

# CONTROLE DE COROA EM TIRAS LAMINADAS A QUENTE ATRAVÉS DO USO DE SISTEMA DE “SHIFT” E “BENDING”<sup>1</sup>

*Nilber Bhering Cordeiro<sup>2</sup>  
Mário Marcio Barbosa Alves<sup>3</sup>*

## **Resumo**

Durante a laminação a quente de tiras de aços um dos importantes quesitos de qualidade a ser alcançado é o perfil transversal e a coroa da tira, visando atender as exigências de mercado na bobina a quente como também visando atender as necessidades de coroa nos processos subsequentes (laminação a frio). Foi desenvolvido então o sistema de “shift”, o qual consiste na movimentação axial dos cilindros de trabalho. Os cilindros possuem um perfil especial (curva axial) adaptado às características do laminador, cuja ação combinada com o “bending” (sistema hidráulico de deflexão axial dos cilindros de trabalho) permite o controle da coroa da tira em qualquer etapa do ciclete (programa de laminação ou chance), uma vez que leva em conta a variação dos principais parâmetros de processo que determinam a necessidade de coroamento em cada cadeira durante o ciclete, visando a coroa final objetivada na tira. Neste trabalho será apresentado o sistema de “shift” implantado no Laminador de Tiras a Quente da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), bem como a descrição básica do modelo matemático que determina os cálculos de posição do “shift” e pressão de “bending”, discutindo as principais variáveis associadas a este cálculo. A modelagem é abrangente em relação aos parâmetros de processo destacando-se o equacionamento dos parâmetros térmicos e de desgaste dos cilindros de encosto e trabalho. Os resultados da aplicação desta tecnologia permitem nitidamente observar os ganhos em capacidade de manter a coroa da tira dentro de valores desejados ao longo do ciclete.

**Palavras-chave:** Laminação, Coroa, Perfil

---

<sup>1</sup> Contribuição a ser apresentada no 41º Seminário de Laminação da ABM, 26 a 28 de Outubro de 2004, Joinville/SC.

<sup>2</sup> Msc., Engenheiro de Produção na Companhia Siderúrgica Nacional.

<sup>3</sup> Técnico de Desenvolvimento em Automação na Companhia Siderúrgica Nacional.

## 1 . Introdução

Na laminação de tiras a quente, a coroa e planicidade são importantes parâmetros de qualidade que não só devem ser medidos/avaliados, como também devem ser também controlados. Existem variáveis que afetam o perfil axial dos cilindros de trabalho e encosto, as quais vão, por conseguinte determinar o formato da abertura entre cilindros superiores e inferiores nas cadeiras. O perfil desta abertura determina a coroa mecânica que se produz visando imprimir na tira a coroa desejada, porém a complexidade em definir tal coroa mecânica está no fato de que o diâmetro e forma dos cilindros variam durante o processo de laminação sob efeito principalmente dos seguintes aspectos:

- Expansão térmica: Os cilindros são aquecidos por condução pelo contato com a tira aquecida, por radiação e fricção. Uma vez que o aquecimento ao longo da seção axial do cilindro não é uniforme, a expansão térmica também não será e por isso terá a formação de uma coroa térmica [1] [2]. No caso da CSN devido a alta produtividade do laminador, onde o intervalo de placas laminadas no trem acabador(gap na cadeira F1 "off-on") atinge até 15 s, a formação da coroa térmica é ainda mais acentuada ;
- Desgaste: O ritmo de produção e a complexidade do "mix" de produtos impõem o desafio constante no desenvolvimento de cicletes de alta produtividade visando reduzir assim o número de trocas diárias. Isto implica ao final do ciclete um elevado desgaste dos cilindros de trabalho onde devido a não uniformidade dos esforços de laminação ao longo da seção axial, origina uma coroa de desgaste[3];
- Deflexão dos cilindros: Como já dito, o "mix" de produto é bastante complexo. Lamina-se no mesmo dia espessuras que variam de 1,2 mm a 12,7 mm, largas de 710 a 1575 mm, e aços desde baixíssimo carbono, como aços IF, até aços ARBL e estruturais. Diante deste "mix" complexo a definição de coroas mecânicas de cilindros de trabalho estaria associada a uma variedade muito grande de tipos de coroamentos a fim de compensar os diferentes cenários de esforços de laminação.

Com finalidade de ter o controle destas variáveis foi implantado o sistema de controle automático de coroa. Este controle é feito utilizando o sistema de "shift" (nas cadeiras de F2 a F4) e controle de força de "bending" (nas cadeiras de F2 a F7), sendo que o "bending" das cadeiras com "shift" é reforçado, conforme especificações na tabela 1:

	Deslocamento do "shift" (mm)	Pressão min./ max. de "bending" (ton.)
F2 ~ F4	+ / - 150	20 / 150
F5 ~ F7	---	20 / 90

**Tabela 1 – Especificação "shift" / "bending"**

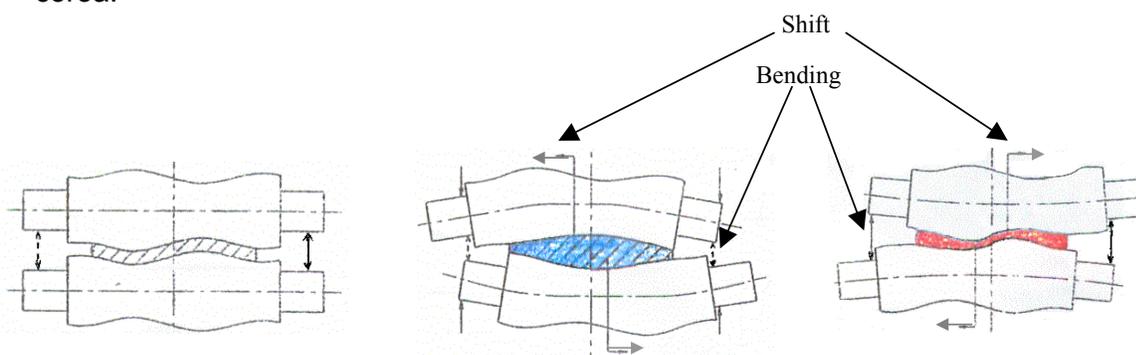
O sistema de "shift" trabalha deslocando os cilindros de trabalho superior e inferior em sentidos opostos na direção axial da mesa dos mesmos. O "bending" consiste em um sistema de forças que agem nas extremidades dos cilindros (região do pescoço) através da flexão no corpo dos mesmos, promovendo desta forma um coroamento mais ou menos positivo e controlando também o aplainamento. Este deslocamento do "shift" ocorre no posicionamento do laminador (set up) para cada

bobina evitando desta forma o desgaste localizado nos cilindros e proporcionando uma coroa na tira que obedecerá a forma da abertura produzida entre as superfícies (perfil) dos cilindros trabalho. No caso CSN o perfil dos cilindros apresenta uma curva do tipo CNP (“combined numeracally profile”) e os cálculos do posicionamento do “shift” referem-se à coroa 25 (Cr25 – figura 1).

$$Cr25 = H_{centro} \frac{(H_{borda(esq)} + H_{borda(dir)})}{2} ; \text{ Onde: H – Espessura da tira}$$

**Figura 1 - Representação matemática e gráfica da Cr25.**

Na figura 2 é mostrados esquematicamente o sistema de cilindros com controle de coroa.



**Figura 2 - Ilustração do movimento do “shift” com cilindro CNP.**

No sistema CNP, a curva é definida em função das características dos laminadores e a gama de produtos laminada. O perfil da curva implantada na CSN pode ser observado na figura 3. Com a implantação do “shift” e uso do “bending” o controle das condições de forma da tira foram favorecidos, permitindo garantir coroas com alto nível de precisão e melhorar as condições de aplainamento do material durante o atravessamento do mesmo, o que também resulta em ganhos de estabilidade de processo. Este novo sistema baseado na coroa final objetivada faz então uma avaliação da quantidade de coroa necessária a ser feita em cada cadeira e a quantidade permitida visando as condições seguras de aplainamento ao processo, as quais são determinadas por parâmetros mecânicos (pré-definidos empiricamente) e de processo (força de laminação, coroa térmica, coroa inicial do esboço, coroa de desgaste do cilindro, etc.) calculados a cada tira laminada.

## 2 - Modelo de coroamento da tira:

Pode-se dizer que o coroamento da tira no laminador é um processo hereditário [4] feito em cada cadeira simultaneamente e por isso definido pela coroa mecânica produzida pela cadeira em questão e pela coroa da tira oriunda da cadeira anterior, conforme equacionado a seguir:

$$\frac{Cr_i - Cr_{i-1}}{h_i - h_{i-1}} = \zeta_i \left( \frac{Cm_i - Cr_{i-1}}{h_i - h_{i-1}} \right)$$

Onde:

i → Cadeira em questão (i = 0 para última cadeira do desbaste);

Cr → Coroa da tira;

Cm → Coroa mecânica na tira;

ζ → Taxa de impressão;

h → Espessura de saída.

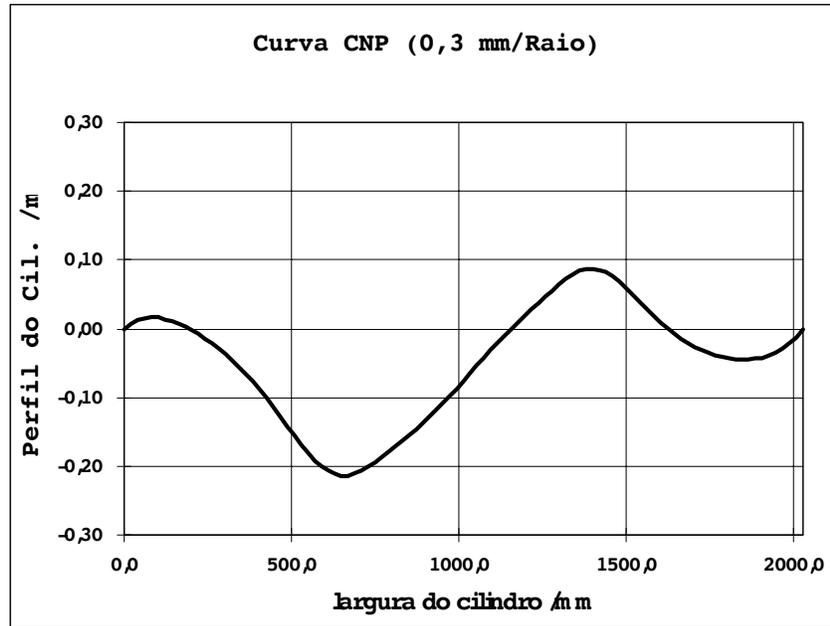


Figura 3 – Curva CNP do LTQ2 da CSN.

### 2.1 – Coroa mecânica:

A coroa mecânica da tira em cada cadeira é definida como a coroa obtida sob uma distribuição uniforme de carga ao longo da largura [4], sendo esta determinada pela combinação de alguns parâmetros relativos ao processo de laminação e conforme o modelo a seguir:

$$Cm = \alpha f . RF + \alpha w . C\_WR + \alpha b . C\_BR + \alpha p\_ctd . (\alpha tdw (CT\_W + CD\_W) + \alpha db . CD\_B) + \alpha ps . PSH + \alpha fb . FB + \alpha p\_cr$$

Onde:

RF – Força de laminação (ton.);

C\_WR – Coroa mecânica inicial do cilindro de trabalho (mm);

C\_BR – Coroa mecânica inicial do cilindro de encosto;

CT\_W – Coroa térmica do cilindro de trabalho;

CD\_W – Coroa de desgaste do cilindro de trabalho;

CD\_B – Coroa de desgaste do cilindro de encosto;

PSH – Posição do “shift” (mm);

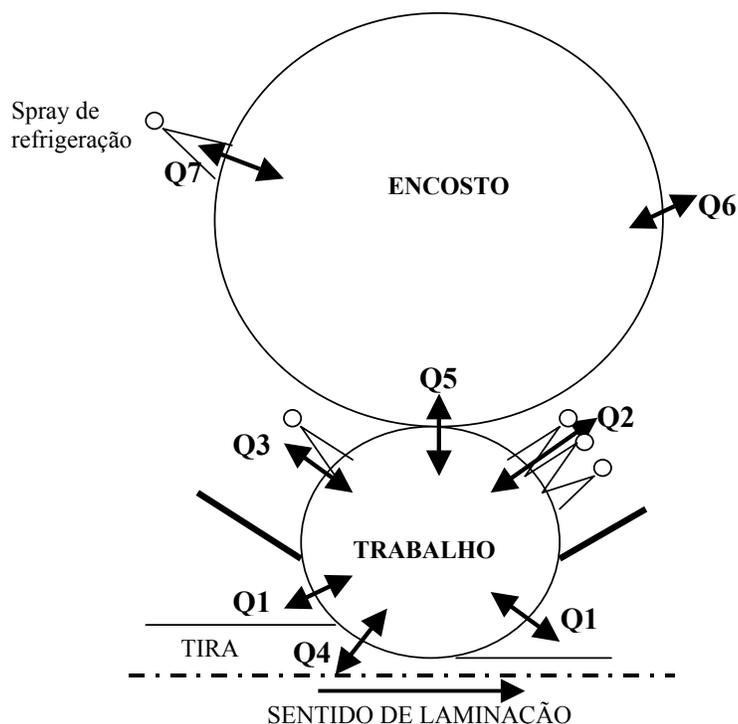
FB - Força de "bending" (ton.);  
 ap\_cdt – Coeficiente de aprendizado de coroa térmica e desgaste;  
 ap\_cr - Coeficiente de aprendizado da coroa mecânica da tira;  
 $\alpha_p, \alpha_w, \alpha_b, \alpha_{tdw}$ , etc. – Coeficientes de influência de cada variável relacionada.

## 2.2 – Coroa Térmica:

O cálculo do perfil térmico é executado a cada 10 s, seja com o laminador operando em vazio ou laminando, garantindo desta forma boa precisão em qualquer etapa do processo. A distribuição de temperatura no interior do cilindro é calculada pelo **método de diferenças finitas** [5] partindo de um modelo bidimensional similarmente desenvolvido em outros trabalhos [1] [2]. O modelo térmico se baseia no esquema de trocas térmicas (figura 4), considerando cilindros, "sprays" de refrigeração e contato com a tira:

**Q** é a quantidade de calor trocado na superfície do cilindro em cada posição denominada abaixo:

- Q1 – Troca entre o cilindro de trabalho e ar ambiente;
- Q2 – Troca entre cilindro de trabalho e os "sprays" de refrigeração de saída;
- Q3 - Troca entre cilindro de trabalho e o "spray" de refrigeração de entrada;
- Q4 - Troca entre cilindro de trabalho e a tira laminando;
- Q5 - Troca entre cilindro de trabalho e o cilindro de encosto;
- Q6 - Troca entre cilindro de encosto e ar ambiente;
- Q7 - Troca entre cilindro de encosto e os "sprays" de refrigeração;



**Figura 4 – Esquema representativo de trocas térmicas nos cilindros [4].**

Fazendo-se o balanço da quantidade de calor total ( $Q_T$ ) trocado ao longo da superfície do cilindro de trabalho com o sistema, temos abaixo:

$$\begin{array}{l}
 Q_1 = \alpha_1 \cdot S_1 \cdot (\theta_1 - \theta_c) \cdot \Delta t \\
 \vdots \\
 Q_5 = \alpha_5 \cdot S_5 \cdot (\theta_5 - \theta_c) \cdot \Delta t \\
 \hline
 Q_T = \sum_i Q_i = \sum_i \alpha_i \cdot S_i \cdot (\theta_i - \theta_c) \Delta t
 \end{array}$$

Onde:

- Q – Quantidade de calor;
- $\alpha$  - Coeficiente de transferência de calor;
- S – Área específica de troca;
- $\theta$  - Temperatura do meio;
- $\theta_c$  – Temperatura do cilindro;
- $\Delta t$  – Intervalo de tempo.

A temperatura de superfície do cilindro ( $\theta_s$ ) pode ser calculada pelo balanço das taxas de troca térmica entre :

Taxa de troca por condução ( $\Delta Q_c$ ):

$$\Delta Q_c = - \frac{\lambda \cdot (\theta_s - \theta)}{\Delta x}$$

Onde:

- $\lambda$  - Coeficiente de condutibilidade térmica;
- $\Delta x$  – Distância entre os pontos centrais dos elementos que dividem o cilindro.

Taxa de transferência de calor pelo sistema ( $\Delta Q_t$ ):

$$\Delta Q_t = \frac{\sum_i \alpha_i \cdot S_i \cdot (\theta_s - \theta_i)}{\sum_i S_i}$$

Para calcular o perfil térmico ao longo da seção radial do cilindro, divide-se este em elementos simétricos e calcula-se a temperatura em cada ponto central dos elementos conforme o método numérico aplicado.

Conhecendo o perfil térmico do cilindro calcula-se a expansão térmica de cada região radial ( $U_r$ ) [2,4], conforme abaixo:

$$U_r = \frac{\beta(1+\nu)}{R} \left[ \Delta\theta_m (r_m^2 - r_{m-1}^2) + \Delta\theta_{m-1} (r_{m-1}^2 - r_{m-2}^2) + \dots \right]$$

Onde:

- $\beta$  - Coeficiente de expansão linear;
- $\nu$  - Coeficiente de Poisson;
- r – Distancia radial entre cada ponto avaliado;
- $\Delta\theta_m$  – Variação de temperatura;
- R – Raio do cilindro.

### 2.3 – Coroa de Desgaste:

O cálculo do desgaste no cilindro de trabalho ou encosto é feito a partir do modelo que considera a distribuição de força ao longo da largura em contato com a tira, conforme a figura 5.

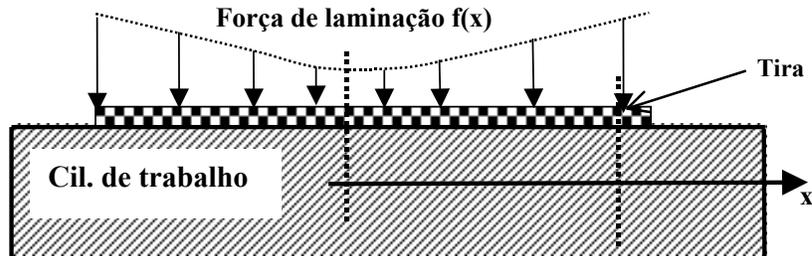


Figura 5 – Distribuição de força na mesa do cilindro de trabalho[4].

O cálculo de desgaste é efetuado a cada bobina considerando o somatório dos comprimentos das bobinas anteriores laminadas no mesmo ciclete.

### 2.4 – Verificação das condições de aplainamento:

Durante o processo de formação de coroa nos passes do laminador deve-se obedecer uma lei de razão redução "versus" coroamento [4] [6] entre as cadeiras, de forma a garantir condições estáveis de laminação, conforme a relação denominada coeficiente de planicidade ( $\varepsilon$ ):

$$\varepsilon_i = \zeta_i \left( \frac{Cr_i}{h_i} - \frac{Cr_{i-1}}{h_{i-1}} \right)$$

Os valores de  $\varepsilon_i$  devem variar dentro de limites máximo e mínimo os quais determinam o coroamento máximo e mínimo permitido entre cada passe, sendo assim um fator limitador do coroamento. A taxa de impressão  $\zeta_i$  determina a quantidade de coroa que é feita na tira a partir da coroa mecânica, sobre a qual foi submetida a tira durante a deformação entre passes, podendo ser expressa pela razão[4]:

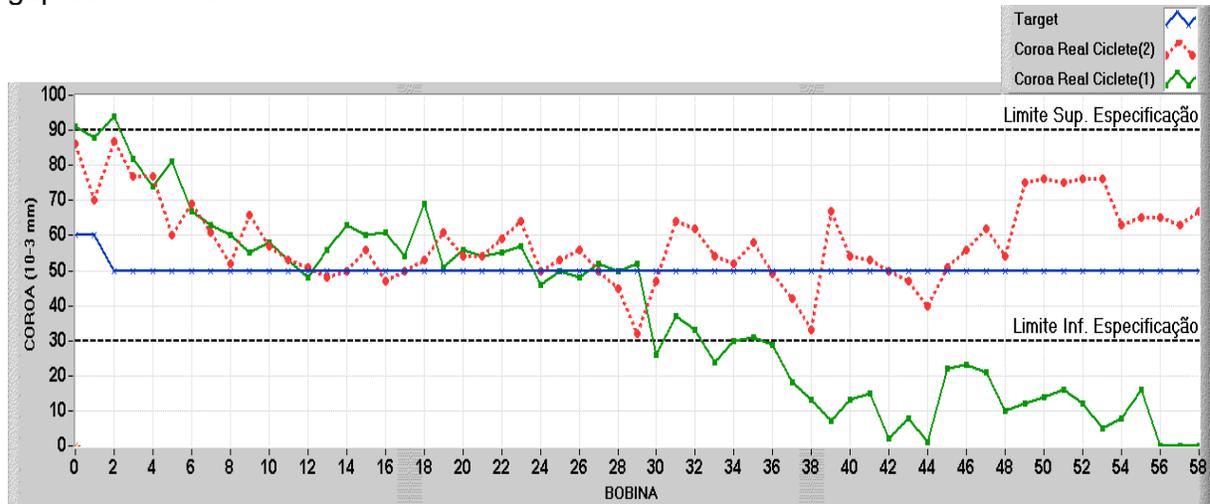
$$\zeta_i = \frac{\partial Cr_i}{\partial Cm_i}$$

## 3 – Aprendizado do Modelo:

A partir da coroa real medida pelo perfilômetro on-line na saída da cadeira F7, o modelo executa novamente os cálculos verificando os erros que houver na previsão (set up) de coroa mecânica e térmica, taxa de impressão, como também considera as intervenções feitas pelo operador no "bending" (no enfiamento do material). Comparando-se os erros são definidos respectivos coeficientes de aprendizado, os quais são utilizados nos cálculos do set up da próxima bobina.

#### 4 – Resultados alcançados:

Nos gráficos abaixo é mostrado o comportamento da coroa ao longo de dois cicletes típicos de material destinado a folha de flandres, antes e depois da implantação e ajuste do sistema “shift”/”bending” para controle de coroa, cujas espessuras variam de 2,00 a 3,00 mm e largura 720 a 1020 mm. No ciclete(1) usou-se coroa mecânica convencional nos cilindros de trabalho e o ciclete(2) usou cilindros CNP de F2 a F4. É nítido a capacidade do uso do “shift” em manter a coroa desejada ao longo do ciclete (figura 6), algo difícil em sistemas convencionais devido à coroa térmica formada, e que neste tipo de ciclete é mais crítico devido ao baixo gap de F1 "off/on".

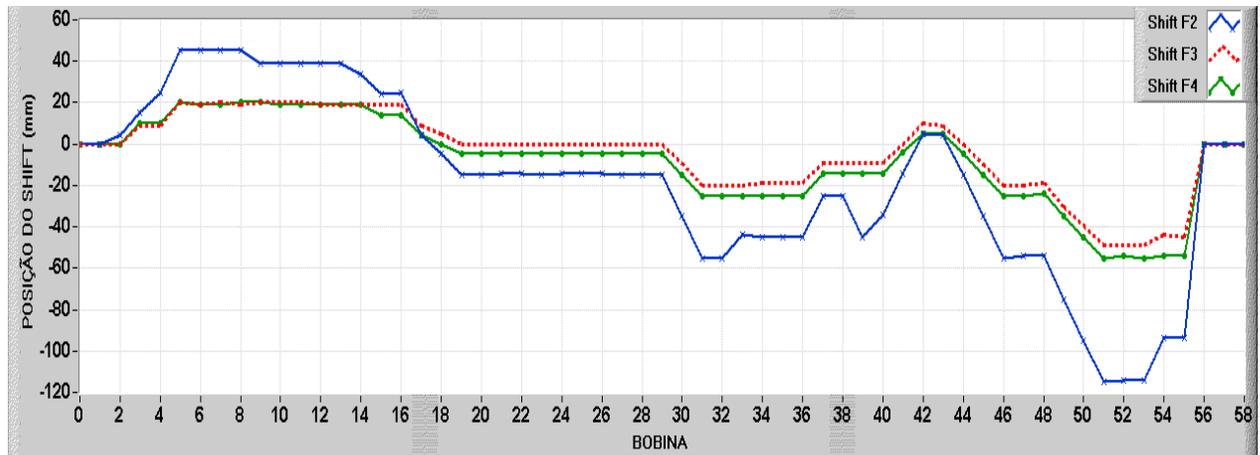


**Figura 6 – Comportamento da coroa, bobina a bobina, ao longo dos cicletes.**

A figura 7 mostra o comportamento do deslocamento do “shift” das cadeiras F2 a F4 durante o processamento do ciclete(2). Verifica-se que seu posicionamento vai ficando mais negativo à medida que o ciclete é processado, o que indica um coroamento cada vez mais positivo no gap entre os cilindros de trabalho e /ou um coroamento mais negativo no perfil dos cilindros. Na tabela 2 é mostrado o percentual médio de acerto de coroa nos cicletes tipo E (espessura 2,00 a 5,00 mm e largura 675 a 1050 mm) e tipos M e Z (espessura 1,50 a 5,00 mm e largura 675 a 1575 mm) antes e após modernização (REVAMP), considerando os limites de especificação entre 30 e 90  $\mu\text{m}$ .

		% de acerto da coroa no ciclete	
		Antes REVAMP	Pós REVAMP
Cicletes	E	68	98
	M e Z	73	97

**Tabela 2 – Acerto da coroa Antes e Pós REVAMP.**



**Figura 7 - Deslocamento do “shift” da F2 a F4 ao longo do ciclete.**

## 5 - Conclusões:

Após a implantação do sistema de “shift”, a garantia de acerto de coroa dentro dos limites de especificação ao longo do ciclete é algo inerente ao processo. Destaca-se a importância da interação junto a oficina de cilindros de forma a garantir a usinagem precisa da curva CNP, o que é feito através do registro do perfil do cilindro em carta gráfica na própria máquina de usinagem, permitindo a conferência da curva antes do uso do cilindro no laminador. Verifica-se que o “shift” pode também ser usado com uma eficiente ferramenta para ajudar em situações de instabilidades como ondulosos laterais e efeitos de “camber” oriundos do desbastador, tendo em vista sua influência determinante das condições de aplainamento nos entre passes do laminador.

## Bibliografia

1. Ashok Kumar, I.V. Samarasekera e E.B. Hawbolt, *Journal of Materials Processing Technology*, 30 (1992), p. 91-114.
2. X. Ye e I.V. Samarasekera, *Iron & Steelmaking*, July 1994, p. 49-60.
3. Y. Miyake, I. Yarita, K. Hamada e Y. Ogawa, *Kawasaki Steel Technical Report*, No. 12, July 1985, p. 1-14.
4. M. Kuchi, No. 2 Hot Strip Mill Profile Control Set-Up System Specification. 2000.
5. Joe D. Hoffman, *Numerical Methods for Engineers and Scientists*, Mc Graw-Hill International, 1993.
6. Joon-Jeong Yi, *Steel Rolling Technology*, Fall Semester, GSIST, POSTECH, 2002.

# HOT STRIP MILL PROFILE CONTROL USING SHIFT AND BENDING SYSTEM<sup>1</sup>

*Nilber Bhering Cordeiro<sup>3</sup>  
Mário Marcio Barbosa Alves<sup>3</sup>*

## **Abstract**

In the hot strip mill process some of the more important quality requirements to be assured are the transverse gauge profile and crown, aiming to accomplish hot-rolled market requirements, and also subsequent cold rolling process. For this purpose, it has been developed the shift system, which consist in the work roll axial motion. The rolls are grinded with special profile (longitudinal curve) adjusted to the hot strip mill characteristics, whose combined work with the bending system (hydraulic system for work roll axial deflection) allows crown control at some rolling schedule stage. The system also takes into account changes of the main process parameters that determine the crown needed in each stand during the rolling schedule, in order to achieve the final desired crown. In this paper, it will be presented the shift system implemented at Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) hot strip mill, as well as the basic mathematical model description which calculates shift position and bending pressure, discussing the main variables associated with this calculation. The modeling is related to process parameters emphasizing the work and backup rolls thermal and wear calculation equations. The results of the use of this technology show clearly the improvement in the capacity of keeping the strip crown within desired values along of the roll schedule.

**Key-Word:** Rolling, Crown, Strip Profile.

---

<sup>1</sup> *Technical report to be presented in 41<sup>st</sup> ABM Rolling Seminar, October 2004, Joinville/SC.*

<sup>2</sup> *Msc., Process Engineer of Companhia Siderúrgica Nacional.*

<sup>3</sup> *Automation Development Technician of Companhia Siderúrgica Nacional.*