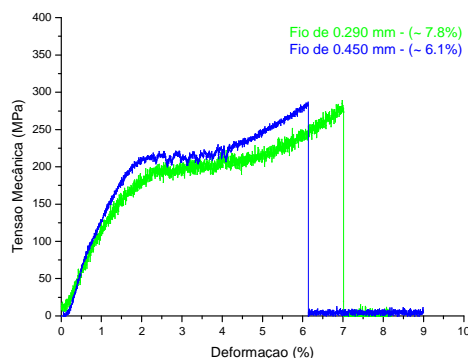


Figura 11. Comparação das Curvas de Tensão em função da Deformação dos fios de 0,290 e 0,450 mm soldados.

3.4. Ensaio dinâmico-mecânicos: DMA

As Figuras (12) e (13) mostram, em valores absolutos, os resultados obtidos dos ensaios dinâmicos em tração uniaxial, onde utilizou-se uma frequência de excitação constante de 1,0 Hz, amplitude de deflexão de 3 μ m e taxa de aquecimento de 5 $^{\circ}$ C/min (4.6 K/s), para os fios NiTi de 0,290 e 0,450 mm, soldados e isentos de solda. Neste ensaio a amostra é submetida a uma rampa de temperatura, enquanto suas propriedades dinâmicas são medidas, permitindo verificar a influência da temperatura e, portanto, da transformação de fase da liga NiTi, sobre a capacidade de amortecimento do material, representada pela tangente do ângulo de fase ($\tan \delta$), (Silva, 2009).

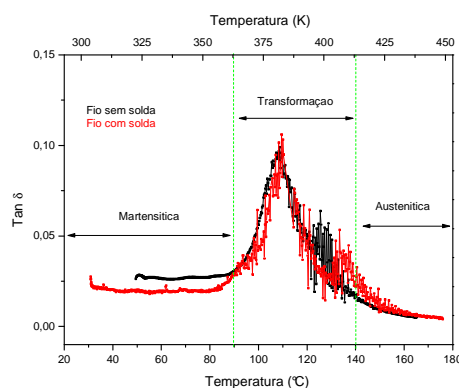


Figura 12. Comportamento da capacidade de amortecimento em função da temperatura dos fios de 0,290 mm com e sem solda, em valores absolutos.

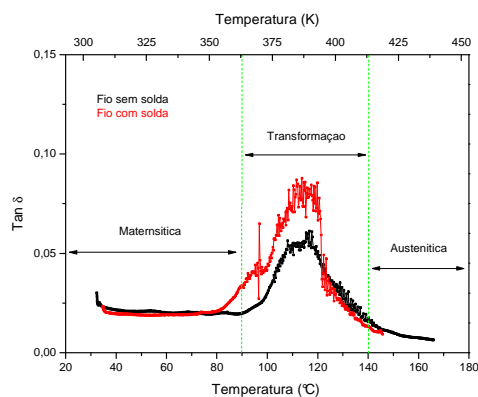


Figura 13. Comportamento da capacidade de amortecimento em função da temperatura dos fios de 0,450 mm com e sem solda, em valores absolutos.

Nas Figuras (12) e (13), qualitativamente, percebem-se três regiões distintas, sendo a primeira chamada de martensítica, com $\tan \delta$ médio de 0,025, correspondente ao amortecimento ocasionado pelo movimento das interfaces das variantes martensíticas. Na segunda região, existe um importante aumento no amortecimento devido à transformação de fase da martensita na austenita no estado sólido. Na terceira região, o material está completamente transformado na fase austenítica e o amortecimento tende a zero.

Através das curvas da variação de $\tan \delta$ com a temperatura, pode-se observar que aparecem os picos de transformação de fase que traduzem uma elevação na capacidade de amortecimento da liga à determinada temperatura, ou seja, um aumento na absorção de energia apresentada pelo material. Esse efeito está intimamente relacionado ao movimento das interfaces martensita/austenita durante a transformação. A elevação do amortecimento também pode ser correlacionada aos defeitos de discordâncias e sua mobilidade no material. Fisicamente, nas temperaturas em que os picos ocorrem, há maior amortecimento da vibração ocasionada por impactos e agentes externos ao material. Verifica-se que a capacidade de amortecimento apresentada pela fase martensítica é maior que a demonstrada pela austenítica, em conformidade com a literatura (Silva, 2009), o que se deve à absorção de energia provocada pelas plaquetas da martensita.

A amostra de fio 0,29 mm soldada apresentou valores diferentes de $\tan \delta$ em relação ao fio sem solda apenas na fase martensítica, que se apresenta com menos capacidade de absorver energia. Durante a transformação de fase e na fase austenítica os níveis de amortecimento são praticamente os mesmos para as duas amostras. No fio com 0,45 mm observou-se que a amostra com solda apresentou maiores níveis de amortecimento durante a transformação de fase, indicando que a solda favoreceu a dissipação de energia durante a transformação de fase.

As Figuras (14) e (15) mostram o comportamento do módulo de armazenamento em função da temperatura para os fios NiTi soldados e isentos de solda. Nos gráficos da esquerda se verificam os valores absolutos dos módulos enquanto nos da direita a sua variação percentual.

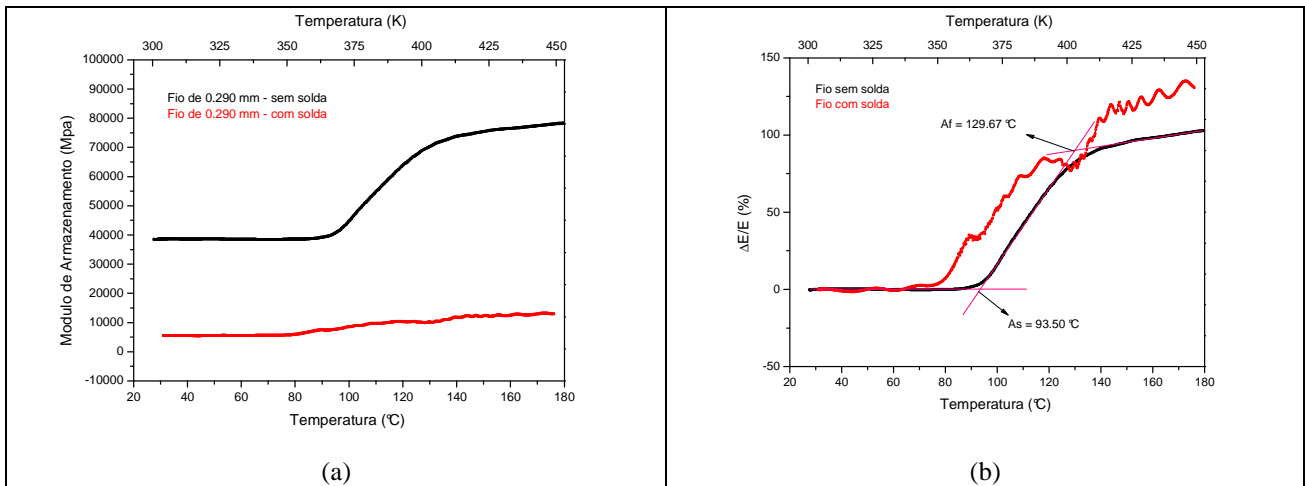


Figura 14. Variação do módulo de armazenamento em função da temperatura para o fio de 0,290 mm, com e sem solda. (a) Valores absolutos. (b) Percentual de variação.

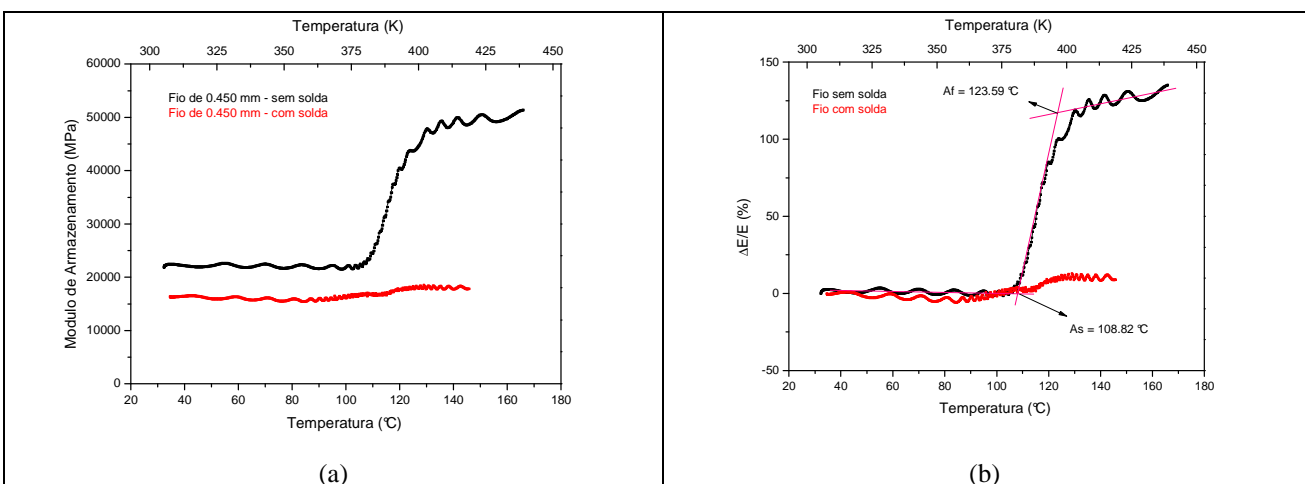


Figura 15. Variação do módulo de armazenamento em função da temperatura para o fio de 0,450 mm, com e sem solda. (a) Valores absolutos. (b) Percentual de variação.

Através dos gráficos se percebe um aumento considerável no módulo de armazenamento para todos os fios isentos de solda ao longo da transformação de fase.

O aumento do módulo de armazenamento com a temperatura indica um acréscimo na rigidez do material, ou seja, há uma menor dissipação de energia pela estrutura em altas temperaturas (fase austenítica). Essa elevação do módulo ocorre pelas mesmas razões que foram verificadas na variação da capacidade de amortecimento dos fios NiTi, relacionadas a movimentos internos na estrutura do material, apresentando rigidez inferior na fase martensítica se comparada à fase austenítica (Otsuka & Wayman, 1998).

Foi verificado que a amostra soldada de 0,29 mm apresentou uma variação de módulo ligeiramente maior que a amostra sem solda de mesmo diâmetro; enquanto que a amostra de 0,45 mm teve sua capacidade de variar o módulo durante a transformação de fase bastante reduzida em relação à variação apresentada pela amostra isenta de solda. Isto ocorreu provavelmente devido a maior introdução de defeitos com a soldagem nesta amostra.

Também através das curvas de variação do módulo podem ser extraídos valores relativos às temperaturas de transformação de fase apresentadas por essas ligas. Para exemplificação, foram determinadas as temperaturas da transformação martensítica reversa dos fios sem solda de 0,290 (Fig. 14b) e 0,450 mm (Fig. 15b), donde se consegue definir também o início da transformação reversa. Observa-se uma diferença entre as temperaturas de transformação obtidas usando as técnicas de RET e a análise dinâmica (aproximadamente 60°C (333 K) para o fio de 0,450 mm e 40°C (313 K) para o de 0,290 mm). Esse retardo ocorre porque existe uma diferença entre a estabilização das propriedades mecânicas e a transformação de fase instantânea do material. Essa observação é bastante importante para aplicações práticas envolvendo cargas dinâmicas ou vibrações mecânicas. Alguns resultados semelhantes foram obtidos na realização de estudo comparativos entre a técnica de análise dinâmica e DSC (Batalu et al. 2006). Além disso, uma análise realizada por (Chang & Wu, 2008) apresenta resultados bastante semelhantes entre as técnicas quando a taxa de aquecimento/resfriamento se aproxima de zero, fornecendo maior tempo para a estabilização das propriedades mecânicas.

4. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos nesta pesquisa experimental, em que se analisou o comportamento termomecânico de fios NiTiNOL microsoldados por descarga capacitiva, conclui-se que:

- É possível soldar fios comerciais de NiTi com memória de forma por descarga capacitiva, permitindo a obtenção de atuadores de LMF de diferentes formatos;
- A soldagem afeta as temperaturas transformação de fase, alterando qualitativamente a curva de RET, tornando o pico da curva de resfriamento (fase R) mais evidente;
- O processo de união é mais eficaz para fios de pequeno diâmetro, permitindo uma fusão mais homogênea das partes envolvidas, conferindo maior resistência mecânica à junta;
- A soldagem causa redução da capacidade de deformação da LMF no regime elástico, pois fragiliza a estrutura;
- O módulo de armazenamento aumenta durante a transformação de fase tanto para os fios soldados, quanto para os isentos de solda. Contudo, para o fio de maior diâmetro, observou-se que essa capacidade de variar o módulo foi bastante reduzida, provavelmente devido maior introdução de defeitos após a solda;
- As propriedades dinâmicas (módulo de armazenamento e $\tan \delta$) das amostras soldadas apresentaram-se qualitativamente com o mesmo tipo de variação à temperatura das amostras sem solda. Porém, a capacidade das amostras soldadas de variar o módulo foi bastante reduzida, o que deve ser considerado em aplicações dinâmicas destes fios soldados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento dos projetos: INCT de Estruturas Inteligentes em Engenharia (Processo no 574001/2008-5), Casadinho UFCG-ITA (Processo no 620091/2008-8) e Universal 2007 (Processo no 478651/2007-4).

6. REFERÊNCIAS

- Casper, V. D. E., Sallom, Z. K., Akselsen, O.M., 2008, "Microwave Brazing of NiTi shape memory alloy with Ag-Ti and Ag-Cu-Ti alloys", *Scripta Materialia* 58 (2008) 779-781.
- Casper, V. D. E., Fostervoll, H., Sallom, Z. K., Akselsen, O. M., 2003, "Plasma Welding of niti to NiTi, Stainless Steel and Hastelloy C276", *SINTEF Materials Technology*", ASM Materials Solutions Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 13-15 October 2003.
- EWI (Edison Welding Institute) Joining Innovation, 2010, "Welding NiTiNOL to Ferrous Metals" e "Resistance and Solid-State Welding", Disponível em: <<http://www.ewi.org>>. Acesso em: 10 de Fevereiro. 2010.
- Falvo, A., Furgiuele, F.M., Maletta, C., 2008, "Functional behaviour of a NiTi-welded joint: two-way shape memory effect", *Materials Science and Engineering A* 481-482 (2008) 647-650.
- Gugel, H., Schuermann, A., Theisen, W., 2008, "Laser welding of NiTi wires", *Materials Science and Engineering A* 481-482 (2008) 668-671.

- KERNIT, Indústria Mecatrônica Ltda, 2008, “Manual de Instruções da máquina SMP 3000 Gold”. Disponível em: <http://www.kernit.com.br/smp3000.htm> >. Acesso em: 25 de Setembro. 2009.
- Ming H. Wu., 2001, “Fabrication of NiTiNOL Materials and Components”, Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, Kunming, China, P.285-292 (2001).
- Otsuka, k., Wayman, C.M., 1998, “shape memory materials”, Cambridge University press, Cambridge, England, 1998.
- Pértile, L. B., 2005, “Caracterização Mecânica e Eletroquímica in Vitro e in Vivo da liga NiTi”. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 104p.
- Reis, R.P.B., de Araújo, C.J., Gomes, A.,A.,C., Neto, J.F.C, Rodrigues, L.F.A., 2008, “Desenvolvimento de um Sistema de Ciclagem Térmica Utilizando O Efeito Termoelétrico: Aplicação a Caracterização de Ligas Com Memória de Forma”. V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2008), Salvador – BA, Brasil, pp. 1-8, 2008.
- Sevilla, P., Martorell, F., Libenson, C., Planell, J. A., Gil, F. J., 2008, “Laser welding of niti orthodontic archwires for selective force application”, J Mater Sci: Mater Med (2008) 19:525–529.
- Silva, N. J., 2009, “Estudo do comportamento termomecânico de uma liga niti com memória de forma usando análise dinâmico-mecânica (DMA)”. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande –PB, 80p., 2009.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos neste trabalho.

THERMOMECHANICAL BEHAVIOR OF NITINOL WIRES MICRO-WELDED BY CAPACITOR-DISCHARGE: AN EXPERIMENTAL STUDY

José Geraldo Vicente da Silva, jgeraldoufcg@gmail.com¹
Carlos José de Araújo, carlos@dem.ufcg.edu.br¹
Esthaphanie Nobre Dantas Grassi, end.grassi@hotmail.com¹

¹Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) , Rua Aprígio Veloso, 882 – UAEM – Bairro Universitário – CEP 58429-140 – Campina Grande - PB,

Abstract. *The welding operation of shape memory wires can allow the fabrication of complex shaped actuators, difficult to obtain by conventional machining techniques. In this work NiTi wire actuators presenting shape memory property, with diameters of 0.290 and 0.450 mm, were welded by capacitor-discharge using a digital micro-welding SMP 3000 GOLD (Kernite). Thermomechanical behavior, as well as storage modulus and damping properties, of welded wire actuators were analyzed under dynamic loading with an oscillation frequency of 1,0 Hz and temperature variation, taking as reference the tests run in non-welded wires. The equipments utilized for this characterization were a TA Instruments Q800 DMA and a Universal Electric-mechanical Testing Machine Instron 5582. The obtained results demonstrated the good mechanical resistance of the welded wires and the potential of the micro-welding by capacitor-discharge technique to the achievement of SMA actuators with different configuration.*

Keywords: *Welding, NiTiNOL, Thermomechanical Characterization, Dynamic Mechanical Analysis.*