

UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS DE TORÇÃO A QUENTE PARA SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO NA OBTENÇÃO DE FERRITA DE GRÃO ULTRAFINO

Tiago de Assis Nogueira ¹
Giovane Azevedo ²
Ronaldo Barbosa ³
Dagoberto Brandão Santos ⁴

RESUMO

O enfoque principal deste trabalho foi na aplicação de deformação plástica intensa através de torção em aço C-Mn para estabelecer uma correlação com os parâmetros de processos industriais de laminação. Após austenitização e têmpera, realizou-se um aquecimento das amostras a taxa de 1°C/s, encharque durante 5 min e, em seguida, as mesmas foram submetidas a torção a temperaturas de 700 e 740°C, envolvendo 7 passes de deformação, até uma deformação verdadeira final de aproximadamente 1. O acúmulo de energia de deformação no campo bifásico possibilitou condições favoráveis à nucleação de ferrita, ocasionando uma estrutura de grãos ultrafinos, da ordem de 1 µm. Foi analisado a evolução do tamanho de grãos ferríticos recozidos isotermicamente a 800°C, bem como a sua influência nas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: grão ultrafino, recozimento intercrítico, torção a quente.

41º Seminário de Laminação da ABM– Processos e Produtos Laminados e Revestidos. 26 a 28 de Outubro de 2004 – Joinville – SC – Brasil

¹ Sócio Júnior da ABM, Estudante de Engenharia Metalúrgica da E.E. UFMG.

² Sócio da ABM, Mestre, Professor do Colégio Técnico da UFMG.

^{3,4} Membro da ABM, Dr., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG.

1. Introdução

O ensaio de torção tem sido usado para simular todo o processo de laminação, desde o aquecimento do lingote até o bobinamento final de tiras. Este ensaio elimina a necessidade de execução de processamentos mais limitados como o de dilatometria e testes de compressão. A principal limitação reside na dificuldade de se conseguir amostras para outros ensaios mecânicos posteriores tais como corpo de prova para ensaios de fratura.

O ensaio de torção a quente computadorizado vem sendo freqüentemente utilizado (Boratto,1987, Bowden,1991, Pussegoda,1991, Karjalainen,1995, Cota,1998) na determinação de parâmetros operacionais na laminação controlada, fornecendo informações sobre tensões de fluxo em cada passe e permitindo uma correlação entre a resistência mecânica e a evolução microestrutural da austenita (tamanho de grão), temperaturas de transformação e cinética das transformações de fases.

Durante o ensaio, o torque e o ângulo são lidos por célula de carga e um potenciômetro registrando o deslocamento angular e os sinais são convertidos em tensão e deformação equivalentes através do uso de equações apropriadas, gerando os gráficos de tensão equivalente x deformação equivalente.

As variáveis mais importantes no processamento termomecânico são: temperatura, tempo (aquecimento, resfriamento, intervalo entre passes), taxa de deformação e deformação.

Na simulação por torção, próxima à laminação real, a seqüência (T , t , $\dot{\epsilon}$, ϵ) é seguida com valores similares aos da escala industrial, utilizando-se níveis de ϵ e $\dot{\epsilon}$ convertidos em valores angulares e transformados em ângulo e velocidade de rotação da máquina de torção. O procedimento, aqui utilizado, foi similar ao desenvolvido por Boratto (1987) empregando um método de simulação que utiliza o conceito de deformação média equivalente por passe, ou seja, deformação total pelo número de passes. Neste caso, utilizou-se também um tempo médio de intervalo entre os passes e uma só taxa de deformação para todos os passes.

O ensaio de torção a quente computadorizado pode também ser utilizado para se projetar esquemas de laminação, que são inicialmente executados na máquina de torção (Boratto et al., 1987). Neste, os parâmetros das curvas tensão-deformação permitem calcular as tensões de fluxo média equivalentes em cada passe e a partir desta podem ser previstas as cargas de laminação, cujos resultados, quando comparados às forças ou cargas de laminação efetivamente obtidas na laminação em escala de laboratório (Santos et al., 1990) e em escala industrial (Samuel et al., 1989) se mostraram bastante satisfatórios.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar parâmetros de processamento termomecânicos de ordem geral visando gerar e posteriormente entender a formação de estrutura ultrafina de grãos ferríticos.

Os parâmetros operacionais para produção de aços com grãos ultrafinos deduzidos dos ensaios de torção foram correlacionados aos passes finais para linha de

produção de tiras. Chama-se a atenção, neste trabalho, de a microestrutura original consistir de martensita.

2. Procedimento Experimental

A Figura (1) mostra esquematicamente a seqüência de eventos realizados durante o procedimento experimental.

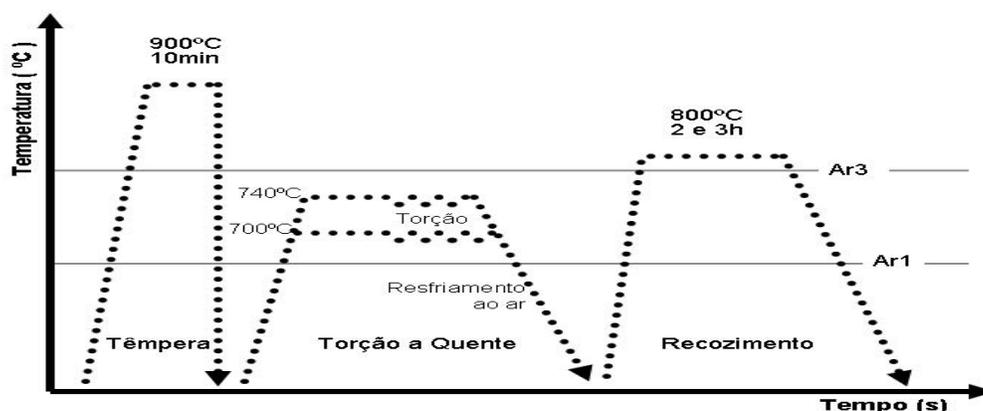


Figura 1. Esquema seqüencial do procedimento experimental.

A correlação dos parâmetros experimentais com a linha de produção foi feita para obtenção de grãos ultrafinos de ferrita em um aço C-Mn, que possui a composição química listada na Tabela 1.

Elemento	C	Mn	Si	Al	P	S	N ₂
Teor	0,15	1,39	0,39	0,039	0,016	0,009	0,004

Tabela 1. Composição química do aço C-Mn (% peso).

Os corpos de prova de torção tubulares com comprimento útil de 16 mm e diâmetro de 6,35 mm foram usinados a partir de tiras cortadas paralelas à direção de laminação da chapa industrial. A austenitização foi realizada a 900°C e a têmpera em salmoura e gelo, com uma taxa de resfriamento estimada de 300°C/s. Após têmpera, realizou-se o aquecimento das amostras à taxa de 1°C/s para depois submetê-las à torção às temperaturas de 700 e 740°C, após um período de 5 min de estabilização, envolvendo 7 passes de deformação segundo o esquema mostrado nas tabelas 2 e 3. A taxa de deformação empregada ($\dot{\epsilon}$) foi de 2 s⁻¹ e intervalo entre passes de 1 s. Em seguida, as amostras foram resfriadas ao ar a uma taxa de aproximadamente 1°C/s.

Uma máquina universal de ensaios MTS 880-14, equipada com uma unidade de torção e uma unidade de aquecimento do tipo INFRATHERM-ANALÓGICA foi utilizada nos presentes experimentos. A aquisição de dados foi feita através de uma unidade computadorizada MTS Test-Star II TM, com software SX TM e controle de servo-válvula. O monitoramento de temperatura e respectivas taxas de resfriamento foram efetuados utilizando-se termopar inserido dentro das amostras.

O tamanho de grão ferrítico foi medido através de um analisador de imagens, IMAGE PRO-PLUS™, ligado a microscópio metalográfico, marca Leitz, modelo Metalux II. O método de cálculo corresponde àquele estabelecido nas normas ASTM E112-96 e E562-83. A microestrutura das amostras, após recozimento, foi caracterizada por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, em um microscópio da marca Jeol, JSM 6360LV. Para esses exames usou-se o ataque com reativo nital 2%.

As medições de microdureza Vickers foram realizadas em um microdurômetro marca Leitz, modelo Durimet com carga de 2.94N (300 gf). A avaliação da microdureza foi realizada na região superficial das amostras, uma vez que os corpos de prova eram tubulares.

3. Resultados e discussão

3.1. Deformação equivalente e carga de laminação

As tabelas 2 e 3 mostram a correlação dos 7 passes de torção com os passes finais da linha de acabamento da laminação de tiras. Os cálculos das forças de separação previstas, coluna 4 das tabelas 2 e 3, foi semelhante ao apresentado por Boratto (1987); partindo de uma tira de espessura de entrada no primeiro passe de 4 mm e largura de 304,8 mm (12”), para um cilindro de laminação de 750 mm de diâmetro a 300 rpm às temperaturas de trabalho de 700 e 740°C.

Deformação equivalente total	Deformação (%) em Laminação (por passe)	Saída (mm)	F (10 ⁶ N)	Passes
0,15	12,18	3,51	2,86	1
0,31	11,36	3,11	2,63	2
0,46	9,31	2,82	2,12	3
0,62	8,69	2,58	1,88	4
0,77	7,12	2,39	1,50	5
0,93	6,64	2,24	1,37	6
1,08	5,44	2,11	1,10	7

Tabela 2. Esquema da aplicação de passes na torção. Temperatura de torção 700°C.

A correlação entre a deformação por torção e a redução equivalente de altura na laminação, onde h_i = altura inicial e h_f = altura final, pode ser calculada como:

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{h_i}{h_f} \right) \quad (1)$$

$$\text{Deformação}(\%) = 100 \left(\frac{h_i - h_f}{h_i} \right) \quad (2)$$

A deformação obtida a partir da torção é função das dimensões do corpo de prova, onde L = comprimento, r = raio e θ = ângulo de torção, como demonstra a equação 3.

$$\varepsilon = \frac{\Theta r}{\sqrt{3}L} \quad (3)$$

Deformação equivalente total	Deformação(%) em Laminação (por passe)	Saída (mm)	F (10 ⁶ N)	Passes
0,12	9,82	3,61	2,33	1
0,26	10,00	3,25	2,43	2
0,38	8,46	2,97	2,09	3
0,53	8,43	2,72	2,01	4
0,66	6,86	2,53	1,67	5
0,81	6,63	2,37	1,56	6
0,91	4,15	2,27	1,03	7

Tabela 3. Esquema da aplicação de passes na torção. Temperatura de torção 740°C.

3.2. Temperaturas de deformação

As temperaturas de deformação empregadas, 700 e 740°C, estiveram abaixo e próximas a Ar_3 (temperatura teórica de transformação $\gamma \rightarrow \alpha$ no resfriamento), de acordo com o cálculo utilizando a expressão de Ouchi et al.(1982), equação 4, e a de Boratto et al. (1988) para T_{nr} (temperatura de não-recristalização), equação 5. A tabela 4 apresenta estes valores calculados.

Ar_3	T_{nr}
752°C	830°C

Tabela 4. Temperaturas teóricas de não recristalização, T_{nr} , e de transformação da ferrita a partir do resfriamento da austenita transformação.

$$\text{Ouchi: } Ar_3 = 910 - 310 \%C - 80 \%Mn - 20 \%Cu - 15 \%Cr - 80 \%Mo - 55 \%Ni \quad (4)$$

$$\text{Boratto: } T_{nr} = 887 + 464 \%C + (6445 \%Nb - 644 \sqrt{\%Nb}) + (732 \%V - 230 \sqrt{\%V}) + 890 \%Ti + 363 \%Al - 357 \%Si \quad (5)$$

3.3. Efeitos da temperatura na tensão de deformação

O encruamento e o amaciamento dinâmicos se comportam de maneiras contrárias, onde se estabelece um processo de balanço entre forças. A geração de deslocamentos e suas interseções durante a deformação plástica levam ao endurecimento, enquanto que a recuperação atenua esse efeito, pela coalescência, aniquilação e reconstrução de deslocamentos por escorregamento cruzado e escalada com ajuda da tensão aplicada e da ativação térmica, como afirmado por Semiatin (1985). As curvas de fluxo, Figura 2, demonstram esta tendência.

Ocorre uma tensão máxima na deformação equivalente próxima a 0,4 para a temperatura de deformação de 740°C, depois a tendência é de se atingir estado estacionário. À deformação de 700°C, a forma da curva envoltória às curvas de fluxo dos passes individuais parece sinalizar para a ocorrência de um amaciamento dinâmico após ultrapassagem de uma certa deformação crítica, que por sua vez pode provocar uma recristalização dinâmica mais intensa da ferrita.

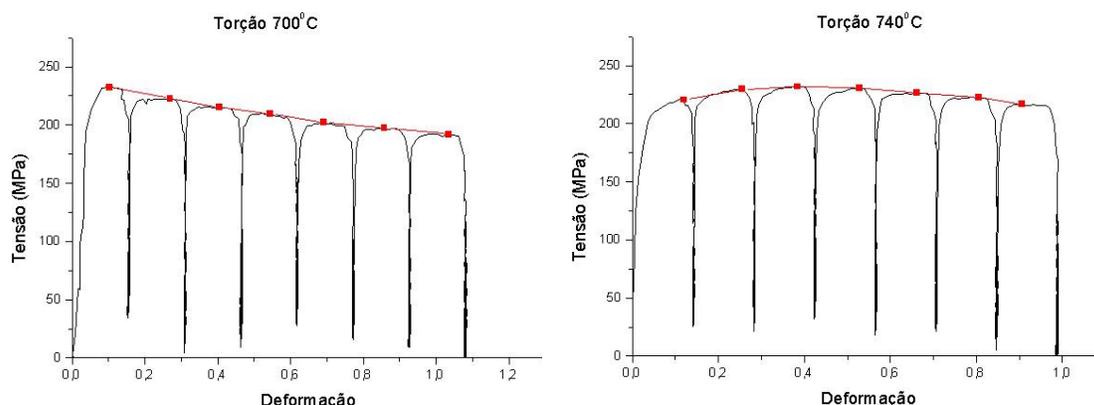


Figura 2. Curvas de fluxo.

A partir dos dados de tensão x deformação foi feito o gráfico de tensão média de trabalho, para as duas temperaturas de deformação. Utilizou-se uma análise estatística simples onde foi calculado a média das tensões, em cada passe, desconsiderando as tensões aplicadas para deformar o aço elasticamente. Foi calculado o desvio padrão populacional por passe. O gráfico desta dependência se encontra mostrado na Figura 3.

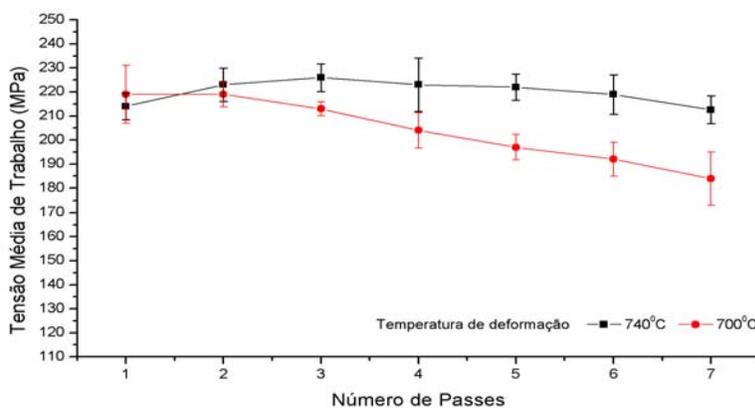


Figura 3. Tensão média de trabalho por passe em função das temperaturas de deformação.

Observando as diferenças das tensões médias de deformação para as temperaturas analisadas em cada passe conclui-se que, no caso analisado, a tensão média de trabalho é independente da deformação sendo função da temperatura de deformação.

3.4. Influência do recozimento nas propriedades mecânicas do aço

Um material deformado a morno acumula menor quantidade de energia que um deformado a frio, portanto se requer uma temperatura mais elevada para promover sua recristalização. Para se evitar um crescimento de grão durante o recozimento estas condições cinéticas devem ser evitadas, ou seja, deve-se acelerar esta etapa. O elemento diferencial desse processamento se encontra na estrutura fina e altamente deformada originalmente obtida pela têmpera, que vai facilitar subsequentemente a nucleação da ferrita durante o recozimento.

O crescimento de grão ferrítico durante o recozimento foi analisado. O valor do tamanho de grão contribui inversamente com o valor da microdureza do aço. A figura 4 demonstra a variação da dureza para as situações estudadas.

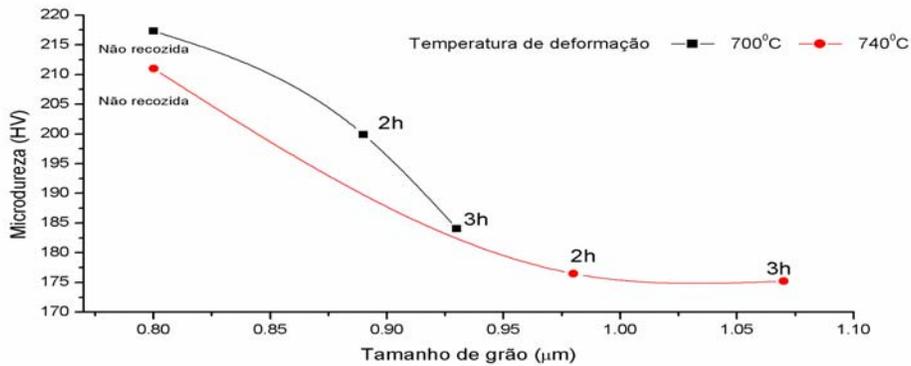


Figura 4. Microdureza em função do tamanho de grão ferrítico para vários tempos de recozimento.

A dureza Vicker é considerada um bom indicativo do limite de resistência do aço (Cota et al., 1998). De acordo com Yada (1987), para aços C-Mn, o limite de resistência pode ser correlacionado com a dureza Vickers através da equação 6.

Recozimento	Deformada 700°C	Deformada 740°C
Não Recozida	652 MPa	633 MPa
2 h	597 MPa	528 MPa
3 h	552 MPa	525 MPa

Tabela 5. Previsão de limite de resistência mecânica em função do tempo de recozimento a 800°C.

$$LR(\text{MPa}) = 3,02.HV \quad (6)$$

Na tabela 5 foram feitas estimativas dos limites de resistência mecânica dos aços para os diferentes tempos de recozimento utilizando a equação 6.

3.5. Parâmetros operacionais na obtenção de grãos ultrafinos em tiras.

Aços com grãos pequenos são utilizadas em estruturas onde se requer um alto limites de escoamento e ao mesmo tempo alta resistência à fratura frágil como na construção civil, construção naval, produção de tubos de grande diâmetro, produção de equipamentos rodoviários, agrícolas, tratores, caldeiras e vasos de pressão.

Foi estabelecida uma correlação do ensaio realizado para obtenção dos grãos ultrafinos com a laminação controlada de tiras a morno na linha de acabamento, como ilustrado na figura 5. Essa correlação se trata de uma nova proposta de tratamento termomecânico à indústria.

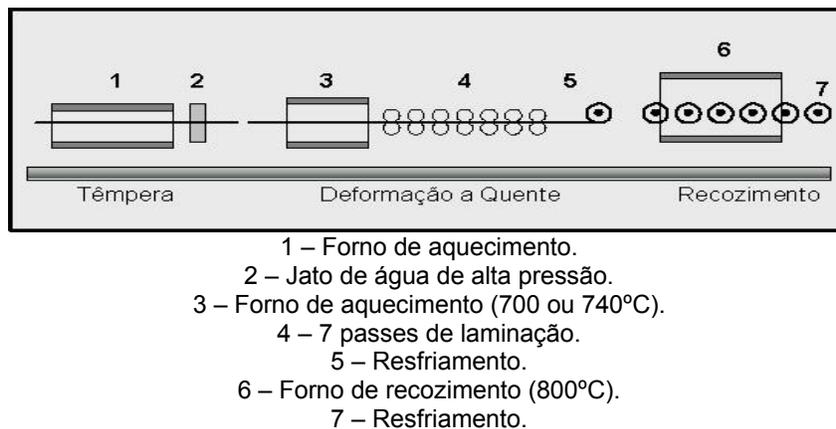


Figura 5. Ilustração do esquema de laminação para obtenção de grãos ultrafinos.

Antes dos passes de laminação, o aço é temperado a partir de 900°C sendo resfriado até a temperatura ambiente com uma taxa de resfriamento de 300°C/s. Os passes de laminação ocorrem na temperatura de 700 ou 740°C com um intervalo de 1 s para cada passe. A velocidade de laminação de 11,78 m/s, que corresponde a 300 rpm para o cilindro de laminação com diâmetro 750 mm, foi utilizado para fins de cálculos da força de separação.

A taxa de deformação tem influência na quantidade crítica de deformação para promover a formação de ferrita induzida por deformação ou recristalização dinâmica. Observa-se, portanto, um melhor refinamento quando se emprega uma maior taxa de deformação, pois uma quantidade maior de sítios para nucleação de ferrita é ativada.

Após os passes de laminação o aço é resfriado a temperatura ambiente e encaminhado para o forno de recozimento a 800°C. O tempo de recozimento influencia o tamanho de grão final e conseqüentemente as propriedades mecânicas do produto final, como discutido anteriormente.

4. Conclusões

São conclusões deste trabalho:

1- O refinamento de grão obtido através da deformação por torção associada ao tratamento térmico foi notável, variando entre 0,75 e 1,2 μm ;

2- Os valores de microdureza variaram em torno de 200 HV. O limite de resistência mecânica previsto e da ordem de 600 MPa, muito maior do que o limite de resistência encontrado nos aços carbono (≈ 350 MPa).

3- O tamanho de grão ferrítico variou com o tempo de recozimento que demonstrou exercer bastante influência sobre as propriedades mecânicas;

4- Os parâmetros do processo foram correlacionados com os parâmetros operacionais podendo ser ajustados para produção em escala industrial.

5. Bibliografia

1. BORATTO, F.; Effect of chemical composition on the critical temperature of microalloyed steels. In: INT. CONFERENCE ON PHYSICAL METALLURGY OF THERMO-MECHANIC PROCESSING OF STEELS AND OTHER METALS, ISIJ, 1988, Tokio, Japão. Anais ... **The ISIJ**, 1988, p. 383-390.
2. BORATTO, F.; YUE, S.; JONAS, J. J.; LAWRENCE, T. Projeto de Esquemas de Laminação Controlada através de Ensaio de Torção Computadorizado. In: SEMINÁRIO COLAM-ABM, 1987, São Paulo. p. 65-81.
3. BOWDEN, J.; SAMUEL, F. H.; JONAS, J. J. Effect of interpass time on austenite grain refinement by means of dynamic recrystallization of austenite. **Metallurgical Transactions A**, v. 22A, p. 2947-2957, dez. 1991.
4. COTA, A. B. **Simulação da Laminação Controlada e Resfriamento Acelerado em um Aço ARBL Bainítico de Baixo Carbono através de Ensaio de Torção**. 1998. Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica – Escola de Engenharia da UFMG.
5. KARJALAINEN, L. P.; MACCAGNO, T. M.; JONAS, J. J. Softening and flow stress behaviour of Nb microalloyed steels during hot rolling simulation. **ISIJ International**, v. 35, n. 12, p. 1523-1531, 1995.
6. OUCHI, C.; The effect of hot rolling condition and chemical composition on the onset temperature of $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation after hot rolling. **Transactions ISIJ**, v.22, p. 214-222, 1982.
7. PUSSEGODA, L. N.; JONAS, J. J. Comparison of dynamic recrystallization and conventional controlled rolling schedules by laboratory simulation. **ISIJ International**, v. 31, n. 3, p. 278-288, 1991.
8. SAMUEL, F. H.; YUE, S.; JONAS, J. J.; ZBINDEN, B. A. Modelling of flow stress and rolling load of a hot strip mill by torsion testing. **ISIJ International**, v.29, n. 10, p. 878-886, 1989.
9. SANTOS, D. B.; BARBOSA, R. A. N. M. The determination of the critical temperatures of recrystallization and austenite transformation during hot rolling of microalloyed steels. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECRYSTALLIZATION IN METALLIC MATERIALS, 1990, Wollongong, Australia. **The Minerals, Metals & Materials Society**, 1990, p. 399-404.
10. SEMIATIN, S. L.; LAHOTI, G. D.; JONAS, J. J. **Asm Metals Handbook Vol.8 (Mechanical Testing)**, 9th Ed. Ohio: American Society For Metals, Metals Park, 1985, p. 154-184.
11. YADA, H.; RUDDLE, G. E.; CRAWLEY, A. F.; Prediction of Microstructural Change and Mechanical Properties in Hot Strip Rolling. In: ACCELERATED COOLING OF ROLLED STEEL, 1987, Winnepeg. Winnepeg: Pergamon Press, 1987. p. 373-385.

THE SIMULATION OF HOT STRIP ROLLING BY HOT TORSION FOR DEVELOPMENT OF AN ULTRAFINE GRAINED FERRITE

T. A. Nogueira ¹
G. Azevedo ²
R. Barbosa ³
D. B. Santos ⁴

Abstract:

The present work deals with strain induced dynamic transformation of ferrite. Samples of low carbon C-Mn steel were intensely deformed in hot torsion aiming at the production of ultrafine grains of ferrite thereby enhancing the mechanical properties when compared to ordinary hot rolled products. After soaking during 5 min at 900°C, the samples were quenched and then reheated and submitted to hot torsion deformation at temperatures of 700 and 740°C. The torsion schedule consisted of 7 isothermal passes leading to a total true strain of ≈ 1 generating an ultrafine microstructure with grain sizes of the order of 1 μ m. The samples were heated up to 800°C, soaked at this temperature for 2 and 3 hours. The various constituents present in the microstructure as well as ferrite grain size were examined. Microhardness tests were performed to evaluate the mechanical properties so obtained.

Keywords: ultrafine ferrite, intercritical annealing, torsion testing.

41st ABM Rolling Seminar- Rolled and Coated Process and Products- 26-28 October 2004 - JOINVILLE – SC – BRAZIL

¹ ABM Jr Associate, Metallurgical Engineering Graduate Student -Engineering School - Federal University of Minas Gerais

² ABM Associate, MSc, Technical College Teacher - Federal University of Minas Gerais

^{3,4} ABM Member, Dr., Metallurgical And Materials Engineering Department Professor - Engineering School - Federal University of Minas Gerais