

EFETO DO TRATAMENTO TERMOMECÂNICO EM
AÇO 0,4% C MICROLIGADO COM NÍOBIO (1)

Paulo Roberto Mei⁽²⁾

Hans Jürgen Kestenbach⁽³⁾

RESUMO

Foi estudado o efeito da adição de 0,01% Nb em aços com 0,4% C e 1% Mn em 2 condições e três diferentes esquemas de laminação. No primeiro esquema (série A) os aços foram aquecidos por 1 hora a 900, 1100 e 1250°C com subsequente laminação (redução total de 34%) e resfriamento ao ar. Foram realizados ensaios de dureza, tração e determinação da largura do grão ferrítico, do diâmetro do grão austenítico, da fração volumétrica de ferrita e do espaçamento interlamelar mínimo de perlita. No segundo esquema de laminação (série B) os aços foram austenitizados a 1250°C por 1 hora e laminados a 900°C, com redução total de 34%. Na série C os aços foram austenitizados a 1250°C por 1 hora e laminados a 1000°C com uma redução total de 60%. Nas séries B e C foram realizados ensaios de tração e determinação do diâmetro de grão austenítico. Em todas as séries estudadas o nióbio elevou resistência mecânica dos aços pela: redução no espaçamento interlamelar da perlita, endurecimento da ferrita proeutetóide e endurecimento da ferrita da perlita.

Comparando-se os aços com ou sem nióbio austenitizados a 1250°C, das três séries, observou-se que o que apresentava a melhor relação resistência/dutibilidade era o aço com nióbio da série C.

1 - Contribuição Técnica apresentada no 46º Congresso Anual da ABM, Setembro de 1991, São Paulo, S.P.

2 - Professor Livre-Docente do Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica.

3 - Professor Titular do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos.

1 - INTRODUÇÃO

Aços com médio teor (0,15 a 0,56%) de carbono microaligados com nióbio, vanádio e titânio são aplicados em componentes forjados na indústria automotiva substituindo os aços ligados beneficiados (0,15 a 0,56% C)⁽¹⁻⁷⁾; barras de junção de trilhos (0,27% C)⁽⁸⁾ e barras reforçadas pra concreto de alta resistência (0,15 a 0,53% C)⁽⁹⁻¹⁰⁾. Na área de componentes forjados este aço tem apresentado um volume de aplicações crescentes onde se incluem árvores de manivéis, biglas, partes de suspensão, barras de conexão, eixos, pequenas engrenagens, etc.

Embora estas aplicações tenham crescido bastante na década de 80, os efeitos dos elementos microaligantes (Nb, V e Ti) na estrutura e propriedades destes aços ainda não são bem conhecidos, e isto, às vezes, dá uma barreira à aplicação mais intensiva dos mesmos. Para contribuir neste aspecto, este trabalho foi realizado, objetivando quantificar os efeitos do tratamento termomecânico (quantidade de deformação, temperatura e sequência de passes da laminação) na estrutura (diâmetro de grão austenítico e ferrítico, fração volumétrica da ferrita e espaçamento interlamelar da perlita) e nas propriedades mecânicas (macro dureza, micro dureza da ferrita e perlita, limite de escoamento e resistência, alongamento e redução de área) de aços com 0,4% C, 1% Mn, com e sem adição de 0,03% Nb.

2 - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Os aços deste trabalho foram preparados em forno de indução a vácuo, em lingotes de 5 kg. Os lingotes foram aquecidos a 1250°C por 9 horas, sendo em seguida forjados entre 1070 e 900°C (temperaturas de início e final de forjamento) para barras quadradas de 30 mm. O resfriamento foi ao ar e as microestruturas resultantes eram ferríticas-perlíticas.

Na tabela I encontram-se as composições químicas destes aços.

Aço	I em peso			ppm	
	C	Mn	Nb	O ₂	N ₂
4	0,40	1,01	-	20	32
4N	0,41	1,02	0,026	17	40

Tabela I. Composição química dos aços

Para as diferentes séries de experiências foram dados os nomes A, B, C. Na série A os lingotes foram aquecidos a 900, 1100 ou 1250°C por 1 hora e laminados em seguida em 2 passes com redução total de 34%, seguindo-se resfriamento ao ar. Na série B os lingotes foram aquecidos a 1250°C e laminados a 900°C, utilizando-se as mesmas reduções da série A, ou seja, uma redução total de 34%. Para se determinar o "tempo de espera", ou seja, o tempo em que a temperatura caía de 1250 pra 900°C, colocou-se um termopar em uma das amostras, registrando-se a temperatura em um medidor digital. Após repetidos ensaios determinou-se o tempo necessário e, como as amostras tinham as mesmas dimensões, o tempo de espera foi igual para todas. Na série C as amostras foram aquecidas a 1250°C por 1 hora, retiradas do forno e laminadas em 4 passes, com início a 1000°C e redução total de 60%, seguindo-se resfriamento ao ar.

Utilizou-se um laminador FEM-051 com cilindro de aço polido de 66,7 mm de raio, sem lubrificação, girando a 45 rpm.

A fração volumétrica de ferrita foi medida através de uma grade com 100 nós, realizando-se 10 medidas em cada amostra e tirando-se a média. Os pontos que estavam sobre o contorno de ferrita foram contados como 1/2.

Como havia dificuldade em se medir o diâmetro do grão ferrítico por intersecção linear, pois o mesmo era alongado e as interfaces ferrite/ferrita pouco visíveis na tela do microscópio, optou-se então por medir a "largura do grão ferrítico". A medida foi realizada sobre a tela do microscópio com aumento de 600X, sendo realizadas 60 medidas em cada amostra, com uma escala milimetrada.

Para se medir o espaçamento interlamelar da perlita, as amostras foram polidas até a pasta 1 um e atacadas profundamente com nital 2X. Essas amostras foram observadas em microscópio eletrônico de varredura CAMBRIDGE SA-10, com aumento entre 5.000 e 12.000X. Foram contadas as lamelas de cementita centradas em uma linha padrão de 20 μ m. A partir disso era calculado o espaçamento interlamelar. As regiões escolhidas eram aquelas que apresentavam as lamelas mais finas de cementita, e por isso essa medida foi denominada de "Espaçamento Interlamelar Mínimo". Ocorre que, como os aços foram transformados por resfriamento contínuo, houve formação de perlita em diferentes temperaturas, e, por consequência, com diferentes espaçamentos interlamelares. O termo "mínimo" denota a perlita designada por "mínimo".

Quando havia um contraste bem visível do contorno do grão austenítico, o diâmetro do grão austenítico era medido por intersecção linear⁽¹¹⁾. Em amostras onde era difícil de se delinear o contorno do grão austenítico utilizou-se o método comparativo de padrões da ASTM convertendo-se em diâmetro médio⁽¹²⁾.

Para cada amostra foram realizadas 10 medidas na série A e 20 medidas na série B, por estarem os grãos desta última alongados.

A microdureza foi medida com um equipamento LEITZ METLAK com carga de 0,050 N (10 gf) para a ferrita; 0,98 N (100 gf) para a perlita dos aços da série A laminados a 900°C e 1,96 N (200 gf) para a perlita dos aços da série A laminados a 1100 e 1250°C. A carga menor para os aços laminados a 900°C deveu-se ao fato das áreas de perlita serem menores, não se podendo utilizar a carga de 200 gf. O tempo de aplicação das cargas foi de 30 segundos e foram realizadas 20 medidas em cada amostra.

A microdureza foi obtida em um equipamento VBE-modelo HPO-250 com carga de 1039 N (107,5 kgf) e esfera de aço de 2,3 mm. O tempo de aplicação da carga foi de 30 segundos, sendo realizadas 10 medidas em cada amostra.

Os ensaios de tração foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaio

com acionamento hidráulico de Mohr-Federhoff. Foram retiradas 2 corpos de prova de cada barra, simétricos à linha de centro da mesma para a realização do ensaio de tração.

3 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Série A

Na tabela II são apresentados os dados obtidos nos diferentes ensaios e na figura 1 as estruturas após a laminação depois de resfriamento ao ar, onde observa-se que a estrutura era ferrítica-perlítica e que a ferrita equiaxial elotróica morfa foi substituída parcialmente pela ferrita de crescimento lateral à medida que a temperatura de laminação foi aumentada. Observa-se também que os aços com e sem nióbio estavam totalmente recristalizados, o que está de acordo com os dados do tamanho do grão austenítico antes e após a laminação (tabela II).

A adição de nióbio nestes aços aumentou a resistência (limite de escoamento e limite de resistência) reduzindo a ductilidade (medida de alongamento) e a medida que a temperatura de laminação (T.L.) foi aumentada (figura 2).

Os aços com nióbio apresentavam uma maior fração volumétrica de ferrita e uma maior largura de grão ferrítico, porém a microdureza da ferrita aumentava com a elevação da T.L., certamente devido a um endurecimento na mesma provocado pela precipitação do Nb (C,N) (figura 3).

Em relação à perlita observou-se igual espaçamento interlamelar (S_p) para aços com e sem nióbio para T.L. de 900 e 1100°C (figura 4). Para T.L. de 1250°C o aço com nióbio apresentou um S_p 10% menor que o aço sem nióbio, devido ao efeito do nióbio em solução na austenita de retardar a reação austenita-perlita⁽¹³⁾. A microdureza da perlita no aço com nióbio no entanto ficou 20% maior que no aço sem nióbio para uma T.L. de 1250°C, o que levou a se pesquisar o efeito de precipitação de Nb(C,N) na ferrita da perlita. De fato, na figura 4.c, se observa que aços com nióbio com igual S_p (laminados a 900 e 1250°C) apresentavam diferen-

Temperatura	σ_{esc} (MPa)	σ_{max} (MPa)	Alongamento (Z)	Redução de área (Z)	Diâmetro do grão austenítico (µm)		f ₀ (Z)	L ₀ (Z)	L ₀ (µm)	Z ₀ (µm)	H _p (Vickers)	H _v (Vickers)	Microdureza (BRINELL)
					Antes	Após							
4 - 900	41210	66123	21,450,3	56,130,6	130	4425	32,453,75	0,01,40,1970,02	239210	126110	18923		18923
0h-900	63123	65523	22,950,3	62,130,1	40	2725	35,453,35	321,380,1970,03	218211	121215	18923		18923
4 - 1100	38021	69525	19,450,6	53,550,6	300	104212	19,427,6	0,21,40,2120,01	237213	12928	20524		20524
0h-1100	60826	71728	16,350,5	55,821,0	180	6725	26,455,75	421,70,2050,02	24728	144214	20227		20227
4 - 1250	39924	71822	17,050,4	51,020,0	400	171229	8,425,8	421,70,2120,02	236210	136211	21225		21225
0h-1250	48926	768113	15,250,4	44,250,6	400	137221	15,117,65	0,01,40,1970,02	284210	168219	21525		21525

f₀ = fração volumétrica da ferrita

L₀ = largura do grão ferrítico

Z₀ = espessamento interlamelar mínimo da perlita

H_p, H_v = microdureza da ferrita, perlita.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de tração, dureza e caracterização morfológica dos aços da Série A.

* Dados em desvio obtidos pelo método de comparação ASTM e dados em desvio por inserção linear.

tes valores de microdureza da perlita. Assim com a elevação de T.L. certamente ocorreu uma maior solubilização de nióbio na austenita (figura 5) com posterior precipitação de Nb(C,N) na ferrita proeutóide e na ferrita da perlita, conforme já observado anteriormente⁽¹⁴⁾.

Um outro aspecto observado foi que a elevação de T.L. e a adição de nióbio levava a uma maior tendência de se formar estrutura de perlita degenerada no lugar da estrutura lamelar (figura 6). Estas estruturas poderiam contribuir para o endurecimento destes aços, embora isto ainda tenha que ser melhor estudado.

Na figura 7 tenta-se resumir os efeitos do nióbio nestes aços e correlacionar as relações entre composição (adição de nióbio), temperatura de laminação, estrutura (fração volumétrica da ferrita, espaçamento interlamelar da perlita, precipitação de Nb(C,N), modificação estrutural da perlita) e propriedades (microdureza da ferrita e perlita e resistência mecânica). Nota-se que o nióbio provoca efeitos, às vezes, antagônicos em relação à resistência mecânica. O que vale no entanto é o balanço global destes efeitos, que indica uma elevação de resistência mecânica provocada pelo nióbio. Também para esta análise ficar completa deveria estar incluindo os efeitos da quantidade e taxa de deformação aplicada e os efeitos do nióbio na recristalização da austenita. No caso estudado a austenita encontrava-se totalmente recristalizada o que facilitou a análise.

3.2 Séries B e C

Como observado anteriormente pela figura 2 a laminação a 900°C não provocou alterações significativas nas propriedades mecânicas dos aços com a adição de nióbio; a 1100°C houve um pequeno aumento na resistência mecânica dos aços com ligeiro comprometimento do alongamento. A 1250°C a adição de nióbio provocou um expressivo aumento na resistência de todos os aços acarretando perdas consideráveis na ductilidade.

Para se tentar melhorar as propriedades destes aços, elevando a resistência mecânica sem reduzir muito a ductilidade, foram realizadas as séries B e C, onde

Os aços foram austenitizados a 1250°C, com o objetivo de se colocar a maior parte do nióbio em solução na austenita, e laminados a 900°C (série B) e 1000°C (série C).

3.2.1 Série B

Na tabela III encontram-se os dados dos ensaios de tração para os aços da série B.

Na figura 8 observa-se nos aços sem nióbio uma estrutura heterogênea (regiões com granulação fina e regiões com granulação grosseira). A adição de nióbio nestes aços provocou a não recristalização da austenita, produzindo uma estrutura ferrítica-perlítica alongada na direção de laminação. Esse efeito do nióbio de retardar a recristalização da austenita já é bastante conhecido^(15,16).

Aço	Série	σ _{esc} MPa	σ _{esc} MPa	Alongamento (%)	R.A. (%)	d ₅₀ (μm)		Macrodureza BRINELL
						Antes	Após	
4	B	38820	68924	18,020,0	59,320,5	400	240±42	205I3
4	B	47820	77820	14,520,5	45,021,0	400	274±59	229I7
4	C	38521	68823	20,521,1	59,820,2	400	*	196I3
4	C	45822	74823	17,220,8	58,220,7	400	*	224I7

Tabela III - Propriedades mecânicas e tamanho de grão austenítico para aços 0,41 C com e sem adição de nióbio das séries B e C.

* medida não efetuada.

3.2.2 Série C

Nesta série os aços foram austenitizados a 1250°C e laminados a 1000°C, com uma redução maior que na série B (50 e 34%, respectivamente).

Na tabela III encontram-se os dados sobre os ensaios de tração destes aços. Observa-se pela figura 9 que para o aço com nióbio a estrutura era parcialmente recristalizada e totalmente recristalizada no aço sem nióbio. Nota-se ainda que a relação à série B, os aços apresentavam, de maneira geral, uma estrutura

de grãos menores, e essa redução do tamanho de grão levou a um aumento no teor de ferrita para os aços 0,41 C com e sem adição de nióbio.

3.3 Comparação entre as três séries

Na figura 10 observa-se que nos três tratamentos termomecânicos utilizados a adição de nióbio elevou a resistência mecânica com redução da ductilidade. Assim analisando-se os aços com nióbio verificou-se que:

a) Mantendo-se inalterada a taxa de redução (34I) e reduzindo-se a T.L. (temperatura de laminação) de 1250 para 900°C houve uma redução de 2I no limite de escoamento e não alteração da ductilidade (R.A. ou alongamento). Séries A e B.

b) Reduzindo-se a T.L. de 1250 para 1000°C e praticamente dobrando-se a taxa de redução (34 e 60I) houve uma redução de 7I no limite de escoamento, mas um ganho de 31I na redução de área e um ganho de 13I no alongamento.

Isso evidencia que embora as relações entre composições, tratamentos termomecânicos, estruturas e propriedades sejam complexas nos aços microaligados, a adição de nióbio e o controle do tratamento termomecânico pode resultar em aços com maior resistência mecânica, sem perda significativa de ductilidade (tabela IV).

Aço	σ _{esc} MPa	$\left[\frac{\sigma_{esc(4N)} - \sigma_{esc(4)}}{\sigma_{esc(4N)}} \right] 100$	R.A. (%)	$\left[\frac{RA(4N) - RA(4)}{RA(4N)} \right] 100$
4N-Série C	456	-	38,2	-
4 -Série A	399	+ 12,5	51,0	+ 12,4
4 -Série B	388	+ 14,9	59,5	- 2,2
4 -Série C	385	+ 15,6	59,8	- 2,7

Tabela IV - Comparação absoluta e relativa entre os valores de limite de escoamento e redução de área do aço 0,41 com nióbio processado na série C e os de aços sem nióbio processados nas séries A,B,C. Todos os aços laminados a 1250°C

CONCLUSÕES

Para aços com 0,41 C, 1% Mn, com a sua adição de 0,03% Nb, austenizados a 900, 1100 ou 1250°C por 1 hora com subsequente laminação (redução total 34%) concluiu-se que:

a) Para a T.L. (Temperatura de Laminação) de 900°C o nióbio elevou em 5% o L. E. (Limite de Escoamento) e em 7% o Al. (Alongamento); para T.L. de 1100°C elevou o L. E. em 7% e reduziu o Al. em 16%; para T.L. de 1250°C elevou o L. E. em 23% e reduziu o Al. em 11%.

b) Nestes aços o aumento da resistência mecânica provocada pelo nióbio foi associado à redução no espaçamento interlamelar da perlita, endurecimento da ferrita proeutetóide e endurecimento da ferrita da perlita.

c) O nióbio reduziu o tamanho de grão austenítico, porém não afetou significativamente a largura do grão ferrítico.

d) A adição de nióbio aumentou a tendência da perlita em mudar de forma laminar para a forma fibrosa, tendência esta também acentuada pela elevação da temperatura de laminação.

e) Nestes aços a austenita após a laminação era recristalizada e a estrutura obtida após o resfriamento ao ar era ferrítica-perlítica.

Comparando-se aços com e sem nióbio austenizados a 1250°C por 1 hora e laminados a 1250°C com 34% de redução (Série A), 900°C com 34% de redução (Série B) e 1000°C com 60% de redução (Série C), concluiu-se que a melhor relação resistência/dutibilidade era obtida por aços com nióbio submetidos ao tratamento da Série C.

AGRADECIMENTOS

Aos Drs. José Diniz de Sousa e Alain Isouré de Eletrometal S. A. - Metais Especiais pela preparação dos aços utilizados neste trabalho.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro e bolsas recebidos e à FAPESP pelo auxílio financeiro concedido para a realização destas pesquisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - BORDIGNON, P.J.P. - SEISIS, Phil., April 1986, p.1.
- 2 - JONES, B.L. et alii - Microalloyed forging steels: a worldwide assessment. In: Proc. of Conf. HSLA steels: Metallurgy and Applications, 4-8 Nov 1985, Beijing, China, ASM, p. 875.
- 3 - ENGINEER, S. et alii - Steel Research, nº 2, 1987, p. 369.
- 4 - KORCHINSKY, M. - M.E., October 1986, p. 45.
- 5 - GUNNARSSON, S. et alii - Experience with forged automotive components in precipitation hardened pearlitic - ferritic steels. In: "Fundamentals of Microalloying Steels", - KRAUS, G. & BANERJI, S.K., Eds., The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, Penn., USA, 1987, p. 325.
- 6 - CLINE, E. S. - Evaluation of medium carbon microalloyed steels for crankshaft applications - Idem ref. [5], p. 339.
- 7 - ROSSI, A. et alii - Development of Nb-Ti-B steel for production of tractor links by hot forging and direct quenching. Idem ref. [5], p. 351.
- 8 - BRANFITT, B.L. & HANSEN, S.S. - Development of a microalloyed joint bar. In: Proc. of Microalloying 88 Congress, 24-30 Sep. 1988, Chicago, USA; p. 451.
- 9 - GRAY, M. - Hot rolling of HSLA concrete reinforcing bar and other niobium containing steel. ILAPA Conference, Lima, Peru, 21-25 Sep., 1975.
- 10 - HEY, A. et alii - Production and application of high strength concrete reinforcing bar. In: Proc. of Int. Symposium, Niobium 81, San Francisco, California, The Metallurgical Society of AIME, 1984, p. 967.
- 11 - PADILMA, A.F. & ANTONIO FQ, F. - Técnicas de análise micro-estrutural. HEMUS EDITORA, 1985, p. 132.
- 12 - METALS Handbook, vol. 8, ASM, USA, 1973, p. 43.
- 13 - MEI, F.B. & BRESCIANI FO, E. - Metalurgia, ABM, Brasil, nº 323, vol. 40, 1984, p. 565.

- 14 - MEI, F.R. - Effect of niobium additions on the structure and properties of medium carbon steels. CPIS Dissertation, Dept. of Metallurgy, University of Cambridge, June 1981, 81 p.
- 15 - JONAS, J.J. & WEISS, F. - Metal Science, Mar.- Apr. 1979, p. 238.
- 16 - WEISS, I. & JONAS, J.J. - Met. Trans., vol. 10a, Jul. 1979, p. 831.

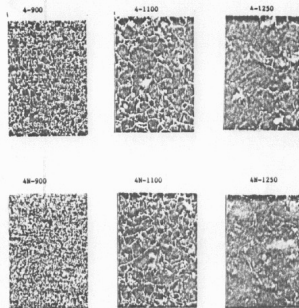


Fig. 1 - Microestrutura dos aços 0,4% C, com e sem adição de nióbio, após a
aminação em diferentes temperaturas. Nitel 50X

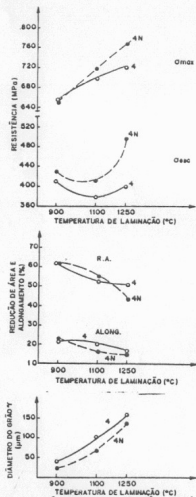


Fig. 2 - Propriedades mecânicas e tamanho de grão austenítico de aço 0,41C, com e sem adição de níbio, laminado em diferentes temperaturas com redução total de 34%

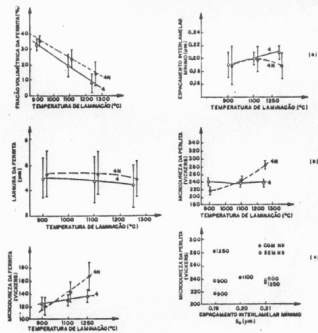


Fig. 3 - Fração volumétrica de ferrita, largura do grão ferrítico e microdureza de ferrita em aço 0,41C com e sem adição de níbio após laminação em diferentes temperaturas com redução total de 34%.

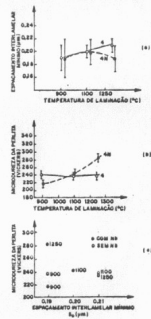


Fig. 4 - a) Espaçamento interlamelar da perlita (S_0), b) microdureza da perlita (H_p) e c) correlação entre S_0 e H_p para aço 0,41C com e sem adição de níbio laminado em diferentes temperaturas com redução total de 34%.

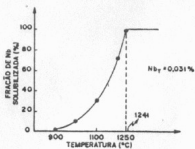
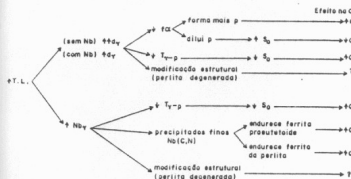


Fig. 5 - Fração de nióbio em solução na austenita para aços com 0,42C aquecidos em diferentes temperaturas.



T.L. = temperatura de laminação.
 S_0 = espaçamento interlamelar da perlita
 $Nb(C,N)$ = carbonetos, nitretos e carbonitretos de nióbio.
 T_{L-p} = temperatura de transformação austenita-perlita.
 Nb_2 = nióbio dissolvido na austenita/↑ aumenta, ++ aumenta muito.
 f_d = fração volumétrica de ferrita
 σ = resistência mecânica
 p = perlita

Fig. 7 - Efeitos da temperatura de laminação na resistência mecânica de aços com e sem nióbio.

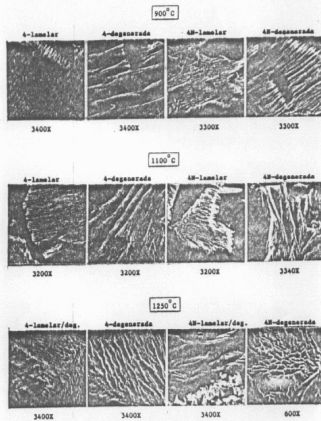


Fig. 8 - Estruturas lamelares e degenerada de perlita em aço 0,42 C, com e sem adição de nióbio, após laminação em diferentes temperaturas. MEU, nitel XI.

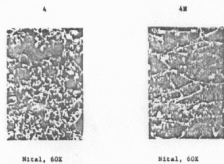


Fig. 8 - Microestrutura dos aços A e 4N após austenitização a 1250°C por 1 hora seguido de laminação a 900°C, com 34% de redução e resfriamento ao ar (Série B).

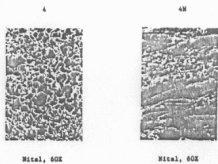


Fig. 9 - Microestrutura dos aços A e 4N após austenitização a 1250°C por 1 hora seguido de laminação a 1000°C, com 60% de redução e resfriamento ao ar (Série C).

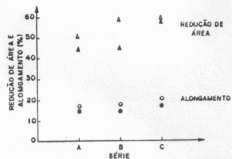
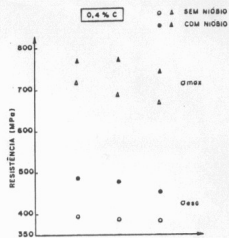


Fig. 10 - Comparação das propriedades mecânicas dos aços 0,4% C, com e sem adição de nióbio, após aquecimento a 1250°C por 1 hora seguido de:
 - Laminação a 1250°C, com 34% de redução (Série A)
 - Laminação a 900°C, com 34% de redução (Série B)
 - Laminação a 1000°C, com 60% de redução (Série C)

EFFECTS OF THE THERMOMECHANICAL TREATMENT ON

0.4 I C NIOBIUM MICROALLOYED STEEL

ABSTRACT

A study was made of the effect of 0,03I Nb addition on 1I Mo, 0.4I C steels after three different hot rolling conditions. In the first sequence of experiments (Series A) the steels were austenitized for 1 hour at 900, 1100 and 1250°C, followed by hot rolling with 34I of overall reduction, and cooled in air. Mechanical tests (tensile, macrohardness, pearlite and ferrite microhardness) and morphological observations (ferrite volume fraction, ferritic and austenitic grain diameter, pearlite interlamellar spacing and cementite morphology) were carried out. In the second sequence of experiments (Series B) the steels were austenitized for 1 hour at 1250°C and rolled at 900°C, with overall reduction of 34I. In the third sequence of experiments (Series C) the steels were austenitized for 1 hour at 1250°C and rolled at 1000°C, with overall reduction of 60I. Tensile tests and austenitic grain size measurements were carried out in Series B and C.

Niobium addition increased the strength of the steels due to pearlite interlamellar spacing refining, proeutectoid ferrite strengthening and pearlite ferrite strengthening for all series studied.

Comparing the steels of the three series, with and without niobium, austenitized at 1250°C, it was observed that the best results in terms of resistance/ductility were achieved in niobium steel of Series C.

ESTUDO DA VARIACAO DIMENSIONAL DE DEFETOS INTERNOS A PEÇAS DURANTE A OPERACAO DE RECALQUE (1)

Paulo de Tarso Rossi Haddad (2)
Miguel Angelo de Carvalho (3)

RESUMO

Estudou-se a variaco dimensional de defeitos localizados no interior de peas submetidas a recalque. Para tanto foram produzidos defeitos internos por furaco em barras de aço aI cromo, alto carbono. Cada barra sofreu deformaco diferenciada por recalque.

As deformaces em rea dos furos foram praticamente as mesmas que as deformaces em rea das barras correspondentes, para reduces em altura at 32%. Reduco de 38% na altura resultou em abertura do defeito, que teve sua rea aumentada em 59,7% contra 40,5% de aumento em rea da pea na mesma seco transversal.

Verificou-se maior deformaco em rea para defeito de maior dimetro inicial. Deformaco em altura maior que 50% resultou em menor dimetro do furo.

1- INTRODUÇO

A operaco de recalque  em geral empregada no forjamento de lingotes de apo a fim de se obter um maior grau de deformaco destes lingotes na etapa subsequente, o estiramento. Alm disso a operaco de recalque pode objetivar o fechamento de defeitos internos e maior isotropia em propriedades mecnicas para o produto forjado(1).

Nos casos em que a operaco de recalque  facultativa, a deciso pela realizaco desta etapa  tomada quando as dimenses do lingote, de peo mais adequado a fabricaco do produto, no

(1) Trabalho a ser apresentado no 42º Congresso Anual da ABM

(2) Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Processos Metalurgicos, Grupo Sidrurgico Villares.

(3) Membro da ABM, Engenheiro de Metalurgia, Coordenador de Processos Metalurgicos, Grupo Sidrurgico Villares.