

# OS AÇOS MARAGING

JULIO C. O. LOPES,

Instituto de Logística da Aeronáutica, Subdivisão de Ensino Presencial,  
Av. Monteiro Lobato 6365, Cumbica, Guarulhos, São Paulo  
julio\_inb@hotmail.com

**ABSTRACT:** This paper reports a developments and recent researches of Maraging steel . The mechanical proprieties of this class of steel is very interesting for aeronautical applications speciality for toughness and strength resistance. The martensitic transformation allow a high density of dislocations in a CBC structure , and this dislocation, will be a preferred site for precipitation during the aging treatment. The precipitation hardening is responsible about fifty percent of total hardening in this steel grade. For this reason, the real studies are concentrates in the precipitation phenomena. New types of alloys are added to modify the precipitation effect .

**Keywords:** Maraging, Precipitation, martensite.

**RESUMO:** Este artigo apresenta informações sobre o desenvolvimento e pesquisas realizadas sobre os aços Maraging. Neste tipo de aço, as propriedades mecânicas são muito interessantes para a aplicação aeronáutica, especialmente nas propriedades de resistência mecânica e tenacidade.

Nestes aços , a transformação martensítica produz uma martensita de estrutura cúbica de corpo centrado com elevada densidade de discordâncias. Estas discordâncias atuam como sítios nucleadores para a precipitação de compostos intermetálicos que ocorre durante o envelhecimento.

O endurecimento por precipitação nestes aços é responsável por aproximadamente cinquenta por cento do endurecimento total apresentado por este tipo de aço, e é por este motivo que os esforços

**Palavras chave:** Aços Maraging; Precipitação; Martensita.

## 1.- HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DOS AÇOS MARAGING

Durante a guerra fria, na década de 50, os EUA procuraram desenvolver um bombardeiro supersônico que pudesse atingir velocidades supersônicas de Mach 3. Evidentemente, velocidades desta ordem em uma aeronave, provocariam um aquecimento superficial devido ao atrito com o ar e a superfície desta aeronave atingiria temperaturas entre 250 e 300°C. Desta forma, ligas convencionais de alumínio não poderiam ser empregadas.

O cenário, então, levou ao desenvolvimento de um aço inoxidável que pudesse ser empregado em painéis de honeycomb para reduzir peso, ao mesmo tempo em que este aço deveria possuir uma elevada relação resistência/peso. Isto

foi obtido pela adição de pequenas quantidades de alumínio e titânio em aços inoxidáveis contendo Ni. Alguns protótipos desta aeronave chegaram a ser construídos, porém este projeto foi substituído pelos sistemas de mísseis, e estes tipos de aços foram utilizados apenas em aplicações específicas.

Os aços maraging com cobalto, tiveram início em 1960, através do desenvolvimento feito por Bieber na Internacional Nickel Company, onde o emprego simultâneo de Cobalto e Molibdênio propiciou um aumento significativo na resistência do material, onde o emprego simultâneo de Cobalto e Molibdênio propiciou um aumento significativo na resistência do material, onde se mostra na figura 1 [1-2].

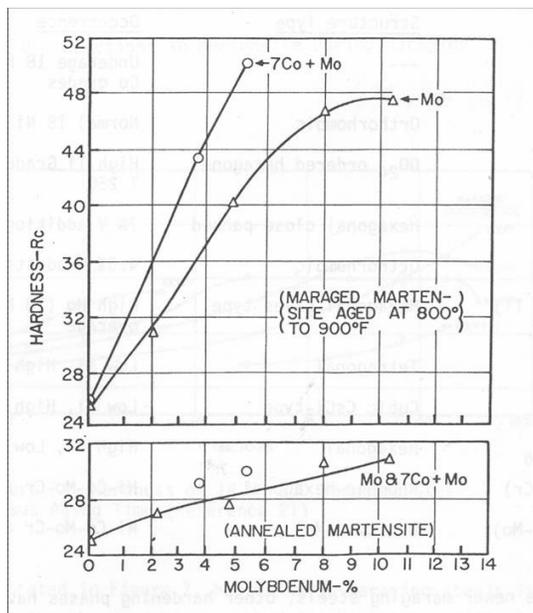


Figura 1 – Efeito do Co nos aços maraging

Devemos ratificar o fato que o efeito na resistência mecânica do Co-Mo, quando empregados simultaneamente nos aços maraging, é maior do que a soma do efeito de cada um destes elementos quando empregados isoladamente.

## 2. - MICROESTRUTURA DOS AÇOS MARAGING

O nome “maraging” originou da combinação de duas palavras, MARTensite e AGING, termos em inglês que significam

Fase	estequiometria	estrutura	ocorrência
$\mu$	A7B6	romboédrica	Alto Cr e Mo, baixo Ni
$\omega$	A2B	hexagonal	
S	A8B	hexagonal	
X	A3B	hexagonal	
Fe <sub>2</sub> Mo	A2B	hexagonal	grau 400
Ni <sub>3</sub> (Ti,Mo)	A3B	hexagonal	grau 350
Ni <sub>3</sub> Mo	A3B	ortorrômbica	
Ni <sub>3</sub> V	A3B	HC	7%V
Ni <sub>3</sub> W	A3B	ortorrômbico	7%W
FeMo	AB	tetragonal	baixo Ni alto Mo

Table 1 – characteristics of precipitated in maraging steel

De forma geral, podemos dizer que nas ligas comerciais C-200, C-250, C-300, C-350 e C-400, os precipitados desejáveis são o Ni<sub>3</sub>Ti(hexagonal) e Ni<sub>3</sub>Mo(ortorrômbico), sendo o Ni parcialmente substituído pelo Fe e pelo Co, e o Ti substituído parcialmente pelo Mo. O Fe<sub>2</sub>Mo é um precipitado associado ao efeito de “overaging”, ou seja, superenvelhecimento. O superenvelhecimento pode ocorrer devido à temperatura de envelhecimento muito elevadas, e/ou

respectivamente martensita e envelhecimento, ou seja, martensita envelhecida. Isto já sugere a o tratamento térmico empregado e a microestrutura esperada.

Os aços maraging possuem um elevado teor de Ni, entre 10 e 30 %, sendo comum o emprego de teores de 13%Ni na série 400 ou de 18% Ni nas séries 200, 250, 300 e 350. Este teor de Ni permite, portanto uma estrutura totalmente austenítica em temperaturas superiores à 750°C, inibindo a transformação para ferrita durante o resfriamento.

Nestes tipos de aço, o teor de carbono é muito baixo (menor que 0,03%) e durante o resfriamento ocorre a transformação austenita->martensita, sendo que esta martensita, chamada de martensita de Ni, é uma martensita dúctil de elevada densidade de discordância com estrutura cúbica de corpo centrado [3].

A microestrutura martensítica é obtida normalmente com resfriamento ao ar, apenas em casos onde se obtém baixas taxas de resfriamento esta reação pode não ocorrer completamente, devido à precipitação de compostos intermetálicos durante o resfriamento.

Esta martensita possui elevada densidade de discordâncias e alto teor de elementos de liga em solução sólida. Isto propicia a precipitação de compostos intermetálicos ao redor das discordâncias, com baixo diâmetro permitindo então um endurecimento significativo do material [1].

Estes compostos intermetálicos variam conforme o material e o tratamento termomecânico aplicado, como pode ser verificado na tabela 1 [4]. É importante observar que não existe período de incubação, e a precipitação começa a ocorrer logo nos estágios iniciais do envelhecimento.

ao elevado tempo de envelhecimento. No “overaging” ocorre coalescimento do precipitado e conseqüentemente, perda de resistência mecânica, além disto, pode ocorrer a formação de Fe<sub>2</sub>Mo a partir dos precipitados existentes (Ni<sub>3</sub>(Ti,Mo) e Ni<sub>3</sub>Mo) aumentando o teor de Ni em solução sólida. Este aumento local do teor de Ni em solução sólida estabiliza a austenita mesmo à temperatura ambiente após o overaging. Esta austenita é chamada de “austenita revertida” com conseqüente redução da resistência mecânica [5].

O tratamento térmico aplicado depende evidentemente da liga empregada, mas geralmente envolve uma austenitização à 820°C por 1 ou 2h seguido de um envelhecimento entre 450-500°C por um período de 3 ou 4 h.

## 3. - ENDURECIMENTO DOS AÇOS MARAGING

Os três mecanismos de endurecimento dos aços maraging são o endurecimento pela transformação martensítica, endurecimento por solução sólida e endurecimento por precipitação. O efeito de cada um destes mecanismos estão representados na figura a seguir:

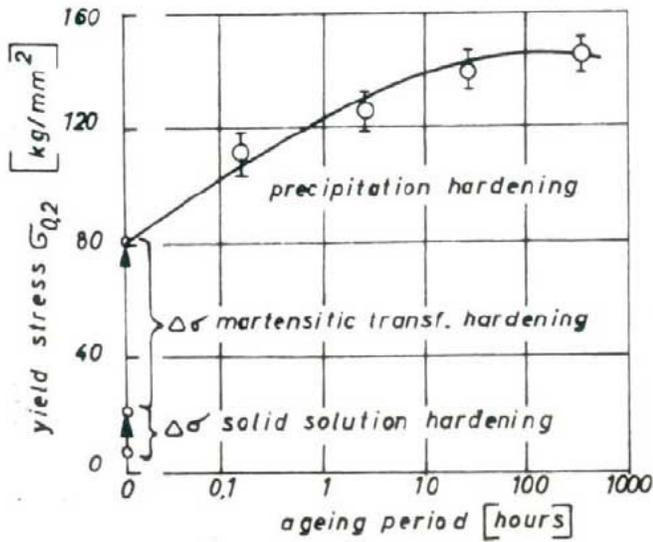


Figura 2- Efeito dos mecanismos de endurecimento em uma liga 27 Ni-12Al

Podemos observar que o endurecimento por precipitação pode representar aproximadamente 45% da tensão de escoamento de uma liga envelhecida [6].

#### 4. - EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA NOS AÇOS MARAGING

Ti

O Titânio parecer ser um dos elementos mais ativos nos aços maraging. Ao final do envelhecimento quase todo Ti encontra-se nos precipitados. Em todos os casos estudados o Ti está presente desde as primeiras etapas do envelhecimento.

Al

Devido à alta afinidade do Al pelo Ni, este elemento está presente na fase Ni<sub>3</sub>Ti. Em alguns aços a adição do Al é realizada para substituir o Ti e baratear o preço, porém ocorre queda da resistência mecânica.

Mo

A precipitação de fases compostas por Mo é muito influenciada pela presença de outros elementos de liga (Co e Ti). Co aumenta a atividade do Mo na matriz. Em aços sem cobalto ocorre o atraso da cinética de precipitação e o principal precipitado é o Ni<sub>3</sub>Ti, o que provoca a necessidade de maior quantidade de Ti. Em aços livres de Ti, o Mo precipita como fase ω.

Si

É considerado usualmente como impureza. Em aços com Cr (corrosão) precipita a fase G (Ti<sub>6</sub>Si<sub>7</sub>Ni<sub>16</sub>) importante endurecedor, porém fragilizante.

Ni

O Níquel possui importante efeito a transformação martensítica de baixo carbono, porém em excesso tende a estabilizar a austenita revertida. Na austenita revertida existe uma maior concentração de Ni que a martensita. Os primeiros precipitados a se formarem no envelhecimento são ricos em Ni e a formação de austenita revertida é mais influenciada pela concentração de Ni na matriz após o envelhecimento do que a concentração na liga.

Co

A principal função do Co é baixar a solubilidade do Mo na martensita e seu emprego é justificado em conjunto com o Mo.

#### 5. - LIGAS SEM COBALTO (COBALT FREE)

O aumento do preço do Cobalto, principalmente após a década de 70, motivou o desenvolvimento de ligas sem cobalto. Neste tipo de liga o teor de titânio é maior, visto que o molibdênio possui menor efeito endurecedor. Estas ligas normalmente possuem a denominação de T-200, T-250 e T-300. Na tabela 2 podemos conferir a composição química comercial destes aços em comparação aos aços maraging com Co.

	Cobalt Base				Cobalt Free			
	C-200	C-250	C-300	C-350	C-400	T-200	T-250	T-300
Aluminum, Al	0.1	0.1	0.1	0.1		0,1	0,1	0,1
Boron, B	0.003	0.003		0.003				
Carbon, C								
Cobalt, Co	8.5	7.5	9	12	15,5			
Iron, Fe	69	68	67	63	76	77,7	77,0	75,6
Manganese, Mn								
Molybdenum, Mo	3.25	4.8	4.8	4.8	11	3,0	3,0	4,0
Nickel, Ni	18.5	18.5	18.5	18.5	13	18,5	18,5	18,5
Phosphorous, P								
Sulfur, S								
Silicon, Si								
Titanium, Ti	0.2	0.4	0.6	1.4	0,2	0,7	1,4	1,9
Zirconium, Zr	0.01	0.01	0.01	0.01				
Hardness, RC	30	50.4	54		59	44	51	55
ULTIMATE, MPa	965	1750	2025	2359	2690	1448	1793	1999
YIELD, MPa	660	1712	1977	2320	2657	1413	1758	1965
Elongation at Break,	17	11	10.3	6.2	5	13	11	10
Reduction of Area, %	75	53.4	46.6	28.6		68	50	53

Tabela 2 – Valores típicos encontrados em aços Maraging

Várias tentativas em substituir o Co pelo Mn foram realizadas, porém sem sucesso, provavelmente devido à segregação de Mn no contorno de grão da austenita. Alguns autores sugerem que a fragilização é provocada não pelo manganês somente, mas pela sua utilização com outros elementos. De qualquer forma ainda não existe consenso sobre o assunto.

O envelhecimento de ligas no sistema Fe-Ni-Mn resultam na formação da fase  $\theta$  NiMn que é fragilizante. Nestes tipos de liga a transformação austenita->martensita não é completa, permanecendo pequena quantidade de austenita retida. Estudos mostraram que a soma Mn+Ti deve estar abaixo de 3,5 % para evitar a precipitação de fases fragilizantes [7].

## 6.- APLICAÇÕES

As principais vantagens dos aços maraging são:

- Altíssima tensão de escoamento e de resistência até 3500 MPa;
- Alta tenacidade à fratura (superior à maioria dos aços);
- Suporta temperaturas de trabalho de até 400°C;
- Boa conformabilidade;
- Usinável antes do tratamento de precipitação;
- Endurecimento realizado a baixo custo com pouca modificação dimensional;
- Não trinca devido a tensões de têmpera;
- Não ocorre descaburação;
- Pode ser nitrocarburado;
- É soldável

A principal desvantagem é o custo do material. Desta forma os aços maraging são aplicados na indústria aeronáutica, aeroespacial, militar, como matriz e ferramentas e na área nuclear.

## 7.- CONCLUSÕES

Os aços maraging possuem excelentes propriedades mecânicas, soldabilidade entre outras características. Muitas tentativas têm sido realizadas no sentido de tentar reduzir o custo da liga, principalmente reduzindo os teores de Cobalto. Apesar de resultados insatisfatórios neste sentido, diversas alternativas continuam sendo estudadas e diversas variações nas ligas comerciais continuam a ser pesquisadas proporcionando um vasto campo de estudo e desenvolvimento.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Méndez , D. , *Una revisión de os aceros Maraging* , revista Ciência Abierta , n **28**, Chile (2000)
- [2] [www.azom.com](http://www.azom.com) - *The Three Most Significant Advances in Alloy Metallurgy Since Federation ( 1901 ) – An Australian Perspective* (2003)
- [3] Sinha, P.P., *Maraging Steel: Lab to launch* , Met News , vol **12** (1) (1993)
- [4] Padial, A.G.F., Monteiro, W.A., Andrade, A.H.P., Ferreira, N. , Thermal Treatment effect on the hot forging Maraging steel 400 microstrutura , 7o Congresso Brasileiro de Microscopia de Materiais (Micromat 2000), São Pedro, **127** (2000)
- [5] Ayub, H., Farooque, M., Ul Haq,A., Okhan,A. , *The formation of reverted austenite in 18% Ni 350 grade Maraging Steel*, Journal of Material Science, **33**, n. 11, p. 2977-2930.
- [6] Cahn, R.W. , *Physical Metallurgy* , 8<sup>th</sup> ed. , Netherlands, (1977)
- [7] Sinha, K., Tharian, T., Sreekumar, K., Nargarajan, K.V., Sarma, D.S., *Effect of Aging on Microstructure and Mechanical Properties of Cobalt Free 18Ni250 Maraging Steel*, Materials Science and Technology, **14**, January (1998),, p. 1-9
- [8] [www.maraging.com/maraging.html](http://www.maraging.com/maraging.html)

