

INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS DE ALÍVIO DE TENSÕES E NORMALIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO DA CLASSE ASTM-A516-70 PARA VASO DE PRESSÃO

José Antonio de Oliveira Torres ⁽¹⁾

Rajindra Clement Ratnapuli ⁽²⁾

Adalto Verneck Costa ⁽³⁾

Dagoberto Brandão Santos ⁽⁴⁾

Resumo

Foi estudada a influência dos tratamentos térmicos de alívio de tensões e de normalização sobre as propriedades mecânicas de dois aços, com e sem adição de elementos microligantes, para vaso de pressão da classe ASTM-A516-70. Os valores de limite de escoamento dos aços com tratamento térmico de alívio de tensões mostram ter dependência com o tamanho original do grão ferrítico. O limite de resistência diminui com o tratamento de alívio de tensões, o que é explicado pela esferoidização parcial da cementita na perlita. Os valores de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy de ambos os aços diminui com o tratamento térmico de alívio de tensões. Esse comportamento é atribuído à precipitação de carbonetos no contorno de grão ferrítico. A normalização provoca o refino do grão ferrítico. Esse refino é acompanhado por aumentos no limite de escoamento e nos valores de energia absorvida de ambos os aços.

Palavras-chave: vaso de pressão, alívio de tensões, normalização.

The Influence of Stress Relief Heat Treatment and Normalizing on the Mechanical Properties of ASTM-A516-70 Pressure Vessel Steels

Abstract

The influence on the mechanical properties of stress relief heat treatment of a pressure vessel steel of the type ASTM-A516-70 has been investigated. Two steel compositions were used, one a C-Mn grade and the other a C-Mn microalloyed steel. The yield strength of the stress relieved plates is found to be depend on the original ferrite grain size. Stress relief heat treatment result invariably in a drop in the tensile strength, which has been attributed to the partial spheroidization of the cementite in pearlite colonies. The Charpy impact energy values decreased after stress relief heat treatment. This behavior is associated with the precipitation of carbides at ferrite grain boundaries. Normalizing results in ferrite grain refinement, accompanied by an increase in energy and the yield strength values of two steels.

Key-words: pressure vessel steel, stress relief heat treatment, normalizing.

I. INTRODUÇÃO

O mercado mundial de chapas grossas compreende aplicações bastante diversificadas, atendendo às áreas estrutural, naval, de tubos de grande diâmetro, de caldeiras e vasos de pressão, entre outras. Dentre estas áreas, o setor de vasos de pressão representa uma parcela de significativa importância, tanto em termos quantitativos como pelas características inerentes à aplicação, crítica pela segurança requerida nestes equipamentos. A Usiminas, ao longo dos anos, tem exercido papel relevante na produção de aços para esta aplicação.⁽¹⁾

Durante a soldagem de chapas destinadas à fabricação de vasos de pressão, são geradas tensões em consequência de escoamentos parciais localizados devido à dilatação térmica e transformações de fases. Após o resfriamento, a zona termicamente afetada (ZTA) fica submetida a um sistema de tensões residuais. Nesta região, a tensão é de tração e da ordem do limite de escoamento do material na temperatura ambiente. Estas tensões podem propagar trincas. Além disso, pode ocorrer uma queda na tenacidade do

⁽¹⁾ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Departamento de Metalurgia e Garantia da Qualidade da Usiminas; Ipatinga, MG.

⁽²⁾ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, BEng (Hon), CEng (Lond), Consultor em Metalurgia; Ipatinga, MG.

⁽³⁾ Membro da ABM. Técnico Químico, Departamento de Metalurgia e Garantia da Qualidade da Usiminas; Ipatinga, MG.

⁽⁴⁾ Membro da ABM. Prof. Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – EEUFG; Belo Horizonte, MG.

material, por eventual mudança microestrutural, principalmente em aços com carbono equivalente elevado. Para compensar estes efeitos negativos, é usual a realização de um tratamento térmico pós-soldagem, conhecido como tratamento térmico de alívio de tensões. Com algumas simplificações, este tratamento consiste em aquecer uniformemente o equipamento de modo que o limite de escoamento do material fique reduzido a valores inferiores às tensões residuais. Nesta condição, as tensões residuais provocam deformações plásticas localizadas e diminuem de intensidade. Este tratamento, entretanto, tende a deteriorar as propriedades mecânicas do material.

Além disto, certos procedimentos de fabricação de vasos de pressão compreendem uma conformação a quente das chapas. Esta conformação se dá em torno de 900°C, com o resfriamento da peça ocorrendo naturalmente ao ar. Este tratamento é similar a um tratamento de normalização. Assim como no caso do alívio de tensões, este tratamento tende também a provocar a deterioração de propriedades mecânicas.

É devido a situações como estas que freqüentemente os fabricantes de vasos de pressão solicitam garantia de propriedades mecânicas após tratamentos térmicos simulados de alívio de tensões e/ou de normalização. Nestes casos, as chapas são fornecidas como laminadas e na amostra referente à chapa são realizados os tratamentos térmicos simulados específicos.

Este trabalho apresenta uma avaliação de propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência e energia absorvida no ensaio de impacto Charpy) de duas composições químicas distintas de chapas de aços para vaso de pressão da classe ASTM-A516-70 nas condições de laminado e com tratamentos térmicos simulados de alívio de tensões, normalização e normalização seguida de alívio de tensões.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Produção das chapas

Foram utilizados aços produzidos em escala industrial, acalmados ao Al e Si, e tratados com Ca para globulização de inclusões (Tabela 1), sendo avaliadas duas composições químicas permitidas pela norma ASTM-A516-70.⁽²⁾

Tabela 1. Composições obtidas nos aços utilizados no estudo (% em peso).

Aço	C	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb + V + Ti	Ca
I	0,22	0,99	0,019	0,007	-	-	-	0,0019
II	0,23	1,15	0,019	0,004	0,25	0,05	0,055	0,0029

As placas destas corridas, obtidas via lingotamento contínuo, foram reaquecidas no forno por 170 minutos a uma temperatura de 1200 °C, e laminadas a partir de uma espessura de 252 mm até 37,5 mm, com uma temperatura final de laminação de 900 °C. As chapas produzidas foram amostradas para posterior realização dos tratamentos térmicos em laboratório.

2.2. Tratamentos térmicos simulados

a) Tratamento térmico de alívio de tensões

O tratamento térmico de alívio de tensões foi realizado de acordo com o código ASME,⁽³⁾ considerando também condições usualmente solicitadas por fabricantes de vasos de pressão. Foi realizado um aquecimento, a partir de 400 °C, com uma taxa de 100 °C/h, até a temperatura de 620 °C, mantendo-a por 8 horas. O resfriamento de 620 °C até 400 °C, também a uma taxa de 100 °C/h, completou o ciclo.

b) Tratamento térmico de normalização

O tratamento térmico de normalização foi realizado a uma temperatura de 925 °C, com um tempo de permanência de 35 minutos, seguido de resfriamento ao ar.

2.3. Ensaio mecânicos e exames metalográficos

O ensaio de tração foi realizado na direção transversal à direção de laminação. Foram ensaiados 10 corpos de prova para cada condição. O ensaio Charpy foi realizado a -20 °C em corpos-de-prova longitudinais em relação à direção de laminação. Foram testados 4 corpos de prova para cada condição, eliminando o resultado que apresentava maior dispersão; o resultado que aparece no gráfico é a média dos três restantes. Além dos ensaios mecânicos, foi feita a caracterização metalográfica, envolvendo análises por microscópio óptico (MO) e eletrônico de varredura (MEV). A medição do tamanho de grão ferrítico foi executada até se alcançar o limite de confiança relativo menor que 5%, para o intervalo de confiança de 95% (ASTM E-562-83 e E-112-83).⁽²⁾

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo compreende quatro condições dos aços I e II, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Condições do estudo.

Código	Condição
(1) L	Laminado
(2) A	Laminado, com tratamento de alívio de tensões
(3) N	Laminado, com tratamento de normalização
(4) NA	Laminado, com tratamentos de normalização e alívio de tensões

3.1. Ensaio de tração

3.1.1. Limite de escoamento (LE)

A Figura 1 apresenta os valores médios de LE obtidos para as diversas condições dos aços I e II.

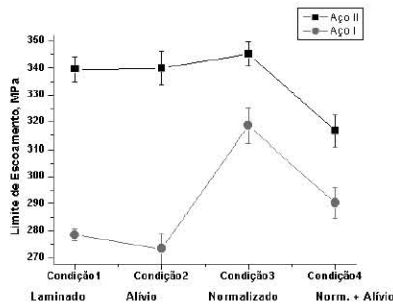


Figura 1. Valores médios do Limite de Escoamento dos aços I e II.

Analisando os resultados da Figura 1 para ambos os aços, observa-se que o LE praticamente não se alterou com o tratamento **A**, a partir da condição **L**. No entanto, a partir da condição **N**, com o tratamento **NA**, há uma queda da ordem de 30 MPa. Uma explicação para isto é que a densidade de cementita nos contornos de grãos ferríticos é função do tamanho original do grão de ferrita, ou seja, quanto maior o grão menor será a densidade de cementita.^(4,5) Se a densidade é menor, a cementita nos contornos de grãos da ferrita será mais fina, ou seja, menor o coalescimento. A Equação 1 mostra que a variação no LE será tanto menor quanto mais fina for a cementita.

$$\Delta LYS = 70(t_c - 0,2)^{2/3}, \quad (1)$$

em que, ΔLYS : variação do LE (MPa); e t_c : espessura da cementita (μm).

Possivelmente, a cementita no contorno de grão da ferrita, na condição **NA**, seja mais grossa que na condição **A**, devido ao menor tamanho original do grão ferrítico da condição **NA** em relação à condição **A**. A Figura 2 apresenta as fotomicrografias nas duas condições para o aço I, onde se observa a cementita nos contornos de grãos ferríticos (situação similar à do aço II).

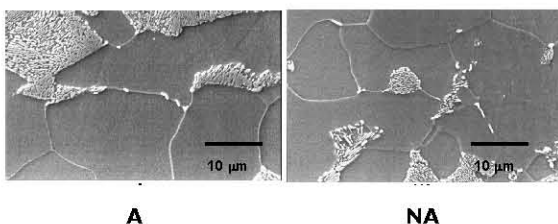


Figura 2. Microestruturas das amostras nas condições A e NA do aço I. MEV, ataque nital 4%.

A normalização provoca no aço I uma elevação no LE. Este aumento deve-se ao refino de grão decorrente deste tratamento, como pode-se constatar na Tabela 3. A Equação 2, de Hall-Petch,⁽⁶⁾ apresenta a influência do tamanho de grão no LE. No aço II, embora tenha ocorrido também uma redução no tamanho de grão ferrítico, é possível que o crescimento de precipitados de Nb e V tenha compensado o efeito do refino de grão, o que explica a pequena elevação do LE do aço II em comparação com o aço I.

Tabela 3. Resultado da determinação do tamanho de grão ferrítico -TGF. Valores

Aços	I				II			
	L	A	N	NA	L	A	N	NA
Diâmetro Médio (μm)	15,7 ± 0,8	15,9 ± 0,8	11,4 ± 0,6	2,1 ± 0,6	14,1 ± 0,7	13,4 ± 0,7	9,5 ± 0,5	9,3 ± 0,5

$$\sigma_{LYS} = \sigma_i + K_Y \cdot d^{-1/2}, \quad (2)$$

em que, σ_{LYS} : limite de escoamento mínimo (MPa); σ_i e K_Y : constantes; e d : diâmetro médio do grão ferrítico (mm).

3.1.2. Limite de resistência mecânica (LR)

A Figura 3 apresenta os valores médios de LR obtidos para as diversas condições dos aços I e II.

Analisando a Figura 3, nota-se que o LR, para ambos os aços, diminui com os tratamentos **A** e **NA**, tanto a partir da condição **L** como da condição **N**. Observações via microscopia eletrônica de varredura (Figura 2) mostram um início de esferoidização, com quebra das lamelas de cementita, levando a um esboroamento parcial da perlita. Este fato justifica esta queda no LR, conforme observado por Cochrane⁽⁷⁾ e Kolahi-Aval e Mintz.⁽⁸⁾ A normalização não provocou alteração no LR do aço I, uma vez que o tamanho de grão ferrítico não exerce influência significativa nesse parâmetro. Já para o aço II foi observada uma redução no LR, que pode ser explicada pelo crescimento de precipitados de Nb e V.⁽⁹⁾

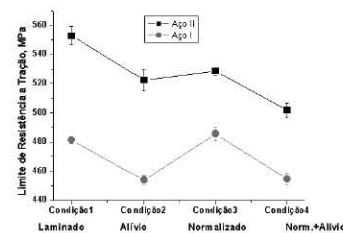


Figura 3. Valores médios de Limite de Resistência dos aços I e II.

Comparando os aços I e II, de uma forma global, observam-se valores mais elevados de resistência mecânica (LE e LR) para o aço II. Isto se deve, principalmente, ao efeito do endurecimento por precipitação e ao menor tamanho de grão ferrítico do aço com microadições.⁽¹⁰⁾

Deve-se ressaltar que o valor de LR do aço I na condição L apresenta-se ligeiramente abaixo da especificação para a classe de aço avaliada (485 MPa), em função da corrida utilizada ter sido destinada à produção de chapas de espessuras menores que a deste estudo.

3.2. Ensaio de impacto Charpy

A Figura 4 apresenta os valores médios de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy para as diversas condições dos aços I e II.

Analisando a Figura 4, observa-se a mesma tendência para ambos os aços. Para as condições A e NA, tanto a partir da condição L como da condição N, ocorrem diminuições nos valores de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy. Esta redução é explicada pela precipitação de cementita nos contornos de grãos ferríticos.⁽⁷⁾ A Figura 5 apresenta, como exemplo, uma comparação entre as microestruturas das condições L e A do aço I.

A normalização promoveu um aumento significativo na energia absorvida no ensaio de impacto Charpy. Esta elevação é consequência do menor TGF resultante deste tratamento (Tabela 3). As fotomicrografias apresentadas na Figura 6, para as condições L e N do aço I, evidenciam tal fato.

4. CONCLUSÕES

O tratamento de alívio de tensões nos aços C-Mn (I) e C-Mn com microadições (II), na condição de laminado, provocou queda no LR e não exerceu influência no LE. A redução no LR deve-se ao início de esferoidização da cementita, levando a um esboroamento parcial da perlita. Com relação à resistência ao impacto, observa-se uma diminuição da energia absorvida para ambos os aços. Essa redução é consequência da precipitação de cementita nos contornos de grãos ferríticos.

O tratamento de normalização implica em aumentos nos valores de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy para ambos os aços, e no LE do aço I. O refino do grão ferrítico é o fator determinante para esse comportamento. No caso do aço II, embora tenha ocorrido também uma redução no tamanho de grão ferrítico, é possível que o crescimento de precipitados de Nb e V tenha diminuído este efeito, não havendo alteração relevante no LE. Com relação ao LR, como o TGF não exerce influência significativa, não há alteração nesse parâmetro para o aço I. Já para o aço II é observada uma redução no LR, que pode ser explicada pelo crescimento de precipitados de Nb e V.

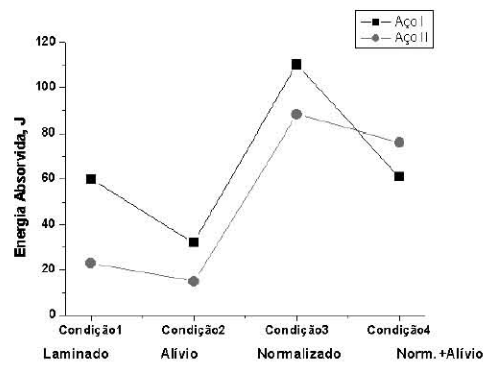


Figura 4. Valores médios de energia-Charpy dos aços I e II.

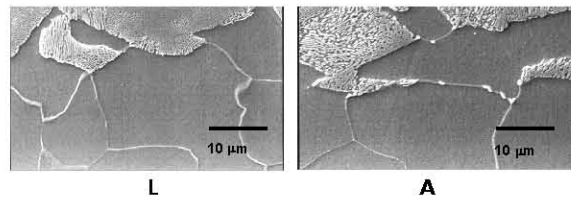


Figura 5. Microestruturas das amostras nas condições L e A do aço I. MEV, ataque nital 4%.

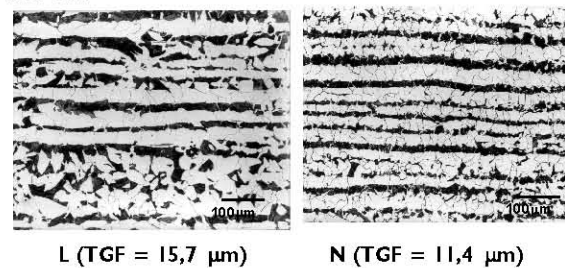


Figura 6. Microestruturas das amostras L e N do aço I. Microscópio óptico, ataque nital 4%.

Uma comparação global entre os dois aços apresenta valores mais elevados de energia para o aço I. Apesar de um menor TGF do aço II, a presença de precipitados na matriz ferrítica justifica os resultados mais baixos de energia.⁽⁸⁾

O tratamento de alívio de tensões após a normalização provoca queda no LE, no LR e na energia absorvida no ensaio Charpy. As quedas verificadas no LE podem ser justificadas pela presença de cementita grossa no contorno de grão ferrítico. A diminuição dos valores de LR é explicada pela modificação da morfologia da perlita (início de esboroamento). A queda na resistência ao impacto deve-se à precipitação de cementita nos contornos de grãos ferríticos.

A utilização de microadições no aço C-Mn da classe ASTM-A516-70 permite ganhos em propriedades mecânicas (LE e LR), que possibilitam compensar as quedas verificadas nesses parâmetros, devido aos tratamentos térmicos de normalização e/ou alívio de tensões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. RATNAPULI, R.C.; CÔRTEZ, C. Plate production capability at Usiminas. **Steel Technology International**, London, p. 185-188, 1993.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, 2001.
3. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Boiler and Pressure Vessel Code**. New York, 2001.
4. MINTZ, B. Influence of cooling rate from normalizing temperature and tempering on strength of ferrite-pearlite steels. **Metals Technology**, London, v.11, n.2, p. 52-60, Feb. 1984.
5. MINTZ, B.; KOLAH-AVAL, J. Influence of grain boundary carbide density on impact behaviour of C-Mn-Nb-Al steels. **Materials Science and Technology**, v.2, n.10, p. 1046-1050, Oct. 1986.
6. LESLIE, W.C. **The physical metallurgy of steels**. New York: McGraw-Hill, 1982.
7. COCHRANE, R.C. Some effects of carbide particle size on the Charpy impact behaviour of normalized and stress-relieved C-Mn steels. **British Steel Corporation Report**, p. 101-106, 1975.
8. KOLAH-AVAL, J.; MINTZ, B. Influence of tempering on impact behaviour of normalized steels. **Materials Science and Technology**, v.5, n.5, p. 457-464, May, 1989.
9. HONEYCOMBE, R.W.K.; BHADSHIA, H.K.D.H. **Steels: microstructure and properties**. 2.ed. London: Metallurgy & Materials Science, 1995.
10. TORRES, J.A.O. **Influência de tratamentos térmicos de alívio de tensões e normalização nas propriedades mecânicas do aço da classe ASTM-A516-70 para vaso de pressão**. 2002. 81f. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Física) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.