

DESENVOLVIMENTO DE AÇOS PARA ESTAMPAGEM EXTRA PROFUNDA LAMINADO A QUENTE NA CST – ARCELOR BRASIL ¹

*João Batista Ribeiro Martins*²
*Sergio de O. Lima Junior*³
*Ângelo Campos Moreira*⁴
*Ralph Telles dos Anjos*⁵
*Leonardo Barbosa Godefroid*⁶

Resumo

Na produção de aços baixa liga convencional, o aço é laminado totalmente no campo austenítico. Mudança da temperatura de laminação para o campo intercrítico abre novas possibilidades de desenvolvimento de processo e produto. Este trabalho apresenta os resultados obtidos de propriedades mecânicas de um aço baixo carbono quando laminado no campo intercrítico e comparado com a laminação no campo austenítico. Os resultados mostram valores de tensão limite de escoamento de até 170 MPa similares a valores de aços laminados a frio para estampagem. Heterogeneidade de tamanho de grãos foram encontradas.

Palavras-chave: Laminação intercrítica; Aço baixo carbono; Heterogeneidade de grão.

DEVELOPMENT OF HOT ROLLED EXTRA DEEP DRAWING STEELS IN CST - ARCELOR BRAZIL

Abstract

In conventional low carbon steel production, steel is hot rolled entirely in the austenitic state. Shifting the rolling temperature to values in the intercritical region opens new possibilities for process and product development. This paper presents the results from the mechanical properties of low carbon steel rolled in an intercritical field when compared to those rolled in the austenitic field. The results show values of yield stress up to 170 MPa similar the values found in cold rolled steel for deep drawing. Heterogeneity of grain size was found.

Key words: Intercritical rolling; Low carbon steel; Heterogeneity of grain.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Eng, Met., M.Sc., Especialista, CST Arcelor Brasil. e-mail: joão.martins@arcelor.com.br*

³ *Gerente de Seção, M.Sc., Especialista, CST Arcelor Brasil. e-mail: sergio.lima@arcelor.com.br*

⁴ *Eng, Met., Especialista, CST Arcelor Brasil. e-mail: angelo.moreira@arcelor.com.br*

⁵ *Especialista, CST Arcelor Brasil. e-mail: ralph.anjos@arcelor.com.br*

⁶ *Eng, Met., M.Sc., D.Sc., REDEMAT/UFOP. e-mail: leonardo@demet.em.ufop.br*

1.1 Efeito da Temperatura Final de Acabamento

O controle da condição de laminação em relação à temperatura de transformação austenita – ferrita (AR_3) se dá pela temperatura final de acabamento (FDT). Dependendo da composição química do aço e das propriedades mecânicas que se deseja, o valor visado da FDT é especificado.⁽⁶⁾ Considerando que há também uma temperatura no campo austenítico que abaixo da qual, a austenita não recristaliza (temperatura de não recristalização – T_{nr}), podemos ter algumas possibilidades de especificar a FDT conforme Figura 2: a) no campo austenítico na região de recristalização da austenita $FDT > T_{nr}$; b) no campo austenítico na região de não recristalização $T_{nr} > FDT > AR_3$; c e d) no campo intercrítico entre (ferrita + austenita) e no campo ferrítico $FDT < AR_1$. A taxa de deformação e escala de redução tem grande influência junto com a FDT.

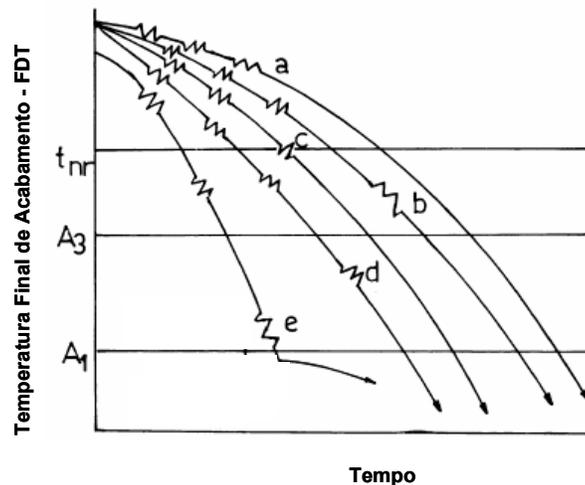


Figura 2: Possibilidades de especificação de temperatura final de laminação em aços baixo carbono.⁽⁶⁾

Quando a FDT está na região da austenita recristalizada, a microestrutura final obtida será de ferrita alotriomorfica recristalizada formada nos contornos de grão da austenita. Neste caso o tamanho de grão é controlado pelo tamanho de grão da austenita e pela taxa de resfriamento na mesa de resfriamento do laminador de tiras a quente.

Quando a FDT está especificada na região de não recristalização da austenita, os grãos de austenita ficam alongados, apresentando regiões deformadas que servem como pontos de nucleação de ferrita juntamente com o contorno de grão. Esta condição é usual em aços microligados onde o controle da recristalização da austenita nesta região é feito através de precipitados que agem como ancoradouro retardando a recristalização. Quando a FDT está na região intercrítica (austenita + ferrita) a estrutura deformada da ferrita pode recuperar ou recristalizar, gerando no final dois tipos de ferrita, uma oriunda da transformação da austenita para ferrita e outra da ferrita deformada.

E por fim quando a FDT está na região ferrítica, as deformações finais de acabamento são feitas no campo ferrítico. Também chamada de laminação a

morno. Esta prática é de grande interesse para aços ultra baixo carbono onde o $AR_3 > 900 \text{ }^\circ\text{C}$, apresentando vantagens em relação à laminação a quente convencional no campo austenítico.^(7,8)

1.2. Efeito da Temperatura de Bobinamento

A temperatura de bobinamento (CT) tem influência na forma e tamanho de grão ferrítico, no espaçamento interlamelar e espessura das lamelas da perlita, na forma da cementita terciária e na forma de precipitados como AlN. Nos aços baixo carbono normalmente se trabalha com duas grandes faixas de temperatura de bobinamento $CT < 600 \text{ }^\circ\text{C}$ e $CT > 600 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo os valores objetivados dependendo do ferramental, propriedades mecânicas objetivadas e aplicação final.

Temperaturas baixas de bobinamento dificultam a formação de cementita e do AlN, tornando os precipitados mais dispersos na microestrutura do laminado a quente. Esta prática é usual para aços que são laminados a frio e recozidos e caixa. Esta condição evita o crescimento de grão além do normal evitando defeitos como casca de laranja. Temperaturas altas de bobinamento favorecem o crescimento do grão ferrítico, e a precipitação de cementita e AlN, promovendo uma redução na tensão limite de escoamento e de resistência. Figura 3.

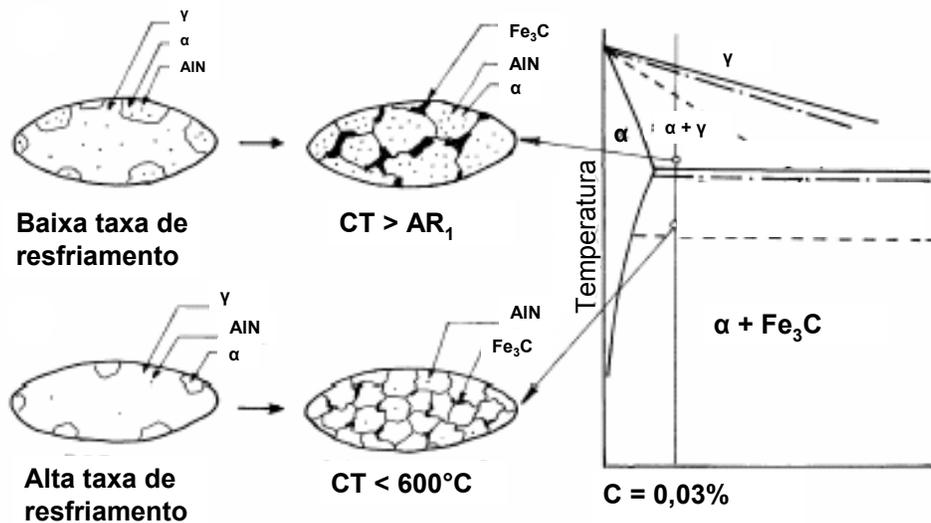


Figura 3: Influência da temperatura de bobinamento no tamanho de grão e distribuição dos precipitados em aços do tipo baixo carbono.⁽⁶⁾

1.3. Efeito da Composição química na Estampabilidade

Os elementos intersticiais como carbono e nitrogênio tem grande influência na estampabilidade, porém a redução do carbono implica no aumento da temperatura AR_3 o que limita a laminação a quente em baixas espessuras devido a dificuldades operacionais. No caso de aços baixo carbono normalmente se trabalha com valores menores do que 0,06% e nitrogênio menor do que 50 ppm.

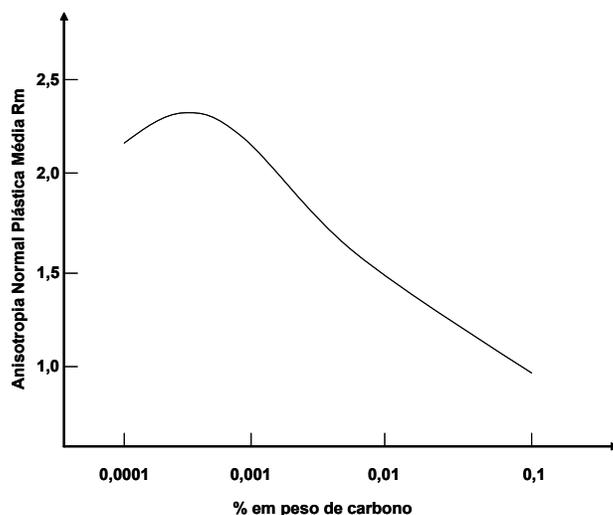


Figura 4: Influência do teor de carbono na anisotropia normal média dos aços sem liga.⁽⁹⁾

O teor de manganês também tem grande influência na anisotropia normal plástica, quanto menor melhor, no entanto o teor de enxofre do aço tem que ser controlado de forma a obter a relação $Mn/S > 12$ para evitar a formação de borda serrilhada na laminação. Figura 5.

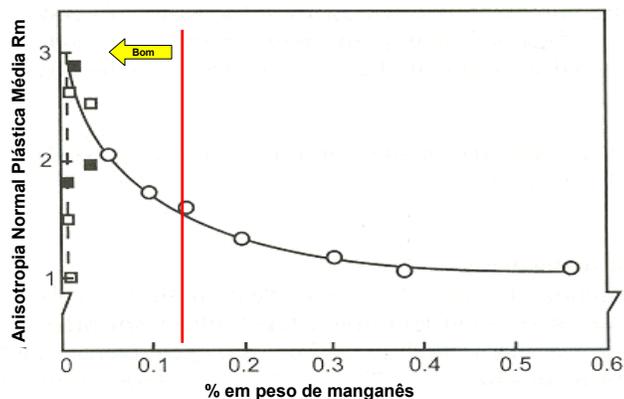


Figura 5: Influência do teor de manganês na anisotropia normal média dos aços sem liga.⁽⁹⁾

Para os aços baixo carbono laminado a quente, para aplicação de estampagem, elementos microligantes como nióbio e titânio promovem aumento de resistência mecânica, sendo seu uso restrito em aplicações onde se deseja controlar o tamanho de grão ferrítico ou aumentar a resistência mecânica. No caso dos aços livres de intersticiais, o uso do nióbio e titânio são essenciais para estabilizar o aço e aumentar a estampabilidade. Fósforo e enxofre devem ser controlados em teores residuais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foi usada uma composição química de um aço baixo carbono conforme a Tabela 1. A temperatura AR₃ medida foi 865 °C.

Tabela 1 – Composição química do aço estudado.

Composição Química (% em peso)						
C	Mn	P	S	Si	Al	N
≤ 0,06	≤ 0,50	≤ 0,020	≤ 0,015	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,0050

Todas as laminações foram feitas no laminador de tiras a quente da CST – Arcelor Brasil. As condições de laminação estudadas foram conforme Tabela 2. Duas espessuras de esboço forma utilizadas somente para espessura de 1,50 mm para avaliar o efeito da deformação no trem acabador na microestrutura e propriedade mecânica. Foi utilizada a estratégia de resfriamento lento no início para todas as condições estudadas. Para cada condição foram laminadas no mínimo 3 bobinas.

Tabela 2 – Condições de laminação usadas para o estudo.

Variável	Espessura (mm)	
	1,50	2,00
FDT (°C)	840, 865, 890	840, 865, 890 e 900
CT (°C)	625 e 700	625, 650, 680 e 700
Espessura do esboço (mm)	28 e 32	32

Para a caracterização foram escolhidos: ensaio de tração transversal com base de medida de 50 mm para levantamento da tensão limite de escoamento (LE), tensão limite de resistência (LR), alongamento total e dureza Rockwell B, além da caracterização microestrutural por microscopia ótica. A caracterização foi feita na posição centro da largura no meio do comprimento de cada bobina, e foram ensaiados 3 copos de prova para cada condição. Os valores de propriedades mecânicas foram comparados com uma especificação interna para LE ≤ 230 Mpa para atendimento à aplicação de estampagem.

Todas as bobinas forma inspecionadas via analisador de imagens durante a laminação (*on line*) no LTQ (Parcytec), que é uma ferramenta de inspeção da tira após a laminação de acabamento e antes do bobinamento em ambas as faces para verificar a ocorrência de defeitos superficiais, além de inspeção visual no laminador de encruamento.

Para realização deste trabalho foi utilizada a ferramenta de gestão de projeto DMADV (Define, Measure, Analyze, Design e Verify) para assegurar o controle e qualidade das análises.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As laminações ocorreram conforme o planejado sem ocorrência de anormalidade e as temperaturas obtidas de acabamento e bobinamento estavam centradas nas faixas visadas. Todas as bobinas apresentaram resultados de superfície conforme o praticado para aplicações de estampagem. Os resultados foram confirmados tanto na análise via Parsytec como na inspeção visual durante o processamento no laminador de encruamento.

A tensão limite de resistência para todas as condições estudadas atendeu a faixa especificação interna de 270 a 350 MPa, porém foi observada uma ligeira queda com o aumento da temperatura de bobinamento, no entanto dentro da dispersão normal dos resultados. A tensão limite de escoamento foi mais sensível tanto pelo aumento da temperatura de bobinamento quanto pela laminação no campo intercrítico (FDT < AR3) chegando a valores de 170 MPa. Isto ocorreu devido ao aumento do tamanho de grão ferrítico e também ao maior crescimento da cementita terciária conforme reportado na literatura^(6,10,11) e Figura 3. Temperaturas de bobinamento maiores do que 650°C indicaram o atendimento à faixa de tensão limite de escoamento especificada pela norma, no entanto para FDT menor do que AR3, a microestrutura apresentou grão heterogêneos como mostra a Figura 7 (a). Porém, para as outras condições, não houve heterogeneidade de grão significativa. A Figura 7 (b) mostra uma microestrutura típica encontrada. O tamanho de grão oscilou entre 6 e 8 ASTM para todas as microestruturas encontradas.

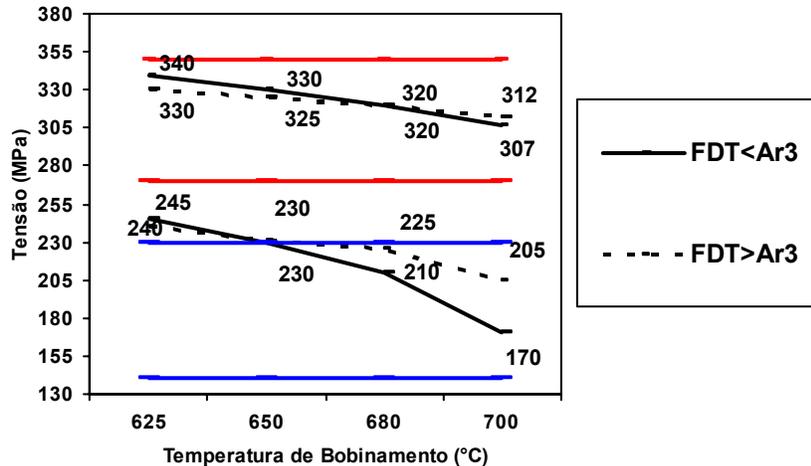


Figura 6: Influência da temperatura de acabamento e bobinamento nas tensões limite de escoamento e de resistência.

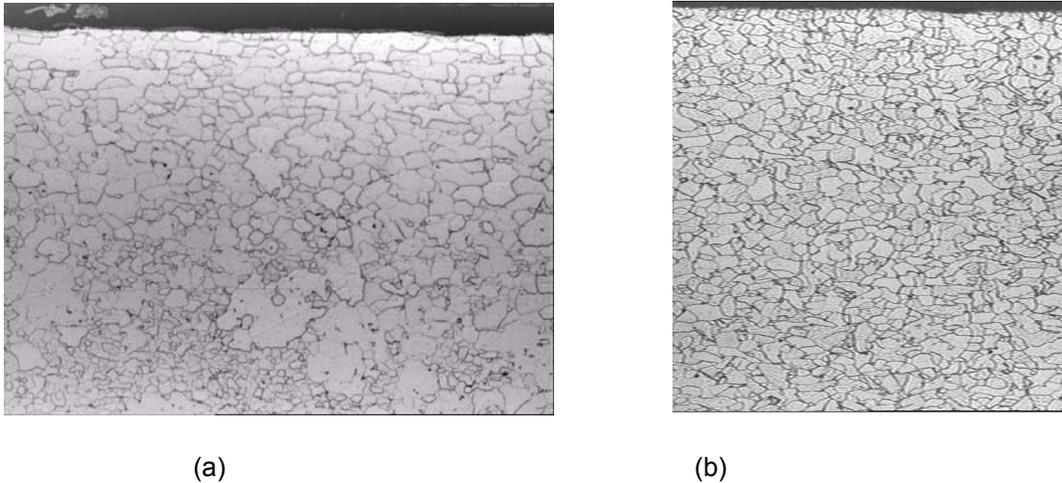


Figura 7: Microestrutura obtida (a) grãos heterogêneos para a condição FDT = 840 °C e CT = 700 °C e (b) grãos poligonais para a condição FDT = 865 °C e CT = 700 °C.

Para uma mesma temperatura de acabamento FDT = 840 °C e espessura de BQ de 1,50 mm, foi observado uma redução de 40 MPa na tensão limite de escoamento para a temperatura de bobinamento CT = 700 °C. Isto ocorreu porque o tamanho de grão austenítico ficou maior com a menor redução (de 28 mm para 1,50 mm) no trem acabador. Esta observação confirma o relatado na literatura.⁽¹⁰⁾

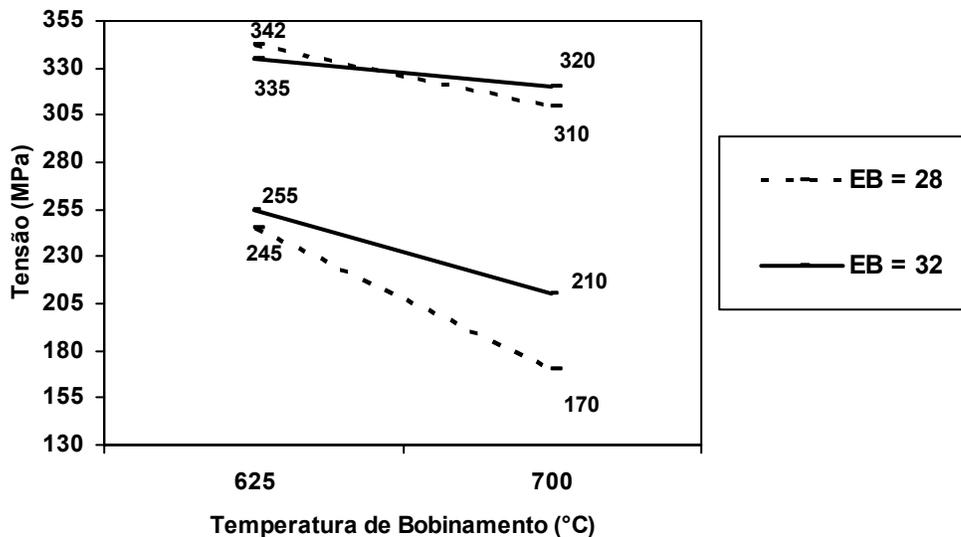


Figura 7: Influência da temperatura de bobinamento e da espessura de esboço nas tensões limite de escoamento e de resistência.

Os valores de dureza acompanharam a tendência da tensão limite de escoamento com redução de 12 pontos no range das temperaturas de bobinamento estudada conforme mostrado na Figura 8.

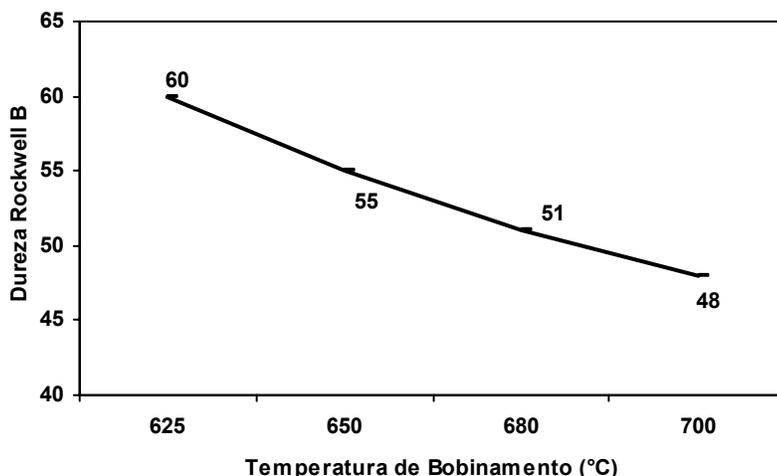


Figura 8: Influência da temperatura de bobinamento na dureza Rockwell B.

Os valores de alongamento não apresentaram nenhuma tendência, sendo que todos os resultados atenderam a especificação interna da CST de 38% mínimo.

Com base nos resultados as bobinas que atenderam a norma foram testadas no mercado e aprovadas pelos clientes. As que não atenderam a norma foram aproveitadas para normas comerciais sem exigência de estampabilidade.

4 CONCLUSÃO

A laminação no campo intercrítico possibilitou obter valores de tensão limite de escoamento da ordem de 170 MPa mostrando ser um grande potencial de desenvolvimento para aços de baixa resistência como aplicação de estampagem. Os valores encontrados são justificados pela microestrutura com tamanho de grão 6 ASTM, além da presença de grãos heterogêneos. Os valores de dureza acompanharam a mesma tendência de queda com o aumento da temperatura de bobinamento.

A variação da temperatura de acabamento na faixa estudada não afetou significativamente a tensão limite de resistência porém os valores encontrados atendem as normas de mercado para estampagem. Não tendo grande influência na resistência mecânica a grandes deformações.

A redução no trem acabado indicou que quando menor maior será o tamanho de grão ferrítico conforme relatado na literatura, sendo que o maior tamanho de grão encontrado foi 6 ASTM.

A qualidade superficial encontrada atende as aplicações usuais no mercado.

Os resultados mostraram que os valores mais baixos de tensão limite de escoamento foi obtido para temperatura de bobinamento $TB > 650$ °C, e para espessura de esboço de 28 mm. Os valores obtidos atende as propriedades mecânicas da especificação interna da CST para a faixa de espessuras estudadas, ou seja: tensão limite de escoamento = 140 a 230 MPa, tensão limite de resistência = 270 a 350 MPa, alongamento total $Lo = 50$ mm = 38% mínimo e dureza Rockwell = 50 máxima.

Agradecimentos

A CST Arcelor Brasil pela oportunidade de desenvolver esse trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 NBR 5906 - Chapas finas a frio de aço-carbono para estampagem, ABNT, 2003.
- 2 NBR 5915 - Bobinas e chapas laminadas a quente de aço-carbono para estampagem – Especificação, ABNT, 2006.
- 3 BODIM, A., Intercritical deformation of low-alloy steel. These PhD., Technische Universiteit Delft, Nederland, 2002.
- 4 POLIAK, E. I. and BHATTACHARYA, D., Effects of Alloying on Deformation Behavior of Low Carbon Steels in the Intercritical Temperature Range. Materials Science Forum Vols. 539-543, pp. 12-19. 2007.
- 5 ABBAS, M., et alli, Intercritical Deformation of Low Carbon Steel, Canadian Metallurgical Quarterly, vol 43, n. 1, pp 109 – 116, 2004.
- 6 PANIGRAHI, B. K., Processing of low carbon steel plate and hot strip – an overview, Bull. Mater. Sci., Vol. 24, No 4, pp 361 – 371, 2001.
- 7 HERMAN, J. C., LEROY, V., New possibilities of ferritic hot rolling applied to low carbon steels, TechCo, Seoul – Coréia do Sul, 4 a 5 de maio de 1997.
- 8 HERMAN, J. C., LEROY, V., Ferritic hot rolling and the potencial for hot rolled and cold rolled products. Liege, Bélgica, 1998.
- 9 HUMPHREYS, F. J., HATHERLY, M., Recrystallization and Related Annealing Phenomena, Elsevier segunda edição, pp 485. 2004.
- 10 BODIN, A., et alli, On the nature of the bimodal grain size distribution after intercritical deformation of a carbon-manganese steel. Materials Characterization, vol 47, pp 187 – 193, 2001.
- 11 BODIN, A., SIETSMA, J. and ZWAAG, V. D., Texture and Microstructure development during Intercritical Rolling of Low-Carbon Steels, Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 33A, pp 1589 -1603, 2002.