

Fig. 7: Endurecimento por precipitação em aço experimental com adição eq. estequiométrica de níbio (aço C). Precipitação de carbonitretos na austenita durante laminação a quente em escala de laboratório, com participação de 88% do total de níbio adicionado. Aumento de 23.000 X.

EFEITO DA MICROESTRUTURA NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE
 AÇOS COM MÉDIO E ALTO TEORES DE CARBONO
 MICROLIGADOS COM NÍBIO (1)
 Paulo Roberto Nal. (2)

RESUMO

Aços com 0,4 ou 0,81 C, 1E Mn, com e sem adição de 0,032 Wb foram aquecidos por 1 hora a 900, 1100 ou 1250° C com subsequente laminação e resfriamento ao ar. Foram realizados ensaios de tração em todos os aços e determinações de diâmetro de grão ferrítico (d_p), fração volumétrica de ferrita (f_a) e espaçamento interlamelar mínimo da perlita (S_p) em aços com 0,41 C e determinação de S_0 em aços com 0,81 C. A seguir comparou-se os resultados de limites de escoamento e limites de resistência medidos e os obtidos pela equação de Gladman (J.I.S.L., Dec. 1972, p. 916) para aços com e sem níbio. No caso dos aços com 0,41 C com e sem níbio foram quantificados através da equação de Gladman os efeitos lamigados de d_p , f_a e S_p na resistência mecânica dos aços. Finalmente faz-se uma aplicação da equação de Gladman para se determinar a resistência mecânica de aços microaligados com níbio e alto teor de carbono.

- 1 - Contribuição Técnica apresentada ao 43º Congresso Anual da ASM Setembro de 1990, Rio de Janeiro, RJ
- 2 - Professor Livre-Docente do Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP

EFFECTS OF THE MICROSTRUCTURE ON THE MECHANICAL

STRENGTHS OF MEDIUM AND HIGH CARBON STEELS MICROALLOYED WITH NIOBIUM

Paulo Roberto Mei

ABSTRACT

Steels with 0.4 or 0.81 C, 1% Mn, with and without 0.03% Nb were heated for 1 hour at 900, 1100 or 1250°C, and subsequently hot rolled and air cooled. Tensile tests and morphological observations (ferrite volume fraction - f_{α} , ferritic grain diameter - d_{α} and pearlite minimum interlamellar spacing - S_p) were carried out. The measured results of yield and tensile strength were compared with those from Gladman equation (J.I.S.I., Dec. 1972, p. 916) for steels with and without niobium. For 0.41 C steels the isolated effects of f_{α} , d_{α} and S_p on the mechanical resistance were quantified using the Gladman equations. Finally the Gladman equation limitations to evaluate the mechanical properties of microalloyed medium and high carbon steels are discussed.

1 - INTRODUÇÃO

Os aços com médio e alto teor de carbono microalloyados com Nb, V e Ti têm apresentado uma evolução crescente de aplicações na indústria metal-mecânica. Os aços com médio teor de carbono (0,20 a 0,59% C) microalloyados são aplicados em componentes forjados na indústria automotiva substituindo os aços ligados beneficiados⁽¹⁻³⁾, barras de junção de trilhos⁽⁴⁾ e barras reforçadas para concreto de alta resistência⁽⁵⁻⁶⁾. Os aços com alto teor de carbono (0,80 a 1,00% C) microalloyados são utilizados em trilhos ferroviários⁽⁷⁾, fio soldado⁽⁸⁾ e eixos⁽⁹⁾.

Embora estas aplicações tenham crescido bastante na década de 80, os efeitos dos elementos microalloyados (Nb, V e Ti) na estrutura e propriedades destes aços ainda não são bem conhecidos, e isto, às vezes é uma barreira à aplicação mais intensiva dos mesmos. Para contribuir neste aspecto, este trabalho foi realizado, objetivando quantificar os efeitos da microestrutura (fração volumétrica de ferrita, diâmetro do grão ferrítico e espaçamento interlamelar de perlita) na resistência mecânica de aços carbonos com 0,4 e 0,81 C, com e sem adição de nióbio, submetidos à diferentes tratamentos termomecânicos.

2 - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Os aços deste trabalho foram preparados em forno de indução e 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. Posteriormente as barras foram aquecidas a 1200 °C por 1 hora e laminadas em quatro passes com uma redução total de 43%, a uma temperatura final de laminação de 1050 °C. A seguir uma barra de cada aço foi aquecida a 900, 1100 ou 1250 °C por 1 hora e laminada em 2 passes, com uma redução total 34%, seguindo-se resfriamento ao

At. A queda de temperatura entre os passos foi de 25, 35 e 50 °C para as temperaturas de início de laminação de 900, 1100 e 1250 °C, respectivamente. Utilizou-se um laminador FENN-031 com cilindros de aço polido de 66,7 mm de raio, sem lubrificação, girando a 45 rpm.

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

Os ensaios de tração foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaio com acionamento hidráulico, de Mohr-Federhoff.

Para o ensaio de tração foram retirados 2 corpos de prova de cada barra, simétricos à linha de centro da mesma.

AÇO	(II em peso)			ppm	
	C	Mn	Si	O ₂	N ₂
A	0,40	1,01	-	20	32
AM	0,41	1,02	0,031	17	40
B	0,79	1,03	-	20	30
BN	0,79	1,01	0,026	15	38

Tabela I - Composição Química dos Aços.

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

Nas amostras com 0,41 C havia dificuldade em se medir o diâmetro do grão ferrítico, pois o mesmo era alongado e as interfaces ferrita/ferrita pouco visíveis na tela do microscópio. Optou-se então por medir a "largura do grão ferrítico". A medida foi realizada sobre a tela com aumento de 600X, sendo feitas 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 µm e atacadas profundamente com nital 2%. Essas amostras fo-

ram observadas em microscópio eletrônico de varredura CAMBRIDGE St-10, com aumento entre 3.000 e 12.000X. Foram contadas as lamelas de cementita centradas em uma linha padrão de 20 µm. 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 da perlita em diferentes temperaturas, e, por consequência, com diferentes espaçamentos interlamelares. O termo "mínimo" denota a perlita desenvolvida nas temperaturas mais baixas de transformação sustentada - perlita, onde a mesma ainda era estável.

3 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 - AÇO 0,41 C

A medida que a temperatura de laminação foi aumentada e a estrutura ferrítica-perlítica dos mesmos ficou mais grosseira e a ferrita equiaxial abertamente foi substituída pela ferrita de crescimento lateral e intergranular. A análise do estado sustentado dos aços mostrou que em todas as condições de laminação o mesmo encontrava-se totalmente recristalizado.

A partir dos resultados quantitativos obtidos foram calculados os limites de escoamento pela equação de Gladson⁽¹⁰⁾, os quais foram comparados com os dados obtidos nos ensaios de tração (figura I e tabela II).

Observou-se uma boa correlação entre os valores calculados e os medidos, exceto para o aço ao níobio laminado a 1250 °C. Ocorre que nesta temperatura todo o níobio está em solução na austenita⁽¹¹⁾, o que provoca:

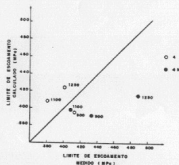


Figura 1 - Correlação entre o limite de escoamento medido e o calculado pela equação de Gladman⁽¹³⁾ para aço 0,41 C, com e sem adição de nióbio, laminado a 900, 1100 e 1230 °C.

Aço-Tem peratura	f_0	d_0 [10 ⁻³ mm]	s_0 min [10 ⁻³ mm]	Mn I peso	M _N ** I peso	σ_{esc} ^{***} calcula do MPa	σ_{esc} medido MPa	$\frac{\sigma_{med}-\sigma_{cal}}{\sigma_{cal}} \cdot 100$
4 - 900	0,328	5,0	0,19	1,01	0,0032	396	412	+ 3,8
4N - 900	0,336	5,3	0,19	1,02	0,0040	391	431	+ 9,3
4 - 1100	0,198	4,8	0,20	1,01	0,0032	408	380	- 7,4
4N - 1100	0,246	5,4	0,20	1,02	0,0040	398	408	+ 2,4
4 - 1230	0,086	4,4	0,21	1,01	0,0032	424	399	- 6,3
4N - 1230	0,151	5,0	0,19	1,02	0,0040	457	489	+ 14,7

$$\sigma_{esc} = 13,2 \left(f_0^{1/2} \sqrt{d_0} \sqrt{s_0} + 1,8 M_n \right) + 1,13 d_0^{1/2} \sqrt{s_0} + (1 - f_0^{1/2}) (11,6 + 0,25 s_0^{1/2}) + 27,6 \sqrt{M_N} \text{ MPa}$$

** M_N (nitrogênio livre), assumido igual a M_T (nitrogênio total)

*** σ_{esc} = σ_{esc} calculado σ_{med} = σ_{esc} medido

Tabela II - Limite de escoamento medido e calculado pela equação de Gladman⁽¹³⁾ para aço 0,41 C, com e sem adição de nióbio, sem alicio.

- Alterações estruturais da perlita com mudança da estrutura lamelar para fibrosa, conforme o observado em trabalho anterior⁽¹²⁾.
- Atraso na formação da perlita⁽¹³⁾, com redução do espaçamento interlamelar (s_0) e aumento de resistência mecânica.
- Precipitação de Nb (C,N) na ferrita da perlita⁽¹⁴⁾.
- Endurecimento da ferrita por precipitados de Nb (C,N)⁽¹⁵⁾.

Resultados semelhantes aos da figura 2 foram obtidos por Gladman⁽¹³⁾ em aço 0,4 a 0,81 C, com e sem adição de Nb, Ti e V. Para os aços carbono ou com adição de Nb e Ti havia uma boa correlação entre os resultados medidos e calculados para o limite de escoamento. Entretanto para aço com vanádio, os valores medidos eram bem maiores que os calculados. Como a maior temperatura de solubilização utilizada por Gladman foi 1100 °C, apenas o vanádio apresentava uma solubilidade suficiente para interferir significativamente nas propriedades⁽¹³⁾. Isso torna claro o fato de que a equação de Gladman⁽¹³⁾ só é aplicável à aço carbono ou aço carbono com nióbio, porém austenitizados em temperaturas onde a solubilização do nióbio não é significativa.

Na figura 2 e tabela III são comparados os resultados obtidos neste trabalho para o limite de resistência com os calculados pela equação de Gladman⁽¹⁰⁾. Observa-se que os valores calculados pela equação de Gladman⁽¹⁰⁾ são próximos aos valores medidos, sendo que esta equação superestima os valores de limite de resistência para aços com níobio.

Como as equações de Gladman⁽¹⁰⁾ para os limites de escoamento e resistência apresentaram valores próximos aos medidos, utilizou-se destas equações para se fazer uma avaliação da contribuição de S_0 , d_0 e f_0 nestas propriedades. Considerou-se os valores de laminação a 900 °C como básicos e calculou-se a variação no $\sigma_{0.2}$ e σ_{UTS} provocados, por exemplo, pela alteração no S_0 , ao se passar para uma temperatura de laminação (T.L.) de 1100 °C, mantendo os valores de d_0 e f_0 básicos (ou seja, válidos para 900 °C). Depois fixou-se o valor de S_0 e d_0 para T.L. de 900 °C e utilizou-se o valor de f_0 para T.L. de 1100 °C e assim sucessivamente. Para a T.L. de 1250 °C o mesmo procedimento foi adotado (tabelas IV e V, figuras 3 e 4). A análise das tabelas IV e V indica que a soma das contribuições isoladas de f_0 , S_0 e d_0 é muito próxima dos valores obtidos quando se usa a equação de Gladman para se calcular o efeito global destas variáveis, indicando que o método de separar as contribuições isoladas de f_0 , S_0 e d_0 é confiável.

Pela figura 3 observa-se que aumentando-se a T.L. para 1100 °C houve um decréscimo no limite de escoamento para os aços com e sem níobio, embora a equação de Gladman⁽¹⁰⁾ preveja um acréscimo no mesmo. Para 1250 °C o mesmo efeito se repetiu para o aço sem níobio. No aço com níobio o total solubilização do níobio antes da laminação provocou acréscimo no $\sigma_{0.2}$ maiores que os previstos pela equação de Gladman. De qualquer maneira em todos os casos da fig. 3 a redução da fração volumétrica da ferrita que resultou em maiores ganhos do limite de escoamento.

Na figura 4 observa-se que a redução da fração volumétrica da ferrita com o aumento da T.L. é, sem dúvida, o fator mais importante para o aumento do limite

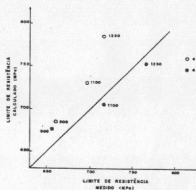


Figura 2 - Correlação entre o limite de resistência medido e o calculado pela equação de Gladman⁽¹⁰⁾ para aços 0,42C, com e sem adição de níobio, laminados a 900, 1100 e 12500 °C.

$$\sigma_{0.2}(\text{MPa}) = 15,2 \left(f_0^{1/2} (16 + 74,2 \sqrt{f_0}) + 1,18 d_0^{1/2} \right) + (1 - f_0^{1/2}) (66,7 + 0,23 S_0 \sqrt{V})$$

Aço-Tempera- tura	$\sigma_{0.2}$ calculado (MPa)	$\sigma_{0.2}$ medido (MPa)	$\frac{\sigma_{0.2} - \sigma_{0.2} \text{ medido}}{\sigma_{0.2}} \cdot 100$
a = 900	683	681	- 3,6
aN = 900	677	654	- 3,3
a = 1100	731	693	- 3,2
aN = 1100	707	717	+ 1,4
a = 1250	786	718	- 9,3
aN = 1250	753	768	+ 1,9

Tabela III - Valores calculados pela equação de Gladman⁽¹⁰⁾ medidos de limite de resistência para aços 0,42C, com e sem adição de níobio, sem níobio.

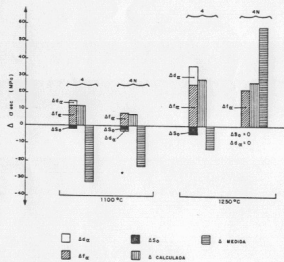


Figura 3 - Contribuições da fração volumétrica de ferrita (ΔF_v), do diâmetro do grão ferrítico (Δd_f) e do espaçamento lamelar de perlita (ΔL_p) no limite de escoamento de aço 0,4% C, com e sem adição de níobio, ao se passar da temperatura de laminação de 900 para 1100 ou 1250°C. Também são registrados a variação global calculada (calculada) de $\Delta \sigma_y$, Δd_f e ΔF_v e a variação medida (medida) no limite de escoamento devido às mudanças na temperatura de laminação. O valor de escoamento para aços laminados a 900°C foi tomado como valor base para cálculo da variação do limite de escoamento ($\Delta \sigma_{esp}$).

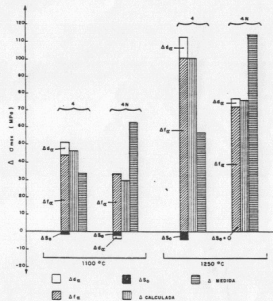


Figura 4 - Contribuições de ΔF_v , Δd_f e ΔL_p no limite de resistência de aço 0,4% C, com e sem adição de níobio, ao se passar da temperatura de laminação de 900 para 1100 ou 1250°C. Também são registrados a variação global calculada (calculada) devido a ΔF_v , Δd_f e ΔL_p e a variação medida (medida) no σ_{max} devido às mudanças na temperatura de laminação. O valor do limite de resistência para aços laminados a 900°C foi tomado como valor básico

de resistência mecânica dos aços. Os efeitos do espaçamento interlamelar da perlita e do diâmetro do grão ferrítico tiveram influência quase que nula na variação do limite de resistência mecânica. Para os dois T.L. observou-se que nos aços sem nítio o acréscimo no σ_{max} calculado foi maior que o real, parecendo indicar que a influência da fração volumétrica da ferrita foi superestimada pela equação de Gladman⁽¹¹⁾. Para os aços com nítio ocorreu o contrário, ou seja, os valores calculados foram menores que os medidos. Isto é razoável pois a equação de Gladman não leva em conta o efeito de elementos microalígenas, como o nítio.

Aço-Temperatura	Δf_p (MPa)	ΔR_p (MPa)	ΔM_n (MPa)	$\Delta f_p + \Delta R_p + \Delta M_n$ (MPa)	Δ calculado	Δ medido
4 - 1100	+ 12	- 2	+ 3	+ 13	+ 12	- 32
48 - 1100	+ 8	- 2	- 1	+ 5	+ 7	- 23
4 - 1250	+ 25	- 5	+11	+ 31	+ 28	- 13
48 - 1250	+ 22	0	0	+ 22	+ 26	+ 58

Tabela IV - Contribuições isoladas da fração volumétrica da ferrita (f_p), espaçamento interlamelar da perlita (λ_p) e diâmetro do grão ferrítico (M_n) no limite de escoamento (σ_{esc}) de aços 0,45C, com e sem adição de nítio. Também são registrados o efeito global de f_p, λ_p, d_p no σ_{esc} calculado pela equação de Gladman⁽¹¹⁾ e variação medida de σ_{esc} para temperaturas de 1100° C e 1250° C nestes aços em relação aos valores de σ_{esc} a 900° C

Aço - Temperatura	Δf_p	$\Delta \lambda_p$	Δd_p	$\Delta f_p + \Delta \lambda_p + \Delta d_p$	Δ calculado	Δ medido
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
4 - 1100	+ 44	- 2	+ 7	+ 49	+ 48	+ 34
48 - 1100	+ 34	- 2	+ 2	+ 30	+ 30	+ 43
4 - 1250	+101	- 4	+ 12	+109	+101	+ 57
48 - 1250	+ 72	0	+ 5	+ 77	+ 76	+114

Tabela V - Contribuições isoladas de f_p, λ_p, d_p no limite de resistência (σ_{max}) de aços 0,45C, com e sem adição de nítio. Também são registrados o efeito global destas variáveis no σ_{max} calculado pela equação de Gladman⁽¹¹⁾ e da variação medida de σ_{max} para temperatura de 1100 e 1250° C nestes aços, em relação aos valores de σ_{max} a 900° C

3.2 - Aço 0,81 C

Estes aços apresentavam estrutura perlitica e a análise de estado austenítico indicou que todos os amostras estavam recristalizadas após as laminadas a 900, 1100 e 1250 °C.

Aplicando as equações de Gladman⁽¹⁰⁾ para se calcular o limite de resistência e o limite de escoamento de aços totalmente perliticos tem-se:

$$\sigma_{max} \text{ (MPa)} = 15.2 (46,7 + 0,23 S_0 \sqrt{L^2})$$

$$\sigma_{0.2} \text{ (MPa)} = 15.2 (11,6 + 0,23 S_0 \sqrt{L^2} + 27,6 \sqrt{W_L})$$

S_0 = em

W_L = I em peso

Pelas figuras 5 e 6 e tabela VI observa-se que os valores dos limites de escoamento e resistência medidos foram sempre maiores que os calculados pela equação de Gladman⁽¹⁰⁾. Nota-se também que a medida que a T.L. foi elevada, os valores medidos afastavam-se mais dos valores calculados, indicando que a equação de Gladman pode ser aplicada nestes casos para se fazer uma estimativa pouco precisa da resistência mecânica. No caso de aço ao níobio laminado a 1250 °C o valor era muito maior que o previsto, pois nesta temperatura ≈ 70 X do teor total de níobio estava em solução na austenita⁽¹¹⁾.

4 - CONCLUSÕES

Essas conclusões referem-se aos aços com 0,4 ou 0,81 C, 12 Mn, com a adição de 0,031 Nb e laminados a 900, 1100 e 1250 °C.

1) Nos aços 0,41 C sem níobio o limite de escoamento calculado pela equação de Gladman ficou próximo dos valores medidos (diferença menor que 10%).

Com a adição de níobio os valores calculados ficaram próximos dos medidos para temperaturas de laminação de 900 e 1100 °C (diferença menor que 10%); para 1250 °C o valor medido foi 15% maior que o calculado, devido aos efeitos de ag

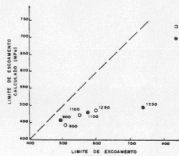


Figura 5 - Correlação entre o limite de escoamento medido e o calculado pela equação de Gladman⁽¹⁰⁾ para aço 0,81 C, com a adição de níobio laminado a 900, 1100 e 1250 °C.

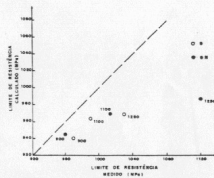


Figura 6 - Correlação entre o limite de resistência medido e o calculado pela equação de Gladman⁽¹⁰⁾ para aço 0,81 C, com a adição de níobio laminado a 900, 1100 e 1250 °C.

Aço-TM percenta	δ_{10} 10^{-3} med	δ_{10} x	σ_{ec} MPa	σ_{es} MPa	$\frac{\sigma_{es} - \sigma_{ec}}{\sigma_{es}}$, 100 x	σ_{fc} MPa	σ_{fs} MPa	$\frac{\sigma_{fs} - \sigma_{fc}}{\sigma_{fs}}$, 100 x
B - 800	0,23	0,0030	538	539	+ 0,2	940	958	+ 2,0
88 - 900	0,22	0,0038	558	548	+ 1,3	955	959	+ 1,4
88 - 1100	0,19	0,0030	575	555	+ 3,4	983	991	+ 2,8
88 - 1100	0,18	0,0038	485	577	+ 16,0	983	1015	+ 4,4
B - 1250	0,18	0,0030	482	608	+ 26,7	970	1030	+ 6,8
88 - 1250	0,18	0,0038	303	737	+ 31,8	986	1118	+ 11,9

Tabela VI - Limite de escoamento e resistência medidos e calculados para aços com 0,18 C, com e sem adição de nióbio (10)

para aços com 0,18 C, com e sem adição de nióbio

δ_{10} = Espessura igual a δ_{10}

σ_{ec} = σ_{ec} medido

σ_{es} = σ_{es} medido

σ_{fc} = σ_{fc} medido

σ_{fs} = σ_{fs} medido

σ_{ec} = σ_{ec} calculado

σ_{es} = σ_{es} calculado

σ_{fc} = σ_{fc} calculado

σ_{fs} = σ_{fs} calculado

solubilização do nióbio.

2) Nos aços 0,18 C com e sem adição de nióbio os valores calculados para o limite de resistência pela equação de Gladman ficaram próximos aos valores medidos (diferença menor que 10%)

3) Nos aços 0,18 C com e sem adição de nióbio, analisando-se, a partir das equações de Gladman, as contribuições individuais da fração volumétrica da ferrita, do espaçamento lamelar da perlita e do diâmetro do grão ferrítico, concluiu-se que o fator preponderante para a elevação dos limites de escoamento e resistência, com o aumento da temperatura de laminação, foi a redução da fração volumétrica da ferrita.

4) Nos aços 0,18 C, com e sem adição de nióbio, os valores calculados para o limite de escoamento foram sempre menores que os medidos. Nos aços sem nióbio em diferença ficou em torno de 15%. Nos aços com nióbio de 7 a 32%, aumentando com a elevação da temperatura de laminação.

5) Nos aços 0,18 C, com e sem adição de nióbio, os valores calculados para o limite de resistência foram ligeiramente menores (diferença menor que 1%) que os valores medidos.

6) De uma maneira geral, a equação de Gladman pode ser usada para prever o limite de resistência mecânica de aços com médio e alto teor de carbono atraindo gases no nióbio, independentemente da temperatura de laminação, dentro de um desvio de 12%. Para o limite de escoamento destas aços a equação de Gladman pode ser empregada com uma precisão de 10% para baixas temperaturas de laminação (900° C), onde a solubilização do nióbio é pequena. Em temperaturas maiores de laminação o desvio cresce consideravelmente.

AGRADECIMENTOS

Aos Profs. Dr. Hans J. Kestelbach e Oscar Balancin do DDM/UTSCar pela utilização do Laboratório de Tratamentos Termomecânicos daquela Instituição.

Aos Drs. José Diniz de Sousa e Alain J. Izerrí, da Eletrometal S.A. - Metais Especiais pela preparação dos aços utilizados.

Aos técnicos José R.F. Taglio, Rita H.B. Jacom e Antonio L. Scruziaro da UNICAMP pelo auxílio na parte experimental.

Ao CNPq pelo suporte financeiro recebido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - JONES, B.L. et alii - Microalloyed forging steels: A world wide assessment. In: Proc. of conf. HSLA Steels: Metallurgy and Applications, 4-8 Nov. 1985 Beijing, China, ASM, p. 873
- 2 - BHATTACHARYA, D. et alii - Evaluation of medium carbon microalloyed steels for connecting rod applications. In: Proc. of Microalloying 88 Congress, 24-30 Sep. 1988, Chicago, USA, ASM, p. 381
- 3 - WOLKA, K. & HEITENAMP, F. - Role and implication of niobium in as-forged steels. In: "Fundamentals of Microalloying Forging Steels" - KRAMUS, G. & BANERJEE, S.K., Eds., Metallurgical Society of AIME, Warrendale, Penn, USA, 1987, p. 235
- 4 - BRANTITT, 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
- 5 - GRAY, H. - Hot rolling of HSLA concrete reinforcing bar and other niobium containing steel. ILASA Conference, Lima, Peru, 21-15 Sep. 1975

- 6 - 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.
- 7 - CONNELL, H.R. - Microalloyed carbon rail steels. In: Proc. of Microalloying 88 Congress, 24-30 Sep. 1988, Chicago, USA, ASM, p.433
- 8 - MOTTISHAW, T.D. & SMITH, C.D.W. - Microalloyed pearlitic steels for the wire industry. In: Proc. Int. Conf. on Technology and Applications of HSLA Steels, 3-6 Oct. 1983, Pennsylvania, USA, ASM, p. 163
- 9 - YAMAMOTO, T. et alii - Precipitation strengthened spring steel for automotive suspensions. In: Proc. Int. Conf. on Technology and Applications of HSLA Steels, 3-6 Oct. 1983, Pennsylvania, USA, ASM, p. 1017
- 10 - GLADMAN, T et alii - J.I.S.I., Dec. 1972, p. 916
- 11 - HORNBERG, H. & ANONSSON, B. - J. I.S.I., Dec. 1968, p. 1263
- 12 - MEI, P.R. - Efeitos do tratamento termomecânico na estrutura e propriedades dos aços com médio e alto teor de carbono microalloyados com nióbio - Tese de Livre-Docência, FEC - UNICAMP, Dez. 1989, 220 p.
- 13 - MEI, P.R. & BRESCIANI, F.R. E. - Metalurgia - ASM, vol. 40, nº 323, Outubro de 1984, p. 565
- 14 - MEI, P.R. - Effect of niobium additions on the structure and properties of medium carbon steels. CPDS Dissertation, Dept. of Metallurgy, University of Cambridge, June 1981, 81p.
- 15 - MEI, P.R. - Efeitos de adição de nióbio na estrutura e propriedades dos aços com médio e alto teor de carbono. Tese de Doutorado, FEC - UNICAMP, Dez. 1983, 446 p.