

EFEITO DO Nb NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E "BAKE HARDENABILITY" EM AÇOS DE CARBONO EXTRA-BAIXO⁽¹⁾

João Francisco Batista Pereira⁽²⁾
Kleiner Marques Marra⁽³⁾

Resumo

A influência do Nb nas propriedades mecânicas à tração, cinética de recristalização e "bake hardenability" de aços extra-baixo carbono, laminados a frio e recozidos continuamente, foi avaliada em grupos distintos de aços. No primeiro, o carbono total (C_t), foi mantido constante e o teor de Nb variado de forma a serem obtidos diferentes valores de carbono em solução sólida (C_{ss}), calculado por $C_{ss} = C_t - C_{NbC}$. No segundo, foram variados C_t e Nb, mantendo-se fixo o teor de C_{ss} . Comportamentos distintos foram observados para os conjuntos avaliados. A ductilidade e o valor r (coeficiente de anisotropia normal), aumentam com o aumento da relação Nb/C em aços com C_t constante e diminuem em aços com C_{ss} constante. Já a propriedade de "bake hardenability" (valor BH) e o índice de envelhecimento (AI), tendem a diminuir com o aumento da relação Nb/C, sendo essa redução bem mais acentuada nos aços com C_t constante. A temperatura de recristalização é sensivelmente aumentada com a adição de Nb a um aço de carbono extra baixo. Contudo, em aços que já contêm Nb, esse aumento é menos intenso.

Palavras-chave: Aços Bake Hardening; Envelhecimento por deformação; Nb.

(1) Contribuição Técnica ao 60º Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, 25 a 28 de julho de 2005.

(2) Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Gerência de Pesquisa de Processos da Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil

(3) Engenheiro Metalurgista, D.Sc., Gerência de Pesquisa de Processos da Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços "Bake Hardenable" - BH, produzidos a partir de aços de carbono extra-baixo, utilizam os mais diversos projetos de liga, sendo os mais tradicionais aqueles contendo Ti e Nb ou somente Nb.^(1,2,3) Esse último, por envolver o acerto, na aciaria, de um menor número de elementos, e em razão da melhor aderência do revestimento em aços do tipo "galvannealed",^(2,3) tem sido mais produzido.

Uma das possibilidades de produção de aços BH ao Nb se dá a partir da adição subestequiométrica de Nb visando-se deixar quantidades residuais de carbono em solução sólida.

Dado que as aciarias tradicionais trabalham com faixas em relação à adição de elementos ao aço, pode-se ter, para um mesmo teor de C_t , várias relações Nb/C, o que determina vários valores de C_{ss} . Da mesma forma, um determinado teor de C_{ss} pode ser obtido a partir de diferentes teores de C_t e Nb.

Nesse estudo avaliou-se a influência dos teores de Nb e C_{ss} nas propriedades mecânicas à tração, estampabilidade, cinética de recristalização e "bake hardenability" de aços de carbono extra baixo laminados a frio e recozidos continuamente a 780 °C.

2 MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As composições químicas em termos dos teores de nióbio e carbono são mostradas na Tabela 1. Foram utilizados aços acalmados ao alumínio tradicionais cujas adições de carbono e nióbio foram variadas de forma a serem obtidos 4 grupos distintos. Nos três primeiros, o C_{ss} foi mantido constante em torno de 20, 13 e 8 ppm. No quarto, o carbono total, C_t , foi mantido em torno de 28 ppm.

Tabela 1. Teores de carbono e nióbio dos aços avaliados. (% em peso).

Classe	Aço	C	Nb
$C_{ss} \sim 20$ ppm	1	0,0023	-
	2	0,0043	0,016
$C_{ss} \sim 13$ ppm	3	0,0029	0,012
	4	0,0022	0,008
	5	0,0042	0,023
$C_{ss} \sim 8$ ppm	6	0,0014	0,004
	7	0,0017	0,007
	8	0,0030	0,018
	9	0,0026	0,016
$C_t \sim 28$ ppm	4	0,0022	0,008
	3	0,0029	0,012
	8	0,0026	0,016
	10	0,0028	0,019

O cálculo do carbono em solução considerou:

$$C_{ss} = C_t - C_{NbC} \quad (1)$$

onde:

C_{ss} = carbono em solução sólida estequiométrico

C_t = carbono total do aço

C_{NbC} = carbono como NbC

Os lingotes foram reaquecidos em temperaturas em torno de 1200 °C, laminados até obtenção de placas de 35 mm de espessura. As placas foram então resfriadas ao ar até a temperatura ambiente, reaquecidas na mesma temperatura de 1200 °C e laminadas até chapas de 7 mm em temperaturas de acabamento da ordem de 900 °C e

bobinadas a temperatura superior a 700 °C. O bobinamento foi simulado deixando-se o material laminado a quente resfriar ao ar, enforando-o na temperatura visada de bobinamento por 2 horas, seguido de resfriamento ao ar até temperatura ambiente. Após a laminação a quente os materiais foram retificados para 4 mm de espessura e laminados a frio com 80% de redução. A temperatura de recozimento foi de 780 °C por 30 s com taxa de resfriamento primário de 50 °C/s. O passe de encruamento foi de 1,5%.

Foram realizados testes de tração com base de medida de 25 mm. Os valores de propriedades mecânicas foram calculados pela média das propriedades medidas nas direção 0°, 45° e 90° com a direção de laminação.

O valor BH foi obtido pela aplicação de pré-deformação em tração de 2% seguido de tratamento térmico a 170 °C por 20 min. O AI foi obtido pela aplicação de pré-deformação de 8% em tração seguido de tratamento a 100 °C por 60 min. Os valores foram obtidos como média das direções a 0 e 90° com a direção de laminação.

3 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados dos testes realizados são mostrados na tabela 2.

Tabela 2. Dados de propriedades mecânicas a tração, tamanho de grão, valor BH e índice de envelhecimento.

Classe	Aço	TG (μm)	LE (MPa)	LR (MPa)	AL(%)	r	n	BH (MPa)	AI (MPa)
C _{ss} ~20ppm	1	17,7	241	352	39,8	1,41	0,175	54,3	38,7
	2	12,3	313	391	36,6	1,37	0,151	50,5	32,9
C _{ss} ~13ppm	3	13,4	241	341	40,8	1,54	0,190	47,2	35,4
	4	14,0	238	325	40,5	1,60	0,191	49,8	36,5
	5	12,0	281	381	38,1	1,37	0,186	45,8	32,0
C _{ss} ~8ppm	6	17,2	211	318	43,6	1,66	0,208	33,5	29,5
	7	16,4	233	330	44,0	1,57	0,209	25,9	20,0
	8	10,0	255	340	41,7	1,61	0,196	24,4	13,6
	9	14,0	270	369	39,6	1,45	0,191	20,2	13,6
C _t ~28ppm	4	14,0	238	325	40,5	1,60	0,191	49,8	36,5
	3	13,4	241	341	40,8	1,54	0,190	47,2	35,4
	8	10,0	255	340	41,7	1,61	0,196	24,4	13,6
	10	7,9	230	350	43,9	1,97	0,202	17,4	2,5

3.1 Propriedades Mecânicas à Tração

Para os grupos com C_{ss} constante, observa-se uma tendência de aumento do limite de escoamento (LE), Figura 1(a), com o aumento da relação Nb/C. Para uma determinada relação Nb/C, o LE é também aumentado pelo aumento do C_{ss}, podendo essas observações serem estendidas à variação do alongamento total (AL(%)), Figura 1(b), numa ordem inversa à da variação do LE. Para o grupo com C_t constante, o aumento da relação Nb/C não altera substancialmente o LE, observação que pode ser estendida também à variação AL(%), embora para esse último seja observada uma tendência de elevação.

Em relação à variação do tamanho de grão, Figura 1(c), sua tendência é diminuir com o aumento da relação Nb/C, independente do grupo de aços testados.

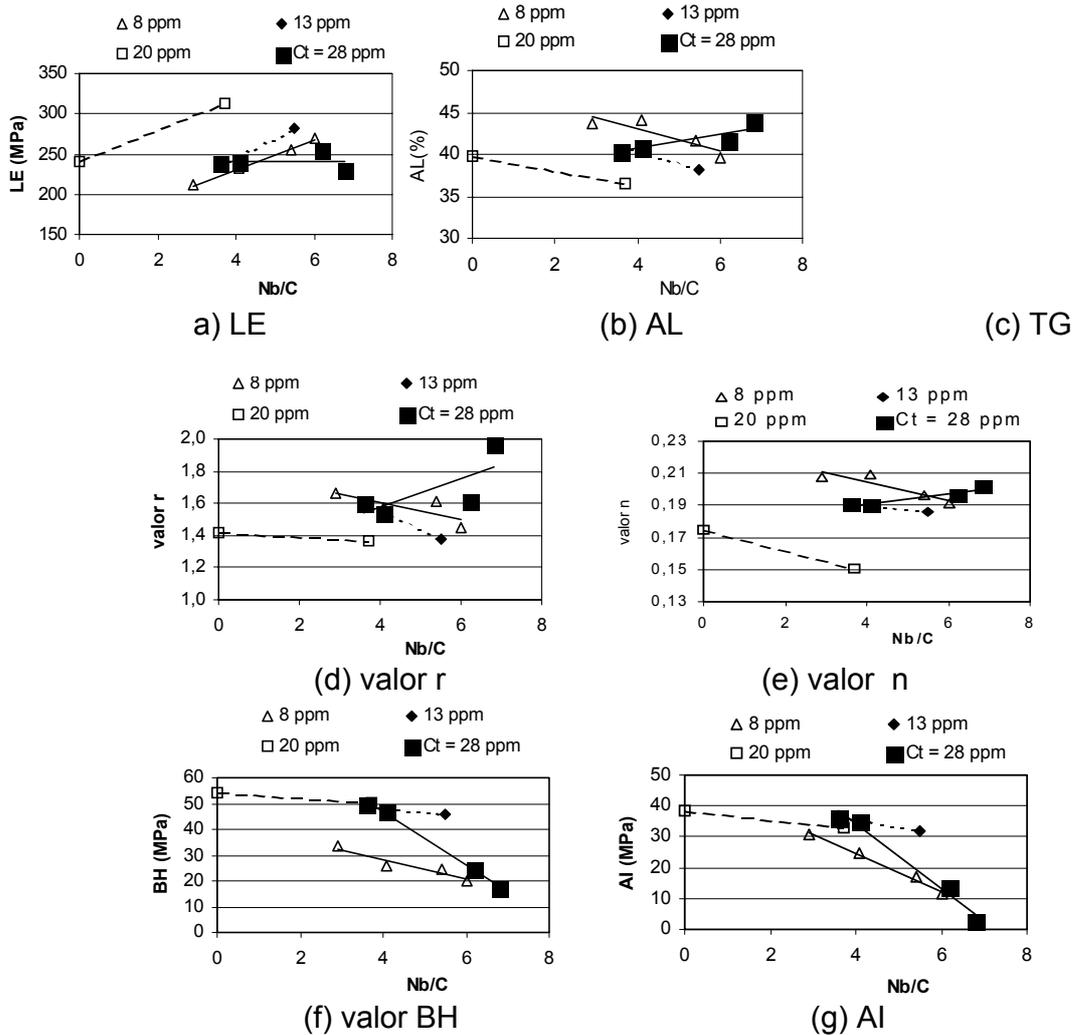


Figura 1. Influência da relação Nb/C nas propriedades mecânicas à tração, tamanho de grão, estampabilidade (valor r e valor n) e envelhecimento (valor BH e AI).

3.2 Estampabilidade

A evolução dos parâmetros que caracterizam a estampabilidade dos aços em função da relação Nb/C, mostra que o valor r, Figura 1(d) tende a diminuir com o aumento da relação Nb/C nos grupos de aços onde o C_{SS} foi mantido constante. Nesses grupos, para uma relação Nb/C constante, o valor r é menor quanto maior C_{SS} . No grupo onde o C_t foi mantido constante a tendência é de crescimento do valor r com o aumento da relação Nb/C.

O valor n, Figura 1(e), apresenta um comportamento muito semelhante ao do AL(%), figura 1(b). Ele diminui com o aumento da relação Nb/C nos grupos onde C_{SS} foi mantido constante e diminui também com o aumento do teor de C_{SS} . Já no grupo que possui C_t constante, o valor n tende a crescer.

3.3 "Bake Hardenability" e Índice de Envelhecimento I

A evolução do valor BH, Figura 1(f), apresenta uma tendência de diminuir com o aumento da relação Nb/C, independente do grupo de aços avaliados. Contudo, no grupo onde C_{ss} foi mantido aproximadamente constante, a queda tende a ser muito mais suave que a observada no grupo onde C_t foi mantido constante. O mesmo tipo de comportamento pode ser estendido à variação do AI, Figura 1(g).

Um importante aspecto dos aços BH é o potencial para retorno do patamar de escoamento,⁽¹¹⁾ que define o tempo para utilização do material, a partir da aplicação do passe de encruamento, sem que haja problemas com linhas de distensão. Uma indicação desse potencial é fornecida pelo AI. Para valores de AI inferiores a 30 MPa o aço é considerado não envelhecível para aplicações de engenharia, ou seja, é possível estocá-lo por um tempo máximo de 6 meses, à temperatura ambiente sem que ocorra retorno do patamar de escoamento.

A variação do AI em função do valor BH é mostrada na Figura 2, que apresenta também a influência do C_{ss} . Fica evidente pelo gráfico que o potencial para envelhecimento natural (AI > 30 MPa) é bastante elevado para C_{ss} da ordem de 13 ppm ou superior.

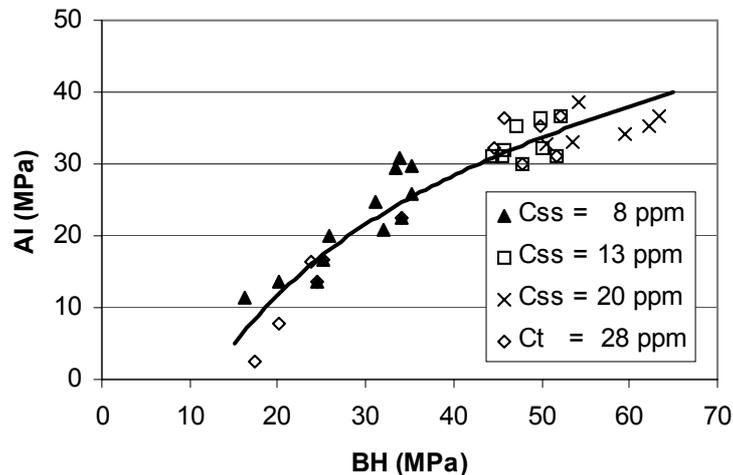


Figura 2. Relação entre AI e valor BH.

3.4. Cinética de Recristalização Isócrona

A cinética de recristalização isócrona é mostrada na Figura 3. Considerando a temperatura de recristalização como aquela que promove 50% de fração recristalizada, pode-se observar que a adição de Nb, Figura 3(a), a um aço de carbono extra-baixo eleva substancialmente a temperatura de recristalização (em 78°C) atrasando, principalmente, o início da recristalização. Adições crescentes de Nb, contudo, não alteram significativamente essa temperatura, Figuras 3(b), (c), (d) e (e). Outro aspecto é que, aparentemente, não há grande influência do C_{ss} , e que as grandes diferenças observadas podem ser relacionadas, Figura 3(e), ao teor de Nb do aço.

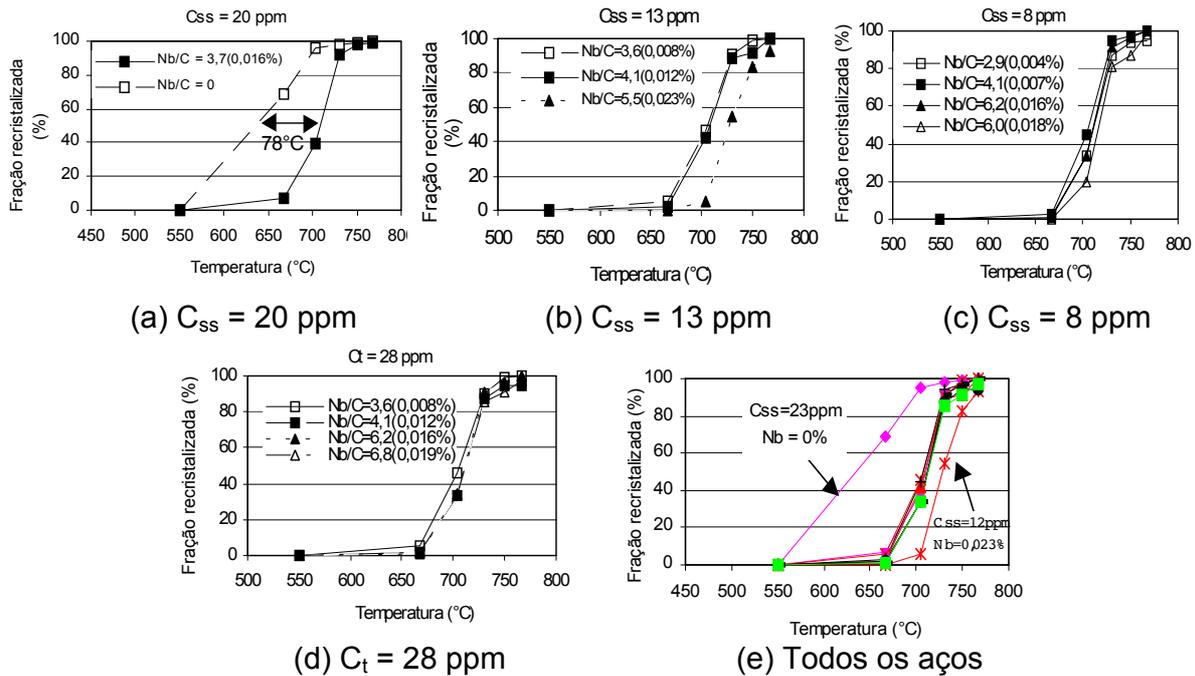


Figura 3. Influência da relação Nb/C na cinética de recristalização isócrona. Nas legendas das figuras, a porcentagem entre parênteses se refere ao teor de Nb do aço.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Propriedades Mecânicas e Estampabilidade

Conforme mostrado na Figura 1, nos grupos de aços com C_{SS} constante, o aumento da relação Nb/C tende a aumentar a resistência mecânica, enquanto naquele com C_t constante, a resistência não varia de forma significativa. Esse comportamento pode, em princípio, ser atribuído a dois fatores: (i) a quantidade de C_{SS} , aparentemente o mais importante, e, (ii) o refino de grão, observado em todos os casos. Para os materiais que possuem C_t constante, o aumento da relação Nb/C significa redução da quantidade de carbono em solução sólida, que, mesmo com o refino de grão, leva a um aumento da ductilidade, caracterizada pelo aumento do alongamento total e variação pouco significativa do LE. Para os aços com C_{SS} aproximadamente constante, o refino de grão mais intenso, determinado pelo aumento da relação Nb/C e da presença de carbono em solução sólida, leva ao aumento da resistência mecânica e queda do alongamento.

Em relação à estampabilidade, o valor r , Figura 1(d) e o valor n , Figura 1(e), apresentam comportamentos diretamente relacionados à quantidade de carbono em solução sólida, ou seja, quanto maior C_{SS} menores os valores n e r .

A influência do carbono em solução sólida na deterioração do valor r é bastante conhecida.⁽⁴⁾ A presença de carbono em solução ainda no produto “como laminado a quente” impede a livre rotação dos grãos durante a laminação a frio gerando o que é conhecido como “bandas de cisalhamento”. Essas bandas são responsáveis pela nucleação de componentes de textura pouco favoráveis a conformação, do tipo $\{110\}<001>$. Naqueles aços que possuem C_{SS} aproximadamente constante, o aumento da relação Nb/C determina um aumento da temperatura de recristalização, Figura 3, levando a um menor tamanho de grão recristalizado e a um menor valor r . A variação do valor n com a relação Nb/C é muito semelhante à do AL(%). Considerando que a relação entre tensão e deformação reais é bem descrita pela equação de Holloman ($\sigma = K \varepsilon^n$) para os aços baixo carbono, demonstra-se facilmente que o valor n nessa

equação é igual ao alongamento uniforme, o que justifica a similaridade de comportamento encontrada entre valor n e $AL(\%)$.

4.2 Cinética de Recristalização Isócrona (Fração Recristalizada)

A evolução da recristalização com a temperatura mostra um atraso na recristalização dos aços ao Nb em relação ao aço que não possui Nb, Figura 3(a), principalmente no período de incubação, início da recristalização, que é dramaticamente aumentado. É conhecido⁽⁶⁾ que, o atraso na recristalização se correlaciona com a quantidade de partículas introduzidas durante a laminação a quente, e, ainda, que esse atraso é devido ao efeito de forças exercidas pelos precipitados, que retardam o movimento de contornos de grão de grande ângulo.

Ainda sobre a influência da relação Nb/C, Figuras 3(b), (c), (d) e (e), aparentemente o carbono em solução sólida não exerce influência decisiva, e o atraso que se observa entre aços que contém Nb, pode ser atribuído ao aumento do teor de Nb, e, conseqüentemente da quantidade de NbC, já que nesses aços todo Nb se encontra precipitado.

4.3 "Bake Hardenability" e Índice de Envelhecimento

Em relação aos parâmetros associados ao envelhecimento por deformação, BH e AI, os resultados mostram um comportamento aproximadamente esperado. No conjunto de aços com C_t constante, Figura 1(g) e (h), o aumento da relação Nb/C significa a redução de C_{ss} , o que leva a uma redução do valor BH e do AI. Para o outro conjunto de aços com C_{ss} constante, ocorre também queda dos valores BH e AI, contudo de forma bem menos acentuada que no conjunto com C_t constante.

Ao se avaliar o envelhecimento, além do C_{ss} , outra variável importante é o tamanho de grão. Contudo, sobre esse parâmetro não há consenso.

Resultados mais antigos mostram um aumento da intensidade do envelhecimento quando o tamanho de grão é diminuído.^(7,8) Contudo, estudo realizado utilizando aços de carbono extra-baixo mostrou resultados totalmente opostos.⁽⁹⁾ Nesse estudo foi mostrado que, na ausência de cementita, caso dos aços de carbono extra baixo, os contornos de grão se tornam o único sítio para a segregação do carbono. Portanto, aços com maior tamanho de grão possuiriam menor número de sítios para segregação, permanecendo mais carbono em solução na matriz.

Estudo recente mostrou que nos aços BH de carbono extra baixo, o refino de grão é uma excelente forma de se melhorar a resistência ao envelhecimento à temperatura ambiente, já que a variação do tamanho de grão tem pouca influência sobre o valor BH.⁽¹⁰⁾

A explicação proposta é que o refino do grão aumenta a área de contornos, o que aumenta a segregação do carbono nesses sítios, diminuindo a sua concentração na matriz. O carbono da matriz é considerado o responsável pelo aprisionamento das deslocamentos. Ainda segundo esses autores, na temperatura ambiente não há mobilidade suficiente para o carbono nos contornos retornar à matriz, o que justificaria o baixo AI observado. Já nas temperaturas de cura da pintura, a mobilidade é suficiente para promover a migração do carbono dos contornos para a matriz proporcionando um valor BH adequado.

Os resultados para conjuntos com C_{ss} constante, Figura 4, aparentemente corroboram os trabalhos onde ocorre uma diminuição do valor BH com a diminuição do tamanho de grão, o mesmo ocorrendo com AI.^(7,8)

Para os aços com C_t constante, a queda do valor BH com o aumento da relação Nb/C se deve a redução do teor de carbono em solução sólida. Associado à redução do C_{ss} , o refino de grão, também observado para esse conjunto de aços, contribui para que

a queda do valor BH seja mais sensível para esse conjunto de aços que para aqueles com C_{ss} mantido constante.

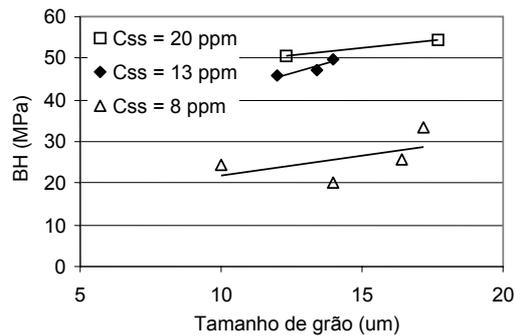


Figura 4. Influência do tamanho de grão no valor BH.

Na Figura 2 foi mostrada a relação entre BH e AI para os aços desse estudo. Resultados de literatura consideram, para AI superior a 30 MPa, que o material não é resistente ao envelhecimento e recomendam que esse valor seja tomado como máximo admissível, quando se quer garantir que o retorno do patamar de escoamento não vá ocorrer em tempo inferior a três meses.^(11,12) A esse valor máximo de 30 MPa para o AI é associado um valor BH máximo da ordem de 50 a 60 MPa. Contudo, na análise da Figura 3, vê-se que o valor máximo de BH admissível para AI igual a 30 MPa, é da ordem de 40 a 45 MPa, mais baixo que aqueles normalmente encontrados. Uma vez que o valor BH e o AI são afetados diferentemente pela variação do tamanho de grão,⁽¹⁰⁾ aparentemente, a inter-relação entre esses parâmetros deve ser reavaliada para casos e aços específicos, enfatizando a influência do tamanho de grão sobre esses parâmetros.

5 CONCLUSÕES

A influência do teor Nb (0,004 a 0,023%) dado pela relação Nb/C, nas propriedades mecânicas à tração, cinética de recristalização isócrona e "bake hardenability" (valor BH e índice de envelhecimento, AI) foi avaliada em aços laminados a frio e recozidos continuamente, com carbono extra-baixo. Os principais resultados podem ser assim descritos:

- para aços com C_t constante, o aumento da relação Nb/C leva a um aumento da ductilidade, caracterizada pelo aumento do AL(%) e variação pouco significativa no LE, embora o tamanho de grão diminua. Esse aumento na ductilidade foi creditado à diminuição do C_{ss} ;
- para aços com C_{ss} constante, o aumento da relação Nb/C levou a uma queda da ductilidade, caracterizada pelo aumento do LE e queda do AL(%). Esse comportamento foi creditado ao refino de grão mais intenso determinado pelo aumento da relação Nb/C e da presença de carbono em solução sólida;
- a temperatura de recristalização, dada pela temperatura onde 50% da matriz se encontra recristalizada, é aumentada em torno de 80°C quando se adiciona Nb a um aço de carbono extra baixo. Não há, no entanto, variação significativa dessa temperatura com o aumento do teor de Nb;
- o valor r tende a diminuir com o aumento da relação Nb/C nos aços com C_{ss} constante sendo essa queda atribuída a formação de uma textura desfavorável e ao refino de grão. Já nos aços com C_t constante a tendência foi de crescimento devido à redução do C_{ss} ;
- o valor n guarda uma relação muito similar àquela observada para o alongamento total. Essa similaridade pode ser explicada em termos da correspondência existente

entre alongamento uniforme e valor n , obtida em estudos do comportamento em tração de aços baixo carbono; e

- em aços com C_t constante o aumento da relação Nb/C leva a uma diminuição nos valores de BH e AI em razão da redução do C_{ss} . Nos aços com C_{ss} constante, o aumento da relação Nb/C levou também a uma diminuição dos valores de BH e AI. Contudo, essa variação ocorreu de forma menos acentuada que nos aços com C_t constante. Essa queda, mesmo mantido constante o C_{ss} , foi atribuída à redução no tamanho de grão.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- 1 OKAMOTO, Y. Sheet steel products and their application technology for automotive uses. **The Sumitomo Search**, n. 59, Sept. 1997.
- 2 Metallurgy and applications of modern IF grades. Dusseldorf: VDEh, 1990. Round Table Discussion
- 3 MATAS, S. J. Properties of ultra low carbon steel interstitial free steels: a technology survey. 1991. (Private Communication of LTV).
- 4 HOSOYA, Y.; NAGATAKI, Y. Probable mechanism on the recrystallization texture formation in IF-steel. In: MWSP CONFERENCE, 37., 1996, **Proceedings...** S.I.p.: ISS, 1996. v.33, p. 915, 1996.
- 5 TAKECHI, H. Metallurgical aspects of IF sheet steel from industrial view points. In: FORUM PROC. IF.IFS-94, 1994, Tokyo.
- 6 WILSHYNSKY, D. O.; DRESLER, D.; MATLOCK, K.; KRAUSS, G. Recrystallization of IF steels. FORUM PROC. IF.IFS-94, Tokyo, 1994.
- 7 WILSON, D. V. Grain-size dependence of discontinuous yielding in strain-aged steels. **Acta Metallurgica**, v. 16, n.7, p. 743-753, May 1968.
- 8 HANAI, S.; TAKEMOTO, N.; TOKUNAGA, Y.; MIZUYAMA, Y. Effect of grain size and solid solution strengthening elements on bake hardenability of low carbon aluminum-killed steel. In: ISIJ MEETING, 103, 1982.
- 9 DE, A. K.; COOMAN, B. C.; SOENEN, B.; VANDEPUTTE, S. Carbon distribution between matrix, grain boundaries and dislocations in ultra low carbon bake hardenable steels. In: MECHANICAL WORKING AND STEEL PROCESSING CONFERENCE, 42., Toronto, Canada, 2000
- 10 KWON, O.; LEE, Y. K.; HONG, M. H. Interstitial-free steels for automotive applications in Korea. ISIJ, IF 2003 INTERNATIONAL FORUM, 2003, Tokyo.
- 11 USHIODA, K.; AKISUE, O.; KOYAMA, K.; HAYASHIDA, T. Metallurgical investigation for producing non-aging deep-drawable low-carbon al-killed steel sheets by continuous annealing. The Minerals, Metals & Materials Society, p.261~286, 1992.
- 12 IRIE, T.; SATOH, S.; YASUDA, A.; HASHIMOTO, O. Development of deep drawable and bake hardenable high strength steel sheet by continuous annealing of extra low carbon steel with Nb and Ti, and P. The Charles Hatchett Award Paper, 1984

THE EFFECT OF NIOBIUM ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND BAKE HARDENABILITY OF EXTRA LOW CARBON STEELS⁽¹⁾

João Francisco Batista Pereira⁽²⁾
Kleiner Marques Marra⁽³⁾

Abstract

The influence of Nb on the tensile properties, recrystallization kinetics and bake hardenability of cold rolled, continuous annealed extra low carbon steels was evaluated in different groups of steels. In the first one, the total carbon amount, C_t , was kept constant and the Nb amount was changed in a such way where different stoichiometric carbon in solid solution, C_{ss} , were obtained. In the second one, C_t and Nb were changed keeping constant C_{ss} . The results showed that the influence of Nb amount, characterized by the Nb/C relationship, change in distinct ways dependent on the steel group. The ductility, in steels where C_t was kept constant, is enlarged when the Nb/C relationship is increased, as a result of reduction in C_{ss} . However, in the group where C_{ss} was kept constant, it decreases as a result of the both factor, carbon in solid solution and grain refining. "Bake hardenability" and Aging Index decrease in both group of steels with the increase of Nb/C relationship. However the reduction is more severe in the steels group where C_t was kept constant as a result of decrease in carbon in solid solution. The r-value increases with the increase of Nb/C relationship in steels of C_t constant and decreases in that one of C_{ss} constant. Recrystallization temperature is very sensitive to Nb addition in steels where originally any Nb was present. However, if some Nb is already present, the post addition of this element does not introduce sensible changes in this temperature.

Key-words: Bake hardening steels; Strain aging; Nb

(1) Paper presented at the 60th Annual ABM Congress; Belo Horizonte, MG, Brazil, July 25 to 28, 2005.

(2) Member of the ABM; Metallurgical Engineer, M.Sc., Research and Development Center, Usiminas; Ipatinga, MG, Brazil.

(3) Member of the ABM, Metallurgical Engineer, D.SC., Research and Development Center, Usiminas; Ipatinga, MG, Brazil.