

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE ACABAMENTO SOBRE A RESPOSTA AO TRATAMENTO DE NORMALIZAÇÃO EM CHAPAS GROSSAS DE AÇOS MICROLIGADOS ¹

Antonio Augusto Gorni²
José Herbert Dolabela da Silveira³
Jackson Soares de Souza Reis⁴
Rodney Pardo Alves⁵

Resumo

Há diversas evidências na literatura sobre os efeitos benéficos da redução na temperatura de acabamento sobre as propriedades mecânicas de chapas grossas normalizadas. O objetivo deste trabalho consistiu em se confirmar tais efeitos sob as condições industriais específicas existentes na COSIPA. Os resultados obtidos de fato indicaram que a redução na temperatura de acabamento tendeu a elevar a tenacidade e, em menor grau, a resistência mecânica das chapas grossas normalizadas. Tais efeitos ficaram mais evidentes à medida que se elevou a espessura do produto e também tendem a depender da composição química do aço. Contudo, ainda é difícil afirmar com segurança até que ponto esses benefícios compensam a perda de produtividade ocorrida no laminador quando se trabalha com temperaturas de acabamento baixas.

Palavras-Chave: Chapas grossas; Aços microligados; Temperatura de acabamento; Normalização.

INFLUENCE OF THE FINISHING TEMPERATURE OVER THE RESPONSE OF MICROALLOYED STEEL PLATES TO THE NORMALIZING HEAT TREATMENT

Abstract

There is enough evidence in the literature about the beneficial effects resulting from the use of lower finishing temperatures during the hot rolling of steel plates that would be subsequently submitted to a normalizing heat treatment. The aim of this work was to confirm such effects under the specific industrial conditions that prevail in COSIPA steelworks. The results got effectively showed that a decrease in the hot rolling finishing temperature tended to increase normalized plate toughness and, in a lesser degree, its mechanical strength. Such effects became more evident as long as product thickness increases and tended to depend over the specific steel alloy design. However, it is still difficult to affirm to which point those benefits compensate the productivity decrease in the plate mill that occurs when finishing temperature is intentionally decreased.

Key words: Plates; Microalloyed steels; Finishing temperature; Normalizing.

¹ Trabalho a ser apresentado ao 61º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais-ABM, Rio de Janeiro (RJ), 24 a 27 de Julho de 2006.

² Membro da ABM. Engenheiro de Materiais, M. Eng, Dr. Eng., Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: gorni@cosipa.com.br

³ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, M.Eng., Gerente de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: herbert@cosipa.com.br

⁴ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, C.Q.E., Superintendente da Laminação a Frio, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: jackson@cosipa.com.br

⁵ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: rodney@cosipa.com.br

INTRODUÇÃO

O objetivo fundamental da normalização de chapas grossas estruturais é a elevação de sua tenacidade; em segundo lugar vem a uniformização de suas propriedades mecânicas, incluindo a minimização da anisotropia. Como se sabe, esse tratamento consiste basicamente da austenitização da chapa, seguida de seu resfriamento sob ar calmo. Dois fatores são primordiais para que sejam conseguidos os efeitos desejados da normalização: as condições de austenitização e a microestrutura prévia da chapa.⁽¹⁾

O aquecimento das chapas no tratamento de normalização deve ser feito sob condições de temperatura e tempo tais que proporcionem austenitização e uniformização plenas da microestrutura da chapa. Valores relativamente baixos de temperatura e tempo de encharque podem levar à austenitização parcial da chapa, condição que reduz tanto sua resistência mecânica como tenacidade ao final do tratamento térmico. Neste caso a microestrutura final da chapa grossa se forma a partir dos grãos ferríticos que não sofreram transformação durante o aquecimento da chapa, condição que gera estrutura grosseira e contendo subestruturas. Já temperaturas excessivas podem levar à formação de microestrutura totalmente austenítica mas com grãos grosseiros, comprometendo igualmente as propriedades mecânicas do produto. Note-se ainda que um ligeiro excesso de temperatura, acima do valor estritamente necessário para promover plena austenitização da chapa, tende a elevar sua tenacidade devido à dissolução dos carbonetos presentes nos contornos de grão. Como se vê, a determinação da temperatura de austenitização no tratamento de normalização deve balancear os efeitos contraditórios exercidos sobre a tenacidade pelo crescimento do tamanho de grão e pela dissolução dos carbonetos entre seus contornos.⁽¹⁾

A microestrutura prévia à normalização pode ser “herdada” até certo ponto pelo produto final, especialmente se a austenitização não for completa durante o tratamento de normalização. Isso é particularmente válido para chapas que apresentem estruturas pós-laminação excessivamente grosseiras ou que contenham ferrita de Widmanstätten. A obtenção de microestruturas ideais após a normalização requer que ocorra plena austenitização e homogeneização do material durante o aquecimento da chapa, especialmente em termos da distribuição de carbono, manganês e silício. Essa condição é favorecida caso a chapa apresente estrutura refinada previamente à normalização.⁽¹⁾

Esse fato já é reconhecido por algumas siderúrgicas, nas quais as chapas grossas a serem normalizadas são laminadas sob baixas temperaturas de acabamento.⁽²⁾ Por outro lado, foi constatado industrialmente na ISG que as propriedades de chapas grossas estruturais de aço ao V com espessura entre 13 a 19 mm, normalizadas a 900°C e submetidas a tratamento de alívio de tensões a 605°C, não foram significativamente influenciadas pela temperatura de acabamento variando numa faixa entre 825 e 1075°C. O resultado foi atribuído à pequena variação no tamanho de grão obtido no esboço sob tais condições.⁽³⁾

Na COSIPA algumas qualidades de chapas grossas microligadas para uso naval, mais críticas do ponto de vista da tenacidade, são processadas através de laminação controlada seguida de normalização. A idéia aqui é maximizar o refino de grão no material antes do tratamento térmico. Essa rota de fabricação foi adotada industrialmente, apresentando bons resultados na prática.⁽⁴⁾ Contudo, é necessário

considerar que a execução da laminação controlada implica numa acentuada perda de produtividade no laminador que, conforme as dimensões do esboço, varia de 20 a 50%. Os benefícios decorrentes dessa rota devem ser significativos para se justificar esse transtorno. Esta foi a motivação para a realização deste trabalho, que teve como objetivo determinar quantitativamente os benefícios do uso de laminação controlada nas chapas grossas destinadas à normalização.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material estudado nesse trabalho foram chapas grossas grau AB EH 36, produzidas em espessuras de 6 a 50 mm. A composição química especificada em todos os casos foi sempre a mesma, variando nas seguintes faixas: 0,10-0,13% C; 1,45-1,60% Mn, 0,15-0,40% Si, 0,020% P_{máx}; 0,005% S_{máx}; 0,020-0,050% Al, 0,030-0,040% Nb; 0,065-0,080% V; 0,008-0,020% Ti, 0,005-0,009% N e 0,0015-0,0050% Ca. Os materiais foram produzidos sob diferentes temperaturas de acabamento variando entre 700 e 1000°C, sendo todas as chapas posteriormente submetidas a tratamento térmico de normalização constituído de austenitização a 900°C seguida de resfriamento ao ar calmo. A análise englobou um total de 537 chapas, sendo extraídos de cada uma delas corpos de prova para ensaios mecânicos de tração e de impacto Charpy a -40°C, considerando-se neste último caso sentido transversal. A correlação entre os dados de processo e as propriedades mecânicas das chapas obtidas foi feita com auxílio do programa computacional *Statistica*.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra os graus de deformação totais aplicados ao esboço em função de sua espessura final. Uma vez que foram usadas placas com apenas dois valores de espessura, 210 e 260 mm, houve tendência no sentido do grau de deformação total ser inversamente proporcional à espessura da chapa. Isto é uma indicação de que os materiais com maior espessura tenderão a apresentar maior tamanho de grão antes da normalização.⁽⁵⁾

A Tabela 1 mostra os valores dos coeficientes de correlação r de *Pearson* observados nas correlações obtidas entre as propriedades mecânicas das chapas grossas normalizadas e a correspondente temperatura de acabamento. A ausência desse valor na Tabela indica que ele apresentou significância estatística menor do que 95%. Os resultados assim obtidos indicaram que variações na temperatura de acabamento só afetaram os resultados de resistência mecânica para chapas grossas com espessura igual ou superior a 30 mm. Os valores dos coeficientes de correlação foram negativos, ou seja, a resistência mecânica do esboços normalizados foi inversamente proporcional à temperatura de acabamento.

Os dados revelam que o limite de escoamento da chapa grossa normalizada aumentou de 10 a 30 MPa a cada redução de 100°C na temperatura de acabamento. Já o limite de resistência nem sempre foi afetado, e quando o foi o efeito foi bem menor do que o constatado para o limite de escoamento, verificando-se aumento de 11 a 16 MPa nessa propriedade sob as mesmas condições. A razão elástica aumentou de 1 a 3 pontos percentuais a cada 100°C a menos na temperatura de acabamento. Não foram observados efeitos significativos no alongamento total ou na resistência ao impacto

medida pelo ensaio Charpy. Isso provavelmente deve ter ocorrido devido à maior dispersão experimental inerente aos valores dessas propriedades.

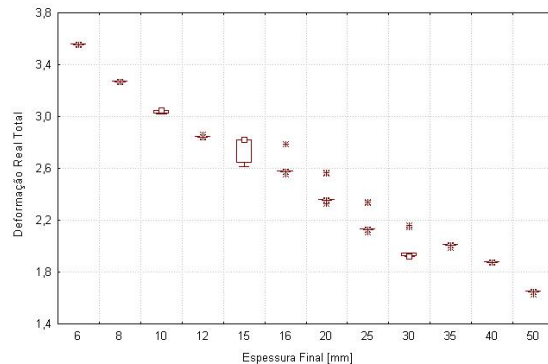


Figura 1. Relação entre o grau total de deformação aplicado e a espessura final do esboço.

Tabela 1. Resultados da correlação linear entre as propriedades mecânicas dos esboços normalizados e a temperatura de acabamento, expressa em termos do coeficiente de correlação r e da declividade da reta b .

h_f (mm)	n	LE		LR		RE	
		r	b (MPa/100°C)	r	b (MPa/100°C)	r	b (%/100°C)
30	40	-0,67	-16	-0,62	-11	-0,56	-2
35	36	-0,54	-13	-	-	-0,35	-2
40	15	-0,70	-10	-	-	-0,78	-1
50	19	-0,61	-29	-0,51	-16	-0,64	-3

O fato da temperatura de acabamento somente ter afetado a resposta à normalização das chapas grossas mais pesadas é explicado, em primeiro lugar, pelo fato de a laminação controlada só ter sido usada para esboços com espessura igual ou superior a 20 mm. Mas o fato dos esboços normalizados com 20 e 25 mm de espessura também não terem sido afetados significativamente pela temperatura de acabamento está coerente com as evidências presentes na literatura. De fato, a influência benéfica decorrente do abaixamento da temperatura de acabamento foi máxima no caso das chapas grossas com espessura de 50 mm, conforme mostrado na Tabela 1. Aqui o tamanho de grão tende a ser maior em função do menor grau de deformação placa:chapa, especialmente no caso dos materiais submetidos a temperaturas de acabamento mais elevadas. Isto reduz o grau de homogeneização microestrutural conseguido durante a austenitização ocorrida durante a normalização, fato que influi negativamente nas propriedades mecânicas da chapa.

Resultados complementares, obtidos através de uma nova análise dos dados obtidos em estudos sobre chapas grossas normalizadas feitos anteriormente pela COSIPA,⁽⁶⁻⁸⁾ permitem complementar as conclusões aqui obtidas. Esses novos resultados estão mostrados na Tabela 2. É interessante notar que nestes casos o efeito benéfico da redução na temperatura de acabamento restringiu-se tão somente à tenacidade das chapas grossas normalizadas, tendo sido verificado um acréscimo na energia absorvida no ensaio de impacto Charpy que variou de 6 a 20 J a cada redução de 100°C nesse parâmetro de processo. É interessante notar que os materiais mais

pesados, com 100 a 150 mm de espessura, apresentaram melhoria mínima nesse parâmetro, ao contrário do que se poderia esperar. Isto pode ser justificado pela pequena quantidade de amostras disponíveis e grande dispersão nos dados experimentais, além da redução placa:chapa extremamente pequena para este tipo de produto, condição que deve ter contribuído muito pouco para o refino do grão do material, mesmo sob baixas temperaturas de acabamento.

Tabela 2. Resultados obtidos em trabalhos anteriores da COSIPA, já publicados, em termos da correlação linear entre as propriedades mecânicas dos esboços normalizados e a temperatura de acabamento, expressos em termos da declividade da reta b ⁽⁶⁻⁸⁾

Aço	n	h_f (mm)	T_{ac} (°C)	Ref.	b (1/100°C)
NbTi	5	19	950~750	(6)	RI (-20°C): -11J
Ti	28	8~16	940~830	(7)	RE: -2%
TiV	45	25~50	930~830	(7)	RE: -3% RI (-20°C): -20 J
Ti	13	100~150	760~990	(8)	RI (-20°C): -6 J

Os resultados aqui apresentados confirmam o efeito benéfico da redução da temperatura de acabamento sobre as propriedades mecânicas das chapas grossas normalizadas. Eles também indicam que esse efeito tende a ser maior para materiais mais pesados, onde a redução placa:chapa é menor, e que ele pode variar de acordo com a composição química do aço. Por outro lado, reduções intencionais na temperatura de acabamento tendem a provocar perda de produtividade no laminador, seja em função da redução na velocidade de laminação, imposição de períodos de espera ou maior número de passes devido ao aumento da carga de laminação. A determinação do valor otimizado de redução na temperatura de acabamento deve levar em conta os benefícios e perdas decorrentes.

CONCLUSÕES

Os resultados aqui obtidos confirmaram que a redução na temperatura de acabamento realmente tende a proporcionar efeitos benéficos nas propriedades mecânicas de chapas grossas, em termos do aumento de resistência mecânica e, principalmente, da tenacidade. Aparentemente tais efeitos são mais significativos para chapas grossas pesadas e tendem a variar conforme o tipo de aço. Contudo, eles somente contribuirão efetivamente para a competitividade da usina caso sua intensidade no produto contrabalance a perda de produtividade que provocam no laminador. Essa é uma questão que somente pode ser decidida caso a caso e embasada sobre dados efetivamente obtidos.

REFERÊNCIAS

- 1 COCHRANE, R.C. e outros. Influence of Prior Microstructure on Normalising Response of C-Mn-Al-Nb Steels. **Materials Science and Technology**, v. 5, n. 1, January 1989, p. 20-8.
- 2 MORRISON, W.B. Microstructure Control in Practice. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 22, n. 6, 1995, 453-458.
- 3 BODNAR, R.L. e outros. The Physical Metallurgy of Normalized Plate Steels. In: Materials Science & Technology Conference. **Proceedings...** TMS/AIST, New Orleans, December 2004, p. 89-109.
- 4 FREITAS, F.V. e outros. Laminação de Chapas Grossas da Classe NV40. In: 41° Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos. **Anais...** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Santos, Outubro de 2005.
- 5 GORNI, A.A. e outros. Efeito da Alteração na Espessura de Espera Durante a Laminação Controlada sobre os Parâmetros Microestruturais de Chapas Grossas Navais. In: 50° Congresso Anual da ABM. **Anais...** Associação Brasileira de Metalurgia e Materais, São Pedro, Agosto de 1995.
- 6 GORNI, A.A. e outros. Produção de Chapas Grossas Normalizadas Diretamente do Calor de Laminação. In: 34° Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos. **Anais...** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte, Agosto de 1997.
- 7 GORNI, A.A. e outros. Uso de Laminação de Normalização para a Produção de Chapas Grossas Grau DIN 17100 St 52.3N. In: 53° Congresso Anual da ABM. **Anais...** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte, Setembro de 1998.
- 8 GORNI, A.A. e outros. Produção de Chapas Grossas Extra-Pesadas, Grau ASTM A36, a Partir de Placas do Lingotamento Contínuo. In: 36° Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos. **Anais...** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte, Setembro de 1999.