

O USO DO PARÂMETRO DE REVENIMENTO NO TRATAMENTO TÉRMICO DE CHAPAS GROSSAS NA USIMINAS-CUBATÃO¹

Marcos Roberto Fernandes Noro²
Antonio Augusto Gorni³

Resumo

Foram desenvolvidas correlações entre o parâmetro de revenimento proposto por Hollomon & Jaffe com as propriedades mecânicas de chapas grossas temperadas e revenidas de aço ASTM A514H. Tais correlações proporcionaram a possibilidade de se prever os valores de propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência, alongamento e redução de área) a serem obtidas em função dos parâmetros desse tratamento, ou seja, tempo e temperatura. Também ficou possível efetuar o procedimento inverso, ou seja, prever as condições de revenimento a serem aplicadas para se obter valores objetivados de propriedades mecânicas. Essa ferramenta provou sua utilidade, uma vez que permite a otimização do processo de revenimento e facilita o desenvolvimento de novos produtos.

Palavras-chave: Tratamento térmico; Chapas grossas; Têmpera; Revenido.

THE USE OF THE TEMPERING EQUIVALENCE PARAMETER IN THE HEAT TREATING OF STEEL PLATES AT USIMINAS-CUBATÃO WORKS

Abstract

Correlations between the tempering parameter proposed by Hollomon & Jaffe and the mechanical properties of quenched and tempered heavy plates made of ASTM A514H steel were developed. Such correlations allowed the prediction of mechanical properties values (yield and tensile strength, ductility and area reduction) from tempering parameters, that is, time and temperature of this treatment. The inverse procedure is also possible, that is, to predict tempering conditions from the aimed values of mechanical properties. This tool proved to be useful, as it permits the optimization of the tempering process and ease the development of new products.

Key words: Heat treatment; Heavy plates; Quenching; Tempering.

¹ Contribuição técnica ao 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.

² Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, MBA em Siderurgia; Analista Industrial, Assistência Técnica da Usiminas-Cubatão, Cubatão SP. marcos.noro@usiminas.com

³ Membro da ABM. Engenheiro de Materiais, M. Eng., D. Eng., Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente; Usiminas-Cubatão, Cubatão SP. Antonio.Gorni@usiminas.com.

1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho consistiu em determinar correlações entre o parâmetro de revenimento – ou seja, a relação de equivalência entre as variáveis tempo de permanência e temperatura do tratamento térmico de revenimento -, e as propriedades mecânicas de chapas grossas de aços martensítico com baixo teor de carbono para fornecimento conforme os requisitos da norma ASTM A514 grau H, ou seja, material estrutural utilizado na construção civil, pontes e navios.⁽¹⁾

A relação de equivalência aqui adotada foi o parâmetro de revenimento proposto por Hollomon e Jaffe,⁽²⁾ com suas equações logarítmicas reconfiguradas em função dos valores de propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência, alongamento e redução de área) obtidos a partir da variação do processo no tratamento térmico.

O revenimento pode ser considerado como uma transformação de fases promovida pela difusão, de um estado metaestável (martensita) para o estado de equilíbrio constituído de ferrita e carbonetos. Com o aumento do tempo, a dureza diminui o que corresponde ao crescimento e a coalescência das partículas de cementita. Em temperaturas próximas da temperatura eutetóide (700°C) e após várias horas a microestrutura terá se transformado em cementita globulizada no interior da fase contínua ferrita. De maneira correspondente, a martensita com excesso de revenido é relativamente macia e dúctil.

A dureza e a resistência mecânica dependem em parte do elevado número de contornos e interfaces na microestrutura, medidos pela quantidade de área de contornos ou interfaces por unidade de volume que existe entre as fases ferrita e cementita, para as numerosas e muito finas partículas de cementita. A fase cementita, dura, reforça a matriz de ferrita ao longo dos contornos, e esses contornos também atuam como barreiras ao movimento das discordâncias durante a deformação plástica. A fase ferrita, contínua, também é muito dúctil e relativamente tenaz, o que corresponde para a melhoria nessas duas propriedades para a martensita revenida.

O tamanho das partículas de cementita influencia o comportamento mecânico da martensita revenida; o aumento no tamanho das partículas diminui a área de contornos entre as fases ferrita e cementita e, conseqüentemente, resulta em um material mais mole e menos resistente, mais tenaz e mais dúctil.

O tratamento térmico de revenimento determina o tamanho das partículas de cementita em função das variáveis de processo que são a temperatura e o tempo. Uma vez que a difusão do carbono está envolvida na transformação da martensita em martensita revenida, o aumento da temperatura irá acelerar o processo da difusão, a taxa de crescimento das partículas de cementita, subseqüentemente, a taxa de amolecimento. A dependência do limite de resistência à tração e do limite de escoamento, bem como da ductilidade, em relação à temperatura de revenido para um aço-liga está mostrada na Figura 1.

A dependência da dureza em relação ao tempo para um aço com composição eutetóide temperado em água está apresentada na figura 2 para diferentes temperaturas. Com o aumento do tempo, a dureza diminui o que corresponde ao crescimento e a coalescência das partículas de cementita.

Conforme o modelo proposto por Hollomon e Jaffe⁽²⁾ tem-se uma relação clássica de equivalência entre tempo e temperatura em processos de revenido.

Eles constataram que a dureza após o revenido de aços temperados pode ser calculada em função de uma expressão com formato similar às equações de difusão do tipo Arrhenius:

$$HV = f(t e^{-Q/RT})$$

onde, HV é a dureza após o revenido, t o tempo de tratamento, T a sua temperatura, Q a energia de ativação e R é a constante universal dos gases. Eles também constataram que o valor de Q dependia da dureza do aço.

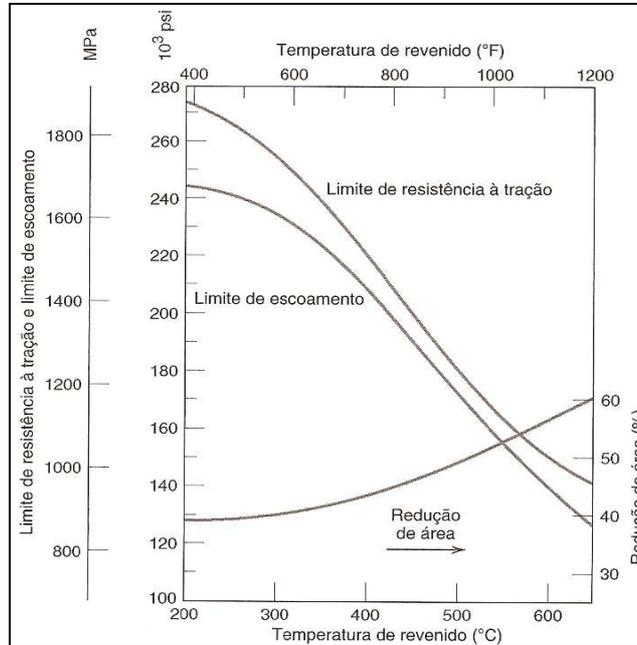


Figura 1: Limites de resistência à tração e de escoamento, e ductilidade (%RA) em função da temperatura de revenido para um aço-liga (tipo 4340) temperado em óleo.⁽³⁾

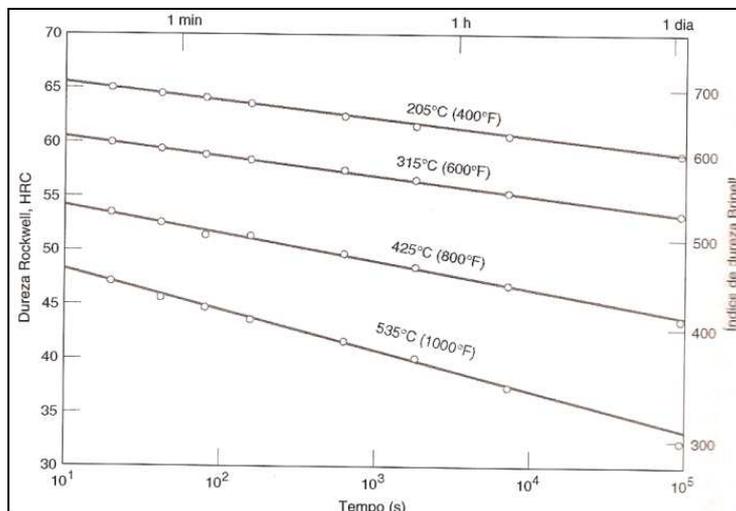


Figura 2: Dureza em função do tempo de revenido para um aço comum ao carbono (1080) com composição eutetóide que foi temperado em água.⁽³⁾

Após algum desenvolvimento matemático eles chegaram a uma expressão que estabelecia equivalência entre tempo e temperatura para um mesmo valor de dureza após revenido:

$$HV = f [T (C + \log t)]$$

A partir dessa expressão pode-se propor um parâmetro de equivalência P adimensional entre tempo e temperatura:

$$P = T (C + \text{Log } t)$$

o qual tem sido empregado em diversos processos termicamente ativados, como o próprio revenido, fluência, envelhecimento etc.^(4,5) O principal problema envolvido no seu uso é a determinação do valor correspondente à constante C, a qual varia em função do aço em consideração.

A pesquisa mostra que o tempo e a temperatura têm efeitos semelhantes no revenido dos aços, especialmente quando do revenido em temperaturas mais elevadas que envolvem agregados de cementita e ferrita. Em vista do exposto, percebe-se que a temperatura de revenido pode ser escolhida de acordo com a combinação de propriedades mecânicas que se deseja no aço temperado.⁽⁶⁻⁹⁾

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material estudado foi um aço fabricado de acordo com a norma ASTM A 514 grau H. Trata-se um aço da classe de 80 kgf/mm² de resistência a tração utilizada principalmente na fabricação de pontes, navios e na construção civil. O processo utilizado para a obtenção desta qualidade é a têmpera e revenimento.⁽¹⁰⁾

As dimensões produzidas foram:

Espessura: 38,10 a 50,80 mm

Largura: 2438 a 3048 mm

Comprimento: 6.096 a 12.192 mm

As faixas de composição química para atender a produção de chapas grossas, segundo a especificação ASTM A 514 grau H, são apresentadas na Tabela 1. As propriedades mecânicas especificadas, segundo a especificação ASTM A 514 grau H, são apresentadas na Tabela 2.

Foi feita a correlação o parâmetro de revenimento proposto por Hollomon & Jaffe com os valores das propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência, alongamento e redução de área) obtidos a partir da variação de processo no tratamento térmico.

A amostragem segue as exigências da norma ASTM A 514 grau H, ou seja, uma amostra por esboço tratado termicamente. O total de amostras coletadas e analisadas foi de 235 (corpos de prova).

Tabela 1: Faixas de composição química segundo a ASTM A 514 H (% peso)

C	0,120 / 0,210	Mo	0,200 / 0,300
Mn	0,950 / 1,300	Cr	0,400 / 0,650
P máx.	0,035	Ni	0,300 / 0,700
S máx.	0,035	V	0,030 / 0,080
Si	0,200 / 0,350	B	0,0005 / 0,0050

Tabela 2: Propriedades Mecânicas Especificadas segundo a ASTM A 514 H

LE mín. (MPa)	690
LR (MPa)	760 / 895
Along. Mín. (%)	≥ 16
Redução de área mín. (%)	45

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O parâmetro de revenido foi definido correlacionando a expressão proposta por Hollomon e Jaffe ($P = T (C + \log t)^{(2)}$) com os resultados obtidos das propriedades mecânicas em função da variação do processo na linha de Tratamento Térmico. As equações 1, 3, 5 e 7, permitem calcular a temperatura de revenimento em função das propriedades mecânicas e dimensões do produto (tempo de permanência) e as equações 2, 4, 6 e 8 permitem calcular as propriedades mecânicas em função da temperatura de revenimento e dimensões do produto (tempo de permanência), para a qualidade ASTM A 514 grau H na linha de Tratamento Térmico da Usiminas, unidade Cubatão.

O parâmetro de revenido correlacionado com o limite de escoamento segue ilustrado na Figura 3. A temperatura de revenimento em função do limite de escoamento (LE) e dimensões do produto segue conforme a equação 1. O limite de escoamento em função da temperatura e dimensões do produto segue conforme a equação 2.

$$TR = (-8841,8 \times \text{LN}(LE) + 73634) / 20 + \text{LN}(((0,14 \times (\text{LARG} / 1000) + 1,77)) \times (1,2 \times \text{ESP})) \quad (1)$$

$$LE = \text{EXP}((((TR) \times (20 + \text{LN}(((0,14 \times (\text{LARG} / 1000) + 1,77)) \times (1,2 \times \text{ESP})))) - (73634)) / (-8841,8)) \quad (2)$$

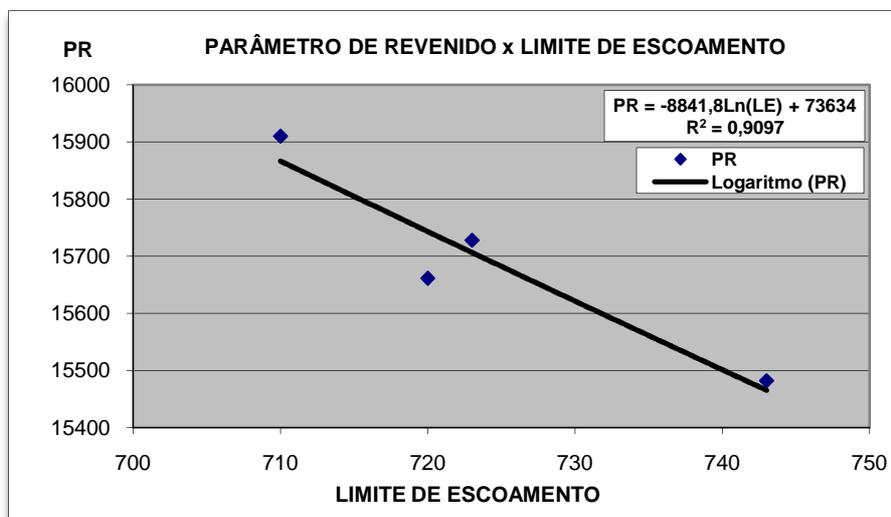


Figura 3: Parâmetro de Revenido x Limite de Escoamento.

O parâmetro de revenido correlacionado com o limite de resistência segue ilustrado na Figura 4. A temperatura de revenimento em função do limite de resistência (LR) e dimensões do produto segue conforme a equação 3. O limite de resistência em função da temperatura e dimensões do produto segue conforme a equação 4.

$$TR = (-11611 \times \text{LN}(LR) + 93164) / 20 + \text{LN}(((0,14 \times (\text{LARG} / 1000) + 1,77)) \times (1,2 \times \text{ESP})) \quad (3)$$

$$LR = \text{EXP} \left(\frac{((TR) \times (20 + \text{LN}(((0,14 \times (LARG / 1000) + 1,77)) \times (1,2 \times \text{ESP})))) - (93164)}{-11611} \right) \quad (4)$$

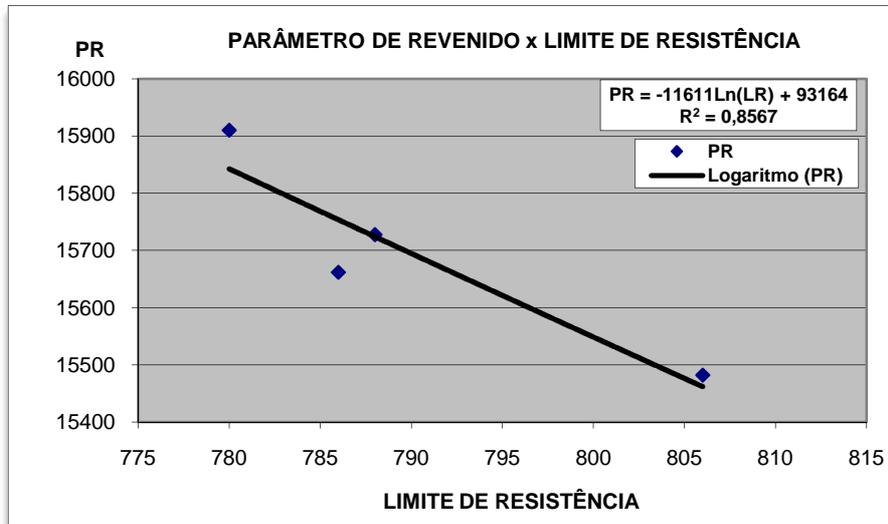


Figura 4: Parâmetro de Revenido x Limite de Resistência.

O parâmetro de revenido correlacionado com o alongamento segue ilustrado na Figura 5. A temperatura de revenimento em função do alongamento (A) e dimensões do produto segue conforme a equação 5. O alongamento em função da temperatura e dimensões do produto segue conforme a equação 6.

$$TR = \frac{(3851,6 \times \text{LN}(A) + 3663,3)}{20 + \text{LN}(((0,14 \times (LARG / 1000) + 1,77)) \times (1,2 \times \text{ESP}))} \quad (5)$$

$$A = \text{EXP} \left(\frac{((TR) \times (20 + \text{LN}(((0,14 \times (LARG / 1000) + 1,77)) \times (1,2 \times \text{ESP})))) - (3663,3)}{3851,6} \right) \quad (6)$$

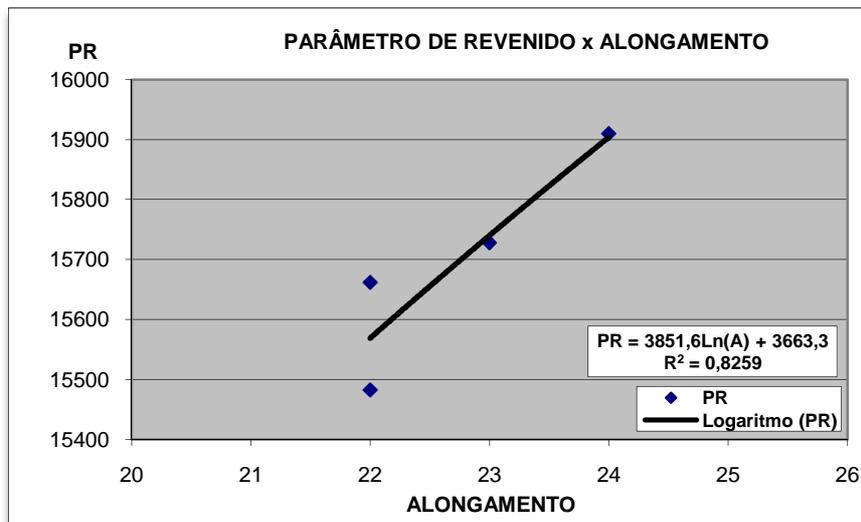


Figura 5: Parâmetro de Revenido x Alongamento.

O parâmetro de revenido correlacionado com a redução de área segue ilustrado na Figura 6. A temperatura de revenimento em função da redução de área (RA) e dimensões do produto segue conforme a equação 7. A redução de área em função da temperatura e dimensões do produto segue conforme a equação 8.

$$TR = (7091,3 \times \text{LN}(RA) - 14456) / 20 + \text{LN}(((0,14 \times (\text{LARG} / 1000) + 1,77)) \times (1,2 \times \text{ESP})) \quad (7)$$

$$RA = \text{EXP}(((TR) \times (20 + \text{LN}(((0,14 \times (\text{LARG} / 1000) + 1,77)) \times (1,2 \times \text{ESP})))) - (-14456)) / (7091,3) \quad (8)$$

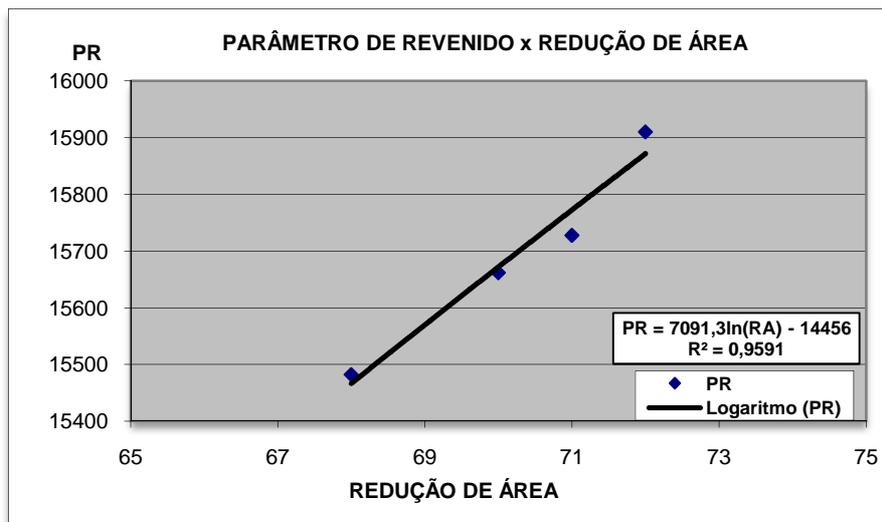


Figura 6: Parâmetro de Revenido x Redução de Área.

onde:

- TR = Temperatura de Revenimento (°C).
- LN = Logaritmo Natural.
- LE = Limite de Escoamento (MPa).
- LR = Limite de Resistência (MPa).
- A = Alongamento (%).
- RA = Redução de Área (%)
- LARG = Largura (mm).
- ESP = Espessura (mm).

4 CONCLUSÕES

Com base nos estudos apresentados foi desenvolvida uma planilha de cálculo que proporcionou a possibilidade de calcular as propriedades mecânicas (Limite de Resistência, Limite de Escoamento, Redução de Área e Alongamento) em função das variáveis de processo no tratamento térmico de têmpera e revenido (temperatura de revenimento e/ou tempo de permanência), através do parâmetro de revenimento. Esse modelo foi específico para a qualidade ASTM A 514 grau H, auxiliando na melhoria do processo, otimização do desempenho e desenvolvimento de novos produtos.

A análise dos resultados decorrentes da aplicação dessa planilha no caso específico da qualidade ASTM A 514 grau H levou ao abaixamento da temperatura de revenimento. Dessa forma ocorreu elevação dos limites de escoamento e de resis-

tência desse material, deslocando-os para valores mais afastados do valor mínimo da faixa admissível. A diminuição dos valores de alongamento e redução de área não prejudicou a qualidade final do produto.

Agradecimentos

À Usiminas, que proporcionou a possibilidade da realização deste trabalho e permitiu sua publicação.

Aos amigos Eng. Jose Herbert Dolabela da Silveira, Eng. Kenji Camey e ao Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin pela orientação e apoio manifestado durante o desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Norma ASTM – Designation ASTM A 514/A5 14M – 05 – Standard Specification for High-Yield-Strength, quenched and Tempered Alloy Steel Plate, Suitable for Welding.
- 2 Hollomon, J.H. & Jaffe, L.D. time-Temperature Relations in Tempering Steel. Transactions of the AIME, 162, 223-249.
- 3 William D. Callister, Jr – Ciência e Engenharia de Materiais. Editora LTC. 5ª edição/2002.
- 4 Canale, L.C.F. e outros. The Development and Use of the Larson-Miller Equation and Hollomon-Jaffe Parameters for Stress-Relieving Operations: a review in: Congresso Anual da ABM. Rio de Janeiro, Julho 2006, 3513-3523.
- 5 Irvine, K.J. e outros. Grain-refined C-Mn Steels. Journal of the Iron and Steel Institute, February 1967, 161-182.
- 6 GRUM, J., SLAVKO, B., ZUPANČIČ, M., Influence of quenching process parameters on residual stresses in steel. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 114, 2001, 57-70.
- 7 PIETIKÄINEN, J., Considerations about tempered martensite embrittlement. Materials Science and Engineering A273 – 275, 1999, 466-470.
- 8 Robert E. Reed – Hill; Princípios de Metalurgia Física - Editora Guanabara Dois. 2ª edição - Rio de Janeiro, 1982.
- 9 W. G. Patton, Metallurgical Progress, vol. 43, 1943.
- 10 Manual de Requisitos Químicos e Mecânicos da Usiminas.