

# RECRISTALIZAÇÃO DE RIPAS DE MARTENSITA DURANTE TRATAMENTO TÉRMICO DE REVENIMENTO DE AÇOS BAIXA LIGA E ALTA RESISTÊNCIA\*

Vicente Braz Trindade<sup>1</sup>  
Mauro Euclides<sup>2</sup>  
Bruna Rivelli<sup>3</sup>  
Raissa Miranda<sup>3</sup>  
Naiara Garcia<sup>3</sup>  
Eric Bartulic<sup>4</sup>

## Resumo

Tubos sem costura *line-pipe* de aço C-Mn têm um importante papel na indústria de extração e transporte de óleo e gás. Estes tubos sofrem diversas solicitações mecânicas em seu uso sendo expostos a diversos meios. Em um dos estágios de fabricação, o tubo passa por um processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento, onde adquire propriedades importantes para o seu desempenho. Uma dessas propriedades é a dureza ao longo do corpo e da seção transversal do tubo, que é desejável que tenha valores acima de 180 HV10 e abaixo de 230 HV10. Um desvio no tratamento térmico de revenimento provoca a recristalização da martensita, causando pontos de dureza abaixo de 160 HV10. Este trabalho avaliou em quais condições de tempo e temperatura em que a recristalização ocorre. Esta avaliação foi feita através de análises metalográficas via microscopias ótica e eletrônica de varredura e avaliação da dureza. Foi possível concluir que para temperaturas acima de 665°C, em tempos variados, ocorreu a recristalização da martensita em grãos equiaxiais de ferrita. Leituras de microdureza Vickers permitiram identificar os pontos de dureza com valores abaixo de 160 HV10, que estavam localizados próximos as paredes externa e interna das amostras.

**Palavras-chave:** Recristalização da martensita; Baixa dureza; Aços C-Mn; Tratamento térmico.

## RECRYSTALLIZATION OF MARTENSITE LATHS DURING TEMPERING HEAT TREATMENT OF HIGH-STRENGTH LOW ALLOY STEELS

### Abstract

Seamless linepipe steels containing low C-Mn play an important role in the oil & gas industry for extraction and transportation. These pipes are submitted to severe mechanical loading as well as exposed to aggressive environments. During manufacturing, usually the pipes are submitted to quenching and tempering heat treatment in order to adjust the mechanical properties and hardness. This last one, is a very important parameter in order to select material for sour service application, therefore, it is usually requested values in the range of 180 HV10 to 230 HV10. However, deviation on the tempering conditions can cause a drop on the hardness lower than 160HV10, due to the recrystallization phenomenon of the martensite. In this paper, it was evaluated the conditions of tempering, time and temperature, for which the recrystallization of the martensite laths occurs. The evaluation was done through metallographic analysis using light and scanning electron microscopy as well as hardness measurements. It was possible to conclude that the recrystallization of martensite for temperature higher than 665°C for different heat treatment times

occur. It was observed that the hardness dropped locally on regions close to the inner and outer pipe surface.

**Keywords:** Martensite recrystallization; Low hardness; C-Mn steels; Heat treatment.

- <sup>1</sup> *Engenharia Metalúrgica, PhD, Professor, Departamento de Metalurgia e Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*
- <sup>2</sup> *Engenharia Metalúrgica, Bacharel, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.*
- <sup>3</sup> *Estudante de Engenharia Metalúrgica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.*
- <sup>4</sup> *Engenharia Metalúrgica, Mestre, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Tsuchiyama et. al [1], investigaram a ocorrência de recristalização durante o revenimento de ripas de martensita em aços baixo carbono (LC) e ultra baixo carbono (ULC), através de testes de dureza, microscopia eletrônica e microscopia ótica. Utilizou também o parâmetro de revenimento,  $T(\log t + 20)$ , para plotar as durezas das amostras após o tratamento térmico de revenimento afim de mapear a ocorrência de recristalização. Através de observações microestruturais, concluíram que no aço ultra baixo carbono, a recristalização da martensita ocorre pelo mecanismo de “nucleação e crescimento” a partir da densidade de discordâncias da martensita. No aço com baixo teor de carbono observou-se a ocorrência de uma normalização dos grãos, resultando na não recristalização.

Os aços LC e ULC no estado temperado apresentaram uma microestrutura martensita típica, composta por agulhas e placas. A dureza das amostras, na condição temperada, foi de 394 HV no aço LC e 270 HV no aço ULC. Foi observado que a dureza do aço LC diminui gradualmente a medida que o corre a recuperação da martensita, porém não ocorre a recristalização. O aço ULC demonstra um decaimento abrupto quando o parâmetro de revenimento tem o valor em torno de 19300 (973 K a 2,7 Ks) e depois mantém-se constante em um valor de 120HV. Esse comportamento de decaimento abrupto da dureza é semelhante ao encontrado em aços fortemente deformados a frio, quando sofrem recristalização [2,3].

Natori et. al. [2], comparou, através do parâmetro de revenimento a suscetibilidade a recristalização de um aço com estrutura 100% martensítica e um aço 100% ferrítico severamente deformado a frio, até possuir um grau de densidade de discordâncias igual ao grau ao aço martensítico. Medidas de dureza evidenciaram o fenômeno de recristalização. Atribui-se a maior suscetibilidade do aço ferrítico deformado ao fenômeno de recristalização devido ao fato de possuir contornos de grãos deformados de forma induzida pela deformação a frio, sendo esses contornos mais longos, quando comparado com os grãos martensíticos. Os contornos de grãos ferríticos apresentam maior ângulo entre si com distribuição mais heterogênea. Observou-se claramente o fenômeno de recristalização de ripas de martensita durante o revenimento do aço martensítico quando a queda brusca da dureza para o parâmetro de revenimento em torno de 19500.

O objetivo deste trabalho foi estudar o fenômeno da recristalização da martensita durante o tratamento térmico de revenimento de aços C-Mn usados na fabricação de tubos sem costura para a indústria de óleo&gás.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Os três aços utilizados nesse estudo, são aços baixo carbono com diferentes teores de elementos de liga, denominados Aço 1, Aço 2 e Aço 3. A composição química de cada aço é mostrada na tabela 1.

**Tabela 1.** Faixa de composição química (% em massa) dos três aços estudados.

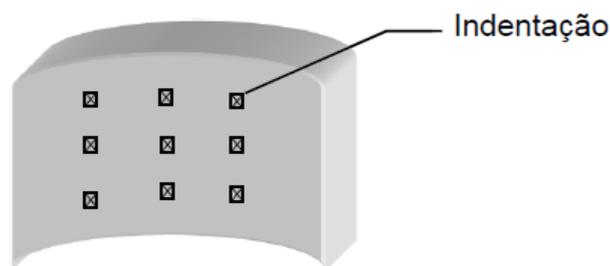
Elementos	Aço 1	Aço 2	Aço 3
C	0,05 - 0,08	0,06 - 0,09	0,06 - 0,09
Mn	0,80 - 1,0	1,2 - 1,6	1,2 - 1,6
Mo	≤ 0,08	≤ 0,14	≤ 0,12
Ti + V + Nb	≤ 0,07	≤ 0,07	≤ 0,07
Pcm <sup>(1)</sup>	≤ 0,19	≤ 0,21	≤ 0,20

$$C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (1)$$

As amostras foram retiradas de tubos sem costura laminados a quente e posteriormente tratados termicamente. No tratamento térmico, os tubos são primeiramente austenitizados. A temperatura de austenitização para os três aços foi de 900°C por 20 minutos. Logo após a austenitização, receberam tratamento térmico de têmpera, com resfriamento em tanque de água, com a taxa de resfriamento mais elevada nas paredes externa e interna, onde jatos de água são aplicados. A têmpera foi realizada em condições industriais e o revenimento realizado em condições laboratoriais usando diferentes temperaturas e tempos de tratamento.

A temperatura do forno de revenimento, em laboratório, foi monitorada com o auxílio de dois termopares fixados nos corpos de prova. As temperaturas de revenimento foram 640°C, 650°C, 655°C, 660°C, 665°C, 670°C, 680°C e 690°C com diferentes tempos de tratamento, como 0,5h, 0,75h, 1h, 1,25h, 1,5h e 2h, 2,5h. Para cada combinação de temperatura e tempo foram realizados 5 corpos de prova.

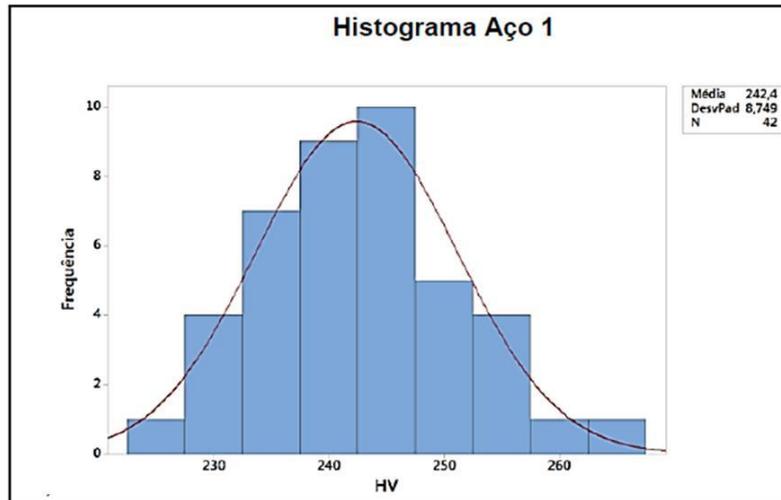
Após a confecção e identificação, os corpos de prova foram submetidos a preparação para ensaio de dureza, passando por lixamento em lixas d'água com granulometria 180, 320 e 600, subsequentes e nesta ordem. Para o ensaio de dureza Vickers (HV10) nove leituras com espaçamento de 6 mm entre as indentações, foi aplicado nos corpos de prova no estado como temperado e após revenimento, como mostra esquematicamente a Figura 1.



**Figura 1.** Figura esquemática das posições das medidas de dureza Vickers (HV10) na seção transversal da amostra do tubo.

Análise metalográfica utilizando microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura foram realizadas em todos os corpos de prova após têmpera e após revenimento. Os corpos de prova foram preparados para ensaios metalográficos passando por um circuito de lixamento em lixas d'água de granulometria 180, 320, 600 e 1500, subsequentemente nessa ordem. Após a etapa de lixamento os corpos de prova foram lavados com água e detergente líquido neutro. Em seguida polidos utilizando uma politriz metalográfica em usando pasta de diamante com granulometria 1µm como abrasivo. As amostras polidas foram enxaguadas com álcool etílico (99,5%) e secadas ao ar quente.

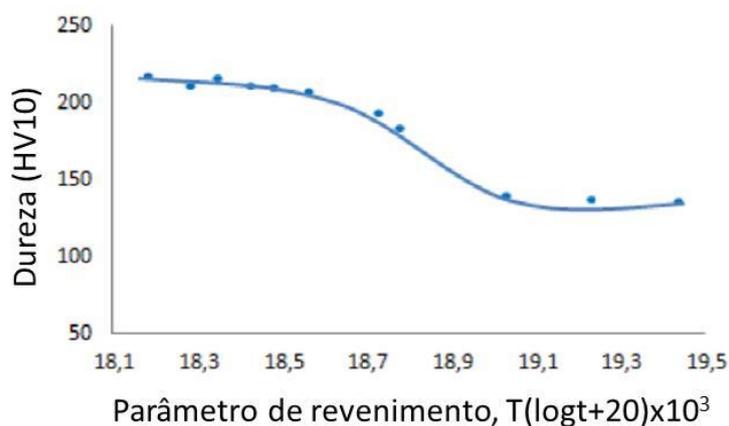




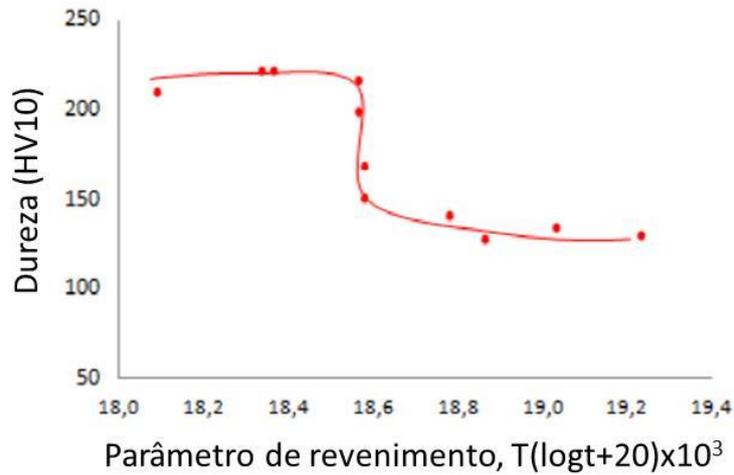
(b)

**Figura 3.** (a) Microestrutura do aço 1 no estado como temperado, M=Martensita e B=bainita e (b) distribuição de dureza de vários corpos de prova no estado como temperado.

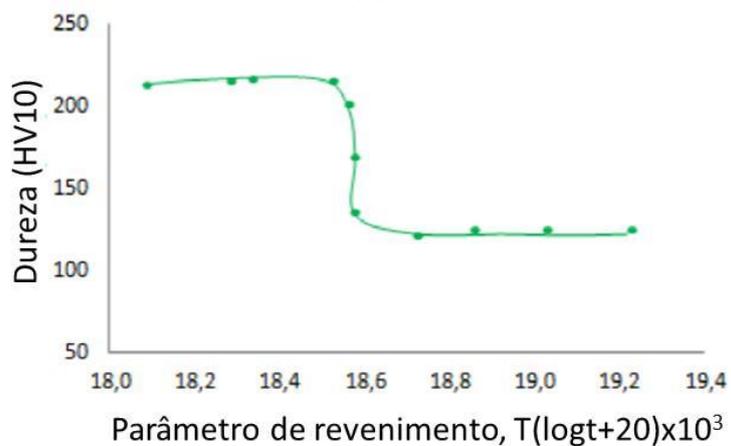
Tsuchiyama et al. [1] relacionou os valores de dureza Vickers com o parâmetro de revenimento, que foi definido como  $T(\log t + 20) \times 10^3$ . Onde T é a temperatura de revenimento e t é o tempo de revenimento. Através desta relação pode-se avaliar o fenômeno da recristalização de ripas de martensita. Observa-se na Figura 4 uma queda abrupta dos valores de dureza em função do parâmetro de revenimento. Para os três aços nas condições de temperaturas de 630°C, 640°C e 645°C e para todos os tempos de tratamento estudados não houve recristalização. Já para as temperaturas de 650°C, 655°C, 660°C e 665°C, com tempo de revenimento igual ou inferior a 45 minutos também não apresentaram recristalização. Nas condições 655°C (60, 90 minutos), 670°C (30, 60, 90 minutos) e 680°C (30, 60, 90 minutos) foi observado o fenômeno da recristalização. Como esperado, os menores valores de dureza foram registrados próximos às paredes externa e interna dos corpos de prova, locais onde ocorre a formação de ilhas de martensita durante a têmpera.



(a)



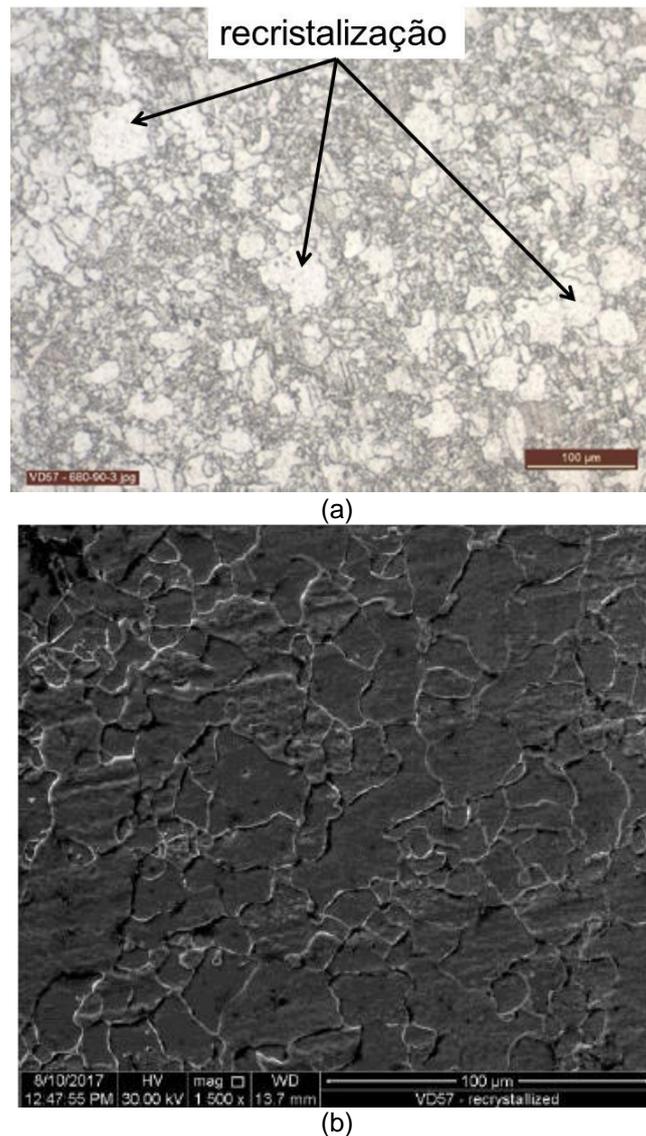
(b)



(c)

**Figura 4.** Dureza versus parâmetro de revenimento para cada aço. (a) Aço 1, (b) Aço 2 e (c) Aço 3.[4]

As microestruturas características das amostras que apresentaram dureza, ao longo do corpo de prova, menor que 160 HV apresentaram grãos equiaxiais ferríticos, evidenciando a ocorrência de recristalização da martensita, como pode-se observar na Figura 5. Os Aço 2 e Aço 3 possuem comportamento semelhantes quanto a tendência a sofrer recristalização, isto se deve ao fato de possuírem composição química semelhante. O Aço 1 possui composição química diferente dos demais, com baixos teores de elementos de liga, por exemplo molibdênio, e é menos suscetível ao fenômeno de recristalização.



**Figura 5.** Microestrutura característica do Aço 3 (próximo à superfície externa) após revenimento usando parâmetro de revenimento maior que 18700. (a) microscopia ótica e (b) microscopia eletrônica de varredura.

#### 4 CONCLUSÃO

A microestrutura na região da parede externa e interna apresentou-se como sendo de grãos ferríticos equiaxiais de tamanho variando de acordo com o tempo e temperatura de revenimento.

O parâmetro de revenimento mostrou-se ser confiável como guia para se alcançar o nível de dureza desejado, conhecendo a temperatura de trabalho é possível se conhecer o tempo máximo de permanência no forno de revenimento e vice-versa.

Demonstrou-se que o fenômeno de recristalização ocorre durante o tratamento térmico de revenimento de aços baixo carbono tipo line-pipe. A composição química tem influência sobre o valor máximo do parâmetro de revenimento, em que o fenômeno da recristalização pode ser evitado.

Devido ao baixo teor de carbono de aços ULC, a temperabilidade também é muito baixa e durante o tratamento térmico de têmpera, dependendo da espessura de parede do tubo, haverá formação de martensita apenas nas regiões próximas à superfície externa e superfície interna. Portanto, o fenômeno da recristalização acontece apenas nesta região, pois nas outras regiões (em direção ao meio da parede) não há formação de ilhas de martensita.

## REFERÊNCIAS

- 1 TSUCHIYAMA, T et al. *Recrystallization of Lath Martensite with Bulge Nucleation and Growth Mechanism*. ISIJ International, Vol. 41, No. 9, pp. 1047–1052, 2001.
- 2 NATORI, Masahide et al. *Difference in recrystallization behavior between lath martensite and deformed ferrite in ultralow carbon steel*. Scripta Materialia, vol. 53, 603-608, 2005.
- 3 LU, Yuan et al. *The effect of carbon content on the c/a ratio of as-quenched martensite in Fe-C alloys*. Materials Science and Materials Engineering, Worcester, MA, USA, 2017.
- 4 Silva, Mauro. *Análise do fenômeno de recristalização durante tratamento térmico de revenimento em aços C-Mn baixo carbono*. Monografia apresentada no curso de Engenharia Metalúrgica do IFMG-Ouro Branco, 2017.