

# A Influência do Teor de Austenita Revertida no Comportamento Mecânico do Aço Maraging 250

Daniel Fonseca da Cunha\*, Alaelson Viera Gomes, Achille Arantes Bassi, Luiz Paulo de Mendonça Brandão  
Instituto Militar de Engenharia (IME)

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

\*danielfonsecacunha@gmail.com

**RESUMO:** *Aços maraging possuem limite de resistência e tenacidade à fratura superiores aos aços convencionais de alta resistência, sendo classificados como aços de ultra-alta-resistência. Tais propriedades advêm da composição desses aços aliada ao processamento termomecânico aos quais são submetidos. Entretanto, durante o tratamento térmico de envelhecimento, a ocorrência de uma fase austenítica conhecida como austenita revertida provoca grande impacto nas propriedades mecânicas do material.*

*A fim de se determinar a influência desta porção de fase austenítica no comportamento mecânico do aço maraging 250, buscou-se analisar neste trabalho o aumento desta fração em função da temperatura de envelhecimento e o decréscimo de dureza atrelada a esse aumento.*

*Para tanto, realizou-se uma análise por Difração de Raios X (DRX) a fim de se determinar a porcentagem das fases presentes no material e ensaios de micro dureza e tração, de acordo com as normas ASTM E384 e ASTM E8/E8M.*

*Por fim, conclui-se que a presença da fase martensítica, presente na liga, é maior do que a prevista para o sistema Fe-Ni, com apreciável decréscimo das propriedades analisadas.*

**PALAVRAS-CHAVE:** *Aço. Maraging 250. Caracterização.*

**ABSTRACT:** *Maraging steels have higher strength and fracture toughness limits than conventional high strength steels and are classified as ultra-high strength steels. Such properties come from the composition of these steels allied to the thermomechanical processing to which they are submitted. However, during aging heat treatment, the occurrence of an austenitic phase known as reversed austenite has a major impact on the mechanical properties of the material.*

*In order to determine the influence of this austenitic phase portion on the mechanical behavior of maraging 250 steel, this work aimed to analyze the increase of this fraction as a function of aging temperature and the decrease of hardness and mechanical strength associated with this increase. For this purpose, an X-Ray Diffraction analysis (DRX) was performed to determine the percentage of phases present in the material and micro hardness and tensile tests according to ASTM E384 e ASTM E8/E8M standards.*

*Finally, it can be concluded that the presence of martensitic phase present in the alloy is higher than expected for Fe-Ni system, with appreciable decrease of the properties analyzed.*

**KEYWORDS:** *Steel. Maraging 250. Characterization*

## 1. Introdução

A principal característica dos aços Maraging 18%Ni é apresentar boas propriedades de tração e de tenacidade para vários níveis de resistência, possuindo um vasto campo de aplicações. Essa característica única é obtida através do endurecimento por precipitação de compostos intermetálicos em uma matriz martensítica tenaz, após um simples tratamento

térmico de envelhecimento. Dentre os compostos intermetálicos formados estão: Ni<sub>3</sub>Mo, Ni<sub>3</sub>Ti, Fe<sub>2</sub>Mo.

Primeiramente o aço é submetido a uma etapa de solubilização ou austenitização por volta de 820 °C com resfriamento ao ar e posteriormente a uma etapa de envelhecimento por volta de 480 °C [1]. Durante tais tratamentos ocorrem transformações de fases que são determinantes para o comportamento mecânico destes aços.

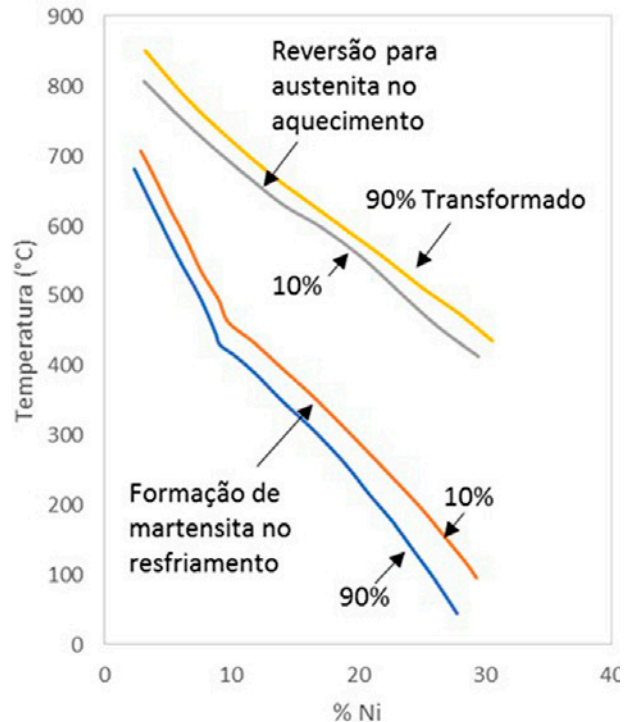
Tais transformações podem ser analisadas a partir do diagrama de fases metaestável do sistema Fe-Ni (**figura 1**), onde podem ser observadas a transformação da austenita para a martensita durante o resfriamento e a transformação reversa da martensita para a austenita no aquecimento.

A martensita formada durante o resfriamento nos aços maraging possui estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), diferentemente da martensita formada no sistema Fe-C que possui estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC).

Esta transformação de fase ocorre por cisalhamento da rede cristalina e não por difusão (adifusional) [2]. Como consequência disso, a martensita gerada possui densidade de discordâncias superior à austenita original, o que aumenta o número de sítios preferenciais para a nucleação de precipitados intermetálicos durante o envelhecimento [3].

Com relação à reversão da martensita em austenita, a mesma ocorre durante o aquecimento, onde a temperatura de início da formação da austenita no aquecimento ( $A_s$ ) e a temperatura de fim da formação da austenita no aquecimento ( $A_f$ ) são bem superiores às  $M_s$  e  $M_f$  (temperaturas de início e fim da transformação martensítica, respectivamente), caracterizando uma histerese no ciclo térmico [4].

A austenita formada nesta transformação é denominada de austenita revertida e seu aparecimento está ligado a exposição a altas temperaturas e tempos prolongados de tratamento térmico de envelhecimento, conhecido como superenvelhecimento. A taxa em que esta reação de reversão ocorre é fortemente dependente da composição do aço maraging e está intimamente ligada a diminuição das propriedades mecânicas destes aços [5].



**Fig. 1** – Diagrama de transformação metaestável no sistema Fe-Ni. Fonte: SILVA; MEI, 2010.

A cinética de formação da austenita revertida é influenciada pelos teores de níquel, cobalto, molibdênio e titânio. Maiores teores de níquel e molibdênio aceleram o processo de reversão, enquanto maiores teores de cobalto e de titânio retardam esta formação [6] e [7].

As propriedades mecânicas dos aços maraging são determinadas a partir dos tratamentos termomecânicos aos quais são submetidos. A **tabela 1** apresenta valores típicos de propriedades mecânicas do aço maraging 250 quando solubilizados a 820°C por 1 hora e envelhecidos a 480°C por 3 horas [8].

**Tab. 1** – Propriedades mecânicas típicas do aço maraging 250 quando solubilizado e envelhecido.

Propriedades	Solubilizado	Solubilizado e Envelhecido
Limite de Escoamento (MPa)	799	1660
Limite de Resistência (MPa)	1010	1690
Deformação total (%)	19	11
Redução de Área (%)	72	50
Dureza (HRC)	29	49

*Fonte:* SILVA; MEI, 2010

De acordo com Schmidt e Rohrbach [2], quanto maior for o limite de resistência menor será a tenacidade a fratura do material, entretanto, estas propriedades são superiores para os aços maraging da classe 18% Ni.

Com relação à dureza, tanto os testes conduzidos na International Nickel Company [1], quanto as análises de Pardal et al [9] apontam para um expressivo ganho de dureza do material quando envelhecido em comparação com somente solubilizado.

Entretanto, o estudo de Pardal et al [9] aponta para um decréscimo de dureza de aços maraging classe 300 quando o tratamento térmico é conduzido a temperaturas mais elevadas que 480 °C e por um longo período de tempo.

## 2. Materiais e métodos

A fim de se determinar o aumento da fração de austenita revertida em função da temperatura de envelhecimento, realizou-se este processo a temperaturas de 480°C, 510°C, 530°C, 550°C e 570°C por um período de 3 horas com posterior resfriamento a ar.

O material analisado encontra-se de acordo com as normas AMS 6512-H [10] e MIL-S-46850-D [11] e foi fornecido pela empresa Villares Metals S.A. Foi produzido em fornos a vácuo pelos processos VIM

e VAR e com composição das amostras, segundo certificado de qualidade fornecido pela referida empresa, detalhada na **tabela 2**.

**Tab. 2** – Composição química do aço maraging 250 fornecido pela Villares Metals S.A.

Elemento	Percentual em Peso (%)	Elemento	Percentual em Peso (%)
C	0,04	Ti	0,47
Si	0,05	Al	0,107
Mn	< 0,01	B	0,018
P	< 0,05	Zr	0,012
S	0,011	Mg	< 0,005
Co	8,49	Ca	< 0,0010
Cr	0,08	N	< 0,0010
Mo	5,2	O	< 0,0010
Ni	18,23	Fe	Rest
Cu	0,02		

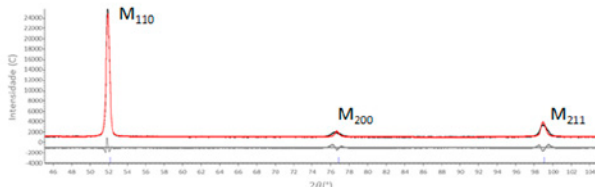
A análise do material se deu através da técnica de Difração de Raios X (DRX), que tem por finalidade determinar as fases presentes no material de acordo com a temperatura de envelhecimento a qual foram submetidos, onde se procurou identificar o aparecimento e a evolução da austenita revertida presente nas amostras atrelado ao aumento de temperatura. Além da microdureza do material, através do ensaio de microdureza Vickers e do ensaio de tração, foi investigada a mudança de propriedades mecânicas em função do tratamento térmico submetido.

## 3. Resultados e Discussões

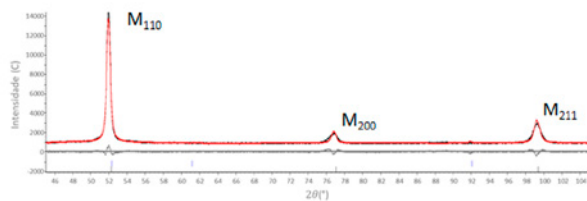
**Tab. 3** – Porção das fases martensíticas e austeníticas presente nas amostras.

Temperatura de Envelhecimento (°C)	Como Recebido	480	510	530	550	570
Martensita (%)	100	96,43	91,07	83,43	76,5	61,38
Austenita Revertida (%)	0	3,57	8,93	16,57	23,5	38,62

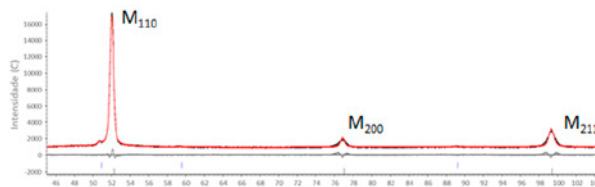
As **figuras 2 a 7** representam o resultado da análise de DRX com os respectivos planos cristalográficos identificados.



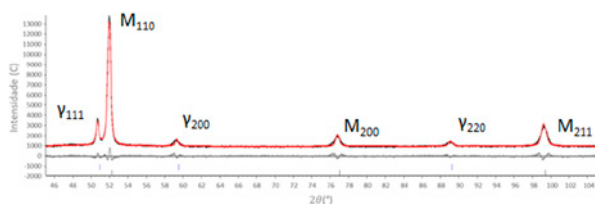
**Fig. 2** – Difratograma do material como recebido.



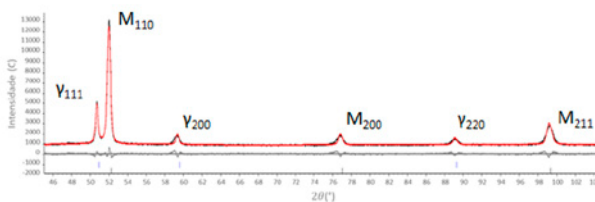
**Fig. 3** – Difratograma do material envelhecido



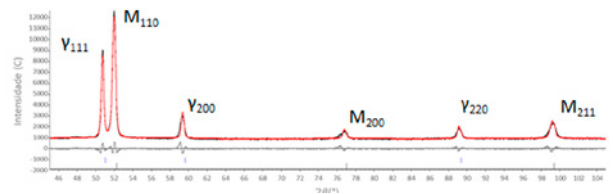
**Fig. 4** – Difratograma do material envelhecido a 510°C.



**Fig. 5**– Difratograma do material envelhecido a 530°C.



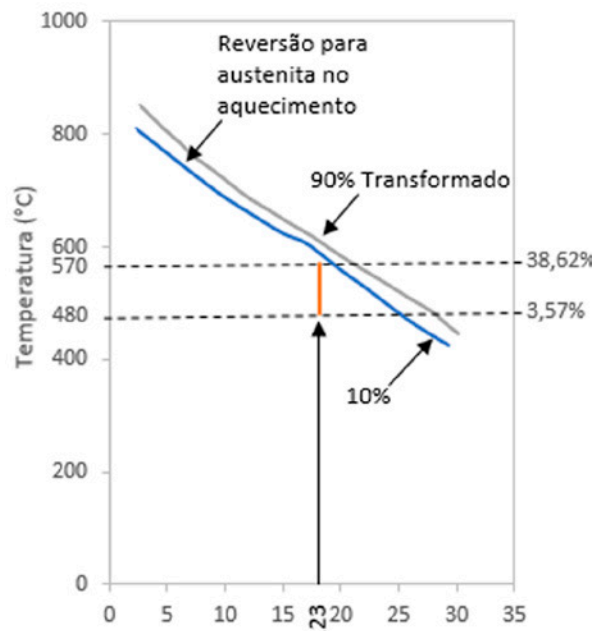
**Fig. 6** – Difratograma do material envelhecido a 530°C.



**Fig. 7** – Difratograma do material envelhecido a 570°C.

Fica evidente o aumento da fase austenítica com o aumento da temperatura de tratamento, através da identificação dos planos (111), (200) e (220).

Fazendo-se uso do diagrama de transformação metaestável do sistema Fe-Ni (**figura 1**), fica evidente que os resultados obtidos se encontram fora da faixa de reversão austenítica, como observado na **figura 8**. Esse fato pode ser explicado através do efeito dos demais elementos de liga e do processo de tratamento térmico empregado, o qual não se utilizou forno com atmosfera controlada.



**Fig. 8** – Fração de austenita revertida e sua relação com o diagrama de transformação metaestável no sistema Fe-Ni. Fonte: Adaptado de SILVA; MEI, 2010.

Com relação ao ensaio de dureza, foi utilizada a técnica de microdureza Vickers segundo a norma ASTM E384 [12], onde foram efetuadas cinco indentações (impressões) em pontos aleatórios em cada amostra com carga aplicada de 0,2 kgf (1,961 N) e duração de 15 s. O ensaio foi realizado com o durômetro Shimadzu modelo HMV-G2 no Laboratório de Ensaio Mecânicos do Instituto Militar de Engenharia (IME).

A **tabela 4** apresenta os valores de dureza obtidos na escala HV.

**Tab. 4** – Medidas de dureza.

Temperatura de envelhecimento (°C)	Dureza (HV)						Mé- dia	Desvio Padrão
480	545	541	541	549	537	542,6	4,56	
510	525	525	529	529	525	526,6	2,19	
530	492	499	499	499	495	496,8	3,19	
550	478	485	485	485	482	483	3,08	
570	429	435	435	429	429	431,4	3,29	
Como recebido	299	297	295	300	297	297,6	1,95	

Os ensaios de tração foram realizados com a máquina universal de ensaio EMIC, modelo EMIC DL10000 com célula Trd 28, no Laboratório de Ensaio Mecânicos do Instituto Militar de Engenharia (IME).

Os corpos de prova possuem as dimensões em concordância com a norma ASTM E8/E8M [13]. Foram testados corpos de prova envelhecidos a 480 °C por 3 horas e como recebidos (somente solubilizados). Tal escolha se baseou na intenção de estimar o ganho de resistência mecânica no melhor cenário de tratamento de acordo com o resultado apresentado nos ensaios de dureza e compará-lo com o resultado do material somente solubilizado.

Foram confeccionados nove corpos de prova de tração e divididos em dois grupos. O grupo

A com 4 amostras recebeu somente o tratamento de solubilização e o grupo B com 5 amostras foi solubilizado e envelhecido a 480 °C por 3 horas.

A **tabela 5** mostra os valores encontrados para os corpos de prova do grupo A. Entretanto, um corpo de prova teve que ser descartado durante o ensaio.

**Tab. 5** – Resultado do Ensaio de Tração para o Grupo A.

	Corpo de Prova 1	Corpo de Prova 2	Corpo de Prova 3	Média	Desvio Padrão
Resistência Mecânica (MPa)	945	931	977	951	24
Limite de Escoamento (MPa)	873	900	657	810	133

A **tabela 6** mostra os valores encontrados para os corpos de prova do grupo B.

Entretanto, para este grupo, um corpo de prova também teve que ser descartado durante o ensaio.

**Tab. 6** – Resultado do Ensaio de Tração para o Grupo B.

	Corpo de Prova 1	Corpo de Prova 2	Corpo de Prova 3	Corpo de Prova 4	Média	Desvio Padrão
Resistência Mecânica (MPa)	1704	1609	1738	1744	1699	62
Limite de Escoamento (MPa)	511	960	1694	971	1034	489

## 4. Conclusão

Após a análise dos resultados, pode-se dizer que a fração de austenita revertida começa a ocorrer a temperaturas em torno de 500° C quando

submetida a 3 horas de tratamento térmico.

As análises de DRX evidenciaram um aumento progressivo da porção de austenita revertida no material associada ao aumento da temperatura de envelhecimento, ocorrendo um aumento mais acentuado acima de 550 °C.

As medidas de dureza do material evidenciaram uma diminuição da dureza das amostras em função do aumento da temperatura de envelhecimento, o que está relacionado ao aparecimento da fase austenítica.

O tratamento térmico de envelhecimento realizado a 480 °C por 3 horas se apresentou como satisfatório, potencializando as propriedades

mecânicas do material e dentre as condições testadas se mostrou a melhor opção de tratamento térmico.

Por fim, pode-se afirmar que embora o aço maraging 250 possua excelente potencial para aplicações que requerem alta performance, a escolha do tratamento térmico ao qual o material será submetido definirá suas propriedades. Como observado nos resultados obtidos, variações na ordem de 20 °C já são suficientes para que se tenha uma grande variação de propriedades mecânicas. Sendo recomendado, portanto, um excelente controle de temperatura na etapa de envelhecimento.

## Referências bibliográficas

- [1] INCO – The International Nickel Company. 18 Per Cent Nickel Maraging Steels: Engineering Properties, Nickel Development Institute, 1976.
- [2] Schmidt, M.; Rohrbach, K.; Heat Treating of Maraging Steels, Heat Treating, ASM Handbook, ASM International, v. 4, p. 219-228, 1991.
- [3] Rohrbach, K.; Schmidt, M.; Maraging Steels. Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM Handbook, ASM International, v.1. p. 1869-1887, 1990.
- [4] Santana, S.I.V. Microestrutura de um Aço Maraging 350 Submetido a Tratamentos Termomecânicos. Tese de Doutorado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2017.
- [5] Rao, M. N. Progress in Understanding the Metallurgy of 18% Nickel Maraging Steels. International Journal of Materials Research, v.11, p.1594-1607, 2006.
- [6] Peters, D. T. A Study of Austenite Reversion During Aging of Maraging Steels. Transactions of ASM, v. 61, p. 62-74, 1968.
- [7] Ahmed, M.; Nasim, I.; Husain, S. W. Influence of Nickel and Molybdenum on the Phase Stability and Mechanical Properties of Maraging Steels. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 3, p. 248-254, 1994.
- [8] Silva, A. L. V. C.; Mei P. R. Aços e Ligas Especiais. São Paulo. Blucher, 2010.
- [9] Pardal, J.M. et al. Influence of Temperature and Aging Time on Hardness and Magnetic Properties of the Maraging Steel Grade 300. Journal of Materials Science. v. 41. p. 2276-2281. 2007.
- [10] SAE – Society of Automotive Engineers. AMS6512 – H: Steel, Maraging, Bars, Forgings, Tubing, and Rings 18Ni – 7.8Co – 4.9Mo – 0,10Al Consumable Electrode Vacuum Melted, Annealed. 2017.
- [11] United States Defense Standard. MIL-S-46850-D: Steel: Bar, Plate, Sheet, Strip, Forgings, and Extrusions, 18 Percent Nickel Alloy, Maraging, 200 ksi, 250 ksi, 300ksi, High Quality. 1991.
- [12] ASTM – American Society for Testing Materials. E384 – 17: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. 2017.
- [13] ASTM – American Society for Testing Materials. E8/E8M – 16a: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 2016.