



**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE
METALURGIA E MATERIAIS - ABM**

50^o CONGRESSO ANUAL

*São Pedro - São Paulo
01 a 04 de agosto de 1995*

VOLUME 2

*Metalurgia Física e
Físico-Química Metalúrgica*

ESTE VOLUME FOI PUBLICADO COM O AUXÍLIO FINANCEIRO DE:



CNPq

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO
CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO

FINEP



FINANCIADORA DE ESTUDOS E PROJETOS

FAPESP

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA
DO ESTADO DE SÃO PAULO

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Congresso Anual da ABM (50.: 1995 : São Pedro, SP)
Congresso Anual da ABM : anais. — São Paulo :
Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais,
1996.

Obra em 6 vol.

1. Metalurgia — Congressos I. Título.

96-0071

CDD-669.06

Índices para catálogo sistemático:

1. Congressos : Metalurgia : Tecnologia 669.06
2. Metalurgia : Tecnologia : Congressos 669.06

COMISSÃO DE ORIENTAÇÃO

André Musetti - Presidente	Luiz Antônio M. Ferreira - <i>Engemasa</i>
Alain Irosé - <i>Eletrometal</i>	Orlando Sanches Filho - <i>Nardini</i>
Cláudio Kiminami - <i>UFSCar</i>	Oscar Quilodrán Alarcón - <i>Bosch</i>
Ettore Bresciani Filho - <i>Unicamp</i>	Paulo Roberto Mei - <i>Unicamp</i>
Hans - Jürgen Kestenbach - <i>UFSCar</i>	Rezende G. dos Santos - <i>Unicamp</i>
Jarbas Nascimento - <i>ABM</i>	Rodnei Bertazzoli - <i>Unicamp</i>
Jorge A. Gouvêa - <i>Fupresa</i>	Vicente Chiaverini - <i>ABM</i>

COMISSÃO EXECUTIVA

Rodnei Bertazzoli - Coordenador	Paulo Roberto Zampieri
Carlos Kenichi Suzuki	Rubens Caram Júnior
Cecília Amélia Carvalho Zavaglia	Sérgio Tonini Button
Célia Marina de Alvarenga Freire	- <i>Faculdade de Engenharia Mecânica / Departamento de Engenharia de Materiais - Unicamp</i>
Maria Clara Filipini Ierardi	

ORGANIZAÇÃO

Departamento de Eventos da ABM

ASSESSORIA

Andréa Manzoni	Maria Cecília Rodini
Lie R. D'Ottaviano	Silvia Motta
Marcos R. Pereira	

CINÉTICA DO REVENIDO DE AÇOS AO Mn, COM E SEM ADIÇÃO DE BORO

8233c

Waldir Gárlipp* 022 187

Mario Cilense**

AÇO AO BORO; PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS E BOROCARBONETOS.

Resumo

Dois aços similares, um contendo o elemento boro e o outro não foram analisados utilizando a técnica da microdureza após tratamento de revenido no intervalo 100°C - 200°C e em diferentes tempos, apresentando uma mudança de energia de ativação a 160°C. Este fato pode explicar uma mudança de densidade volumétrica de precipitados $Fe_{23}(C,B)_6$ ou $Fe_{24}C$, com início naquela temperatura. Micrografias mostram um diâmetro médio de 840 μm para o grão cristalino e um atraso na formação da ferrita no aço contendo boro.

Introdução

A temperabilidade de aços com microadição de boro é mais elevada que a dos aços liga tradicionais contendo Ni, Cr, Mo, W e outros elementos. A economia que se consegue na substituição dos segundos pelo primeiro é muito grande, uma vez que algumas dezenas de ppm de boro substitui os elementos acima citados. Por exemplo 20 ppm de boro substitui em determinado aço a adição de 1,33 % Ni + 0,31 % Cr + 0,04 % Mo para se ter a mesma temperabilidade (1,2), na fabricação de engrenagens, eixos, pinhões, porcas e parafusos (3-5). Além disso apresentam excelente conformação a frio no estado recozido, e no estado temperado não se forma austenita retida, nem ferrita ou microsegregação, elevando a resistência à fadiga (6).

Estes aços de baixo carbono, baixa liga denominados BCBL (LCLA em inglês), onde a porcentagem de carbono não é maior que 0,3 % e que fazem parte da classificação ARBL (HSLA em inglês), alta resistência baixa liga exigem condições especiais de preparo e conhecimento específico de temperatura de solubilização, velocidade de têmpera e temperatura de revenido (2). A partir da II Guerra Mundial por meio de pesquisas metódicas e exaustivamente realizadas vieram a ser melhor considerados, conforme as necessidades de aplicação.

50º Congresso Anual da ABM- Associação Brasileira de Metais, 01 a 04 de agosto 1995 - São Pedro - SP

* Membro da ABM, Professor Titular Aposentado do Departamento de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, bolsista do CNPq.

** Membro da ABM, Professor Adjunto do Departamento de Físico-Química do Instituto de Química de Araraquara - UNESP, bolsista do CNPq - Araraquara-SP, CP 355, CEP 14800-900.

Para o aço BCBL, a temperatura recomendada no tratamento térmico de revenido não deve ultrapassar de 540°C, para evitar o fenômeno denominado de "fragilidade ao revenido". Para esse tipo de aço pouca informação se tem até o momento quanto às propriedades físicas obtidas pelo tratamento térmico de revenido no intervalo de temperatura de 100 a 200°C onde se dá a precipitação de carbeto e borocarbonetos de composição $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$ (ε), $\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$ e $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$.

Koh-ichi (7) não conseguiu detectar no tratamento de revenido a 180°C nenhum destes precipitados além de compostos BN, TiN e MnS, provavelmente pela dimensão extremamente pequena dos mesmos e pela concentração mais elevada de nitrogênio (20 vezes maior que o normal admitido).

No aço ao boro, o precipitado é em forma de partículas extremamente finas (8) como lascas (laths) com estrutura hcp e orientação cristalográfica com a ortorrômbica da martensita, $(10\bar{1}1)_\epsilon$, $\parallel (101)_\alpha$ e $[0001]_\epsilon \parallel [011]_\alpha$, se precipita no intervalo de temperaturas, 100°C - 250°C. O processo deve apresentar a transição coerente → semi-coerente → incoerente. Acima de 250°C o precipitado é passa a ser absorvido (retrogressão) pela matriz, dando lugar a precipitação da cementita (Fe_3C) extremamente fina na temperatura de 360°C.

A existência de alguns elementos como impurezas nos aços de baixo carbono não precipita seus carbeto, a não ser nas temperaturas acima de 500°C (9), o que permite se estudar isoladamente a precipitação dos carbonetos e borocarbonetos de ferro na faixa de temperaturas entre 100°C e 200°C. Neste caso praticamente 75% de carbono se difunde a curta distância para formar os precipitados $\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$ ou ε, dependendo da liga possuir ou não o elemento boro. Dependendo do estado microestrutural da liga, o tamanho de grão e a existência de discordâncias podem diminuir esta porcentagem.

A adição do Mn nos aços de baixa liga provoca um abaixamento da temperatura do Ms, em relação ao aço sem boro, de 22°C no tratamento térmico de têmpera (9), e com teores normais sua ação é praticamente nula no tratamento do revenido (10 e 11). Grinberg et al (12) acredita que o boro também não influe no tratamento de revenido a 200°C.

Neste trabalho, por meio de medidas de microdureza procurou-se analisar o comportamento no tratamento térmico de revenido no intervalo de 100 - 200°C, em diferentes tempos, de dois aços com composição química semelhante, porém, um deles contendo o elemento boro. As variáveis independentes adotadas no tratamento foram o tempo e a temperatura.

Materiais e método experimental

Os dois aços em estudo apresentaram a composição química em porcentagem em peso dos elementos, mostrados na tabela I

Os corpos de prova utilizados nesse trabalho tinham forma cilíndrica com 12,5 mm de diâmetro e 10,5 mm de altura. O borocarboneto solubiliza a 1100°C e para dar o tratamento térmico idêntico, ambos os corpos de prova foram aquecidos a 1100°C

durante 0,5 hora em atmosfera protetora e temperados na água fria. O tratamento térmico de revenido foi feito em banho de óleo de silicone Baysilone PN200 nas temperaturas de 100, 120, 140, 160, 175, 190 e 200°C em distintos tempos desde 0 até 10⁴ minutos (2).

Tabela I - Porcentagem em peso dos elementos constituintes dos dois aços.

liga	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu
10B22	0,20	0,23	1,14	-	-	-	-
E1522EP	0,18	0,29	1,36	0,16	0,07	0,02	0,06

liga	P	S	B	Al	N	O	V
10B22	0,013	0,009	0,003	0,030	0,0047	0,0021	-
E1522EP	0,007	0,002	-	-	-	-	0,032

Micrografias foram obtidas dos corpos de prova polidos e atacados com reativo de Villela, para acompanhar o tratamento de revenido no dois aços em estudo.

As medidas de microdureza foram realizadas com auxílio de uma microscopia REICHERT MeF equipado com microdurímetro. Os dados experimentais, microdureza, temperatura e tempo nos permitiu obter os gráficos contidos nas figuras 3 e 4.

Discussão

Micrografia

O revenido a 200°C, após 10⁴ minutos revelou no interior dos grãos cristalinos a formação de agulhas de ferrita no aço 10B22, e das mesmas agulhas mais polígonos irregulares de ferrita no aço E1522EP (figuras 1 e 2), pela decomposição da martensita.

Não foi possível revelar carbonetos ou borocarbonetos pela insuficiente definição ótica (8).

O diâmetro médio calculado dos grãos cristalinos foi igual a 840 µm, o que permitiu que na medida de dureza Vickers 80% dos contornos de grão fosse incluídos.

Microdureza

Medidas de dureza Hv em função do logaritmo do tempo em minutos para cada temperatura e cada aço, foram lançadas na figura 3. Das curvas em forma de sigmoide

obteve-se os tempos (t_i) e as temperaturas T_i correspondentes aos pontos de inflexão. Os logaritmos de t_i colocados em função de $1000/T_i$, (figuras 4 a e 4b), mostram uma mudança das energias de ativação para os dois aços, de 51 kJoule/mol para 134 kJoule/mol na temperatura de 160°C. Esta alteração deve explicar a variação da densidade volumétrica, pela autodifusão de vacâncias a curta distância (13), de precipitados $Fe_{23}(C,B)_6$ no aço com boro e $Fe_{24}C$ no aço sem boro, com distâncias médias relativas que dificultariam o caminhar das linhas de discordâncias produzidas pela marca de dureza.

Segundo Fletcher (14) a têmpera de 1250°C do aço ao boro aqui pesquisado seguida de revenido a 200°C deixa ainda uma tensão residual na superfície do corpo de prova ensaiado, correspondente a 5,1 Hv. Este valor é menor que a variação da medida de dureza, portanto a mudança de energia de ativação deve corresponder a um outro tipo de mudança estrutural de precipitação. Medidas de difração de raios-X, microscopia eletrônica de transmissão e medidas preliminares de resistividade elétrica que acompanharam este trabalho, confirmam a existência do fenômeno de precipitação dos carbonetos e borocarbonetos nos aços aqui utilizados.

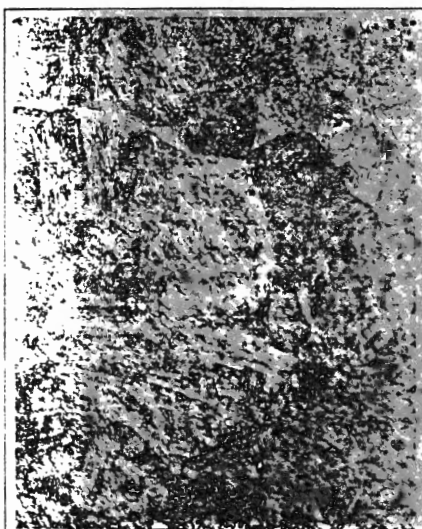


FIGURA 1 - Micrografias do aço 10B22
(820X)

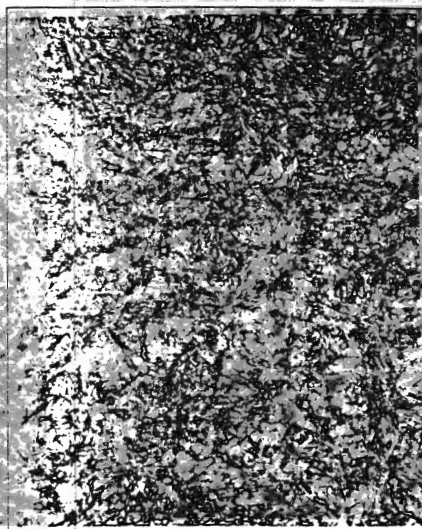


FIGURA 2 - Micrografia do aço E1522EP
(820X)

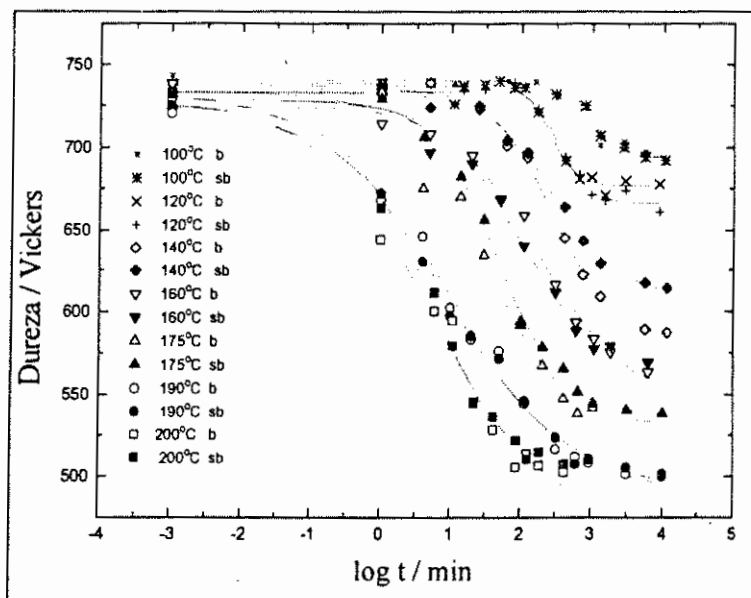


FIGURA 3 - Microdureza Vickers em função do logaritmo do tempo, (minutos).

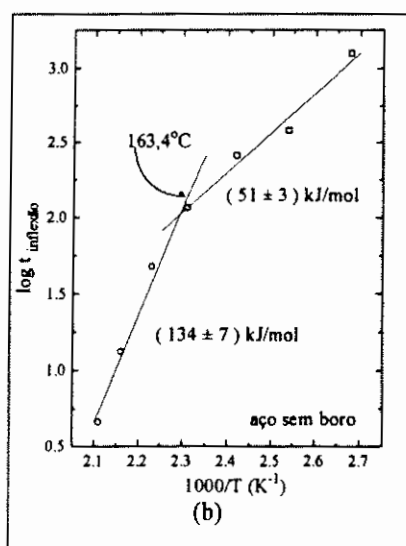
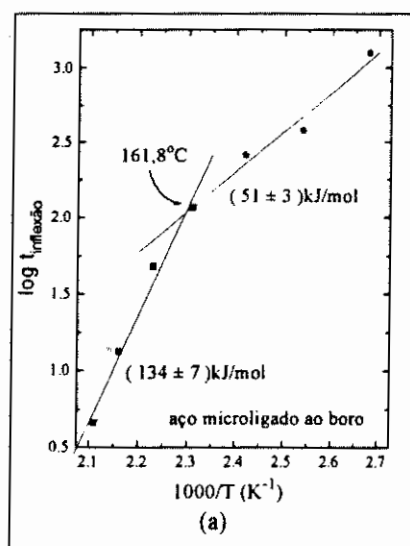


FIGURA 4 - Logaritmo do tempo no ponto de inflexão das curvas da figura 3 em função do inverso da temperatura absoluta, (a) 10B22; (b) E1522EP

Microdureza

Uma intensa precipitação a partir de 200°C, seguida de coalescimento dos precipitados $\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$ e Fe_{24}C a partir de 160°C, parece explicar a alteração da energia de ativação de 134 kJ/mol para 54 kJ/mol.

Micrografia

O diâmetro médio dos grãos cristalinos é praticamente igual a 840 μm para os dois aços. No aço contendo boro o tratamento de revenido apresenta um atraso na formação da ferrita em comparação ao aço sem boro, que tem acrescentada ainda um tipo de ferrita poligonal.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro e a doação do material pelas firmas AÇOS IPANEMA E ELÉTROMETAL

Referencias bibliográficas

1. CORRÊA da SILVA, L. C., "Aço ao boro: Principais características metalúrgicas e aplicações", *Boletim da Associação Brasileira de Metais*, 9 (30), p 109 - 140 , 1953.
2. IRVINE, K. J.; PICKERING, F. B. ; HESELWOOD, W. C. and ATKINS, M., 'The Physical Metallurgy of low carbon, low-alloy steels containing boron', *J. Iron and Steel Inst.*, 184 , p 54 - 67, 1957.
3. BARBOSA, J., 'Características físico-químicas do aço ao boro usado em parafusos de alta resistência', *Dissertação de Mestrado Araraquara, SP*, 1994, 103 p, Instituto de Química de Araraquara - UNESP.
4. GARLIPP, W. ; NOVAES GOMES, S. I. e CILENSE, M. , "Decomposição da austenita em aço C-Mn microligado ao boro", *Metalurgia (ABM)*, 48 (404) p 188 -192, 1992.
5. NOVAES GOMES, S. I.; GARLIPP, W. e CILENSE, M. , " Decomposição da austenita em aço C-Mn microligado ao boro por resfriamento contínuo", *Anais do 46º Congresso da Associação Brasileira de Metais, ABM* , São Paulo ,1991.
6. SPENCER, H. P., "How Caterpillar uses boron steel", *Metal Progress* p 76 - 81, 1966.

7. SUGIMOTO, K ; SAKAKI, T. and MIYAGAWA, O., "Effects of boron and nitrogen on fracture toughness of boron-treated 0.35% steels tempered", *Transactions ISIJ*, **26**, p328 - 336, 1986.
8. BRICK, R. M. ; GORDON, R. B. and PHILIPS, A., "Tempering of martensite" in *Structure and Property of Alloys*, Mc-Graw Hill Company- third edition, N. York, 1965.
9. PORTER, D. A. and EASTERLING, K. E., "Diffusionless transformations" in *Phase Transformations in Metals and Alloys*, Reprinted 1990, Chapman and Hall, London.
10. da COSTA, A. L. e MEI, P. *Aços e Ligas Especiais 2ª Edição*-Sumaré, SP Eletrometal S. A. Metais Especiais, 1988.
11. CHIAVERINI, V., *Aços e Ferro Fundidos, 4ª Edição*, ABM, São Paulo, p 162-173, 1979.
12. GRINBERG, E. M. ; LARICHEVA, G. G. and MIROSHNIK, E. S., "Influence of boron on the transformations of steel in tempering,, *Metal Science and Heat Treatment*, (Russia), **33**, (9-10), p 650 - 654, 1991.
13. GÄRLIPP, W. PFEILER, W. and DOPPLER, T. "SRO - effects in alpha-AgSn, investigated by resistivity measurement" *Defect and Diffusion Forum*, 66-69, p 497-502, 1989
14. FLETCHER, A. J.; GEARY, W. and KING, J. E. "Fatigue crack propagation and residual stress in a quenched and tempered C-Mn-B steel" *Analytical and Experimental Methods for Residual Stress Effects in Fatigue*, ASTM STP 1004, R. L. Champoux, J. H. Underwood, and J. A. Kapp., Eds, American for Society for testing and Materials, Philadelphia, 1988, p 82-96.

TEMPERING KINETICS OF Mn-STEELS CONTAINING OR NO MICROADDITION OF BORON

Key words

Steel boron; tempering steel boron; kinetics of Mn-steel boron tempering

Abstract

Using microhardness technique two similar steels containing or no boron were analysed after tempering treatment in the range 100 - 200°C and different times, presenting a change of activation energy at 160°C. This fact can explain a change of volumetric density of precipitates $Fe_{23}(C,B)_6$ and $Fe_{24}C$ (ε) starting at that temperature. Micrographies show an average diameter for the crystalline grains of 840 micrometer and a delay on ferrite formation for the steel containing boron.