

DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE AUSTENITA REVERTIDA EM AÇO MARAGING 350 ENVELHECIDO*

Ana Larissa Melo Feitosa¹
Leandro Gomes de Carvalho²
Nelson Batista de Lima³
Angelo Fernando Padilha⁴

Resumo

Os aços maraging são materiais endurecíveis por precipitação usados em aplicações de alta resistência mecânica, com as indústrias aeroespacial e nuclear. O presente trabalho teve como objetivo comparar os métodos de intensidade integrada e Rietveld usados para a determinação da quantidade de austenita formada entre 520 e 600°C em um aço maraging 350. As mudanças microestruturais decorrentes dos tratamentos térmicos realizados foram acompanhadas com o uso das técnicas experimentais complementares, como a difração de raios X, a ferritoscopia, as microscopias óptica e eletrônica de varredura. Os valores de fração volumétrica de austenita determinados pelo método de intensidade integrada apresentaram maior desvio padrão médio do que aqueles obtidos pelo método de Rietveld. A quantidade de austenita revertida aumentou com a temperatura e o tempo de envelhecimento. Além disso, as observações microestruturais evidenciaram que a formação de austenita revertida nas regiões de interface predomina a partir de 520°C, enquanto a austenita encontrada no interior das ripas da martensita é formada a partir de 560°C.

Palavras-chave: Aços maraging; Envelhecimento; Austenita Revertida.

DETERMINATION OF REVERTED AUSTENITE AMOUNT IN AGED MARAGING 350 STEEL

Abstract

Maraging steels are precipitation hardened materials used in high mechanical strength applications such as the aerospace and nuclear industries. The present work had as objective to compare the integrated intensity method and the Rietveld method used to determine the amount of austenite formed between 520 and 600°C in a maraging 350 steel. The microstructural changes resulting from the heat treatments were followed with the use of complementary experimental techniques, such as diffraction x-rays, ferritoscopy, optical and scanning electron microscopes. The values of austenite volumetric fractions determined by the integrated intensity method showed a higher average standard deviation than those obtained by the Rietveld method. The amount of reverted austenite increased with temperature and aging time. In addition, the microstructural observations showed that the formation of reverted austenite in the interface regions predominates from 520°C, while the austenite found inside the martensite laths is formed from 560°C.

Keywords: Maraging steel; Aging Treatment; Reverted Austenite

¹ Engenheira Metalúrgica, mestranda em Eng. Metalúrgica no PMT da EPUSP, São Paulo, SP.
² Dr. Eng. Metalúrgica, Prof. do Inst. Paulista Adventista de Educ. e Assist. Soc., São Paulo, SP.
³ Físico, Dr. Tecnologia nuclear, Pesquisador Titular do CCTM do IPEN, São Paulo, SP.

⁴ *Eng. de materiais, Dr. -Ing., Prof. Titular do PMT da Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP.*

1 INTRODUÇÃO

Os aços maraging são uma classe especial de aços de alta resistência que são endurecidos por reações de precipitação induzidas por elementos de liga, que promovem a formação de fases intermetálicas em uma matriz martensítica, durante o tratamento térmico de envelhecimento [1-3]. Entretanto, temperaturas de envelhecimento maiores que 500 °C podem levar a mudanças nas propriedades mecânicas, como tensão de escoamento e de resistência, ou nas propriedades magnéticas, como campo coercivo e saturação magnética, devido à presença de austenita [1,2,4-9].

A reversão da austenita nos aços maraging é habitualmente atribuída ao enriquecimento local de níquel da matriz cúbica de corpo centrado, devido à dissolução de precipitados do tipo Ni_3X ($X = Mo, Ti$) e à formação de compostos intermetálicos Fe-Mo (Fe_7Mo_6 ou Fe_2Mo) que se tornam coalescidos durante o superenvelhecimento [1,6,10-12]. Além da presença de precipitados grosseiros formados após tempos prolongados de envelhecimento ou temperatura mais alta, a austenita revertida pode apresentar mudanças de morfologia com o aumento da temperatura e do tempo de superenvelhecimento [6,11,13]. Uma delas é a austenita inter-ripas que nucleia nos contornos das ripas da martensita, enquanto o outro tipo de austenita, conhecida como austenita revertida intra-ripas, cresce dentro das ripas da martensita na forma de placas de Widmanstätten com maclas [6,11,13,17].

O acompanhamento da cinética global da austenita revertida pode ser realizado por meio da determinação da fração volumétrica em amostras superenvelhecidas pela análise dos picos de difratograma de raios X (DRX) ou também por mudanças em propriedades magnéticas como o campo coercivo e a saturação magnética, uma vez que a austenita é uma fase paramagnética [4,5,18-21]. Habiby e coautores [22] observaram também que há uma relação entre a quantidade de austenita e a variação das correntes parasitas induzidas em amostras de aços maraging 350.

Apesar dos estudos realizados por Pardal e coautores para o aço maraging 300 [18] e por Peters [23] para alguns aços maraging experimentais abordarem a determinação da quantidade de austenita, usando DRX, em amostras envelhecidas em temperaturas maiores que 500 °C, não foram encontrados trabalhos que fizessem um estudo comparativo do método de Rietveld e do método de intensidade integrada em amostras analisadas por meio de DRX em aços maraging. Dessa forma, nesse trabalho foram comparadas as técnicas de determinação da austenita usando DRX para amostras tratadas entre 520 e 600 °C em um aço maraging 350. Além disso, as amostras também foram analisadas por meio de ferritoscopia.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

As amostras foram obtidas a partir de um tarugo circular de aço maraging 350 com 140 mm de diâmetro fornecido como solubilizado a 820°C, do qual foram cortados discos com 10 mm de espessura. A composição química do material é dada na tabela 1.

Tabela 1. Composição química (% em massa) da barra de aço maraging 350.

Ni	Co	Mo	Ti	Al	S*	C*	O*	N*
18,16	11,92	4,81	1,22	0,074	30	30	8	2,0

* em ppm.

Esse disco foi cortado em amostras de aproximadamente 5 mm x 10 mm x 10 mm para os tratamentos de envelhecimento entre 520 e 600°C por 1 hora ou 18 horas em um forno mufla da marca Grion.

As observações microestruturais foram realizadas usando microscópio eletrônico de varredura (MEV), FEI Quanta 450FEG, em uma tensão de operação de 20 kV. As amostras para o MEV foram polidas mecanicamente e atacadas com o reagente Nital 2%. Já as amostras no estado como recebido foram observadas em um microscópio óptico Olympus BX60M usando o reagente Vilella.

As análises por difração de raios X foram realizadas em amostras tratadas em 520, 560 e 600 °C por 1 hora e 18 horas. Essas análises foram feitas em um difratômetro X'Pert Pro com um passo de 0,020°, tempo para cada passo de 30 s e um intervalo angular 2θ de 40,0° a 100,0°. A radiação CuKα com comprimento de onda de 1,5405 Å foi obtida a partir de uma tensão 40 kV e uma corrente 40 mA. Já o *spinner* foi usado para melhorar a estatística de grão por medida nos padrões de difração de raios X.

Os parâmetros de rede da martensita e da austenita, bem como a fração volumétrica da austenita, foram obtidos com a ajuda de análises de Rietveld usando o *software* GSAS[29], o qual utiliza o método matemático dos mínimos quadrados, enquanto o método de intensidade integrada foi aplicado para a obtenção da fração volumétrica, esse último método utiliza integração dos picos obtidos via difração de raios X para quantificação das fases, a partir da média dos valores estimados por meio dos picos α'(200), α'(211), α'(220), γ(200), γ(220), γ(311) e γ(222), considerando, apenas por simplicidade, fatores de espalhamento e composições químicas iguais nas fases. Essa metodologia foi a mesma empregada por Pardal e coautores [18] para determinar a fração volumétrica para um aço maraging 300. Os resultados obtidos por ambos os métodos foram comparados.

A ferritoscopia geralmente é usada para medir a quantidade de fase ferromagnética, especialmente em aços inoxidáveis austeníticos, duplex e superduplex [30,31]. As medidas de ferritoscopia são baseadas no método da indução magnética [31] e apresentam uma similaridade de funcionamento com o instrumento usado por Habiby e coautores [22] para a detecção da austenita em um aço maraging 350. No presente trabalho, um ferristoscópio Fischer MP3 foi usado para a detecção da austenita revertida nas amostras envelhecidas.

2.2 Resultados e discussão

Este item de resultados e discussão (2.2) foi dividido em três partes principais: caracterização microestrutural no estado como recebido (2.2.1); determinação da austenita em amostras envelhecidas (2.2.2) e, por fim, a caracterização microestrutural em amostras envelhecidas (2.2.3).

2.2.1 Caracterização microestrutural no estado como recebido

As figuras 1a e 1b apresentadas a seguir indicaram que não há a presença de austenita. Na figura 1a, pode-se observar apenas a microestrutura da martensita em

ripas, enquanto no difratograma de raios X, mostrado na figura 1b, não foi possível observar qualitativamente a presença de picos relativos à austenita.

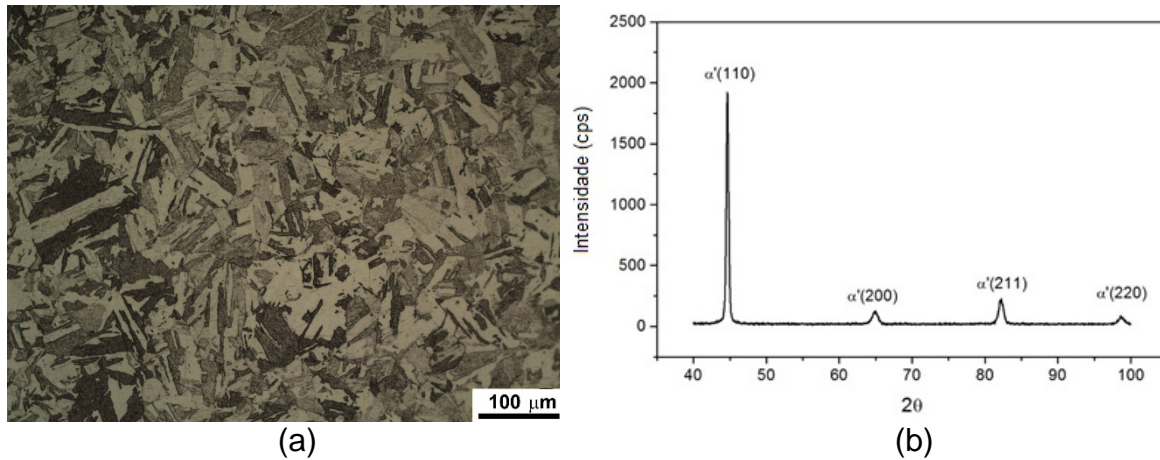


Figura 1. Caracterização da amostra no estado como recebido no aço maraging 350 analisado: (a) micrografia obtida por meio de ataque químico usando reagente Vilella e (b) difratograma de raios X

No item 2.2.2, são apresentados resultados dos diversos métodos usados na determinação da austenita em amostras envelhecidas entre 520 e 600 °C.

2.2.2 Determinação da austenita em amostras envelhecidas

A figura 2 mostra os difratogramas de raios X para as amostras envelhecidas em 520, 560 e 600 °C por 1 e 18 horas.

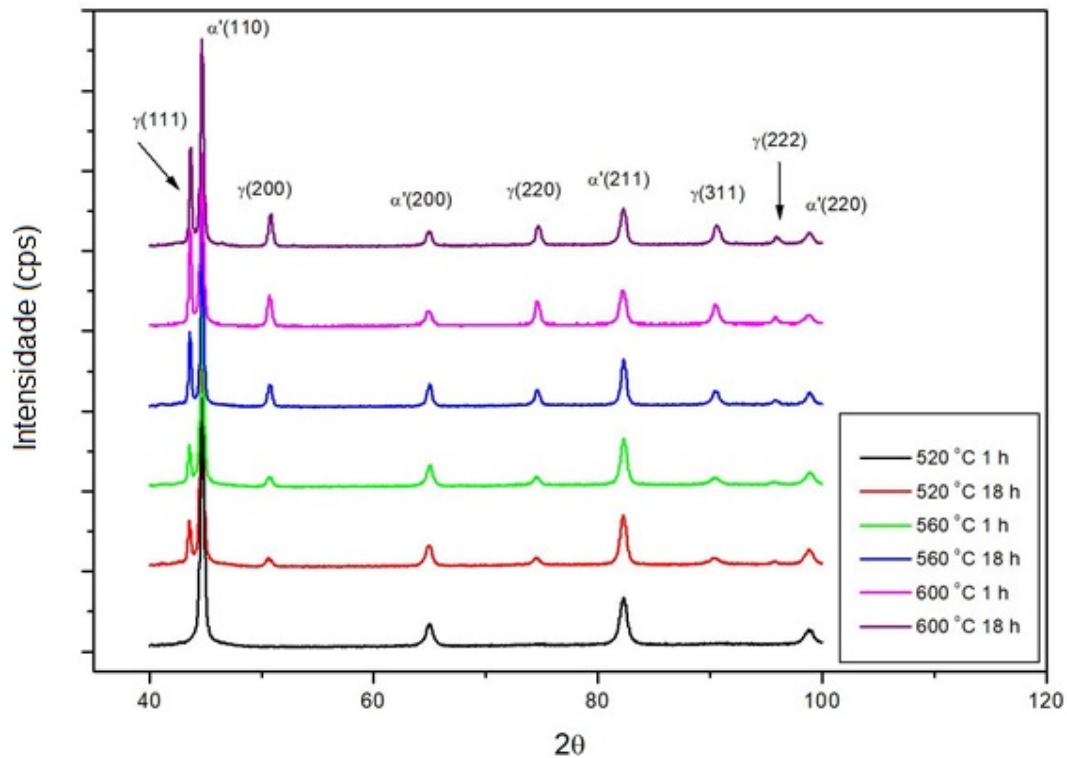


Figura 2: Difratoograma de raios X de amostras no estado como recebido e envelhecidas a 520, 560 e 600 °C por 1 e 18 horas para o aço maraging 350

Os difratogramas de raios X apresentados na figura 2 mostram que, conforme a temperatura e o tempo de envelhecimento aumentam, há a formação de uma quantidade crescente de austenita, o que pode ser visto qualitativamente comparando-se as áreas dos picos da austenita $\gamma(200)$, $\gamma(220)$, $\gamma(311)$ e $\gamma(222)$, em diversas condições de tratamento térmico. Na tabela 2, são apresentados os valores de fração volumétrica obtidos a partir do método de intensidade integrada.

Tabela 2. Valores da fração volumétrica da austenita obtidos por meio do método de intensidade integrada pela comparação entre picos da martensita α' e austenita γ para amostras de aço maraging tratadas a 520, 560 e 600 °C por 1 e 18 horas

Planos para comparar			Fração volumétrica da austenita (%)				
N	γ	α'	520 por 18 h	560 por 1 h	560 por 18 h	600 por 1 h	600 por 18 h
1	200	200	12,8	13,9	25,4	34,6	37,4
2	200	211	11,7	12,7	24,1	32,3	32,2
3	200	220	11,8	14,7	26,0	33,8	32,3
4	220	200	20,5	22,5	34,0	47,7	44,4
5	220	211	18,9	20,7	32,5	45,1	38,8
6	220	220	18,9	23,6	34,8	46,8	38,9
7	311	200	19,9	16,3	35,1	43,7	48,3
8	311	211	18,3	15,0	33,6	41,1	42,6
9	311	220	18,3	17,2	35,9	42,8	42,7
10	222	200	12,1	13,1	26,5	43,2	48,3
11	222	211	11,1	12,0	25,2	40,7	42,6
12	222	220	11,1	13,8	27,2	42,3	42,7
Média (%)			15,5	16,3	30,0	41,2	40,9
Desvio padrão da média (%)			1,1	0,9	1,2	1,1	1,2

A tabela 2 mostra que há variação nos valores da fração volumétrica da austenita obtidos pelo método da intensidade integrada quando se comparam diversos planos da martensita α' e austenita γ . Isso pode ser devido à existência de uma orientação preferencial das fases presentes nas amostras. Todavia, essas variações são minimizadas quando se efetua o cálculo da média e seu respectivo desvio padrão. Os valores da fração volumétrica da austenita, parâmetros de rede da austenita e da martensita calculados a partir do difratograma com base no método de Rietveld e no método de intensidade integrada são apresentados na tabela 3.

Tabela 3. Valores da fração volumétrica da austenita, parâmetro de rede da austenita e da martensita do aço maraging 350 em diversas condições de envelhecimento usando os métodos de intensidade integrada e o método de Rietveld

Tratamento térmico	Método	Fração volumétrica da austenita (%)	Parâmetro de rede da austenita (Å)	Parâmetro de rede da martensita (Å)	Chi ²
520 °C por 1 h	Intensidade integrada	0,0 ± 1,0	-	2,8697 ± 0,0005	-
	Rietveld	0,0 ± 1,0		2,8755 ± 0,0005	3,2
520 °C por 18 h	Intensidade integrada	15,5 ± 1,1	3,5980 ± 0,0005	2,8697 ± 0,0005	-
	Rietveld	14,0 ± 1,0	3,6051 ± 0,0005	2,8749 ± 0,0005	4,2
560 °C por 1 h	Intensidade integrada	16,3 ± 0,9	3,5995 ± 0,0005	2,8660 ± 0,0005	-
	Rietveld	17,0 ± 1,0	3,6042 ± 0,0005	2,8732 ± 0,0005	4,6
560 °C por 18 h	Intensidade integrada	30,0 ± 1,2	3,5973 ± 0,0005	2,8675 ± 0,0005	-
	Rietveld	30,0 ± 1,0	3,6020 ± 0,0005	2,8731 ± 0,0005	3,8
600 °C por 1 h	Intensidade integrada	41,2 ± 1,1	3,5971 ± 0,0005	2,8707 ± 0,0005	-
	Rietveld	36,0 ± 1,0	3,6041 ± 0,0005	2,8765 ± 0,0005	4,3
600 °C por 18 h	Intensidade integrada	40,9 ± 1,2	3,5940 ± 0,0005	2,8694 ± 0,0005	-
	Rietveld	34,0 ± 1,0	3,6002 ± 0,0005	2,8752 ± 0,0005	4,5

A tabela 3 mostra que os valores da fração volumétrica estimada pela intensidade integrada e pelo método de Rietveld são compatíveis em três barras de erro para as amostras tratadas a 520 e 600 °C. Todavia, os valores de parâmetro de rede da austenita e da martensita estimados pelos dois métodos foram incompatíveis em três barras de erro. Quando são comparados os valores do parâmetro da austenita, observa-se que ele diminui com o aumento da temperatura de envelhecimento para tratamentos isócronos entre 520 e 560 °C por 1 hora e 18 horas no método de Rietveld. Esse fato ocorre devido à mudança na composição química da austenita com a temperatura de envelhecimento, como foi observado por Pardal e coautores [18] e por Li e Yin [11], o que minimiza a distorção do parâmetro de rede. Além disso, Pardal e coautores [18] também observaram o aumento da proporção de austenita em um aço maraging 300 devido ao aumento da temperatura e do tempo de envelhecimento.

Já o parâmetro de rede da martensita calculado apresentou uma diminuição com o aumento da temperatura de envelhecimento até 560 °C, como visto na tabela 1, o que pode ser atribuído à precipitação de átomos substitucionais que estavam na rede cristalina supersaturada da martensita, diminuindo a distorção do parâmetro de rede [18,32].

Além da influência das medidas de difração de raios X, as medidas de ferritoscopia foram realizadas também para acompanhar a reversão da martensita como função do tempo e da temperatura de envelhecimento, como apresentado na tabela 4.

Tabela 4. Variação das medidas de ferritoscopia como função da condição de envelhecimento no aço maraging 350 analisado

Tratamento térmico	Como recebido	520 °C por 1 h	520 °C por 18 h	560 °C por 1 h	560 °C por 18 h	600 °C por 1 h	600 °C por 18 h
Medidas de	70,3 ± 2,1	74,5 ± 2,0	69,0 ± 2,0	66,2 ± 2,0	65,1 ± 2,0	47,5 ± 2,0	46,9 ± 2,0

ferritoscopia (u.a.)

A tabela 4 mostra que há um efeito significativo do tempo e da temperatura de envelhecimento nas medidas magnéticas realizadas com o ferritoscópio (m_f), o que pode indicar que a proporção de austenita aumenta, uma vez que a austenita é uma fase paramagnética. Dessa maneira, foi verificada a relação entre as medidas ferromagnéticas realizadas com o ferritoscópio e a fração volumétrica calculada pelo método de Rietveld para a difração de raios X no aço maraging 350, conforme apresentado na figura 3.

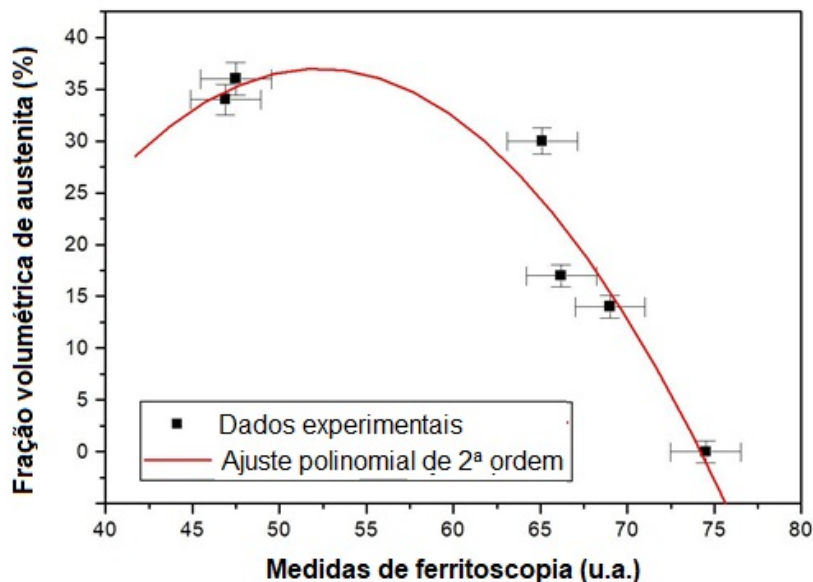


Figura 3. Relação entre as medidas do ferritoscópio e a fração volumétrica de austenita para um aço maraging 350.

O valor do coeficiente de determinação R^2 do polinômio de segunda ordem ajustado foi de 0,94. Esse polinômio ajustado aos dados experimentais que representa relação entre a fração volumétrica da austenita (V_v) e as medidas do ferritoscópio (m_f), é dado pela equação 1.

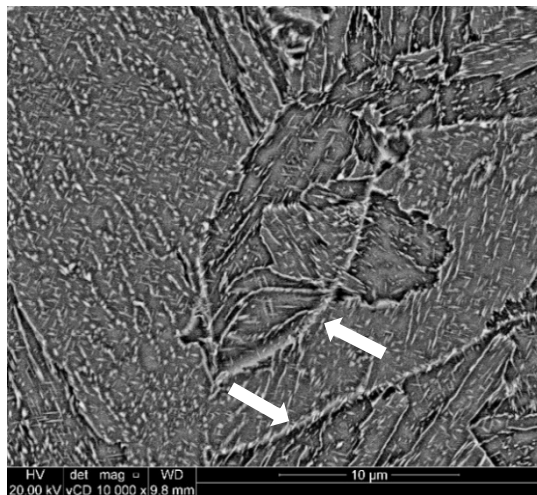
$$V_v = -170.97 + 7.97 m_f - 0.08 m_f^2 \quad (1)$$

Pardal e coautores [5] observaram também que um polinômio de 2º grau ajusta-se melhor aos dados experimentais de saturação magnética e de fração volumétrica, o que foi atribuído às mudanças de composição química da austenita e da martensita, que também influenciam nas propriedades magnéticas. A partir da equação 1, podem-se determinar os valores da fração volumétrica de austenita para diversos tempos de envelhecimento para temperaturas entre 520 e 600 °C.

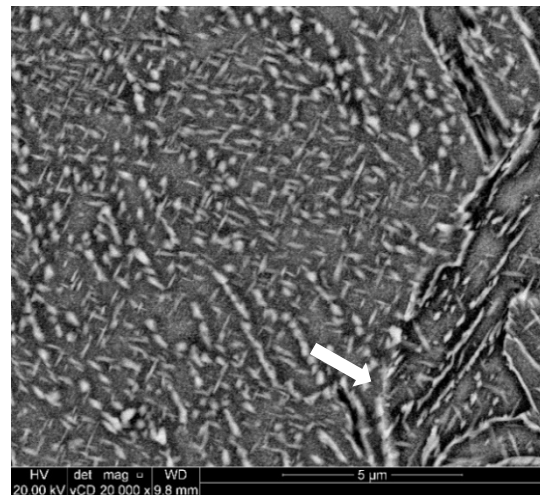
No item 2.2.3, são mostradas micrografias de amostras envelhecidas entre 520, 560 e 600 °C por 18 horas.

2.2.3 Caracterização microestrutural em amostras envelhecidas

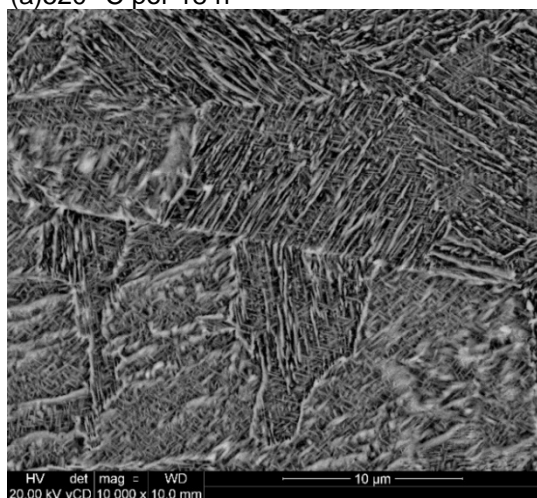
A figura 4 apresenta a microestrutura de amostras tratadas a 520, 560 e 600 °C por 18 horas.



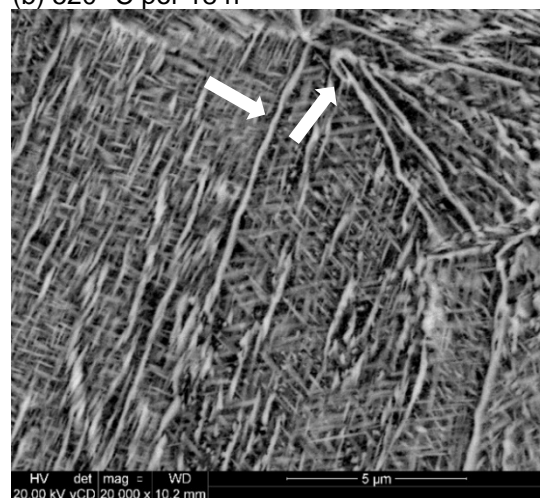
(a) 520 °C por 18 h



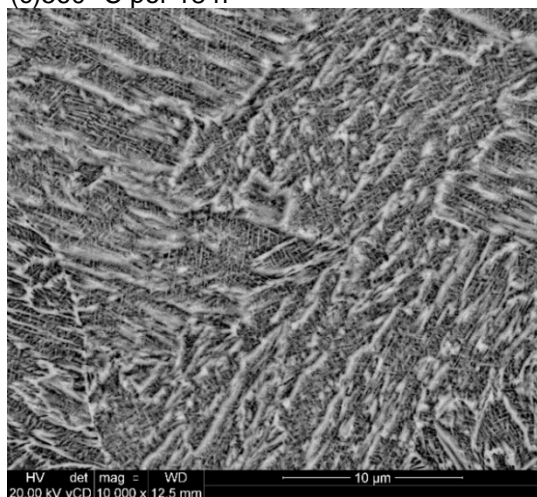
(b) 520 °C por 18 h



(c) 560 °C por 18 h



(d) 560 °C por 18 h



(e) 600 °C por 18 h



(f) 600 °C por 18 h

Figura 4: Micrografias da microestrutura do aço maraging 350 reveladas pelo uso do reagente 2% Nital e obtidas por microscopia eletrônica de varredura, com o uso de elétrons retroespalhados, em amostras envelhecidas por 18 horas a 520, 560 e 600°C

As micrografias relevadas por 2% Nital mostradas nas figuras 4a e 4b evidenciam que há a formação de austenita revertida nas regiões de contornos de ripas e de contornos de pacotes da martensita para amostras envelhecidas em 520 °C por 18

horas (setas brancas). Além disso, no interior das ripas da martensita, pode ser vista a presença de fases com tamanho menor em relação à austenita, apresentando as morfologias elipsoidal, cilíndrica e esferoidal, o que poderia indicar a presença das fases Ni_3Ti , Ni_3Mo e Fe_2Mo [12,13,15].

As figuras 4c e 4d evidenciam a formação de austenita inter-ripas a partir da reversão da martensita (setas brancas). Comparando-se as micrografias obtidas para a amostra tratada a 520°C por 18 horas (vide figura 4a e 4b) e a amostra envelhecida a 560°C por 18 horas, observa-se que a austenita entre as ripas da martensita de amostras superenvelhecidas em 560°C são mais espessas (seta branca) do que aquelas formadas em 520°C . Além disso, a figura 4d mostra que há formação de agulhas de austenita do tipo Widmanstätten no interior das ripas da martensita, bem como a presença dos precipitados intermetálicos menores [6,12,13]. Já as figuras 4e e 4f evidenciam que austenita localizada entre as ripas da martensita são mais grossas do que aquelas formadas em 520 e 560°C por 18 horas (vide figuras 4a, 4b, 4c e 4d). Ademais, as figuras 4e e 4f mostram, que no interior das ripas de martensita, são formadas agulhas de austenita do tipo Widmanstätten, bem como a presença de austenita globular entre as ripas da martensita [6,12,13].

3 CONCLUSÕES

- a) Os valores da fração volumétrica obtidos por difração de raios X foram determinados pelos métodos de intensidade integrada e de Rietveld. De modo geral, eles foram compatíveis entre si em até três barras de erro. Todavia, os valores determinados pelo método de intensidade integrada apresentaram maior desvio padrão médio do que aqueles obtidos pelo método de Rietveld.
- b) Observou-se que a cinética da reversão da austenita é fortemente influenciada pela temperatura e pelo tempo de envelhecimento. A fração volumétrica de austenita revertida para amostras tratadas por 18 h do aço maraging 350 analisado foi de 17%, 30% e 34%, respectivamente, para 520 , 560 e 600°C , usando a medição pelo método de Rietveld.
- c) As medidas de ferritoscopia apresentaram uma relação decrescente com a quantidade de austenita medida por difração de raios X, a qual pôde ser expressa por um polinômio de segunda ordem.
- d) As observações microestruturais com o auxílio de microscopia eletrônica de varredura evidenciaram que a austenita revertida é formada nas regiões de interface, como os contornos de grão, contornos de pacote e contornos de ripas da estrutura martensítica para temperaturas a partir de 520°C , enquanto a austenita revertida encontrada no interior das ripas da martensita é formada a partir de 560°C .

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro a esse trabalho. Além disso, os autores também agradecem à EPUSP, ao CTMSP e ao IPEN pelas facilidades experimentais oferecidas.

REFERÊNCIAS

- 1 Rohit B, Muktinutalapati NR. Austenite reversion in 18% Ni maraging steel and its weldments. *Materials Science and Technology*. 2018;34:253-260.
- 2 Rao MN. Progress in understanding the metallurgy of 18% nickel maraging steels. *International Journal of Materials Research*. 2006;11:1594-1607.
- 3 Sha W; Guo Z. *Maraging steels: modeling of microstructure, properties, and applications*. 1st. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2009.
- 4 Tavares SSM, da Silva MR, Neto JM, Pardal JM, Fonseca MPC, Abreu HFG. Magnetic properties of a Ni–Co–Mo–Ti maraging 350 steel. *Journal of Alloys and Compounds*. 2004;373:304-311.
- 5 Pardal JM, Tavares SSM; Fonseca MC, da Silva MR, Neto JM, Abreu HFG. Influence of temperature and aging time on hardness and magnetic properties of the maraging steel grade 300. *Journal of Materials Science*. 2007;42:2276-2281.
- 6 Viswanathan UK, Dey GK, Sethumandhavan V. Effects of austenite reversion during overageing on the mechanical properties of 18Ni (350) maraging steel. *Materials Science and Engineering A*. 2005;398:367-372.
- 7 Carvalho LG, Plaut RL, Martorano MA, Padilha AF. Study of Age Hardening Behavior in a 350 Grade Maraging Steel. *Characterization of Minerals, Metals, and Materials*. 2015:3-10.
- 8 Carter CS. Fracture toughness and stress corrosion characteristics of a high strength maraging steel. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1971;2(6): 1621-1626.
- 9 He Y, Yang K, Sha W. Microstructure and mechanical properties of a 2000 MPa grade Co-free maraging steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005;36(9):2273-2287.
- 10 Decker RF, Floreen S. Maraging steels – the first 30 years. In: Wilson RK. *Maraging steels: recent developments and applications*. 1st. ed. Warrendale: TMS; 1988. p. 1-38.
- 11 Li X, Yin Z. Reverted austenite during aging in 18Ni(350) maraging steel. *Materials Letters*. 1995;24:239-242.
- 12 Viswanathan UK, Dey GK, Asundi MK. Precipitation hardening in 350 grade maraging steel. *Metallurgical Transactions A*. 1993; 24:2429-2442.
- 13 Farooque M, Ayub H, Ul Haq A, Khan AQ. The formation of reverted austenite in 18% Ni 350 grade maraging steel. *Journal of Materials Science*. 1998;33:2927-2930.
- 14 Carvalho LG, Andrade MS, Padilha AF. A dilatometric study of the phase transformations in 300 and 350 maraging steels during continuous heating rates. *Materials Research*. 2013;16(4):740-744.
- 15 Moshka O, Pinkas M, Brosh E, Ezersky V, Meshi L. Addressing the issue of precipitates in maraging steels–Unambiguous answer. *Materials Science and Engineering A*. 2015;638:232-239.
- 16 Shmulevitsh M, Meshi L, Pinkas M, Shneck RZ. Elastic consideration of the precipitation in model alloys of maraging steels: theory and experimental validation. *Journal of Materials Science*. 2015; 50:4970-4979.
- 17 Atsmon N, Rosen A. Reverted austenite in maraging steel. *Metallography*. 1981;14:163-167.
- 18 Pardal JM, Tavares SSM, Fonseca MPC, Abreu HFG, SILVA JJM. Study of the austenite quantification by X-ray diffraction in the 18Ni-Co-Mo-Ti maraging 300 steel. *Journal of Materials Science*. 2006;41:2301-2307.

- 19 Belyakov LN, Nikol'skaya VL, Ryzhak SS. The $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in maraging steel N18K9M5T. *Metal Science and Heat Treatment*. 1968;10:438-442.
- 20 Habiby F, Ul Haq A, Khan AQ. Influence of austenite on the coercive force, electrical resistivity and hardness of 18% Ni maraging steels. *Materials & Design*. 1992;13:259-264.
- 21 Ahmed M, Ali A, Hasnain SK, Hashmi FH, Khan AQ. Magnetic properties of maraging steel in relation to deformation and structural phase transformations. *Acta Metallurgica et Materialia*. 1994;42:631-638.
- 22 Habiby F, Siddiqui TN, Ul Haq A, Khan AQ. Austenite determination by eddy current measurements in a maraging steel. *NDT & E International*. 1992;25:145-146.
- 23 Peters DT. A Study of austenite reversion during aging of maraging steels. *Transactions of ASM*. 1968;61:62-74.
- 24 Peters DT, Cupp CR. The kinetics of aging reactions in 18 pct Ni maraging steels. *Transactions of AIME*. 1966; 236:1420-1429.
- 25 Pardal JM, Tavares SSM, Terra VF, Da Silva MR, Dos Santos DR. Modelling of precipitation hardening during aging and overaging of 18Ni-Co-Mo-Ti maraging steel 300. *Journal of Alloy and Compounds*. 2005;393:109-113.
- 26 Sinha PP.; Tharian KT, Sreekumar K, Nagarajan KV, Sarma DS. Effect of aging on microstructure and mechanical properties of cobalt free 18%Ni (250 grade) maraging steel. *Materials Science and Technology*. 1998;14:1-9.
- 27 Vasudevan VK, Kim SJ, Wayman CM. Precipitation reactions and strengthening behavior in 18 wt pct nickel maraging steels. *Metallurgical Transactions A*. 1990;21:2655-2668.
- 28 Viswanathan UK, Dey GK, Asundi MK. Precipitation hardening in 350 grade maraging steel. *Metallurgical Transactions A*. 1993;24:2429-2442.
- 29 Larson AC, Von Dreele RB. Gsas. General Structure Analysis System. LANSCE, MS-H805, Los Alamos, New Mexico. 1994.
- 30 Martorano MA, Tavares CF, Padilha AF. Predicting Delta Ferrite Content in Stainless Steel Castings. *ISIJ International*. 2012;52:1054-1065.
- 31 Escriba DM, Materna-Morris E, Plaut RL, Padilha AF. Chi-phase precipitation in a duplex stainless steel. *Materials Characterization*. 2009;60(11):1214-1219.
- 32 Habidy F, Sddiqui TN, Hussain H, Ul Haq A, Khan AQ. Lattice changes in the martensitic phase due to ageing in 18 wt% nickel maraging steel grade 350. *Journal of Materials Science*. 1996; 31:305-309.