

EFEITO DAS ADIÇÕES DE ELEMENTOS MICROLIGANTES NAS CARGAS DE LAMINAÇÃO A QUENTE DE AÇOS LIVRES DE INTERSTICIAIS¹

*Roney Eduardo Lino²
Ronaldo Barbosa³*

RESUMO

O presente trabalho analisa criticamente o processo de laminação de tiras a quente de um aço livre de intersticiais. O processo é inicialmente caracterizado em termos de suas variáveis usuais; temperatura, tempo entre passes, deformação e taxa de deformação. Em seguida, as tensões médias no passe e as mudanças na microestrutura durante laminação são estimadas. Mudanças na composição química são propostas e os resultados obtidos são discutidos.

Palavras-Chaves: Aços Livres de Intersticiais, Ensaio de torção a quente, Laminação de tiras a quente.

-
1. 41º Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos. 26 a 28 de outubro de 2004 – Joinville – SC – Brasil
 2. Técnico em Instrumentação, Graduando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG
 3. Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, Mestre, Dr., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG

1. INTRODUÇÃO

A laminação de planos produz chapas grossas e tiras. O processo de fabricação de chapas grossas é realizado em laminadores reversíveis com mesas à frente e à ré. As deformações são aplicadas em passes sucessivos de valores médios em torno de 0,3 e taxas de deformação variando entre 1 a 10s^{-1} do primeiro ao último passe (1). O processo de fabricação de tiras a quente, por outro lado, é realizado em duas fases, desbaste e acabamento, sendo que o desbaste é similar à laminação de chapas grossas enquanto a laminação de acabamento se dá em trens contínuos. O acabamento é realizado, portanto, sem reversões, com taxas de deformações da ordem de 10 a 100s^{-1} das cadeiras iniciais às finais (2). A laminação de não planos, barras e fios-máquina, apresentam várias características similares à de planos. A laminação de barras se parece com a laminação de chapas grossas, no que diz respeito às temperaturas, deformações, tempos entre passes e taxas de deformação. A laminação de fios-máquina, por outro lado, se assemelha à de tiras a quente, isto é, seu acabamento é realizado em trens contínuos onde as taxas de deformação começam com valores da ordem de 1s^{-1} terminando com valores maiores que 100s^{-1} .

Vários ensaios mecânicos, dentre eles o de torção a quente, são utilizados para simular aspectos dos processos de laminação. Os ensaios mecânicos, entretanto, apresentam algumas limitações, sendo uma delas a taxa máxima de deformação que eles conseguem reproduzir. As taxas de deformação usuais não ultrapassam 10s^{-1} chegando, raramente, a 50s^{-1} . Dessa forma, valores de carga calculados para os acabamentos de tiras ou de fios-máquina só podem ser realizados por meio de extrapolações de dados obtidos de ensaios mecânicos executados a taxas de deformação consideravelmente inferiores às observadas nas linhas industriais.

O presente trabalho visa estudar a influência da adição de elementos microligantes nas cargas de laminação de tiras a quente de aços livres de intersticiais (LI). Para isso, foram utilizados o Ti e uma combinação de Ti e Nb como elementos microligantes comumente usados nas linhas de produção industrial.

2. METODOLOGIA

A composição química dos aços LIs utilizados nos experimentos está apresentada na Tabela 1. Dois tipos de ensaios de torção foram realizados. O primeiro, um ensaio com resfriamento contínuo da amostra à taxa de $1^\circ\text{C}/\text{s}$ para determinação de T_{nr} e Ar3 (3), e o segundo, um ensaio a temperatura e taxa de deformação constante para obtenção de curva tensão-deformação em condições isotérmicas, ambos os testes realizados em equipamento de torção servo-hidráulico computadorizado. As temperaturas foram medidas empregando-se termopares tipo cromel-alumel revestido com tubos de 1,5mm de diâmetro de aço inoxidável ABNT 316 com isolação mineral.

O procedimento de ensaio consistiu em aquecer o corpo de prova à temperatura de 1473K (1200°C) por 900s (15min) e em seguida resfriá-lo até a temperatura de ensaio, à taxa de $1\text{K}/\text{s}$ ($1^\circ\text{C}/\text{s}$). A amostra permaneceu, nessa temperatura, por 600s (10min) com o objetivo de se promover sua homogeneização. Em seguida, os corpos de prova foram torcidos nas temperaturas de 1123, 1173, 1223, 1273, 1323 e 1373K (850, 900, 950, 1000, 1050 e 1100°C) e taxa de deformação de 0.1, 1, 3 e

10s⁻¹. Todas as amostras foram torcidas até uma deformação equivalente de 7, mostrando a ocorrência de um pico e atingindo a tensão de estado estacionário em todos os casos.

Liga	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Nb	N2	T _{nr} , °C	Ar ₃ , °C
Ti-Nb	24	1.70	0.17	0.006	0.002	0.021	0.014	0.11	9	945	750
Ti	28	0.15	0.01	0.013	0.009	0.058	0.083	-	38	-	875
Fe α	89	0.13	0.01	0.008	0.010	0.058	-	-	22	-	910

Tabela 1 – Composição química dos aços utilizados neste trabalho. Todos os números são dados em % do peso, exceto para C e N cujos números são dados em ppm. O Fe α, sem elementos microligantes, foi usado como referência.

Sinais de torque e de deformação angular foram convertidos em curvas tensão-deformação equivalente utilizando (4):

$$\sigma = \frac{3.3\sqrt{3}}{2\pi} \frac{\Gamma}{R^3} \quad (1)$$

e

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{R}{L} \theta \quad (2)$$

sendo R e L o raio e o comprimento da amostra, respectivamente e Γ e θ o valor medido do torque e da deformação angular.

3. RESULTADOS

Curvas tensão-deformação

Nas Figuras 1 e 2 estão apresentadas curvas tensão-deformação medidas para o aço Ti-Nb. As curvas apresentam formatos similares não importando a taxa de deformação e a temperatura de ensaio. Pode-se observar que, à medida que a taxa de deformação aumentou ou a temperatura de ensaio diminuiu, a tensão a uma dada deformação aumenta, e tanto a deformação de pico quanto a deformação para a tensão de estado estacionário aumentaram.

Nota-se a existência de um pico de tensão em todas as curvas, sendo este mais suave quanto menor a temperatura, seguido de uma queda de tensão e atingindo um estado estacionário. Este comportamento é um indicativo de que ocorreu recristalização dinâmica em todos os casos. Observa-se que a diferença entre tensão de estado estacionário e de pico diminuiu com o acréscimo da temperatura ou com a diminuição da taxa de deformação.

Equação constitutiva para tensão de pico

A carga de laminação é uma função das variáveis geométricas do processo, do coeficiente de atrito e da tensão necessária para deformar o material. Existem várias equações que podem ser usadas para estimar o valor da carga de laminação, sendo

a equação de Sims muito utilizada na laminação a quente de planos. Essa equação pode ser escrita como

$$P = \bar{\sigma} w \sqrt{R(h_i - h_f)} Q_s \quad (4)$$

Os símbolos representam a tensão média no passe, $\bar{\sigma}$, a largura da chapa, w , o raio do cilindro, R , as espessuras inicial e final, h_i e h_f , e, finalmente, um fator geométrico Q_s , crescente com a deformação e com a relação R/h_f . O valor da tensão média, $\bar{\sigma}$, depende da temperatura, da deformação e da taxa de deformação. Logo, torna-se necessário estabelecer uma equação que descreva essa relação para se obter o valor da carga P . Faz-se, portanto, necessário obter uma equação “constitutiva” que descreva como a tensão depende da temperatura e da taxa de deformação e uma equação de “evolução” para descrever a dependência dessa mesma tensão com a deformação. A equação utilizada habitualmente para relacionar a tensão à temperatura e taxa de deformação é dada por (5)

$$Z = \exp\left(\frac{Q_{def}}{RT}\right) = A(\sinh(\alpha \sigma))^n \quad (5)$$

Aqui, Z é o parâmetro de Zener-Hollomon, Q_{def} é uma energia de ativação, R a constante dos gases, $8,31\text{J}/(\text{mol K})$ e A , n e α são constantes. A Figura 3 (a) mostra quão bem a expressão acima relaciona Z à tensão de pico, σ_p , observando-se, neste caso o coeficiente de correlação R^2 de 0,999.

4. DISCUSSÃO

Aplicação ao caso da laminação de tiras a quente

A laminação de tiras a quente é realizada, em geral, em laminadores dispostos em tandem com pequena distância entre cadeiras o que reduz o tempo entre passes a poucos segundos nos primeiros passes e a frações de segundo nos últimos passes. As deformações nos primeiros passes são elevadas, da ordem de 0,6, esse valor diminuindo nas últimas cadeiras para algo em torno de 0,3 a 0,2 para garantir espessura final e planicidade da tira. As taxas de deformação se iniciam na faixa de 1 a 10s^{-1} terminando, não raro, por volta de 100s^{-1} . Um exemplo típico de uma seqüência de laminação de tiras a quente é a que se mostra na Tabela 2 abaixo, retirada da referência (6). Às temperaturas dos passes da tabela originalmente publicada na referência 6 foram adicionados 30°C por se tratar, no caso deste trabalho, da conformação de aços IF cujos os valores de A_{r3} são, não raro, da ordem de 850 a 900°C às taxas de resfriamento usuais de tiras a quente.

Passe	ϵ	$\dot{\epsilon}, \text{s}^{-1}$	tip, s	T, °C
F1	0,68	8,9	4,09	986
F2	0,52	15,3	2,71	950
F3	0,52	29,2	1,79	946

F4	0,55	57,4	1,16	932
F5	0,36	77,4	0,87	924
F6	0,40	117,2	0,64	914
F7	0,26	131,7	--	901

Tabela 2: Seqüência típica da laminação de tiras a quente no trem de laminação acabador. A laminação é realizada em 7 passes com tempos entre passes, temperaturas e deformações no passe decrescentes. As taxas de deformação, por outro lado, são crescentes variando uma ordem de grandeza do início ao final da laminação. Os símbolos significam ϵ , a deformação verdadeira no passe, $\dot{\epsilon}$, a taxa de deformação no passe e t_p o tempo entre deformações.

A carga de laminação pode ser considerada proporcional à tensão média, conforme mostrado na Equação (4). O valor da tensão média pode ser estimado a partir do cálculo da tensão de pico re-arranjando a Equação (5)

$$\sigma_p = \frac{1}{\alpha} \left\{ \sinh^{-1} \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} \right] \right\} \quad (6)$$

A Figura 3 (b) mostra como as tensões de pico variam com a temperatura para a seqüência de passes mostrada na Tabela 2 acima. A Figura apresenta valores obtidos para o caso de uma laminação hipotética dos três aços Livres de Intersticiais empregados neste trabalho. Esses dados foram apresentados a título de comparação.

Aplicação ao caso da laminação de tiras a quente no laminador do tipo Steckel

O laminador do tipo Steckel é muito diferente de um trem de laminação de acabamento de tiras. O Steckel possui 2 fornos posicionados um a frente e outro a ré sendo que a tira é laminada em passes sucessivos reversíveis. A tira é bobinada dentro desses fornos após deformação tanto num sentido de laminação quanto no outro. Como consequência, a queda na temperatura é lenta dependendo da temperatura dos fornos de bobinamento. O processo de laminação também é consideravelmente mais longo que o anterior fazendo com que as taxas de deformação sejam menores que as registradas na Tabela 2.

A Figura 3 (b) mostra uma comparação entre as tensões de pico que seriam obtidas numa laminação hipotética num laminador acabador de tiras e num do tipo Steckel. Todos os dados utilizados para o laminador acabador de tiras foram utilizados para o cálculo das tensões de pico para o laminador Steckel, exceto os dados referentes às taxas de deformação. Neste caso, as taxas de deformação empregadas foram aquelas mostradas na Tabela 2 divididas, porém, por um fator de 10. Como pode ser visto, as tensões médias são, no caso do Steckel, consideravelmente mais baixas do que aquelas esperadas para o trem de laminação acabador de tiras a quente.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho permite concluir o que se segue:

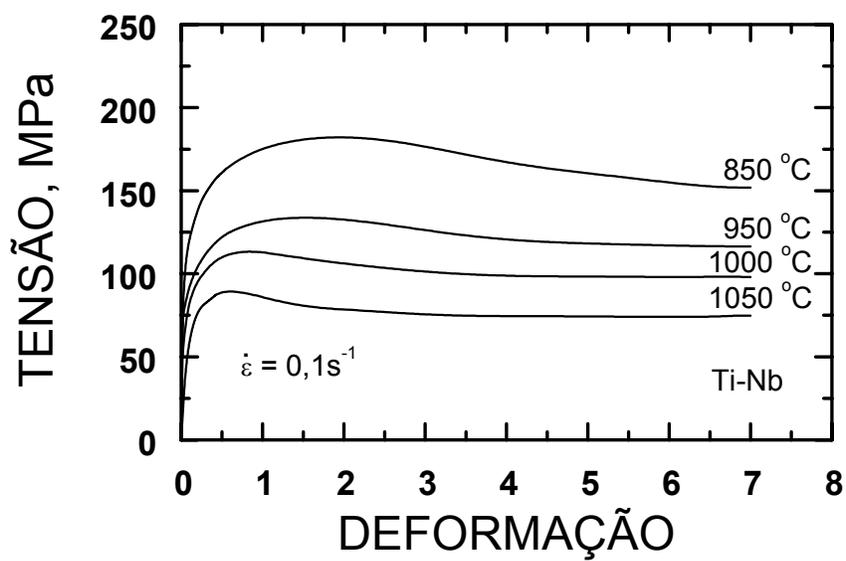
- 1- As cargas de laminação a quente aumentam com a adição dos elementos microligantes Ti e Nb;
- 2- Curvas tensão-deformação assim obtidas podem ser descritas por equações constitutivas simples estabelecendo relações claras entre as tensões para uma deformação particular com a temperatura e a taxa de deformação;
- 3- Essas equações constitutivas podem ser usadas para estimar variações nas cargas de laminação a quente quando são utilizados aços diferentes ou mesmo laminadores diferentes;
- 4- Cargas de laminação serão consideravelmente maiores no acabamento de tiras a quente processadas em trens de laminação do que em laminadores do tipo Steckel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

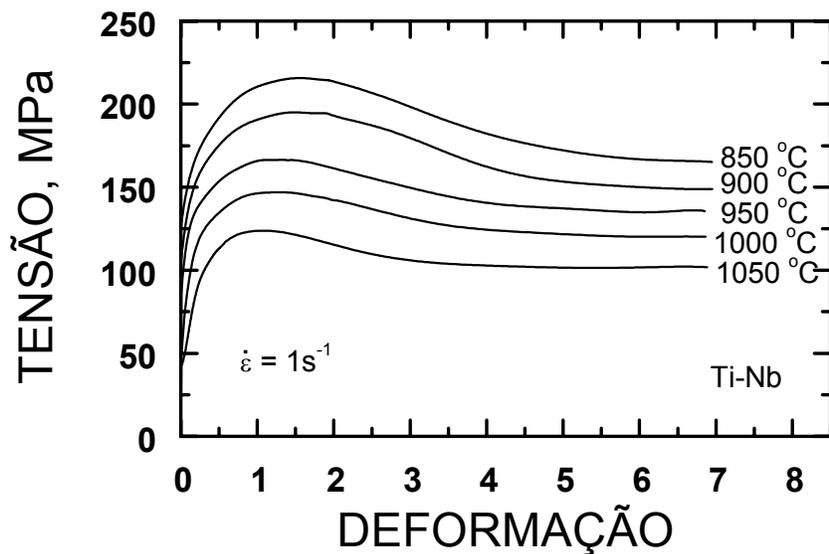
- 1- J.J. Jonas, The hot strip mill as an experimental tool, *ISIJ International*, 40, no.8 (2000), pp. 731-738.
- 2- F. Siciliano Jr., K. Minami, T.M. Maccagno e J.J. Jonas, Mathematical modeling of the mean flow stress, fractional softening and grain size during the hot strip rolling of C-Mn steels, *ISIJ International*, 36, no.12 (1996), pp. 1500-1506.
- 3- F. Boratto, S. Yue, J.J. Jonas, T. Lawrence, Projeto de Esquemas de Laminação Controlada através de Ensaio de torção Computadorizado. *Seminário Laminação-ABM SP*, Brasil, Set. 1987, pp. 65-81.
- 4- BACKOFEN, W. A.; FIELDS, D. S. Determination of strain-hardening characteristics by torsion testing. **American Society for Testing and Materials**, 57, p. 1259-1272.
- 5- JONAS, J. J.; McQUEEN, H. J. Recovery and recrystallization during high temperature deformation. In: *TREATISE ON MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 6., 1975. **Plastic Deformation of Materials...** New York: Academic Press, 1975. p. 394-493.
- 6- JONAS, J. J.; MACCAGNO, T. M.; MINAMI, K.; SICILIANO, F. Mathematical modeling of the mean flow stress, fractional softening and grain size during the hot strip rolling of C-Mn steels. **ISIJ International**, 36. n. 12, p. 1500-1506, 1996.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico Tecnológico, pelo apoio financeiro a este trabalho.

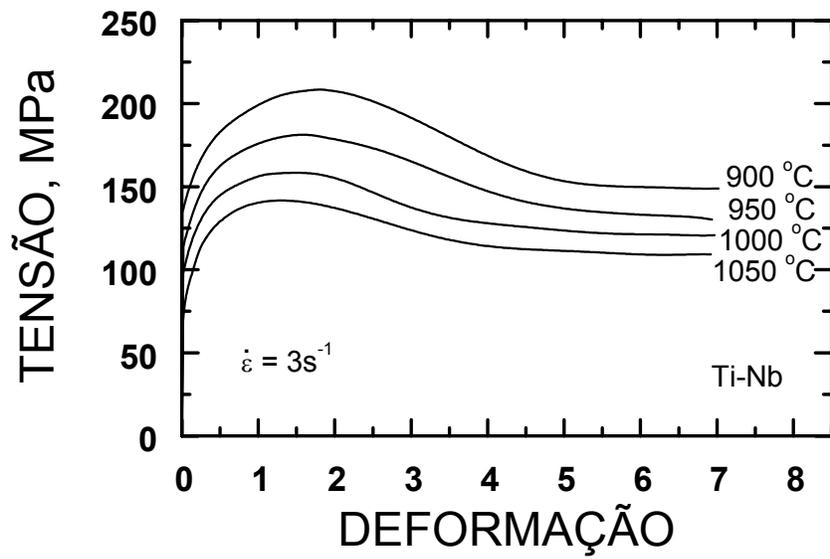


(a)

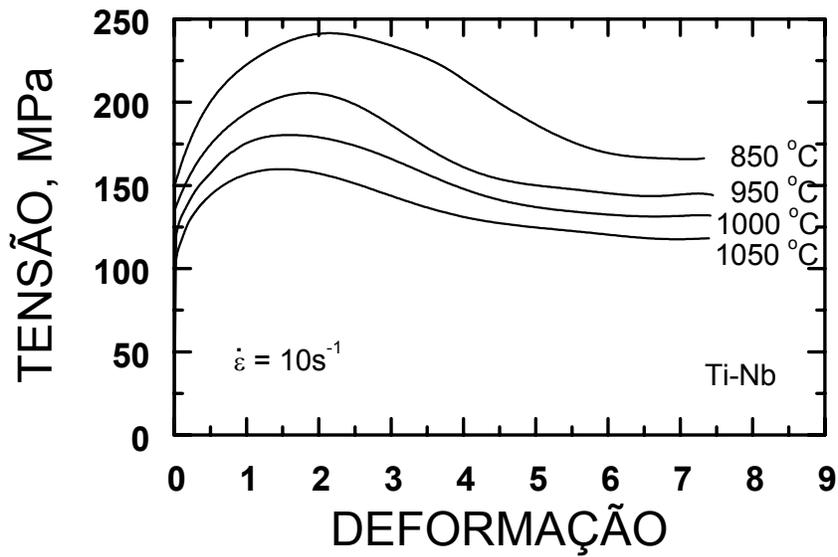


(b)

Figura 1 – Curvas tensão-deformação obtidas via ensaio de torção a quente para aço IF Ti-Nb testado nas temperaturas de 850, 900, 950, 1000 e 1050°C e a taxas de deformação nominais constantes de a) 0,1 e b) 1 s^{-1} .

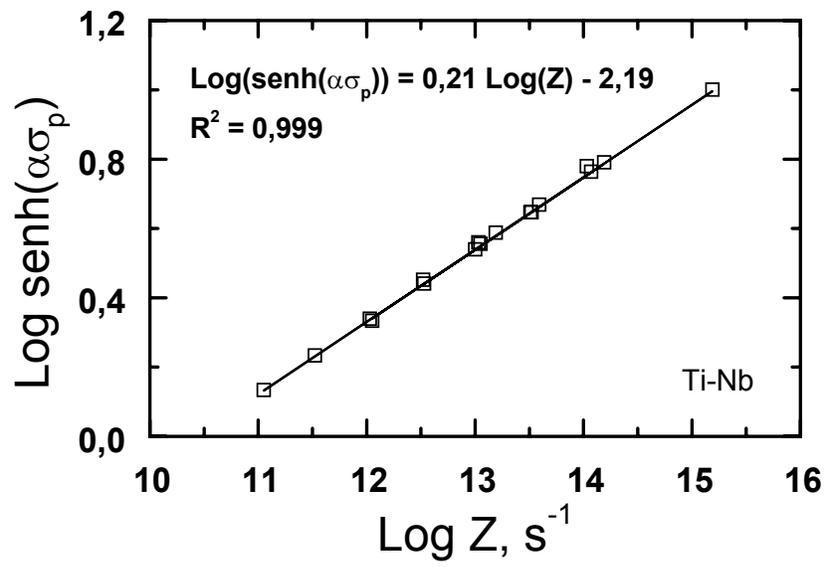


(a)

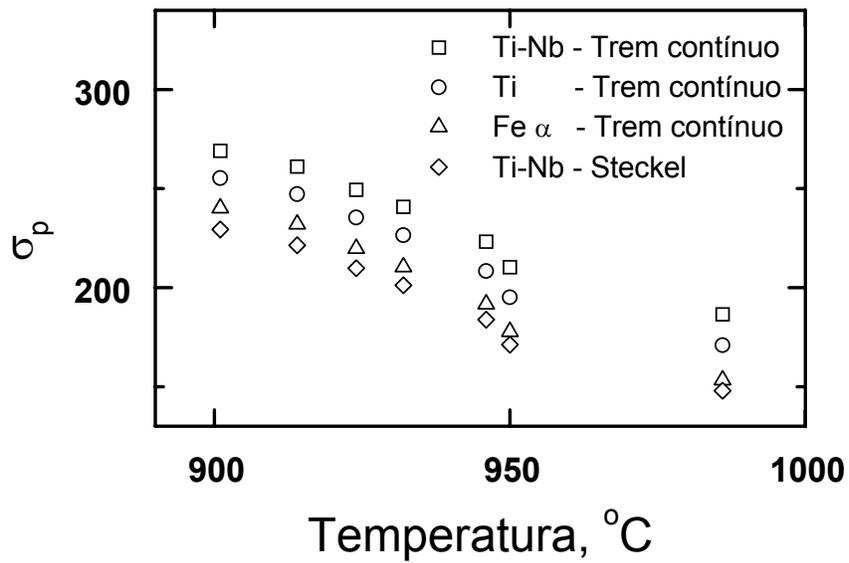


(b)

Figura 2 – Curvas tensão-deformação obtidas via ensaio de torção a quente para aço IF Ti-Nb testado nas temperaturas de 850, 900, 950, 1000 e 1050°C e a taxas de deformação nominais constantes de a) 3 e b) 10 s^{-1} .



(a)



(b)

Figura 3- (a) Relação entre o parâmetro de Zener-Hollomon e a tensão de pico e (b) simulações de variações das tensões de pico como função na mudança do tipo de aço sendo laminado e do laminador sendo utilizado.

EFFECT OF MICROALLOYING ADDITIONS ON THE HOT ROLLING LOADS OF IF STEELS

Roney Eduardo Lino²

Ronaldo Barbosa³

ABSTRACT

The present work critically analyses the process of hot strip rolling. The process is initially characterized in terms of its usual variables: temperature, time elapsed between passes, strain and strain rates. Following this, the average stresses per pass and changes in the microstructure occurring during rolling are assessed. Modifications in the chemical composition are proposed and the results so obtained are discussed.

Key words: Interstitial Free Steels, Hot Torsion Testing, Hot Strip Rolling.

-
1. 41st Rolling Seminar: Processes, Rolling and Coated Products. October 26 to 28, 2004 – Joinville – SC- Brazil.
 2. Automation and instrumentation Technician, Undergraduate student at the course of Metallurgical and Materials Engineering at UFMG;
 3. ABM Member, Mechanical Engineer, M.Sc., Ph.D., Associate Professor at the Department of Metallurgical and Materials Engineering at UFMG.