

Efeito da flexão dos cilindros na laminação de encruamento sobre a planicidade de tiras de aço

SILVA, C.N.^I; ARAÚJO, F.G.S.^{II}; FAGUNDES JR., J.^I; COTA, A.B.^{II};

^I CST – Arcelor Brasil, Av. Brigadeiro Eduardo Gomes, 930 – CEP: 29163-970,
Jardim Limoeiro – Vitória ES

e-mail: caetano.silva@arcelor.com.br, jose.fagundes@arcelor.com.br

^{II} Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Pça. Tiradentes, 20 – CEP: 35400-000,
Centro - Ouro Preto MG

e-mail: fgabrielaraujo@uol.com.br, abcota@iceb.ufop.br

RESUMO

A flexão dos cilindros durante a laminação é um fenômeno que tanto provoca defeitos de planicidade como permite corrigi-los, através da laminação diferenciada ao longo da largura. Este trabalho objetivou avaliar o efeito da flexão estimada dos cilindros na laminação de encruamento sobre a variação da planicidade de tiras laminadas a quente. Isto foi realizado através de experimentos industriais com variação dos parâmetros de força de laminação e de dobramento durante processamento no laminador de encruamento, em que se buscou correlacionar os resultados estimados de flexão com os resultados observados de variação de planicidade. Foi confirmada a relação entre a flexão dos cilindros e a planicidade, praticamente sem variação da planicidade quando o perfil transversal da tira e a flexão dos cilindros eram coerentes e com a variação da planicidade aumentando à medida que se aumentava esta incoerência.

Palavras chaves: planicidade, laminação de encruamento, aço.

Effect of skin pass roll bending in flatness of steel strips

ABSTRACT

Roll bending during rolling can be the cause and the solution for flatness defects through differential rolling across the strip width. This work aims to evaluate the effect of skin pass roll bending in flatness changes of hot rolled strips. This was done through industrial experiments with process parameters changings of rolling force and bending forces in the skin pass mill, correlating the estimated result of roll bending with the observed flatness changes. The results confirmed the relationship between roll bending and flatness, practically without flatness changes when the cross section of the strip and the roll bending was coherent and with flatness changes increasing with the increase of this incoherence.

Keywords: flatness, skin pass rolling, steel.

1 INTRODUÇÃO

A planicidade é uma característica de qualidade claramente percebida e que vem sendo demandada em tolerâncias cada vez mais restritas pelo mercado [1]. Caracteriza-se principalmente pela presença de ondulações resultantes da acomodação de regiões mais alongadas, que costumam concentrar-se no centro ou nas bordas das tiras, conforme ilustrado na Figura 1.

A planicidade pode ser mensurada pela diferença de alongamento ao longo da largura através da Unidade I (*I-Unit*), a qual está diretamente relacionada com a altura e o comprimento das ondulações, conforme mostrado na equação 1 [2].

$$UnidadeI = \left(\frac{\Delta L}{L_{ref}} \right) \times 10^5 = \left[\left(\frac{\pi}{2} \right) \left(\frac{H}{L} \right) \right]^2 \times 10^5 \quad (1)$$

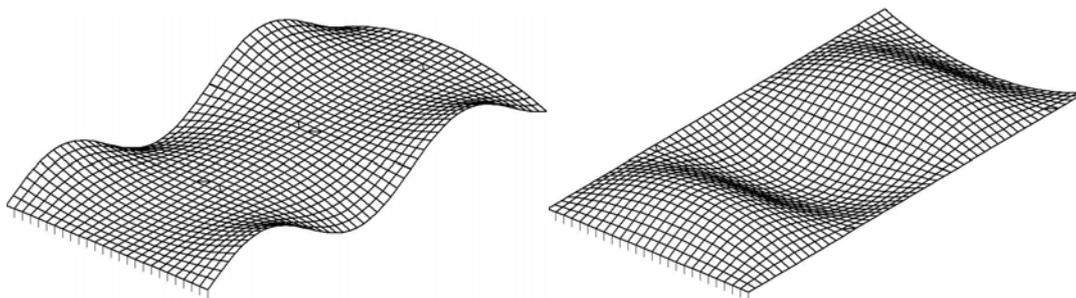


Figura 1: Ondulações de borda (à esquerda) e ondulações centrais (à direita).

Na Equação 1, ΔL representa a diferença de comprimento entre o trecho mais alongado e o menos alongado da largura da tira, L_{ref} o comprimento do trecho menos alongado, H a altura e L o comprimento das ondulações.

Em tiras laminadas a quente para aplicação direta, a laminação de encruamento costuma ser empregada como um processo adicional para corrigir defeitos de planicidade. Neste processo são aplicados alongamentos da ordem de 0,5 a 4,0%, sendo que a correção das ondulações se dá através do mesmo princípio pelo qual a maioria delas é formada durante a laminação a quente, que é a laminação diferenciada ao longo da largura [1]. A Figura 2 ilustra um exemplo de laminação diferenciada ao longo da largura, com alongamentos maiores nas bordas do que no centro, levando à formação de ondulações de borda.

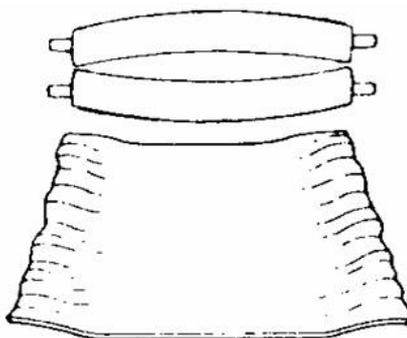


Figura 2: Formação de ondulações de borda pela laminação diferenciada ao longo da largura.

A laminação diferenciada ao longo da largura está fortemente relacionada ao perfil transversal da tira laminada e à flexão dos cilindros de laminação. O perfil transversal da tira pode ser representado de forma simplificada pela coroa, a qual é definida como sendo a diferença entre a espessura no centro da tira e a espessura em um ponto próximo à borda da mesma. De forma semelhante, a flexão dos cilindros pode ser mensurada pela diferença na abertura entre os cilindros de trabalho inferior e superior no centro da tira e em um ponto próximo à borda da mesma. A laminação diferenciada ao longo da largura ocorre quando o perfil transversal da tira e a flexão dos cilindros não são perfeitamente coerentes. Com uma flexão dos cilindros maior que a coroa, haverá uma tendência à formação de ondulações de borda ou correção de ondulações centrais, enquanto que com uma coroa maior que a flexão dos cilindros, haverá uma tendência à formação de ondulações centrais ou correção de ondulações de borda.

Nos laminadores de encruamento, a coroa da tira é uma variável de entrada, não havendo possibilidade de atuação sobre ela durante o processo. Assim sendo, a laminação diferenciada ao longo da largura deve ser obtida através da atuação sobre a flexão dos cilindros. A flexão depende principalmente da força de laminação aplicada, a qual por sua vez é função do alongamento que se deseja aplicar. Muitas vezes este alongamento não pode ser alterado, limitando também a possibilidade de atuação sobre esta variável. Então, para possibilitar um maior controle da planicidade, os laminadores podem ser dotados de sistemas que aplicam forças específicas para a flexão dos cilindros (forças de dobramento). A Figura 3 ilustra a aplicação destas forças e os seus efeitos sobre a flexão dos cilindros.

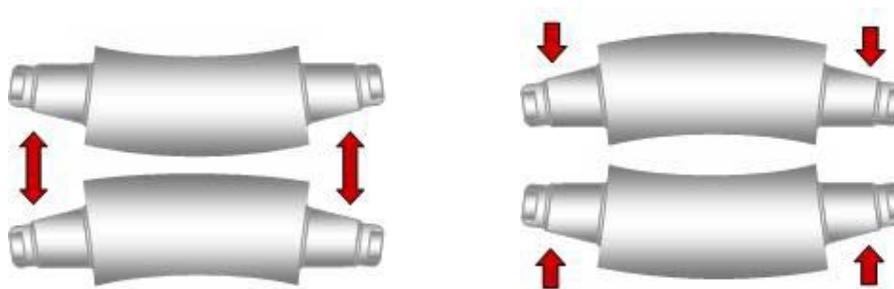


Figura 3: Forças de dobramento positivas para correção de ondulações de borda (à esquerda) e forças de dobramento negativas para correção de ondulações centrais (à direita) [3].

Este trabalho tem o objetivo de avaliar, através de experimentos industriais, o efeito da flexão estimada dos cilindros na laminação de encruamento sobre a variação da planicidade em tiras laminadas a quente.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos industriais constaram do processamento de bobinas no laminador de encruamento da ArcelorMittal Tubarão com variação controlada dos principais parâmetros de influência sobre a flexão dos cilindros. Estas bobinas foram então cortadas em chapas, nas quais foram feitas medições da planicidade para correlacioná-las com a flexão estimada dos cilindros em cada condição de processamento.

Foram utilizadas duas bobinas de aço baixo-carbono com espessura de 2,05mm, largura de 1.514mm e composição química (% em peso) apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química (% em peso) das bobinas utilizadas nos experimentos.

C	Mn	P	S	Si	Cu	Al
0,0369%	0,2382%	0,0174%	0,0044%	0,0100%	0,0075%	0,0440%

No laminador de tiras a quente da ArcelorMittal Tubarão, estas bobinas foram laminadas em seqüência e sem variação nos parâmetros de processo, buscando-se obter condições de planicidade similares e homogêneas.

Durante o processamento no laminador de encruamento, foi induzida uma variação das forças de laminação e de flexão dos cilindros (força de dobramento) ao longo do comprimento das bobinas, na bobina A pequena variação na força de dobramento, variando-se a força de laminação, e procedimento inverso na bobina B. Cada bobina foi dividida em quatro regiões de amostragem, utilizando-se diferentes valores para estas variáveis em cada uma destas regiões, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de processamento no laminador de encruamento.

Parâmetros:	Regiões de amostragem:							
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
Força de laminação:	423k	1.605kN	3.441kN	5.636kN	700kN	3.655kN	3.698kN	3.515k
Força de dobramento:	+5kN	+49kN	-128kN	-61kN	+67kN	-814kN	-19kN	+938kN

As primeiras regiões de amostragem de cada bobina (A1 e B1) foram processadas com os cilindros atuando apenas como rolos puxadores, com a aplicação de forças insuficientes para promover um alongamento significativo no material. Estas regiões foram utilizadas na análise dos resultados como referências, representando a condição inicial de planicidade destas bobinas, sem a influência da laminação de encruamento.

As demais variáveis de processamento relevantes na laminação de encruamento foram mantidos nas seguintes condições:

- Força de desbobinamento: 137kN;

- Força de bobinamento: 176kN;
- Velocidade de processamento: 200m/min;
- Diâmetro dos cilindros de trabalho: 585mm;
- Diâmetro dos cilindros de encosto: 1.229mm;
- Cilindros de trabalho e de encosto planos e recém retificados (desgaste insignificante);
- Temperatura de processamento: ambiente (~25°C).

As bobinas foram então cortadas em chapas de 3m de comprimento em uma linha de corte transversal, sendo que nos pontos de amostragem o processamento foi realizado com a desempenadeira de rolos aberta para não alterar a condição de planicidade. A planicidade foi avaliada através de medições das alturas e comprimentos das ondulações observadas ao longo da largura das chapas, transformando os valores encontrados para Unidades I, conforme descrito na equação 1.

A flexão dos cilindros durante o processamento no laminador de encruamento foi estimada através de equações de previsibilidade [4] e das variáveis utilizadas em cada região de amostragem. Estas equações são similares às utilizadas no cálculo da flexão dos cilindros no modelo matemático de controle do perfil e planicidade da laminação de tiras a quente, mas foram adaptadas para as características técnicas do laminador de encruamento da ArcelorMittal Tubarão. A curva básica e os quocientes diferenciais para cada parâmetro influente (força de laminação, força de dobramento e diâmetros dos cilindros) foram aproximados por funções polinomiais de quinta ordem, dependentes da largura da tira. O resultado destas equações é a diferença na abertura entre os cilindros de trabalho inferior e superior no centro e nas bordas da tira.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através das equações de previsibilidade calculou-se a influência das forças de laminação, de dobramento e dos diâmetros dos cilindros sobre a flexão dos cilindros de trabalho, para as condições experimentais em cada região de amostragem. Somando-se estas influências, chegou-se às flexões estimadas totais, conforme apresentado nas linhas 1 a 4 da Tabela 3.

A partir da medição automática do perfil no laminador de tiras a quente, foram obtidos os valores de coroa a 25mm das bordas. Subtraindo-se os valores de coroa dos valores estimados de flexão, determinou-se o que convencionaremos chamar aqui de incoerência entre a flexão dos cilindros e o perfil da tira. Dividindo-se este valor pela espessura da tira (2,05mm), determina-se a incoerência relativa. Estes resultados são apresentados nas linhas 5 a 7 da Tabela 3.

A variação da planicidade, nas bordas e no centro, em relação às amostras de referência (A1 e B1) está apresentada nas linhas 8 e 9 da Tabela 3.

Tabela 3: Sumário dos resultados obtidos para as diferentes regiões de amostragem.

Regiões de amostragem:	c/ variação da força de laminação:			c/ variação da força de dobramento:		
	1.605kN	3.441kN	5.636kN	-814kN	-19kN	+938kN
Resultados obtidos:	A2	A3	A4	B2	B3	B4
1. Flexão f(força de laminação)	22,9µm	51,0µm	84,5µm	54,2µm	54,9µm	52,1µm
2. Flexão f(força de dobramento)	-1,1µm	2,8µm	1,3µm	18,0µm	0,4µm	-20,7µm
3. Flexão f(diâmetros dos cilindros)	0,4µm	0,3µm	0,3µm	0,3µm	0,3µm	0,3µm
4. Flexão estimada total	22,2µm	54,1µm	86,1µm	31,7µm	55,6µm	31,7µm
5. Coroa da tira a 25mm das bordas	80,0µm	80,0µm	80,0µm	78,0µm	78,0µm	78,0µm
6. Incoerência (flexão – coroa)	-57,8µm	-25,9µm	6,1µm	-5,5µm	-22,4µm	-46,3µm
7. Incoerência relativa	-28,2	-12,6	3,0	-2,7	-10,9	-22,6
8. Variação da planicidade nas bordas	-14 IU	-2 IU	25 IU	-4 IU	-18 IU	-24 IU
9. Variação da planicidade central	17 IU	34 IU	29 IU	-15 IU	-2 IU	5 IU

O gráfico da Figura 4 relaciona a incoerência relativa entre a flexão dos cilindros e o perfil transversal da tira com as variações de planicidade observadas nos experimentos.

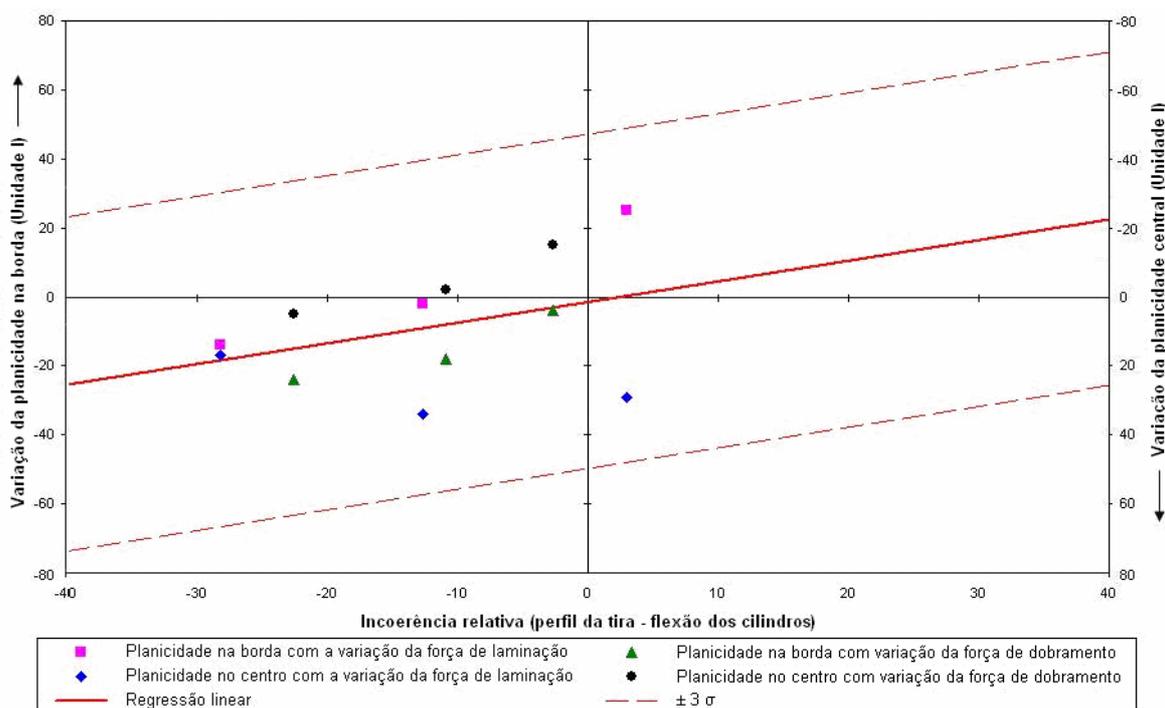


Figura 4: Resultados experimentais mostrando a relação entre a incoerência relativa e a variação da planicidade na borda e no centro das tiras.

Pelo resultado da regressão linear, observa-se uma correlação de acordo com o esperado, praticamente sem variação da planicidade quando os perfis são perfeitamente coerentes e com a variação da planicidade aumentando à medida que se aumenta a incoerência.

Apesar da dispersão observada, se considerarmos uma distribuição normal dos desvios, 95% dos resultados ainda encontrariam-se dentro de uma faixa de ± 48 Unidades I (linhas tracejadas no gráfico da Figura 4). Considerando uma tolerância admitida para desvios de planicidade de ± 55 Unidades I (equivalente aos 15mm admitidos pela norma ASTM A568 em ondulações senoidais com 1m de comprimento de onda), esta faixa de ± 48 Unidades I confirma a efetividade do uso da flexão estimada dos cilindros para o controle da planicidade.

4 CONCLUSÕES

Os resultados experimentais comprovaram a relação entre a flexão estimada dos cilindros na laminação de encruamento e a variação da planicidade de tiras laminadas a quente. Estes resultados sugerem a utilização das equações de previsibilidade da flexão dos cilindros para definição dos valores de *set-up* e para o controle dinâmico das forças de dobramento.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ArcelorMittal Tubarão e a REDEMAT pelo suporte prestado ao longo do desenvolvimento deste trabalho, parte integrante do projeto de mestrado intitulado “Influência da Laminação de Encruamento sobre a Planicidade e Propriedades Mecânicas de Tiras de Aço Laminadas a Quente”.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] SILVA, C.N., *Influência da laminação de encruamento sobre a planicidade e propriedades mecânicas de tiras de aço laminadas a quente*, Tese de M.Sc., REDEMAT, Ouro Preto, MG, Brasil, 2007.

- [2] ASTM A 568, General requirements for standard specification for steel, sheet, carbon, and high-strength, low-alloy, hot-rolled and cold-rolled, ASTM – American Society for Testing & Materials, USA, 2000.

- [3] SILVA, C.N., SEQUEIRA, L.T., SARNAGLIA, G.M., SOBRINHO, Q.R., DORNELAS, F.C., DADALTO, J., “Desenvolvimentos recentes no hot skin pass da CST para o controle de planicidade em tiras laminadas a quente”, In: Anais da 16a Conferência de Laminação do IAS - Instituto Argentino de Siderurgia, San Nicolas, Argentina, Nov. 2006.

- [4] KLOECKNER, H.J., SILVA, C.N., SMS demag technical assistance for flatness – Final Report, CST – Arcelor Brasil, 2006.