

CARACTERIZAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS COM  
EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA

Jorge Otubo e Paulo Roberto Mei  
FEM-DEMA-Unicamp, CP 6122, CEP13.081-970, Campinas SP  
Sadamu Koshimizu  
CEN/IPEN, CP 11.049, CEP 05.422-970, São Paulo, SP

RESUMO

Recentemente, além das já conhecidas ligas de NiTi e ligas a base de Cobre com Efeito de Memória de Forma (EMF), ligas a base de Ferro e aços inoxidáveis estão sendo desenvolvidos, principalmente no Japão. São apresentados neste trabalho resultados preliminares de duas ligas inoxidáveis cuja a recuperação de forma total para uma pré-deformação de 4% foi da ordem de 80%.

INTRODUÇÃO

Efeito de Memória de Forma (EMF) é o termo utilizado para descrever a capacidade de certos materiais, que após serem deformados plasticamente, voltarem ao estado ou formato inicial quando aquecidos. Este fenômeno aparece em certas ligas que apresentam transformação martensítica cristalograficamente reversível. Apesar de serem conhecidas desde a década de 50 [1], o avanço maior com aplicações práticas se deu a partir de 1963 com o desenvolvimento da liga NiTi pela NASA [2] e de ligas a base de cobre. Mais recentemente, foi descoberto que algumas ligas a base de ferro, como Fe-Pd, Fe-Mn, Fe-Ni-Co-Ti, Fe-Mn-Si, etc [1,3], também apresentavam o fenômeno do EMF, sendo a mais conhecida a liga Fe-Mn-Si [4]. É a partir dessa liga que pesquisadores japoneses [5,6,7,8,9] estão desenvolvendo aços inoxidáveis com EMF, os quais por sua vez, foram a base desse trabalho. O EMF nessa liga e na maioria das ligas a base de ferro, está associado com a transformação

martensítica não termoelástica passando da fase  $\gamma$ (fcc) para a fase  $\epsilon$ (hcp). A martensita e pode também ser induzida por tensão mecânica. É a reversão dessa martensita e induzida por tensão assistida por aquecimento que causa a recuperação de forma. A influência de cada elemento em termos de Ms (temperatura de início da transformação martensítica), Tw e sua relação com EMF foram apresentados no Seminário INOX 94 [4].

OBTEÇÃO DAS LIGAS

A literatura [5,7] indica duas faixas de composições: 1) liga resistente a corrosão com Cr de 7 a 13%, Ni<10%, Mn<15%, Si<7% e base Fe e 2) liga altamente resistente a corrosão com Cr de 13 a 15%, Ni<10%, Mn<15%, Si<7%, Co<15% e base Fe.

Para este trabalho foram escolhidas duas composições: uma dentro da primeira faixa denominada de CrNi e outra dentro da segunda faixa denominada de CrNiCo.

Tabela 1. Composição química dos lingotes (% em peso)

LIGA	C	Si	Mn	Ni	Cr	Co
CrNi	0,037	5,27	13,61	4,77	9,08	0,25
CrNiCo	0,044	5,16	7,81	5,74	13,02	11,85
8Cr [8]	-	5,9	14,3	5,4	5,1	-
13Cr [8]	-	6,0	8,0	6,0	13,0	12,1
liga # [9]	-	6,0	13,7	4,9	8,3	-

Os lingotes foram elaborados num forno de indução a vácuo (VIM) utilizando-se de matéria prima virgem. A composição química final se encontra na Tabela 1 acima. Nesta tabela, foram também colocadas as ligas obtidas pela NKK [7,8,9] para comparações futuras dos resultados.

Os lingotes foram forjados e laminados a quente para dimensões 5,00x5,15mm (CrNi) e 6,75x5,75mm (CrNiCo), num perfil quadrado de cantos arredondados. Em seguida, solubilizados a 1050°/40min. e calibrados por trefilação para diâmetros 5,05mm (CrNi) e 5,60mm (CrNiCo) e novamente solubilizados a 1050°/40min./água.

Tanto as amostras de CrNi como as de CrNiCo apresentavam após solubilização maclas de recozimento e estrutura martensítica após calibração [4]. Posteriormente foram trefiladas para diâmetro 1,20mm que serviu de material de partida para verificação do RMP. Detalhes de elaboração e processamento podem ser vistos na referência [4].

Durante a trefilação, foram retiradas amostras para ensaios de tração, dilatométrica e medidas de resistividade. Os resultados se referem sempre a amostras recozidas.

#### RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO

Na Tabela 2 estão apresentados resultados de ensaios de tração para as ligas CrNi, CrNiCo e, para comparação a 9Cr da NKK [8] com composição similar a liga CrNi conforme Tabela 1. Em termos de resistência a tração, o valor apresentado pela liga CrNi foi um pouco superior que a da liga CrNiCo e cerca de 50 Mpa a mais quando comparado a 9Cr [8]. A diferença foi bem maior quando se compara os valores do limite de escoamento com 130 Mpa a mais para a liga CrNi em relação a liga 9Cr. Em termos de alongamento, as comparações ficam prejudicadas pois o comprimento 0til das amostras eram diferentes. Já em termos de redução de área, o melhor resultado foi apresentado pela liga CrNi seguida da liga CrNiCo e por fim da liga 9Cr. Isto é, as duas ligas apresentadas neste trabalho são mais dúcteis que a liga obtida pelos pesquisadores da NKK [8].

Já em termos de coeficiente de expansão térmica, na faixa de 25-600°C, os valores encontrados neste trabalho foram semelhantes aos da NKK [7] como pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 2. Resultados de ensaio de tração

LIGA	CrNi	CrNiCo	9Cr
RT (MPa)	865,8	852,0	816
LE (MPa)	321,1	309,2	187
Along. (%)	52,8 (100mm)	61,2 (100mm)	72 (30mm)
Red. Área (%)	72,0	69,4	61

Tabela 3. Resultados de medidas de coeficiente de dilatação térmica  $\alpha \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ .

FAIXA (°C)	CrNi	CrNiCo	9Cr	13Cr
25 - 300	-	-	15,6	17,7
25 - 600	20,0	18,8	18,4	18,8
25 - 1200	-	21,9	20,5	-

Tabela 4. Medidas de resistividade elétrica ( $\mu\Omega\text{cm}$ )

LIGA	CrNi	CrNiCo	9Cr	13Cr
resist.	102,92	102,73	103	201

Para a resistividade elétrica, Tabela 4, as ligas CrNi, CrNiCo e 9Cr apresentaram valores semelhantes. No entanto, a liga CrNiCo quando comparada a similar da NiX, 13Cr [7], apresentou metade do valor: 98,73  $\mu\Omega\text{cm}$  para a primeira e 201  $\mu\Omega\text{cm}$  para a segunda.

Para a verificação preliminar do EMF, fios no diâmetro 1,20 mm foram laminados a frio para fitas de espessura 0,22 mm e recozidas a 1050/15min.. Estas amostras foram usadas para ensaios de dobramento [9]. Este ensaio consiste em dobrar um fio ou uma fita em torno de um mandril até um ângulo de 180° e posteriormente descarregar (soltar) conforme pode ser visto na Figura 1.

recuperada com o aquecimento devido ao EMF por  $f_{emf} = \theta_0 / 180^\circ \cdot \theta_0$ . A taxa de pré-deformação pode ser variada mudando-se o diâmetro do mandril ou a espessura da fita. Para este trabalho foi utilizado uma pré-deformação de 4% a temperatura ambiente e o aquecimento para verificação do EMF foi feito em chama de maçarico. A tabela 5 abaixo, apresenta os resultados do ensaio de dobramento para as ligas deste trabalho e compara com valores encontrados por Yang, Chen e Wayman [9] denominado de liga 8 (vide Tabela 1) que por sua vez foi fornecido pela NiX e possui composição similar ao 9Cr. Em termos de recuperação instantânea ou superelástica, o melhor resultado foi apresentado pela liga CrNiCo seguida da liga 8 e por fim da liga CrNi. Após aquecimento, a recuperação de forma maior foi apresentada pela liga 8, seguida de CrNi e por último a CrNiCo. Em termos de recuperação de forma total ( $f_{ee} + f_{em}$ ), em relação a 4% de pré-deformação, foram 87% para a liga 8, 81% para a liga CrNi e 80% para a liga CrNiCo. Estes resultados são bastante promissores pois estão próximos dos valores encontrados na literatura, sem que se tenha tido a preocupação de otimizá-los. Resultados de ensaio de tração indicam que existe um campo para melhoria do EMF pois tanto a resistência a tração quanto o limite de escoamento da matriz austenítica apresentaram valores superiores que as ligas da NiX.

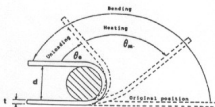


Figura 1. Ilustração esquemática do ensaio de dobramento [9].

A pré-deformação é definida por  $\epsilon = t/d$  onde  $t$  é a espessura da fita ou diâmetro do fio e  $d$  o diâmetro do mandril. A fração recuperada no descarregamento ou superelástica é dada por  $f_{ee} = \theta_0 / 180^\circ$  e a fração

Tabela 5. Recuperação de forma após pré-deformação de 4%

LIGA	$f_{ee}$	$f_{em}$	$f_{ee} + f_{em}$	% em rel. a 4%
8	0,80	2,70	3,50	87
CrNi	0,77	2,43	3,20	80
CrNiCo	0,88	2,36	3,24	81

#### CONCLUSÕES

1. Em termos de resistência a tração, a liga CrNi apresentou um valor ligeiramente superior que a liga CrNiCo. Já a liga CrNi quando comparada a similar 9Cr, aquela apresenta 50Mpa a mais.
2. Em termos de limite de escoamento, a liga CrNi apresentou um valor em torno de 130Mpa a mais que a liga 9Cr. Uma diferença relativamente grande.
3. Em termos de resistividade elétrica, as ligas CrNi, CrNiCo e a 9Cr apresentaram valores similares entre si. No entanto a liga CrNiCo comparada a liga 13Cr, apresentou a metade do valor.
4. Na faixa de 20 a 600°C os valores de coeficiente de expansão térmica das quatro ligas foram semelhantes.
5. Em termos de EMP, os valores encontrados foram um pouco inferiores quando comparadas a liga 8 da NKK apresentada por Yang, Chen e Wayman. No entanto deve-se observar que existe potencial para melhoria pois o limite de escoamento das ligas apresentadas neste trabalho são superiores que as da NKK, o que poderia favorecer em termos de EMP.
6. Trabalhos futuros visam otimizar em termos de EMP e caracterizar também as temperaturas de transição de fase.

#### AGRADECIMENTOS

À Eletrometal e em especial ao Dr. José Diniz de Sousa pelo incentivo e apoio material. Ao Dr. Alain Jean Isoré, Eugênio José de Almeida, Wagner Luis Faustino, João Luz, Nilson Oliveira e Ismael Politoro pela ajuda na elaboração e ensaio. Ao Dr. Marcelo Gonçalves do IPT pela ajuda na laminação e ao CNPq pela ajuda financeira a um dos pesquisadores.

#### REFERÊNCIAS

- [1] MIYAZAKI, S. and OTSUKA, K., Development of Shape Memory Alloys, ISIJ International, v.29, n.5, p. 353-377, 1989.
- [2] MAKI, T., Recent Development in Fe-Based Shape Memory Alloys, Prog. 1st Japan International SAMEP Symposium, Nov. 28- Dec. 1, 1989.
- [3] JACKSON, C. M., WAGNER, H. J. and WASILEWSKI, R. J., 55-Minimol - The alloy with memory: Its Physical Metallurgy, Properties, and Applications, NASA - SP 5110, 1972.
- [4] OTUBO, J., KEI, P. R. e KOSHIMIZU, S., Desenvolvimento de novos Aços Inoxidáveis com Efeito de Memória de Forma, IV Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável - Inox'84, São Paulo, SP, 23 e 25 Nov. 1984.
- [5] OTSUKA, H., YAMADA, H., MARUYAMA, T., TANAHASHI, H., MATSUDA, S. and MURAKAMI, M., Effects of Alloying Additions on Fe-Mn-Si Shape Memory Alloys, ISIJ International, v. 30, n. 8, p. 674-679, 1989.
- [6] OTSUKA, H., YAMADA, H., TANAHASHI, H. and MARUYAMA, T., Shape Memory Effects in Fe-Mn-Si-Cr-Ni Polycrystalline Alloys, Materials Science Forum, v. 56-58, p. 655-660, 1990.
- [7] NKK CORPORATION, Stainless Steel-Based Shape Memory Alloy, NKK Technical Bulletin, Cat. n. 400-055, 1990.
- [8] MORIYA, T., KIMURA, H., ISHIZAKI, S., HASHIZUME, S., SUZUKI, S., SUZUKI, H. and SAMPEI, T., Properties of Fe-Cr-Ni-Mn-Si-Co Shape Memory Alloys, Journal de Physique IV, Colloque C4, supplément au Journal de Physique III, v. 1, p. 433-437, nov. 1991.
- [9] YANG, J. H., CHEN, H. and WAYMAN, C. M., Development of Fe-Based Shape Memory Alloys Associated with FCC-HCP Martensitic Transformations: Part I. Shape Memory Behavior, Metallurgical Transactions A, v. 23A, 1431-1437, 1992.

#### SUMMARY

Recently, beside the already known NiTi alloy and copper based shape memory alloys (SMA), iron based alloys and stainless steel based alloys are being developed mainly in Japan. In this work we present a preliminar results of two stainless steel alloys with total shape recovery of about 80% after 4% pre-strain.