

O EFEITO DA TEMPERATURA DE TRATAMENTO TÉRMICO INTERCRÍTICO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AISI 41B30H¹

Geovani Rodrigues²
Joelson de Moraes Andrade³
Luiz Carlos Rolim Lopes⁴
Luciano Pessanha Moreira⁴
Flávio Ferreira⁴
Adriano de Senne⁵

Resumo

O aço AISI 41B30H é um dos materiais utilizados na fabricação de cilindros para armazenamento de gás natural veicular, que normalmente são produzidos pelo processo de extrusão rotativa a partir de um tubo de aço sem costura. Neste trabalho, as propriedades mecânicas do aço AISI 41B30H, tratado termicamente em diferentes temperaturas na região intercrítica, foram medidas e comparadas com aquelas deste aço na condição de normalizado. A partir da região intercrítica, determinada pelo software THERMOCALC, o aço foi temperado de forma a obter uma estrutura bifásica formada por diferentes frações volumétricas de ferrita e martensita. Os resultados obtidos pelos ensaios de tração uniaxial indicaram que o aço bifásico AISI 41B30H tratado termicamente possui melhores propriedades de conformação do que aquele na condição normalizado.

Palavras-chave: Aço AISI 41B30H; Tratamento térmico; Conformação mecânica; Extrusão rotativa.

THE EFFECT OF THE INTERCRITICAL HEAT –TREATMENT TEMPERATURE IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE AISI 41B30H STEEL

Abstract

The AISI 41B30H steel is one of the materials used to produce cylinders for storing natural gas for vehicles, normally produced by flow forming of seamless tube steel. In this work, the mechanical properties of AISI 41B30H steel, heat-treated in the intercritical region, have been studied and compared with those of the material in the normalized condition. From the intercritical region, determined by THERMOCALC software, the steel was quenching to produces a dual-phase microstructure formed by different volume fractions of the ferrite and martensite. The results, obtained by tensile tests, indicated that the performance of the heat-treated dual-phase AISI 41B30H steel in forming operation will be better than those as-received normalized material.

Key-words: AISI 41B30H steel; Heat treatment; Mechanical forming; Flow forming

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Pesquisador/DTI – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda/UFF

³ Aluno de iniciação científica – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda/UFF

⁴ Professor - Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda/UFF

⁵ Engenheiro Mecânico – Gerente de Tecnologia e Qualidade- WHITE MARTINS/PRAXAIR

1 INTRODUÇÃO

O aço AISI 41B30H é usado na produção de cilindros para armazenamento de gás natural veicular (GNV). Esses vasos de pressão são produzidos pelo processo de extrusão rotativa, a partir de um tubo de aço sem costura, onde se reduz a espessura da parede do tubo e aumenta-se o seu comprimento. O fechamento de suas extremidades é realizado por meio de um processo de conformação a quente, denominado “spinning”. O processo de extrusão rotativa foi avaliado teoricamente e experimentalmente em vários trabalhos.⁽¹⁻⁸⁾ As deformações mecânicas no processo de extrusão rotativa de tubos foram estudadas por Singhal, Kalpakcioglu, Hayama e Kobayashi,⁽⁹⁻¹²⁾ onde por meio de modelos analíticos foi possível prever a energia necessária para o processo de conformação, a influência de parâmetros mecânicos como velocidade de avanço dos rolos, porcentagem de deformação, ângulo dos rolos, entre outras. Além das propriedades mecânicas, as propriedades metalúrgicas como microestrutura, pureza da liga e composição química influenciam mutuamente o processo de conformação e apesar de sua importância não são muito estudadas.⁽¹³⁾

A produção de cilindros para armazenamento de GNV envolve um grande número de etapas, começando pela caracterização do material de partida, corte do esboço, processo de extrusão rotativa, fechamento das extremidades pelo processo de “spinning”, ciclos de tratamentos térmicos, testes de pressão, etc. No processo de extrusão rotativa, é interessante que o material apresente baixa tensão de escoamento, alto limite de resistência à tração e alto alongamento total.⁽¹⁴⁾ Além destas propriedades mecânicas iniciais, as propriedades mecânicas finais são de fundamental importância para a avaliação da resistência do produto em serviço. De fato, as propriedades mecânicas finais do cilindro para armazenamento de GNV, são obtidas durante o processo de conformação e durante os tratamentos térmicos impostos ao material inicialmente no estado normalizado.

O objetivo deste trabalho é estudar a possibilidade de se projetar uma microestrutura capaz de melhorar a conformabilidade do aço AISI 41B30H. Assim, tratamentos térmicos foram realizados sobre amostras deste material, de modo a se obter uma microestrutura bifásica, composta de uma mistura de ferrita e martensita e as propriedades de conformação resultantes foram analisadas.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A região intercrítica para o aço AISI 41B30H foi determinada por meio da termodinâmica computacional, utilizando o programa THERMOCALC. As simulações foram realizadas considerando um aço com 0,3 % C e a influência de seus principais elementos de liga, de acordo com a composição química mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço AISI 41B30H

| | C | Mn | Si | Ni | Cr | Mo | Cu | Nb | B | P | S |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|-------|------|
| Mínimo | 0,28 | 0,40 | 0,15 | 0,20 | 0,80 | 0,15 | - | 0,010 | 0,0005 | - | - |
| Máximo | 0,33 | 0,60 | 0,35 | 0,30 | 1,10 | 0,25 | 0,35 | 0,030 | 0,002 | 0,015 | 0,01 |

As simulações permitiram a determinação da região intercrítica do diagrama de fases, onde a ferrita e a austenita se encontram em equilíbrio. Desta forma, foi encontrada uma faixa das possíveis temperaturas para os tratamentos térmicos intercríticos. A partir destes resultados foi possível obter soluções analíticas, por meio de regressões lineares, que definem as frações volumétricas de ferrita e austenita em função da temperatura de tratamento térmico intercrítico. Estes resultados foram validados por meio de metalografia quantitativa.

Para a realização dos tratamentos térmicos, amostras do aço AISI 41B30H foram temperadas a partir de diferentes temperaturas, de acordo com a região intercrítica determinada pela simulação computacional. Amostras do aço AISI 41B30H foram retiradas de um tubo na condição de normalizado (ou como recebido) e tratadas a 737°C, 744°C, 754°C, 767°C e 782°C por 30 minutos, temperadas em óleo, revenidas a 610°C por 30 minutos e resfriadas ao ar. Para as análises metalográficas, as amostras foram embutidas a quente, lixadas com lixas de carbetto de silício (N^{os}. 200-4000), polidas com suspensão de alumina e quimicamente atacadas com solução de Nital. A determinação das frações volumétricas de ferrita e martensita foi realizada por metalografia quantitativa, utilizando um microscópio óptico Carl-Zeiss equipado com uma câmera digital e um sistema de análises de imagens Image-Pro-Plus.

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM A370 usando uma máquina de ensaio WOLPERT com capacidade de 20 t. As propriedades mecânicas obtidas com os testes de tração foram: expoente de encruamento, tensão de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento total.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio do software THERMOCALC foram obtidas, a região do diagrama de fases onde a ferrita e a austenita se encontram em equilíbrio e as frações volumétricas de ferrita e austenita em função da temperatura, as quais são mostradas nas Figuras 1 e 2, respectivamente. Na figura 1 pode-se observar que a faixa de temperatura para tratamentos térmicos intercríticos está entre 720°C e 790°C.

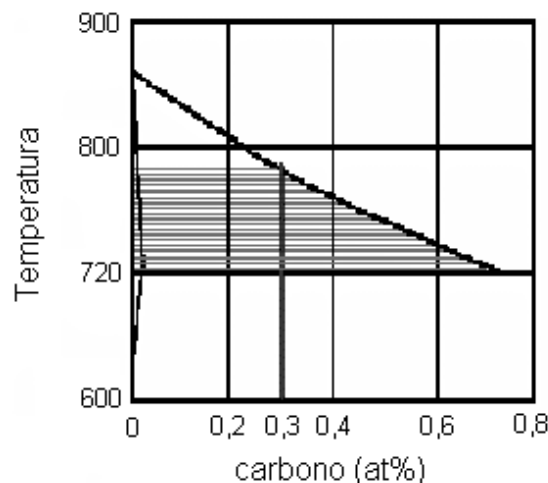


Figura 1. Intervalo de temperatura da região intercrítica do aço AISI 41B30H, obtida com o auxílio do programa THERMOCALC.

A Figura 2 mostra as frações volumétricas de ferrita e austenita, obtidas com o auxílio do programa THERMOCALC. Como esperado, com o aumento da temperatura de tratamento térmico intercrítico tem-se uma diminuição da fração volumétrica de ferrita e um aumento na fração volumétrica de austenita. Entretanto, observa-se que a maior razão de formação de austenita em função da temperatura, se dá em um pequeno intervalo entre 720°C e 736°C, onde com o aumento de apenas 16°C a fração volumétrica de austenita passa de 0% para 50% em volume. Após este intervalo, nota-se uma significativa diminuição nesta taxa, pode-se observar que para a austenitização completa, ou seja, a formação de mais 50% em volume de austenita, é necessário um aumento de 54 °C, onde a fração volumétrica de austenita aumenta de 50% em 736°C para 100% em 790 °C.

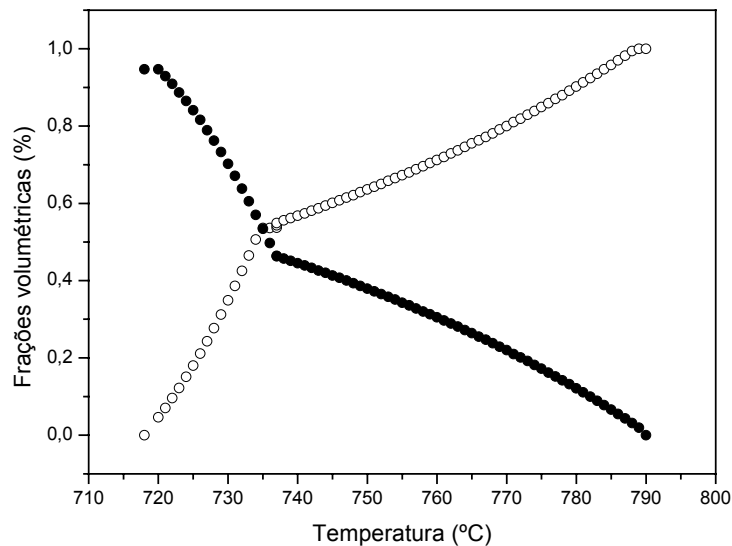


Figura 2. Frações volumétricas de ferrita e austenita em função da temperatura, obtidas com o auxílio do programa THERMOCALC (○- austenita, ● – ferrita).

A partir destes resultados, utilizando-se regressão linear, foram obtidas as equações que definem as frações volumétricas de ferrita e austenita em função da temperatura. As equações descrevem separadamente, as frações volumétricas de ferrita (α) e austenita (γ), nas regiões com maior e menor taxa de formação de austenita:

Intervalo de 720°C a 736°C:

$$\% \alpha = 20,8499 - 0,0276 \times T \tag{1}$$

$$\% \gamma = - 23,9299 + 0,0333 \times T \tag{2}$$

Intervalo de 737 °C a 790 °C:

$$\% \alpha = 6,7104 - 0,0084 \times T \tag{3}$$

$$\% \gamma = -5,8443 + 0,0086 \times T \tag{4}$$

A Figura 3 mostra as microestruturas do aço AISI 41B30H nos estados como normalizado e como temperado e revenido, para diferentes temperaturas de têmpera dentro da região intercrítica. Pode-se observar que o aço no estado normalizado é formado por ferrita e perlita fina. Após os tratamentos de têmpera e revenido essas microestruturas passam a ser formadas por ferrita e martensita revenida. Além disso, pode-se observar que com o aumento da temperatura de têmpera há uma diminuição na fração volumétrica de ferrita e um aumento na fração volumétrica de martensita revenida, o que está de acordo com os resultados obtidos pela simulação computacional.

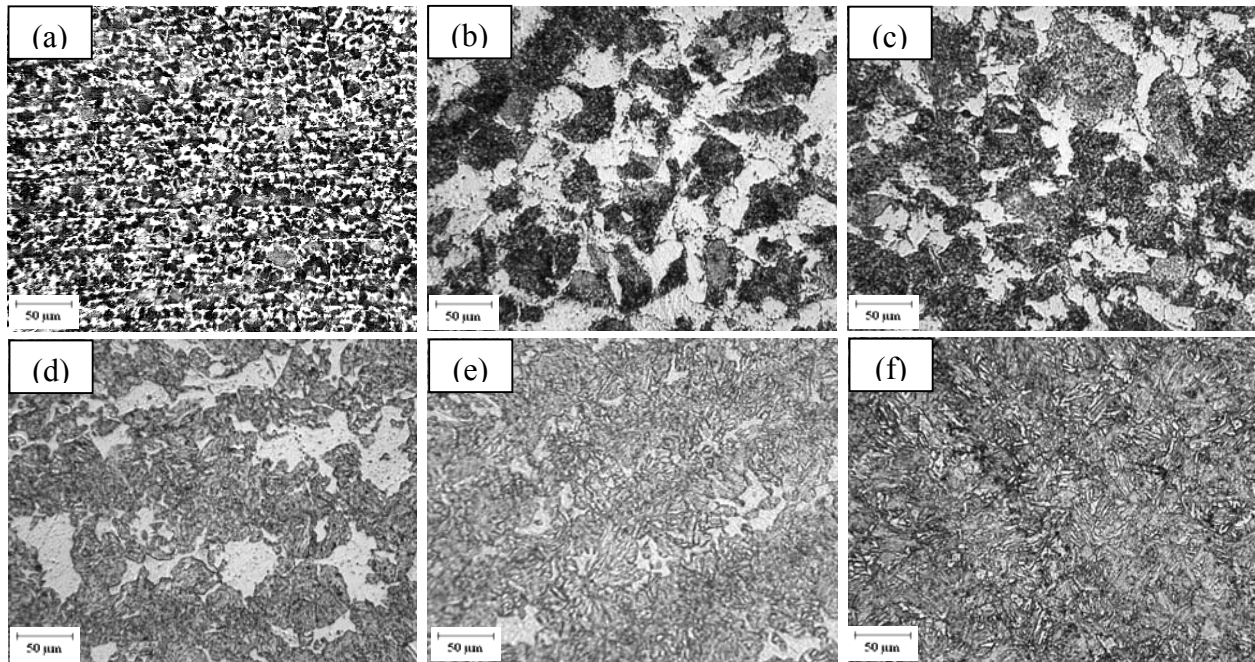


Figura 3. Aço AISI 41B30H na condição de normalizado e temperados a partir de diferentes temperaturas dentro da região intercrítica, seguido de revenimento (a) normalizado, (b) 737 °C, (c) 744 °C, (d) 754 °C, (e) 767 °C, (f) 782 °C.

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre as frações volumétricas de ferrita e austenita obtidas por meio do programa THERMOCALC, com aquelas de martensita e ferrita, obtidas por metalografia quantitativa. Considerando-se que toda austenita se transformou em martensita, por meio do resfriamento rápido, pode-se observar que os resultados experimentais estão próximos daqueles encontrados pela simulação computacional.

Tabela 2. Frações volumétricas de ferrita, austenita e martensita obtidas via simulação numérica e via metalografia quantitativa

| Temperatura de têmpera (°C) | Frações volumétricas (%) | | | |
|-----------------------------|--------------------------|-----------|---------------------------|------------|
| | THERMOCALC | | Metalografia quantitativa | |
| | Ferrita | Austenita | Ferrita | Martensita |
| 737 | 46,3 | 53,7 | 44,4 | 55,6 |
| 744 | 42 | 58 | 32,7 | 67,3 |
| 754 | 32,6 | 67,4 | 22,5 | 77,5 |
| 767 | 24,7 | 75,5 | 20,5 | 79,5 |
| 782 | 10 | 90 | 9,4 | 90,6 |

As propriedades mecânicas do aço AISI 41B30H, na condição de normalizado e aquelas na condição de temperado, a partir de 737°C e 754°C, e revenido, foram avaliadas por ensaios de tração. A Figura 4 e a tabela 3 mostram estes resultados para as diferentes condições analisadas.

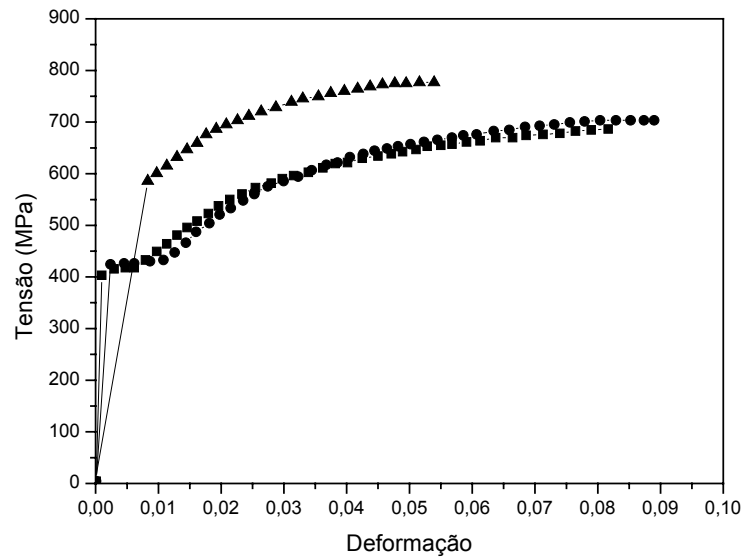


Figura 4. Curvas experimentais tensão-deformação para diferentes temperaturas de têmpera e na condição normalizado (■ - 737°C; ● - 754°C e ▲ - Normalizado).

Tabela 3. Propriedades mecânicas do aço AISI 41B30H na condição normalizado e temperado a partir de 737°C e 754°C seguido de revenimento.

| Propriedade Mecânica | Temperatura de Têmpera (°C) | | Normalizado |
|-----------------------------|-----------------------------|------|-------------|
| | 737 | 754 | |
| σ_e (MPa) | 405 | 421 | 580 |
| σ_R (MPa) | 630 | 645 | 737 |
| Razão σ_R / σ_e | 1,50 | 1,5 | 1,27 |
| K (MPa) | 1160 | 1277 | 1273 |
| n | 0,20 | 0,23 | 0,1600 |
| Alongamento total (%) | 21,6 | 21,4 | 18,4 |

Estes resultados mostram que os tratamentos térmicos de têmpera a partir de 737°C e 754°C com posterior revenimento, produzem melhores propriedades de conformação do que a condição normalizado (como recebido), por que nesta condição o aço possui menor tensão de escoamento (σ_e), maior razão σ_e / σ_R , maior expoente de encruamento (n) e maior alongamento total.

Destes resultados, pode-se esperar que em operações de conformação o desempenho do aço bifásico AISI 41B30H tratado termicamente pode ser melhor do que na condição normalizado.

4 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que o tratamento térmico intercrítico do aço AISI 41B30H em temperaturas próximas a 737°C e 754°C, produzem uma estrutura bifásica formada por ferrita e martensita revenida, conduzindo a melhores propriedades de conformação do que na condição normalizado. Nestas condições de tratamento térmico a microestrutura deste aço é formada por frações volumétricas de aproximadamente 50% de ferrita e 50% de martensita.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FINEP pelo apoio financeiro e ao CNPq pelas bolsas de Desenvolvimento Tecnológico Industrial e Iniciação.

REFERÊNCIAS

- 1 XIA, Q.X.; XENG, X.Q.; HU, Y.; RUAN, F. Finite element simulation and experimental investigation on the forming forces of 3D non-axisymmetrical tubes spinning, **International Journal of mechanical Sciences**, v. 48, p. 726- 735, 2006.
- 2 GROCHE, P.; FRITSCH, D. Application and modelling of flow forming manufacturing processes for internally geared wheels, **International journal of Machine & Manufacture**, v. 46, p.1261-1265, 2006.
- 3 HUA, F.A.; YANG, Y.S.; ZHANG, Y.N.; GUO, M.H.; GUO, D.Y.; TONG, W.H.; HU, Z.Q. Three-dimensional finite element analysis of tube spinning, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 168, p. 68-74, 2005.
- 4 WONG, C.C.; DEAN, T.A.; LIN, A review of spinning, shear forming and flow forming processes, **International journal of Machine Tools & Manufacture Design Research an Application**, v. 43, p. 1419-1435, 2003.
- 5 LEE, K.S.; LU, L. A study on the flow forming of cylindrical tubes, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 113, p. 739-742, 2001.
- 6 XU, Y.; ZHANG, S.H.; LI, P.; Yang K.; Shan, D.B.; Lu, Y. 3D rigid-plastic FEM numerical simulation on tube spinning, **Journal of Materials Processing Technologies** v.113, p. 710-713, 2001.
- 7 NAWI, I.; MAHDAVIAN, S.M. Hydrodynamic lubrication analysis for tube spinning process,. **WEAR**, v. 220, p. 145-153, 1998.
- 8 PARK, J.; KIM, Y.; BAE, W. Analysis of tube-spinning processes by the upper-bound stream-function method, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 66, p. 195-203, 1997.
- 9 SINGHAL, R.P.; SAXENA, P.K.; PRAKASH R. Estimation of power in the shear spinning of long tubes in hard-to-work materials, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 23, p. 29-40, 1990.
- 10 KALPAKCIOGLU, S.; RAJAGOPAL, S. Spinning of tubes **Journal Appl MetalWorking**, v. 2, p. 211-223, 1982.
- 11 HAYAMA M. Theoretical study of tube spinning. Bull, **Faculty Eng., Yokohama National University**, v. 15, p. 33-47, 1966.
- 12 KOBAYASHI, S.; THOMSEN, E.G. Theory of spin forging, **CIRP-ANNALEN**, v. 10, p. 114-123, 1962.

- 13 JAHAZI, M.; EBRAHIMI, G. The influence of flow-forming parameters and microstructure on the quality of a D6ac steel, **Journal of Materials Processing Technology**, v.103, p. 362-366, 2000.
- 14 RAJAN, K.M.; DESHPANDE, P.U.; NARASIMHAN, K. Effect of heat treatment of preform on the mechanical properties of flow formed AISI 4130 Steel Tubes-a theoretical and experimental assessment, **Journal of Materials Processing Technology**, v.125-126, p. 503-511, 2002.