

Efeito do tratamento térmico na caracterização microestrutural e das propriedades mecânicas de um aço inoxidável martensítico do tipo 13Cr5Ni0,02C

Eloy Strobel Filho

Mestre pela Universidade São Francisco/PPG-EC
E-mail: strobel_strobel@uol.com.br

Alex Pereira de Lima

Graduando da Universidade São Francisco/Engenharia Mecânica
E-mail: alexdelima@gmail.com

Neide Aparecida Mariano

Professora Associada da Universidade São Francisco/PPG-ECM
E-mail: neide.mariano@saofrancisco.edu.br

Resumo

O controle dos ciclos térmicos, nos tratamentos térmicos de têmpera e revenido, nos aços inoxidáveis martensítico do tipo 13Cr5Ni0,02C, é essencial para se obter boa resistência mecânica associada à resistência à corrosão, principalmente em equipamentos para a extração de petróleo. Corpos-de-prova foram austenizados por três horas a 1025°C, com posterior têmpera ao ar e água e revenido a 680°C por 10 horas e resfriados ao ar. Um segundo grupo de corpos-de-prova foi tratado, termicamente, nas mesmas condições, porém foi realizado alívio de tensão a 150°C por 1 hora e resfriado ao ar. O revenimento aumenta, substancialmente, a tenacidade e a ductilidade e, em alguns casos, sem redução substancial da resistência mecânica. A elevada dureza e resistência da martensita revenida está relacionada à alta relação de área entre os contornos de cementita e da matriz, pois estas agem como barreiras à movimentação das discordâncias, durante a deformação plástica. Dessa maneira, a matriz que é dúctil, é reforçada pela cementita.

Palavras-chave: Tratamento térmico, aço inoxidável martensítico; propriedades mecânicas.

Abstract

The thermal cycle control of heat treatments for the quenching and tempering of martensitic stainless steels, type 13Cr5Ni0,02C, is essential for obtaining the good mechanical resistance which is associated to corrosion resistance, mainly in equipment used in petroleum extraction. Samples were austenized during three hours at 1025°C, with posterior air and water quenching and tempering at 680°C during 10 hours and then, air-cooled. A second sample group was heat treated under the same conditions, but a stress relief was done at 150°C for 1 hour and then, air-cooled. The tempering increases substantially its hardness and ductility and in some cases, without substantial reduction of the mechanical resistance. The great hardness and resistance of the tempered martensite is related to the large area relation between the cementite and matrix contours, because these act as barriers to the dislocation motion during the plastic deformation. In this way, the matrix which is ductile is reinforced by the cementite.

Keywords: Heat treatment, martensitic stainless steels, mechanical properties.

1. Introdução

No início da década de 60, foram desenvolvidos os aços inoxidáveis martensíticos macios (AIMM), com o objetivo de melhorar a resistência mecânica e de corrosão desses materiais, principalmente em relação à necessidade de diminuir os defeitos de solidificação, que ocorriam com frequência nos aços inoxidáveis martensíticos tradicionais.

Os aços inoxidáveis martensíticos são empregados em ambientes onde há exigência de resistência mecânica aliada à resistência à corrosão e dureza. O aço inoxidável martensítico do tipo 13Cr5Ni0,02C, encontrou rápida aceitação na fabricação de componentes de grandes seções, como rotores de turbinas hidráulicas e componentes na indústria química e de petróleo, devido às excelentes combinações das propriedades mecânicas, resistência à corrosão e erosão, acompanhadas de alta temperabilidade.

Nessa classe de aço, o teor de carbono é menor, em relação aos aços inoxidáveis martensíticos convencionais, necessitando da adição de elementos de liga que promovam a estabilização da fase austenítica, como o Ni. A redução do carbono pode-se evitar a precipitação de carbonetos do tipo $Cr_{23}C_6$, trazendo efeitos benéficos à resistência à corrosão desses aços (Newman, 2001).

Dessa forma, as otimizações das propriedades mecânicas e de corrosão se tornaram dependentes da composição química e das temperaturas de revenimento do material.

Entretanto essas propriedades podem ser, seriamente, prejudicadas, em função da precipitação de fases, em geral, ricas em cromo, na temperatura de serviço ou durante o processamento e os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. Assim, os ciclos térmicos aos quais esses aços são submetidos devem ser realizados sob um controle absoluto.

O tratamento térmico desses aços consiste de uma têmpera seguida de um revenido simples, cujas condições são otimizadas para proporcionar ao aço a

resistência mecânica, dureza e tenacidade necessárias.

O tratamento térmico de têmpera consiste no aquecimento do material dentro do campo austenítico, seguido de resfriamento até uma temperatura abaixo da temperatura M_i , rápido o suficiente para obtenção de martensita (Balan et al., 1998; Leslie, 1981; Leem et al., 2001; Rodrigues et al., 2000). A martensita é uma fase metaestável, resultante da transformação da austenita. A martensita é uma solução sólida supersaturada de carbono, de estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), que é uma forma distorcida do ferro α (ferrita). No entanto, em aços com teores de carbono menores que 0,2% C em peso, que é o caso do aço em estudo ($< 0,06\% C$ em peso), não obedece à relação de que, quanto maior o teor de carbono, maior é a tetragonalidade da martensita, assim esse aço tem estrutura cristalina CCC (Krauss, 1999).

Os aços 13Cr5Ni0,02% C são austenitizados entre 950-1050°C, temperaturas na qual ocorrem a dissolução de carbonetos e a decomposição da ferrita delta oriunda do material bruta fusão. A temperatura de austenitização não deve ser muito baixa, pois pode levar a baixos valores de tenacidade, devido à não dissolução dos carbonetos e não deve ser muito alta para evitar o crescimento acentuado dos grãos austeníticos. Objetivava-se, portanto, uma martensita homogênea que resulte em melhores propriedades mecânicas e de resistência à corrosão.

O tratamento térmico de revenido tem por objetivo uma otimização das propriedades mecânicas e tenacidade do aço. E os principais fenômenos relacionados com o revenido são: precipitação de carbonetos; recuperação e recristalização da estrutura martensítica e formação de austenita, que permanece retida, após resfriamento à temperatura ambiente.

Durante o revenido, pode ocorrer a formação de uma seqüência de precipitação, em função do aumento da temperatura de revenido, como: M_3C a 300°C, na faixa 300-400°C, observa-se a presen-

ça de austenita retida, entre 450 e 500°C, há uma precipitação fina de M_7C_3 e início da formação de M_2C , com o aumento da temperatura acima de 500°C, observam-se uma diminuição da quantidade de austenita retida e uma crescente formação de $M_{23}C_6$ ($Cr_{23}C_6$), entre as ripas da martensita revenida (Nalbone, 2000; Iwabuchi; Sawada, 2000).

Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito dos tratamentos térmicos na microestrutura e propriedades mecânicas do aço inoxidável martensítico do tipo 13Cr5Ni0,02% C, de forma que os resultados contribuam para a viabilidade técnico-econômica da utilização do mesmo.

2. Materiais e Métodos

A Tabela 1 apresenta a composição química do aço inoxidável martensítico fundido do tipo 13Cr5Ni0,02C. O aço foi obtido de acordo com a norma ASTM A743-743M-98, a partir do material fundido e vazado em moldes de areia aglomerada com resina fenólica-uretânica, em forma de blocos tipo quilha. A liga foi recebida na condição de bruta de fusão, na forma de corpos de prova cilíndricos de diâmetro de, aproximadamente, 50mm e comprimento de 250mm.

Os corpos-de-prova foram tratados termicamente nas condições: austenitização a 1025°C por 3 horas, com posterior têmpera ao ar, seguidos de revenimento a 680°C por 10 horas e, em seguida, algumas amostras foram resfriadas ao ar e outras em água. Também foi realizado alívio de tensão a 150°C por uma hora com resfriamento ao ar, em algumas amostras. A Tabela 2 apresenta as condições dos tratamentos térmicos empregados.

As amostras foram caracterizadas por microscopia ótica após os tratamentos térmicos, para avaliar a morfologia da microestrutura. Para revelar a microestrutura, foi utilizado um ataque químico por imersão à temperatura ambiente e o reagente químico empregado foi o Vilela (50ml de HCl e 10g de ácido pícrico em 1000ml de álcool etílico).

Os parâmetros mecânicos como limite de resistência à tração (σ_R), limite de escoamento para 0,2% de deformação (σ_E), deformação total no alongamento (ϵ_T) e redução de área (RA), do aço tratado termicamente nas condições A e C foram obtidos através do ensaio de tração. As medidas de dureza foram realizadas em Rockwell C com um mínimo de cinco impressões sobre a superfície das amostras, nas condições tratadas termicamente.

3. Resultados e discussões

As micrografias apresentadas nas Figuras 1a (condição A) e 1b (condição B) são formadas por matriz martensítica, disposta em agulhas muito finas de distribuição homogênea. Nas referidas figuras, também se observa semelhança nas microestruturas obtidas nos tratamentos térmicos de revenido ao ar e em água.

As fotomicrografias apresentadas nas Figuras 2a (condição C) e 2b (condição D) apresentaram microestrutura mais dispersa em relação às amostras que não sofreram tratamento térmico de alívio de tensão. Na condição com alívio de tensão, a martensita está disposta na forma

de ripas paralelas com a mesma orientação cristalográfica, formando blocos.

Pelas características morfológicas apresentadas, foi possível verificar que a forma do resfriamento (ar e água) não influenciou na microestrutura final do material. E, para essas condições, também não ocorreu variação da microestrutura nas seções transversal e longitudinal das amostras.

A Tabela 3 apresenta os resultados de dureza e pode ser observado que não houve variação significativa nos valores obtidos nas seções transversal e longitudinal e a dispersão das medidas foi pequena, demonstrando homogeneidade do tratamento térmico da liga.

Os resultados mostraram que o resfriamento forçado em água, quando comparado com o resfriamento ao ar, no tratamento térmico sem alívio de tensão, não influenciou a dureza do aço de forma significativa. Entretanto, no tratamento térmico com posterior alívio de tensão, o valor da dureza do material foi menor, quando comparado aos sem alívio de tensão. Esse resultado é decorrente da microestrutura da matriz martensítica, que se encontra disposta na forma de ripas paralelas, enquanto que o material sem alívio de tensão apresenta uma matriz martensítica, disposta em agu-

lhas muito finas, promovendo uma dureza maior.

A Tabela 4 mostra os resultados dos ensaios de tração realizados nos aços tratados termicamente sob as condições A, C, no aço recebido com tratado térmico industrial (austenitização por três horas a 1020°C-1050°C, com posterior têmpera ao ar forçado, revenimento por 10 horas entre 670°C-690°C e resfriado sob ar forçado) e também mostra os valores recomendados pela norma ASTM A487/A487M-98. Os valores apresentados representam uma média de três corpos-de-prova para cada condição de tratamento térmico.

Os ensaios de tração foram realizados apenas nas condições A e C dos tratamentos térmicos propostos, por não ter sido observada variação significativa, tanto nas microestruturas, como na dureza das amostras revenidas e resfriadas ao ar e em água. Observou-se que os valores obtidos, para a condição com alívio de tensão, estão mais próximos dos valores recomendados por norma do que a condição sem alívio de tensão.

O revenimento da martensita, após a têmpera, aumentou, sensivelmente, a tenacidade e ductilidade e, em alguns casos, sem redução substancial da resistência mecânica. A elevada dureza e re-

Tabela 1 - Composição química do aço inoxidável martensítico em (% peso).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	W	V
0,02	0,95	0,77	0,028	0,006	12,96	0,85	5,01	0,081	0,091	0,049

Tabela 2 - Condições dos tratamentos térmicos empregados.

Condição	Austenitização / Têmpera ao ar	Revenimento a 680°C por 10 horas		Alívio de tensão
		Resfriamento ao ar	Resfriamento a água	
A	1025°C/3 horas	ao ar	-----	-----
B	1025°C/3 horas	-----	em água	-----
C	1025°C/3 horas	ao ar	-----	150°C/1 hora
D	1025°C/3 horas	-----	em água	150°C/1 hora

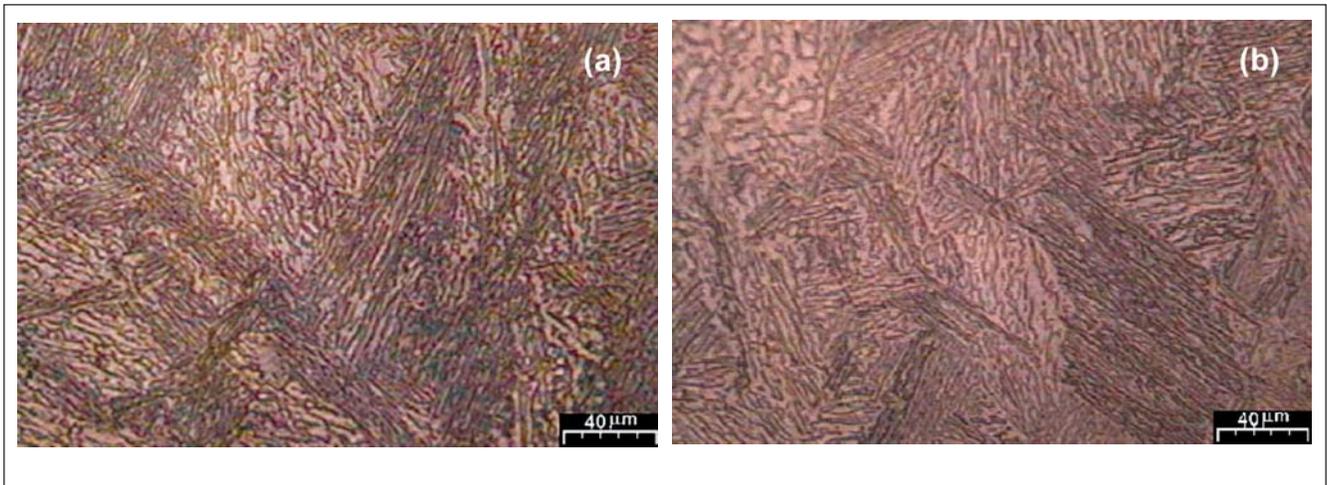


Figura 1 - Micrografias obtidas por microscopia ótica. (a) na condição de revenido, resfriado ao ar e sem alívio de tensão; (b) Na condição de revenido, resfriado em água e sem alívio de tensão. Ataque químico Vilella.

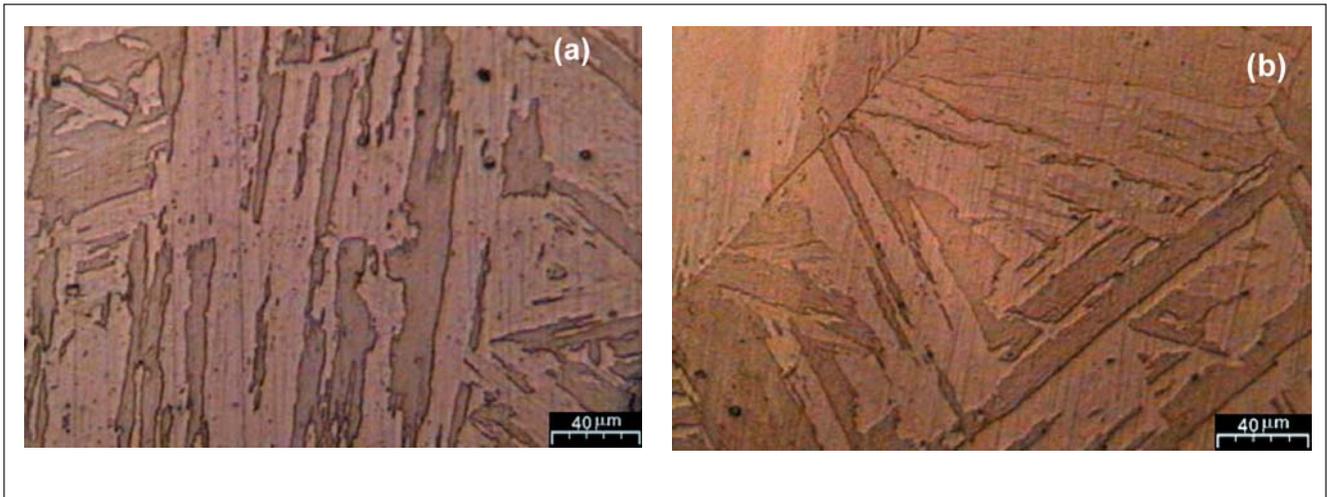


Figura 2 - Micrografias obtidas por microscopia ótica. (a) na condição de revenido, resfriado ao ar e com posterior alívio de tensão; (b) Na condição de revenido, resfriado em água e com posterior alívio de tensão. Ataque químico Vilella.

Tabela 3 - Resultados de dureza do aço inoxidável, em Rockwell C.

Seção da amostra	Tratamentos térmicos			
	A	B	C	D
Transversal	34,7±1,2	33,7±1,0	23,6±1,1	25,7±2,0
Longitudinal	32,0±4,2	29,3±1,5	23,3±1,6	26,0±1,8
Norma ASTM A487M	23			

Tabela 4 - Parâmetros obtidos pelos ensaios de tração.

Tratamento térmico	σ_r MPa	σ_e MPa	ϵ_t %	R.A. %
Condição A	764±29	529±4	15±2	30±4
Condição C	706±59	529±5	18±3	36±2
Revenido tratado termicamente	735	529	15	34
A487/A487M-98	686	519	17	35

σ_r = Limite de resistência, σ_e = Limite de Escoamento, ϵ_t = Alongamento Total, R.A = Redução de área

sistência da martensita revenida está relacionada com a alta relação de área entre os contornos de cementita e da matriz, pois estas agem como barreiras à movimentação das discordâncias, durante a deformação plástica. Dessa maneira, a matriz, que é dúctil, é reforçada pela cementita.

4. Conclusões

As condições utilizadas nos tratamentos térmicos foram adequadas para se obterem a microestrutura, a dureza e as propriedades mecânicas desejadas. O resfriamento do revenimento, seja ao ar ou em água, não alterou a morfologia das microestruturas, nas condições estudadas, porém afetou a dureza do material. A microestrutura do aço 13Cr5Ni0,02C revenido e resfriado ao ar ou água, sem alívio de tensão, foi constituída por uma matriz martensítica, disposta em agulhas muito finas de distribuição homogênea, enquanto que no revenido com posterior alívio de tensão, a martensita está disposta na forma de ripas paralelas com a mesma orientação cristalográfica, formando blocos.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP pelo suporte financeiro ao Projeto de Auxílio à Pesquisa - Processo N° 02/04827-2.

6. Referências bibliográficas

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard specification for steel casting suitable for pressure service.-Designation A487/A487M-98. In: *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Castings, Iron-Chromium, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application.-Designation 743/A743M-98a. In: *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, 1998.
- BALAN, K.P. et al. Austenite precipitation during tempering in 16Cr-2Ni martensitic stainless steels. *Scripta Materialia*, v. 39, n.7, p. 901-905, 1998.
- IWABUCHI, Y., SAWADA, S. Metallurgical characteristics of a large hydraulic runner casting of type 13Cr-Ni stainless steel, *ASTM STP* 756, 2000.
- KRAUSS, G. Martensite in steel: strength and structure. *Materials Science and Engineering*, A273-275, p. 40-57, 1999.
- LEEM, DONG-SEOL et al. Amount of retained austenite at room temperature after reverse transformation off martensite to austenite in an Fe-13%Cr-7%Ni-3%Si martensitic stainless steel. *Scripta Materialia*, v. 45, p. 767-772, 2001.
- LESLIE, W. C. *The physical metallurgy of steels*. McGraw-Hill Series In Material Science and Engineering. 1981.
- NALBONE, C.S. Effects of carbon content and tempering treatment on the mechanical properties and sulfide stress corrosion cracking resistance of AOD-refined CA6NM stainless steel casting, *ASTN STP* 756, 2000.
- NEWMAN, R.C. Understanding the corrosion of stainless steel. *Corrosion*, v.57, n.12, p.1030-1041, 2001.
- RODRIGUES, J.G.G., MARTINEZ, G.B., BRAVO, V.M. Effect of heat treatment on the stress corrosion cracking behavior of 403 stainless steel in NaCl at 95°C. *Materials Letters*, v.43, p.208-214, 2000.

Artigo recebido em 30/07/2006 e aprovado em 05/10/2006.



Rem - Revista Escola de Minas
71 anos divulgando CIÊNCIA.