

AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSAMENTO DE NORMALIZAÇÃO E TÊMPERA DOS AÇOS ASTM-516-70N E USI-AR360Q NO FORNO DE TRATAMENTO TÉRMICO 2 DA USIMINAS

Geraldo Magno Cruz ⁽¹⁾

Antônio Adel dos Santos ⁽²⁾

Dagoberto Brandão Santos ⁽³⁾

Resumo

A atual aplicação dos aços tem exigido propriedades mecânicas cada vez mais rigorosas, além da incorporação de novas propriedades em função de aplicações específicas. Nesse contexto, o tratamento térmico, sendo um eficiente método para modificar as propriedades dos metais e ligas, consolida-se como uma importante ferramenta. Com o objetivo de fornecer produtos de boa qualidade para aplicações específicas, a Usiminas possui uma Linha de Laminação e Acabamento de Chapas Grossas, iniciada em 1976, incluindo um setor de tratamentos térmicos de normalização, têmpera e revenimento. Este estudo é realizado com o objetivo de melhoria contínua dos processos, onde são avaliadas as principais variáveis de controle dos processos de normalização e têmpera, para os aços ASTM-516-70N e USI-AR360Q, respectivamente, relativas a sua garantia de qualidade. Essas variáveis incluem a temperatura de austenitização, o tempo de permanência na temperatura de processo, a velocidade de resfriamento na têmpera e as temperaturas de início e fim de formação da martensita. Adicionalmente, são avaliadas a microestrutura e a dureza desses aços.

Palavras-chave: Têmpera; Normalização; Chapas grossas.

EVALUATION OF THE PROCESSING VARIABLES OF NORMALISING AND QUENCHING FOR THE ASTM-516-70N AND USI-AR360Q STEELS IN THE #2 HEAT TREATING FURNACE OF USIMINAS PLATE MILL

Abstract

The current application of steels has demanded ever-increasing requirements for mechanical properties, besides incorporation of new characteristics due to specific applications. In such context, the heat treatment, being an efficient method to modify metals and alloys properties, has consolidated as an important tool. With the objective of supplying products of good quality for specific applications, Usiminas began in 1976 the operation of Heavy Plates Rolling and Finishing Lines, including a section for heat treatments of normalizing, quenching and tempering. This study is carried out with the aim of continuous process improvement, where the main control variables of normalizing and quenching respectively for the ASTM-516-70N and USI-AR360Q steels, are analyzed. Such variables included austenitizing temperature, soaking time, cooling rate during quenching and start and finish temperatures for martensite formation. Additionally, microstructure and hardness obtained in those steels are evaluated.

Key-words: Normalising; Quenching; Plates.

I INTRODUÇÃO

Nas usinas metalúrgicas e de construção mecânica, o tratamento térmico constitui-se em uma das etapas mais importantes para a produção de semiprodutos e peças de máquinas. Nesse contexto, é empregado como operação intermediária para melhorar propriedades tecnológicas

como a deformabilidade sob pressão e a usinabilidade. Além disso, é empregado como operação final para dar ao metal ou liga um conjunto de propriedades mecânicas e físicas que garantam as características necessárias para a utilização das peças.

Para atender à demanda por produtos laminados mais nobres, especialmente em termos de propriedades mecânicas para aplicações específicas, vários processos foram desenvolvidos na Usiminas, envolvendo desde a elaboração do aço na aciaria até o produto final.

⁽¹⁾ Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M.C.; Gerência de Laminação a Quente da Usiminas; Ipatinga, MG.

⁽²⁾ Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M.C.; Gerência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

⁽³⁾ Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, Professor, Dr.; Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG; Belo Horizonte, MG.

Assim, foi construída a Linha de Laminação e Acabamento de Chapas Grossas, incluindo o setor de tratamentos térmicos.

Esse setor é importante na produção, pois permite obter chapas com propriedades mecânicas especiais, normalmente não obtidas pelo processo de laminação. Consta, basicamente, de um jateador de granalhas, dois fornos e uma máquina de têmpera. No Forno de Tratamento Térmico 2, cujo aquecimento é realizado por tubos radiantes, são realizados os tratamentos de normalização e têmpera. Em 2002, foram tratadas cerca de 141.000 t de chapas neste forno, distribuídas entre normalização e têmpera.

As principais variáveis de controle de processo na normalização são a temperatura e o tempo de permanência nessa temperatura. No processo de têmpera, além das duas variáveis citadas, é controlada também a vazão de água necessária à completa têmpera das chapas.

Este trabalho verifica a conformidade das principais variáveis de controle dos processos de normalização do aço ASTM-516-70N e de têmpera do aço USI-AR360Q (norma Usiminas), no Forno de Tratamento Térmico 2 da Usiminas, em relação à obtenção da microestrutura e das propriedades especificadas.

2 MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As composições químicas dos aços estudados são listadas na Tabela 1, em que são fornecidas suas faixas de especificação em norma e os valores determinados, especificamente, para as chapas relativas a esse estudo. O aço ASTM-516-70N, normalizado, é aplicado para construção de equipamentos e vasos de pressão, enquanto que o aço USI-AR360Q, temperado, destina-se a componentes estruturais, em que é exigida alta resistência à abrasão.

Foram realizados experimentos industriais de medição da evolução da temperatura nas chapas dos aços estudados no Forno de Tratamento Térmico 2 durante os processos de normalização e têmpera. Essa medição consistiu no enformamento de um coletor de dados, suficientemente isolado, conectado a termopares inseridos em várias posições nas chapas.^(1,2) Com isso, foi possível determinar os tempos de homogeneização térmica e encharque do material austenitizado e a velocidade de resfriamento na têmpera.

Tabela 1. Composições químicas dos aços estudados (% em massa).

Aço	Ref.	C	Si	Mn	S	P	Al _s	Ni	Cr	Nb	Ti	B
USI-AR360Q	Norma	≤	≤	≤	≤	≤	NE	NE	≤	≤	≤	≤
	Chapa	0,22	0,40	1,50	0,0150	0,030			0,80	0,050	0,045	0,0050
ASTM-516-70N	Norma	≤	0,15~	0,85~	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	NE
	Chapa	0,28	0,40	1,20	0,0350	0,035	0,015	0,40	0,40	0,020	0,030	
		0,18	0,27	0,91	0,0027	0,014	0,047	0,15	0,19	0,016	0,018	NA

NE: não especificado; NA: não analisado; Al_s: alumínio solúvel.

São construídos diagramas de transformação em resfriamento contínuo (TRC) para os aços estudados, a partir de ensaios conduzidos em dilatômetro. Desses ensaios, foram determinadas as temperaturas de início (A_{c1}) e fim (A_{c3}) de

austenitização, durante aquecimento, e a velocidade crítica de resfriamento na têmpera.

Os valores experimentais obtidos para essas temperaturas são comparados com resultados teóricos calculados por meio de equações de literatura. Para as temperaturas de início (A_{c1}) e fim (A_{c3}) de austenitização, em condições de equilíbrio são utilizadas as equações (1) e (2), estabelecidas por Andrews:⁽³⁾

$$A_{c1} (^{\circ}\text{C}) = 723 - 16,9\%Ni + 29,1\%Si + 6,38\%W - 10,7\%Mn + 16,9\%Cr + 290\%As, e \quad (1)$$

$$A_{c3} (^{\circ}\text{C}) = 910 - 203\sqrt{\%C} - 15,2\%Ni + 44,7\%Si + 104\%V + 31,5\%Mo + 13,1\%W - 30\%Mn + 11\%Cr + 20\%Cu - 700\%P - 400\%Al - 120\%As - 400\%Ti. \quad (2)$$

A temperatura de início de formação da martensita (M₁) é calculada pela equação (3), determinada por Steven e Haynes.⁽⁴⁾ O cálculo da temperatura de final de formação da martensita (M_s) é determinado a partir da curva proposta por Krauss:⁽⁵⁾

$$M_s (^{\circ}\text{C}) = 561 - 474\%C - 33\%Mn - 17\%Ni - 17\%Cr - 21\%Mo. \quad (3)$$

São analisadas também as microestruturas dos materiais normalizado e temperado, para verificar sua conformidade com as especificações e as propriedades mecânicas esperadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Diagramas TRC

Os diagramas TRC obtidos para os aços estudados são apresentados nas Figuras 1 e 2.

A Tabela 2 apresenta as temperaturas de início e fim de austenitização para os dois aços, e as de início e fim de formação da martensita para o USI-AR360Q. Nota-se uma diferença de, no máximo, 23° C entre as temperaturas correspondentes, no caso entre A_{c3} e A_{s3}, para o aço USI-AR360Q. Como a temperatura de austenitização utilizada no forno é de 900° C, há ainda excesso de temperatura, o que garante uma condição adequada de processo.

3.2 Obtenção dos Tempos de Aquecimento e Encharque

Para obtenção das curvas de aquecimento foram colocados termopares como indicados na Figura 3. As curvas de aquecimento das chapas de 12,7 mm e de 25,4 mm, para o tratamento de normalização, são apresentadas nas

Figuras 4 e 5, respectivamente. O termopar 1 refere-se à medida da temperatura do ambiente do forno, próximo à superfície superior da chapa. Os demais foram inseridos no interior da chapa. Nesse tratamento, a temperatura do forno, controlada pelos termopares que estão próximos às paredes, é fixada em 900 °C, em todas as zonas.

Observa-se nas Figuras 4 e 5 que o aquecimento dos pontos na superfície inferior da chapa é mais lento, provavelmente devido à presença dos rolos condutores da chapa, que interceptam parte do calor transferido por radiação a partir do ambiente do forno.

Os padrões operacionais do forno estabelecem tempos para as etapas de aquecimento e encharque do material. A partir das curvas de evolução térmica medidas, foi definido o critério de tempo de aquecimento como aquele para atingir a temperatura mínima de 900 °C em todos os termopares. O tempo de encharque é considerado como o necessário para estabilizar todas as temperaturas, dentro da faixa de $\pm 10^\circ\text{C}$, medidas pelos termopares.

A Tabela 3 apresenta esses tempos para os experimentos realizados nas espessuras de 12,7 mm e 25,4 mm no processo de normalização, pois neste foram colocados termopares distribuídos para a verificação da evolução térmica. Nota-se que os tempos totais das experiências, que obedeceram aos padrões operacionais, superam a soma dos tempos de aquecimento e encharque. Isso indica que esses parâmetros podem ser otimizados no processo industrial, trazendo, em consequência, ganhos de produtividade. Deve-se ressaltar, porém, que essa análise está contemplando apenas o aspecto térmico e que é necessária, também, uma avaliação microestrutural do material em caso de mudança dos parâmetros de processo.

3.3 Velocidade de Resfriamento na Têmpera

Para a velocidade de resfriamento, foram utilizados os termopares de 4 a 8. As Figuras 6 e 7 apresentam as curvas obtidas para as chapas de 12,7 mm e 25,4 mm, respectivamente. A partir desses resultados, é calculada a velocidade de resfriamento média de têmpera, considerando o intervalo de tempo entre a saída do forno, temperatura de 900 °C, até a temperatura M_f calculada.

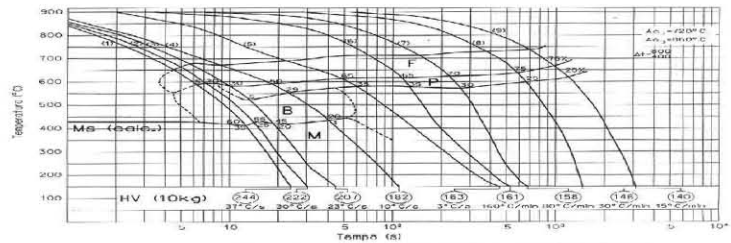


Figura 1. Diagrama TRC para o aço ASTM-516-70N.

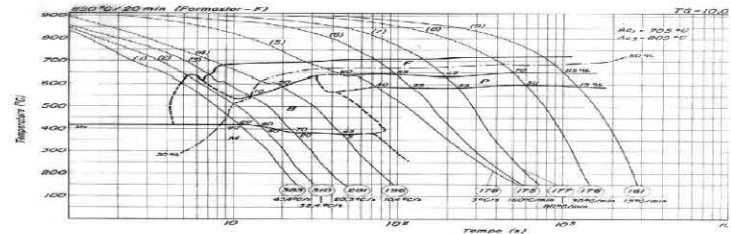


Figura 2. Diagrama TRC para o aço USI-AR360Q.

Tabela 2. Comparação entre as temperaturas críticas para o tratamento térmico, determinadas por dilatométrie e a partir da literatura.

Aço	Diagramas TRC (°C)		Dados de literatura (°C)			
	A_{c1}	A_{c3}	A_{e1}	A_{e3}	M_f	M_s
USI-AR360Q	705	805	722	828	427	~ 200
ASTM-516-70N	720	860	724	839		

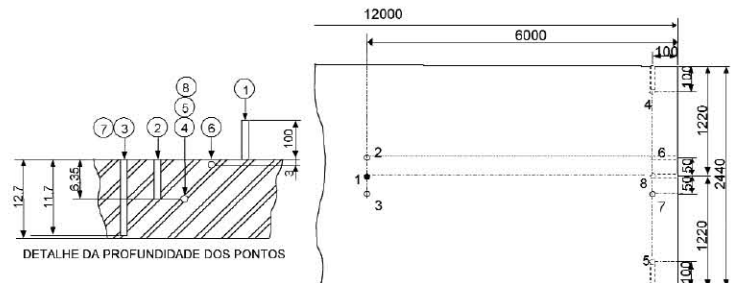


Figura 3. Distribuição dos termopares para o teste de desempenho de normalização.

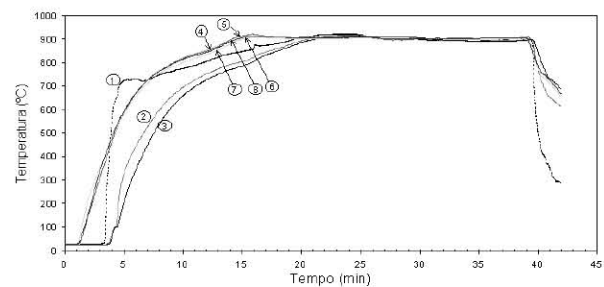


Figura 4. Curvas de aquecimento em várias posições da chapa de 12,7 mm durante tratamento de normalização.

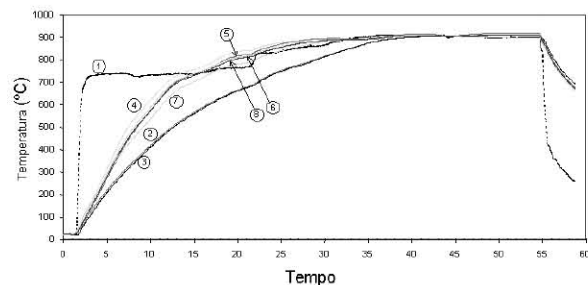


Figura 5. Curvas de aquecimento em várias posições da chapa de 25,4 mm no tratamento de normalização.

Tabela 3. Tempos de aquecimento e encharque medidos e total das experiências para a chapa normalizada.

Espessura (mm)	Aquecimento (min)	Encharque (min)	Total do ensaio (min)
12,7	19	10	37
25,4	35	10	52

Para a chapa de 12,7 mm, o tempo para atingir a temperatura M_i , calculada em 427°C , foi de, aproximadamente, 14 s (Figura 6), o que forneceu uma velocidade de resfriamento de 34°C/s . Essa velocidade é determinada considerando-se a posição no meio da chapa, onde o resfriamento é mais lento. A vazão de água de resfriamento na zona principal da máquina de têmpera, em que a temperatura é reduzida, drasticamente, foi de $770\text{ m}^3/\text{h}$ na superfície superior e de $740\text{ m}^3/\text{h}$ na superfície inferior.

Para a chapa de 25,4 mm, o tempo correspondente para resfriamento desde a austenitização até a temperatura de início de formação da martensita foi de, aproximadamente, 20 s (Figura 7). Com isso, a velocidade de resfriamento na têmpera foi de 24°C/s . As condições de análise foram as mesmas aplicadas para a chapa de 12,7 mm. As vazões de água de resfriamento foram, dessa vez, $830\text{ m}^3/\text{h}$ tanto na superfície superior quanto na inferior.

De acordo com o diagrama TRC, a velocidade mínima necessária, ou seja, velocidade crítica, para a formação de martensita é de 35°C/s . Essa velocidade é obtida passando-se uma curva de resfriamento pela interseção com a linha de formação da perlita. Portanto, a velocidade de resfriamento obtida na chapa de 12,7 mm foi praticamente igual a velocidade crítica, ao passo que, para a chapa de 25,4 mm, no centro, a velocidade de resfriamento foi menor que a crítica. Isso significa que a microestrutura será praticamente martensítica na chapa de 12,7 mm e na superfície da chapa de 25,4 mm, e constituída de uma mistura de bainita e martensita no centro dessa última.

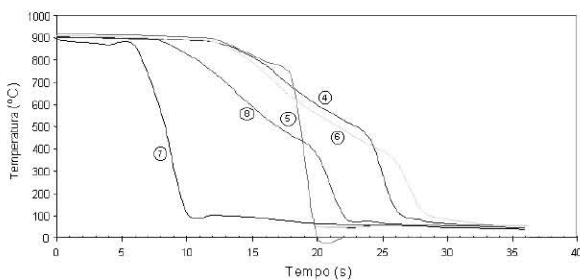


Figura 6. Curvas de resfriamento em têmpera para a chapa de 12,7 mm.

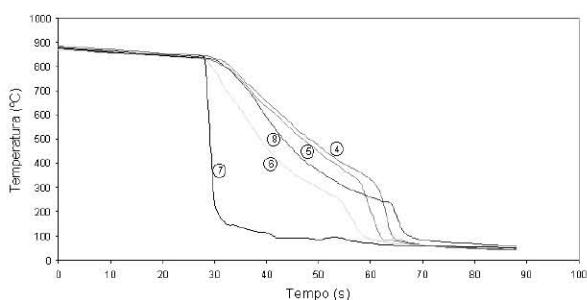


Figura 7. Curvas de resfriamento em têmpera para a chapa de 25,4 mm.

3.4 Microestrutura

As microestruturas observadas no centro das chapas tratadas termicamente estão apresentadas na Figura 8 (a, b, c). Para a chapa de 12,7 mm do aço USI-AR360Q, a microestrutura é constituída de, praticamente, 100% martensita, enquanto que, para a espessura maior, há presença de quantidade significativa de bainita, em virtude da menor taxa de resfriamento. Todavia, essa presença de bainita não causa desclassificação do material, uma vez que sua principal especificação para aplicação é a dureza superficial, que, ainda, é plenamente atendida com essa microestrutura. Para o material normalizado, a microestrutura é constituída de ferrita e perlita bandeada. O tamanho de grão para a chapa de 12,7 mm é de 5,9 μm . Essa microestrutura está de acordo com o esperado para esse tipo de material.⁽⁶⁾

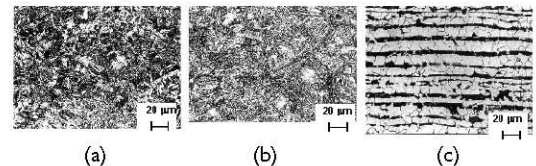


Figura 8. Microestruturas observadas no centro das chapas do aço USI-AR360Q, espessuras de 12,7 mm (a), e 25,4 mm (b), e do aço ASTM-516-70N espessura de 12,7 mm, (c); ataque Nital 4%.

3.5 Propriedades Mecânicas

A propriedade básica especificada para o aço USI-AR360Q é a dureza, cujo valor mínimo é de 375 HV. Para as chapas de 12,7 mm e de 25,4 mm, os valores médios obtidos na região central das amostras são de 430 HV e 420 HV, respectivamente. O valor mínimo obtido na série de determinações em ambas amostras é de 405 HV, de forma que a especificação está plenamente atendida.

Para o aço ASTM-516-70N, as propriedades obtidas comparadas com as de especificação são dadas na tabela 4, para as espessuras de 12,7 mm e 25,4 mm. Essas propriedades atendem à especificação e estão de acordo com a literatura.⁽⁶⁾

Tabela 4. Propriedades mecânicas dos aços ASTM-516-70N.

Espessura (mm)	Dureza (HV)		LE (MPa)		LR (MPa)	
	Especificado	Obtida	Especificado	Obtido	Especificado	Obtido
12,7	< 160	145	≥ 260	349	485 ~ 620	515
25,4	< 160	145	≥ 260	346	485 ~ 620	544

4 CONCLUSÕES

O dispositivo de medição da evolução térmica da chapa durante os processos de austenitização e têmpera mostra-se adequado e útil para otimização operacional do forno de tratamento térmico.

Os tempos de aquecimento e encharque

para os aços tratados termicamente no forno 2 podem ser otimizados, tendo em vista o resultado desse trabalho.

As condições operacionais atuais do forno 2 e da máquina de têmpera atendem aos requisitos metalúrgicos para os tratamentos de normalização e têmpera de chapas grossas na Usiminas. Como resultado, a microestrutura e as propriedades mecânicas desses aços estão de acordo com as exigências de qualidade necessárias para o fornecimento de chapas tratadas termicamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AZEVEDO, J. C.; ALVES, A. A.; CRUZAT, G. R.; BARROS, M. S. Sistema de medição de temperatura de placas em fornos industriais. In: SEMINÁRIO DE INSTRUMENTAÇÃO DA ABM, 6., 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABM, 1986.
2. CRUZ, G. **Avaliação das variáveis de processamento de normalização e têmpera dos aços de classificação ASTM-516-70N e USI-AR360Q no forno de tratamento térmico 2 da Usiminas.** 2003. 56p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
3. ANDREWS, K. W. Empirical formulae for the calculation of some transformation temperatures. **Journal of the Iron and Steel Institute**, v. 203, p. 721-727, Jul. 1965.
4. STEVEN, W.; HAYNES, A. G. The temperature of formation of martensite and bainite in low-alloy steels. **Journal of the Iron and Steel Institute**, v. 183, p. 349-359, Aug. 1956.
5. KRAUSS, G. **Steels heat treatment and processing principles.** Hardbound: ASM, 1990. p. 43-87.
6. COCHRANE, R. C.; MINTZ, B.; WARD, J. L. Influence of prior microstructure on normalising response of C-Mn-Al-Nb steels. **Materials Science and Technology**, v. 5, n.1, p. 20-27, Jan. 1989.