

INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE DEFORMAÇÃO SOBRE O EFEITO MEMÓRIA DE FORMA (EMF) DA LIGA NiTi ¹

Galeno Côrtes Martins de Oliveira²

Leonardo Kyo kabayana³

Jorge Otubo⁴

Odair Doná Rigo⁵

Resumo

Para o desenvolvimento deste trabalho foram feitas um passe de trefilagem consecutivos, com 15% área redução por passar, sem inter-annealing até fio quebra. Após os passes de trefilação as amostras foram analisados pelo teste de dureza(micro-indentação)e metalografia. Estes testes mostraram a influência da quantidade de deformação nas propriedades mecânicas da liga de NiTi. Complementando esse trabalho, a microscopia óptica mostra a evolução da microestrutura dos fios trefilados em cada passe.

Palavras-chave: Ni-Ti; Trefilação.

INFLUENCE OF DEFORMATION ON NiTi SHAPE MEMORY ALLOY (SMA)

Abstract

For the development of this work they were made a consecutive pass of wire drawing with 15% area reduction per pass, without inter-annealing until wire breakage. Samples were taken after each drawing pass and they were analyzed by micro-indentation hardness test and metallography. These tests showed the influence of the amounts of deformation on the mechanical properties of NiTi alloy. Complementing this work, optical microscopy shows the evolution of the microstructure of the wires in each wire passes.

Key words: Nickel-titanium; Wiredrawing.

¹ *Contribuição técnica ao 64 ° Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Bacharel em Física, Divisão de Engenharia Mecânica, ITA, São José dos Campos, SP.*

³ *Doutor em Engenharia Mecânica, Divisão de Engenharia Mecânica, ITA, São José dos Campos, SP.*

⁴ *Doutor em Engenharia Mecânica, Professor Adjunto II da Divisão de Engenharia Mecânica, ITA, São José dos Campos, SP.*

⁵ *Engenheiro de Materiais, Centro Tecnológico da Marinha – CTMSP.*

1 INTRODUÇÃO

Conhecida desde a década de 1970 a liga Ni-Ti é um material que apresenta um dos melhores desempenhos entre as ligas com Efeito Memória de Forma (EMF) e Efeito Pseudoelástico (EPE) com recuperação de forma de até 8%, tem ótima resistência à fadiga e a corrosão e pode ser biocompatível.⁽¹⁾ Além disso, apresenta várias aplicabilidades industriais: naval, aeronáutica, nuclear, eletrônica, médico hospitalares etc.

O fenômeno do Efeito Memória de Forma (EMF) pode ser definido como sendo a capacidade de certos materiais voltarem ao estado ou à forma original com o aquecimento em temperaturas acima da temperatura de fim de transformação da martensita em austenita após serem deformados plasticamente no estado martensítico.⁽²⁾

Na prática, o esquema do processo de fabricação das ligas de NiTi com efeito memória de forma é mostrado na Figura 2.⁽³⁾

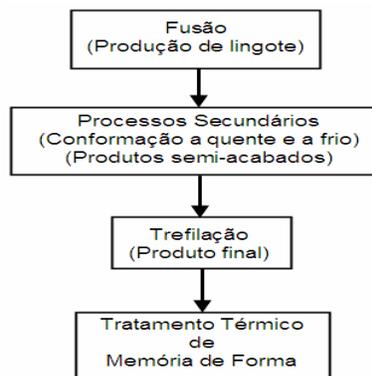


Figura 2. Processo de fabricação de ligas de NiTi

A produção da liga pode ser feita via fusão em forno de indução a vácuo, mas pode apresentar contaminação por oxigênio provinda da matéria prima e por carbono devido a utilização de cadinho de grafite, porém o grau dessa contaminação pode estar dentro da Norma ASTM F 2063 – 00.⁽⁴⁾ Essa contaminação pode gerar a precipitação de óxido de titânio (Ti_4Ni_2O) e de carbeto de titânio (TiC).

A trefilação é o processo de conformação plástica, geralmente realizada a frio, que permite a obtenção de barras, fios e tubos de diversas dimensões. Na forma de fios as ligas de NiTi com efeito de memória de forma são usadas para a fabricação de molas, tubos e fios com formatos irregulares (diferentes de fios redondos) para diversas aplicações, a principal delas é a de fios ortodônticos.

As ligas de NiTi podem alcançar de 30% a 50% de redução de área,⁽⁵⁾ porém em conformação a frio essa liga sofre um encruamento severo (Figura 3) principalmente no processo de trefilação, reduzindo a sua conformabilidade, e portanto necessitam de tratamentos térmicos de recozimento para recuperar a capacidade de deformação da liga.⁽⁶⁾ Esses inter-recozimentos apresentam uma perda na redução de área dos fios trefilados após o tratamento térmico, devido ao efeito de memória de forma, alterando

as quantidades de redução em cada passe e com isso o comportamento da deformação do material durante o processo de trefilação.

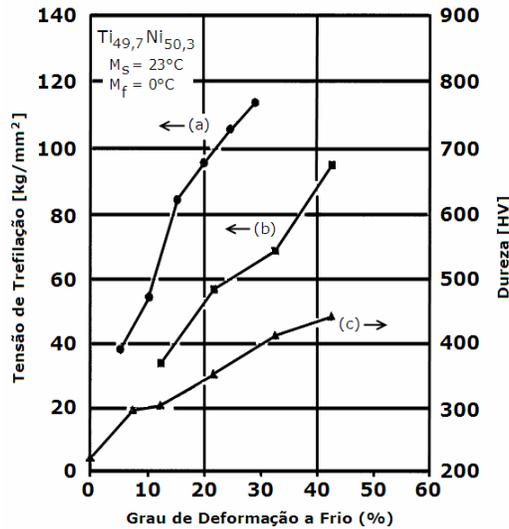


Figura 3. Tensão de trefilação e dureza HV.⁽⁶⁾

Na Figura 3 são mostradas as curvas de tensão de trefilação em um único passe (a), tensão de trefilação em passes múltiplos (b) e dureza HV do material (c) em função do grau de deformação a frio obtido num ensaio do processo de trefilação em temperatura ambiente de uma liga de $Ni_{50.3}Ti_{49.7}$. Nota-se na Figura 3, que a tensão e a dureza aumentam rapidamente com o aumento do grau de deformação (encruamento severo) na liga NiTi e portanto necessitam recozimentos entre um passe e outro durante o processo de trefilação.⁽⁶⁾

Este trabalho objetivou analisar o comportamento do material em passes múltiplos de trefilação relacionando com as propriedades mecânicas analisadas através dos testes de micro-indentação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado foi produzido pelo processo convencional de obtenção da liga de NiTi via fusão em forno de indução a vácuo (VIM). Com um adequado dimensionamento e controle da qualidade da grafite utilizado na confecção do cadinho tem-se obtido lingotes com teor de impurezas encontrado em produtos comerciais. A liga de NiTi utilizada neste trabalho possui a composição química e as temperaturas de transformação martensítica e transformação austenítica são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química e temperaturas de transformações

Ligas de NiTi	Ni (at.%)	C (wt.%)	O (wt.%)	M_i (°C)	M_p (°C)	M_f (°C)	A_i (°C)	A_p (°C)	A_f (°C)
VIM 16	49,94	0,110	0,039	-26,0	-46,0	-68,0	-41,5	-21,9	-3,5

Por definição, as temperaturas de transformação são:

M_i : é a temperatura de início da transformação da austenita em martensita no resfriamento;

M_f : é a temperatura de fim da transformação martensítica;

A_i : é a temperatura de início da reversão da martensita em austenita no aquecimento;

A_f : temperatura de fim da reversão da martensita em austenita; e

M_p e A_p : são as temperaturas de pico.

Observa-se da Tabela 1 que as temperaturas de transformações estão abaixo da temperatura ambiente, apresentando assim o efeito da superelasticidade tendo em vista que o material se encontra no estado austenítico.

A conformação a frio da liga de NiTi foi realizada com a utilização do processo de trefilação com uma trefila monobloco pertencente ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica.



Figura 4. Equipamento usado para trefilação.

Para o processo de trefilação foi utilizado um jogo de fieiras com núcleo de carbeto de tungstênio com 15% de redução de área em cada passe e como lubrificante foi utilizada uma graxa de bissulfeto de molibdênio (MoS_2). Utilizando esse jogo de fieiras foram dados passes de redução consecutivos até a ruptura do material, para determinar a quantidade limite de deformação que a liga de NiTi pode suportar na trefilação.



Figura 5. Conjunto de fieiras

A preparação das amostras da liga NiTi VIM16 (material superelástico) foi realizada seguindo as etapas metalográficas especificadas: corte, embutimento, lixamento, polimento mecânico e ataque químico. O objetivo da Microscopia Óptica foi revelar a evolução da microestrutura dos fios trefilados em cada passe.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o processo de trefilação foi possível aplicar cinco passes de trefilação, com 15% de redução de área em cada passe, até o material sofrer rompimento. Portanto a liga de NiTi VIM16 suportou uma redução de área de 55,86% divididas em cinco passes consecutivos sem inter-recozimentos.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no processo de trefilação do fio de NiTi VIM16 com passes consecutivos e sem inter-recozimentos. Nela são apresentados os valores de diâmetro inicial ($\varnothing_{inicial}$) do fio antes do passe de redução; o diâmetro da fieira (\varnothing_{fieira}) referente ao passe de redução de área aplicada; e o diâmetro do fio trefilado ($\varnothing_{tref.}$). A partir desses valores de variação de diâmetros em cada passe de trefilação, foi possível calcular os valores de redução de área (RA) aplicada ao fio pela fieira; da recuperação elástica (Rec_{EL}) que ocorre no material após a retirada da carga de deformação. Devido a essa recuperação elástica, o diâmetro do fio trefilado é maior que o apresentado pela fieira. Portanto a redução de área final (Red_{Final}) ou resultante é diferente da redução de área aplicada pela fieira.

Tabela 2. Variação de diâmetros na trefilação VIM 16

Passe	$\varnothing_{inicial}$	\varnothing_{fieira}	$\varnothing_{tref.}$	RA	Rec_{EL}	Red_{Final}	RA_{ac}
	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	1,73	1,571	1,60	17,56	3,62	14,46	14,46
2	1,60	1,448	1,48	18,10	4,28	14,44	27,28
3	1,48	1,335	1,36	18,63	3,64	15,56	38,21
4	1,36	1,231	1,25	18,07	3,02	15,52	47,97
5	1,24	1,134	1,15	16,37	2,76	13,99	55,86

A cada passe de redução ocorre uma recuperação elástica do material que é uma recuperação de deformação que ocorre quando é retirada a carga de deformação do material. Como se pode observar na Tabela 2 a recuperação elástica da liga de NiTi trefilada está em torno de 3% a 4%, devido a propriedade de superelasticidade da liga, pois a liga NiTi se apresenta no estado austenítico a temperatura ambiente e por isso apresenta essa característica de superelasticidade. Devido a recuperação elástica do material, a redução de área final é menor que a redução de área aplicada ao material, pois a mesma recupera parte da deformação aplicada pela fieira e portanto seu diâmetro final é maior que o diâmetro da fieira.

Os resultados dos ensaios de dureza por micro-indentação estão apresentados na Tabela 3. Verifica-se que a dureza variou de um mínimo de 356,8HV no fio inicial a um máximo de 497,6HV depois de 5 passes de trefilação.

Tabela 3. Ensaios de dureza por micro-indentação

	DUREZA (HV)			
	1ª	2ª	3ª	Média
Material inicial	344,8	365,0	360,7	356,8
1º Passe	417,0	394,9	373,8	395,2
2º Passe	384,6	401,5	375,3	387,1
3º Passe	468,2	457,8	454,8	460,2
4º Passe	476,7	468,2	480,0	474,9
5º Passe	495,6	508,5	488,8	497,6

Combinando os resultados dos ensaios de trefilação e dos ensaios de dureza, pode-se observar que há um aumento da dureza média a cada passe de trefilação, como pode ser visto na Figura 6. Esse aumento da dureza é devido a um severo encruamento devido a deformação plástica a frio.

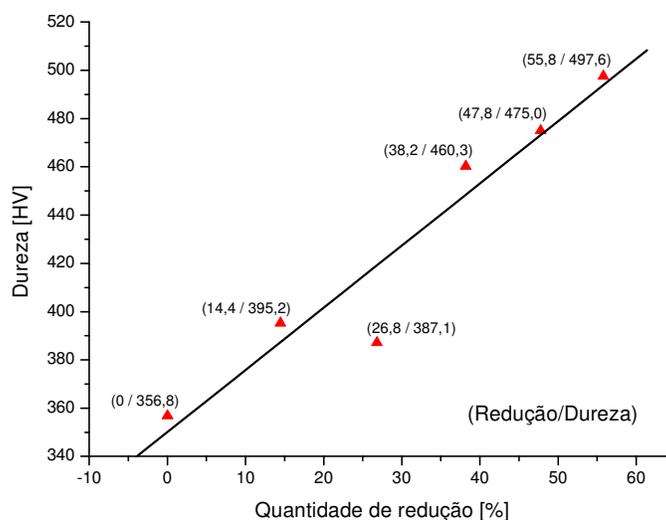


Figura 6. Curva da dureza média em função da quantidade de redução.

Além do severo encruamento que o material sofre quando é plasticamente deformado a frio, há a influência da presença de precipitados de óxido de titânio (Ti_4Ni_2O) e de carbeto de titânio (TiC) provenientes do processo de fabricação da liga por fusão em forno de indução a vácuo que utiliza cadinho de grafite que pode contaminar o banho da liga fundida e da contaminação da matéria prima. Esses precipitados podem dificultar a deformação do material, pois apresentam dureza elevadas, bem maiores que o da liga matriz, e também por serem considerados limitadores de movimentação de discordâncias.

A presença desses precipitados pode ser observada nas micrografias obtidas das amostras de fios trefilados retirados em cada passe de redução. Essas micrografias são apresentadas nas Figuras 7 a 12.

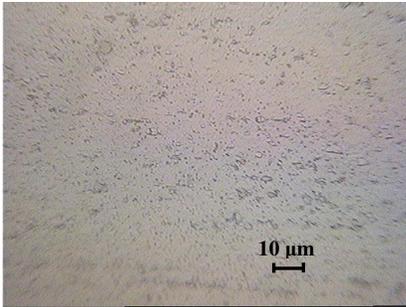


Figura 7. Fio de NiTi inicial, 500x.

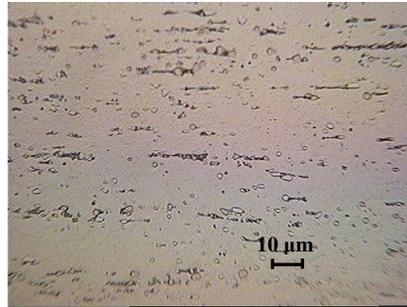


Figura 8. Fio de NiTi trefilado, 1º passe, 500x.

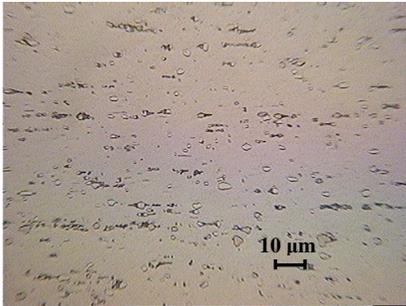


Figura 9. Fio de NiTi trefilado, 2º passe, 500x

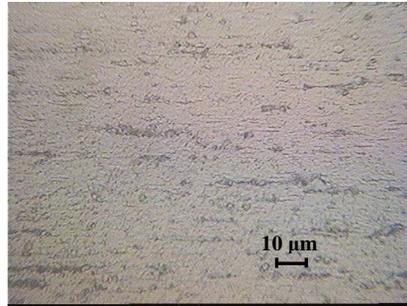


Figura 10. Fio de NiTi trefilado, 3º passe, 500x

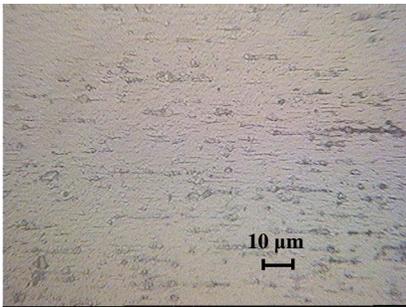


Figura 11. Fio de NiTi trefilado, 4º passe, 500x

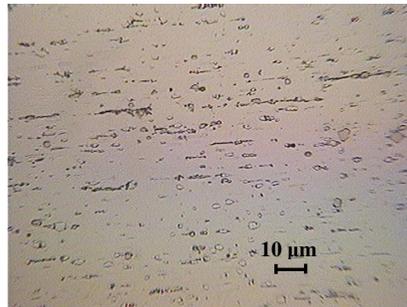


Figura 12. Fio de NiTi trefilado, 5º passe, 500x

Observando as micrografias, nota-se que no material inicial os precipitados apresentam uma grande dispersão na matriz, e a medida em que são realizados os passes de trefilação, os mesmos tendem a se agrupar em uma distribuição alinhada na direção de estiramento do material devido à trefilação. Devido a essa concentração de precipitados alinhados, outras regiões da matriz se tornam limpas e sem barreiras para deformação do material, tornando possível a redução de área de 55,86% divididas em cinco passes de aproximadamente 15% de redução em cada passe.

4 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos nos ensaios realizados com o material utilizado neste trabalho foi possível concluir que:

- é possível aplicar uma redução de área de até 50%, divididas em passes de redução de área de 15% em cada passe, na liga de NiTi usada;

- a liga de NiTi usada se torna mais encruado a cada passe de redução de área, pois ocorre um aumento da dureza do material com o aumento da quantidade de redução aplicada ao material;
- a presença e a distribuição dos precipitados na liga de NiTi usada influencia na quantidade de redução alcançada.

Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq pela bolsa de pós-graduação e também ao apoio recebido do INPE e ITA.

À FAPESP, processo 00/09730-1 pela infra-estrutura e fornecimento de material.

À FINEP, PRO-INFRA, ao CNPq Universal, processo 473612/2006-2 e a AEB que apóiam este projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 STOECKEL, D., *Forming of Nitinol – A Challenge*. New Development in Forging Technology, ed. K. Siegert, 2001, 119-134. Available in website: http://www.nitinol.info/ndc_literature.html, accessed in September, 12, 2008.
- 2 FUNAKUBO, H., *Shape Memory Alloys*, Ed. Hiroyasu Funakubo, University of Tokyo, 1987.
- 3 RAMAIAH, K. V., SAIKRISHNA, C. N., BHAUMIK, S. K., *Processing of Ni-Ti Shape Memory Alloy Wires*, Proceedings of ISSS 2005 International Conference on Smart Materials Structures and Systems, Bangalore, India, July 28-30, 2005.
- 4 *ASTM F 2063 – 00 Standard Specification for Wrought Nickel-Titanium Shape Memory Alloys for Medical Devices and Surgical Implants*, approved in November, 10, 2000, published in February, 2001, © ASTM – American Society for Testing and Materials, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- 5 (PELTON, 2000) PELTON, A., DiCELLO, J., MIYAZAKI, S., *Optimization of processing and properties of medical-grade Nitinol wire*. Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies SMST 2000, ed S. Russel, A. Pelton, 361-374, accessed in September, 12, 2008.
- 6 WU, S. K., LIN, H. C., YEN, Y. C., *A Study on The Wire Drawing of TiNi Shape Memory Alloys*, Materials Science & Engineering A, 215, 1996, pp 113~119.