

# DESENVOLVIMENTO DE ESTRATÉGIA DE LAMINAÇÃO PARA AÇOS PLANOS DE ATÉ 0,20 mm NO LAMINADOR REVERSÍVEL 4-HI DE 1 CADEIRA DA CSN-PR<sup>1</sup>

Alexandre Yukio Shigemori<sup>2</sup>  
Fernando Celso Kaminski<sup>3</sup>  
Carlos Frederico Rangel Xavier<sup>4</sup>

## Resumo

O laminador reversível 4-HI de uma cadeira da CSN-PR entrou em produção em Jan/2004, com um mix médio esperado de espessuras acima de 0,45 mm. Devido às demandas de mercado no ano de 2005, foi necessária a produção de produtos planos, direcionados à galvanização, com espessuras de até 0,20mm e especificação de produto revestido “full hard”, no qual a característica de aplainamento de laminação a frio é crítica. As estratégias de laminação concebidas no modelo matemático original mostraram-se ineficientes, gerando baixa produtividade, arrebentamentos e problemas de qualidade, principalmente de aplainamento. Este trabalho aborda os aspectos considerados na nova modelagem assim como a adoção de uma nova estratégia, com a realização da redução nos primeiros passes e acerto das tensões no último passe, o que permitiu que a CSN-PR produzisse os materiais requeridos com a produtividade e qualidade necessárias.

**Palavras-chave:** Laminação; Reversível; Estratégia; Modelo.

## DEVELOPMENT OF A NEW ROLLING STRATEGY FOR 0.20mm GAUGE SHEET STEELS ON THE 4-HI ONE STAND REVERSING COLD MILL OF CSN-PR

## Abstract

The 4-HI one stand reversing cold mill of CSN-PR started its production in Jan/2004, with an expected average mix above 0.45mm. Due to the market demands in 2005, it became necessary the production of sheet products aimed to galvanizing with gauges down to 0.20mm and full hard specification, where the flatness obtained out of the cold rolling is critical. The rolling strategies provided by the original mathematical model showed inefficient, lowering the productivity, causing strip breaks and quality problems, especially concerning flatness. This work copes with the aspects considered in the new modeling as well as the adoption of a new strategy, with the realization of the reduction on the first passes and tensions adjustment in the last pass, which allowed CSN-PR to produce the requested materials and achieve the productivity and quality needs.

**Key words:** Rolling; Reversing; Strategy; Model.

<sup>1</sup> *Contribuição Técnica ao 43º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Curitiba – PR – Brasil – 17 a 20 de outubro de 2006.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Mecânico, Coordenador de Laminação a Frio da Gerência de Laminação e Galvanização da Companhia Siderúrgica Nacional, Curitiba / PR*

<sup>3</sup> *Engenheiro Eletrônico, Engenheiro de Processo Sênior da Gerência de Laminação e Galvanização da Companhia Siderúrgica Nacional, Curitiba / PR.*

<sup>4</sup> *Engenheiro Eletrônico, MSc em Engenharia de Produção, Gerente de Laminação e Galvanização da Companhia Siderúrgica Nacional, Curitiba / PR.*

## 1 INTRODUÇÃO

A planta da CSN , localizada em Araucaria/PR, começou sua produção em 2000 com a entrada em operação do Centro de Serviços. Em 2003 as linhas de Decapagem, Laminação a Frio, Galvanização Contínua e Pintura Contínua entraram em operação. O principal foco da planta no Paraná é atender aos mercados de linha branca e construção civil. É a única planta no Brasil a produzir o Galvalume®. A implantação da fábrica no Paraná faz parte da estratégia da empresa de ampliar seus negócios e de se aproximar de seus principais clientes.

Os laminadores reversíveis apresentam uma boa alternativa para o processo de laminação a frio de aços planos, principalmente, devido ao investimento inicial mais baixo quando comparado aos laminadores de 4 ou 5 cadeiras. Porém, a produtividade desses laminadores reversíveis passa a ser um fator que exige bastante atenção e estudo, porque a espessura final é conseguida com uma seqüência de passes, logo, para uma mesma espessura final, quanto maior for a espessura a quente, maior será o número de passes aplicados e, conseqüentemente, menor será a produtividade. Uma decisão óbvia é a de utilizar menores espessuras a quente, e então, reduzir o número de passes e aumentar a produtividade, contudo, essa prática levará a redução na produtividade da laminação a quente e decapagem.

O laminador reversível 4-HI de uma cadeira da CSN-PR entrou em produção em dez/2003, com um mix médio esperado de espessuras acima de 0,45 mm. Devido às demandas de mercado no ano de 2005, foi necessária a produção de produtos planos, direcionados à galvanização, com espessuras de até 0,20mm e especificação de produto revestido “*full hard*”, no qual a característica de aplainamento de laminação a frio é crítica. As estratégias de laminação concebidas no modelo matemático original mostraram-se ineficientes, gerando baixa produtividade, arrebentamentos e problemas de qualidade, principalmente de aplainamento. Este trabalho aborda os aspectos considerados na nova modelagem, assim como a adoção de uma nova estratégia, com a realização da redução nos primeiros passes e acerto das tensões no último passe, o que permitiu que a CSN-PR produzisse os materiais requeridos com a produtividade e qualidade necessárias.

No desenvolvimento a seguir serão apresentadas as principais características do laminador, assim como uma introdução teórica. A seguir será explorado o procedimento experimental na tentativa e se atingir espessuras menores. Depois será apresentado o desenvolvimento da nova estratégia assim como sua automação. No final os resultados obtidos serão discutidos e as conclusões traçadas.

## 2 DADOS DO LAMINADOR REVERSÍVEL

A Tabela 1 mostra as principais características do Laminador.

Tabela 1. Principais características do Laminador Reversível

Dados do equipamento		Dados de bobina	
Tipo	Quádruplo reversível	Tipo de aço:	Baixo carbono
Velocidade máxima:	1350m/min	Largura:	700...1600mm
Força máxima:	21MN	Peso máximo:	25t
<b>Diâm. Cilindros</b>		<b>Entrada</b>	
Trabalho:	400-450mm	Diâm. Interno:	610mm
Encosto:	1170-1270mm	Espessura:	1,5...5mm
<b>Potência</b>		<b>Saída</b>	
Enroladeiras:	2717kW	Diâm. Interno:	508mm
Cadeira:	6000kW	Espessura:	0,20...1,55mm

O controle de espessura do laminador é feito pelas malhas “*feed-back*”, “*feed-forward*”, fluxo de massa e compensação de fricção. A partir das leituras obtidas pelos medidores de espessura e velocidade ilustrados na Figura 1, esses controles determinam a força de laminação necessária para atingir a espessura requerida no passe. O controle de planicidade é realizado a partir da leitura dos rolos medidores e atuam através da flexão, deslocamento axial e refrigeração seletiva nos cilindros de trabalho, além da aplicação de força de laminação diferencial.

O número de passes, a distribuição das reduções nos passes e todos os valores iniciais necessários aos controles de espessura e planicidade são calculados pelo modelo matemático do nível 2, utilizando as regras definidas na estratégia de laminação. Durante a laminação, este modelo recebe os valores reais de processo e, ao fim de cada passe, adapta o cálculo para os passes e bobinas subseqüentes através de redes-neurais.

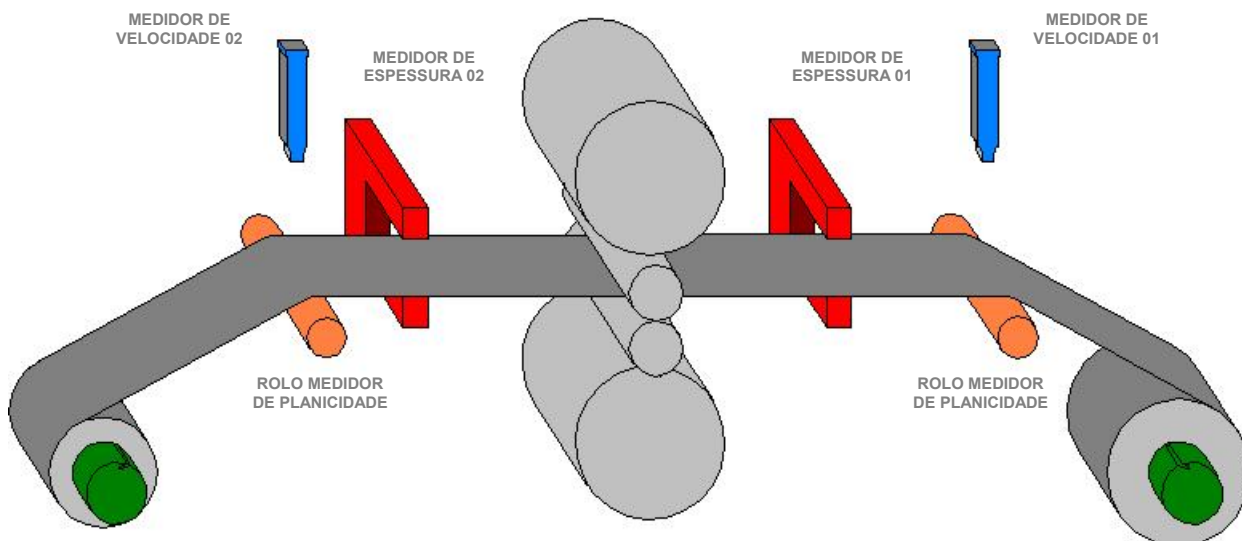


Figura 1. Controle de espessura e planicidade do laminador.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Na laminação a frio, é sabido que, independentemente do limite de força de laminação ou do número de passes realizado, existe um limite a partir do qual não é mais possível reduzir. Isso ocorre devido ao aumento da deformação elástica dos cilindros de trabalho proveniente do aumento da carga de laminação, que gera um aumento da superfície de contato entre a tira e o cilindro. Esse aumento de área chega a um ponto tal que qualquer incremento adicional de força de laminação não contribuirá mais para o aumento na pressão de laminação, pois o efeito da força será cancelado pelo aumento da área.

Caso o controle de espessura continue atuando, a força aumentará até o limite máximo suportado pelo sistema hidráulico, sem atingir a espessura de saída desejada. Como esta força é exercida sobre os mancais dos cilindros de encosto, a flexão dos cilindros durante a laminação de espessuras finas pode causar o contato dos mesmos após as bordas da tira (*“roll kissing”*), o que compromete a planicidade da tira devido ao forte ondulado lateral.

A fórmula definida por Stone<sup>(1)</sup> é a mais utilizada para se determinar esta espessura mínima possível, que relaciona o comprimento do arco de contato (equação de Hitchcock) com a força de laminação específica:

$$tm = \frac{3,58(D \cdot \mu(\sigma_c - \sigma_1))}{E} \quad (1)$$

Onde:

$tm$  = espessura mínima [m]

$D$  = diâmetro dos cilindros de trabalho [m]

$\mu$  = coeficiente de fricção

$\sigma_c$  = limite de escoamento compressivo [N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_1$  = tensão específica total [N/mm<sup>2</sup>]

$E$  = módulo de Young dos cilindros [N/mm<sup>2</sup>]

Caso a medição direta do coeficiente de fricção não esteja disponível, pode-se determiná-lo a partir dos valores medidos de deslizamento avante, torque e força através da equação 2, definida em Roberts.<sup>(2)</sup>

$$\mu = \frac{T}{f \cdot R \left( 1 - 2 \sqrt{\frac{fs(1-r)}{r}} \right)} \quad (2)$$

Onde:

$T$  = torque específico [Nm/m]

$f$  = força de laminação específica [N/m]

$R$  = raio dos cilindros de trabalho

$fs$  = deslizamento avante =  $(V_{saída} - V_{cilindro})/V_{cilindro}$

$r$  = redução relativa

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O aço utilizado neste trabalho é do tipo baixo carbono, cuja composição química é mostrada na Tabela 2.

**Tabela 2.** Composição química do aço estudado.

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	Ni	Nb	N
%	0,04	0,3	0,01	0,01	0,013	0,04	0,03	0,02	0,002	0,003

Durante os testes realizados em dezembro de 2004, objetivou-se 0,25mm, mas a espessura mínima alcançada ficou em torno de 0,27mm, conforme resultados apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Primeiro teste visando baixa espessura.

Bobina	Esp. Quente (mm)	Esp. Frio Set-up (mm)	Esp. Frio Real (mm)	Largura (mm)	Num. Passes
1	2	0,25	0,263	1200	6
2	2	0,25	0,27	1200	5
3	2	0,25	0,271	1200	5

Após o teste, foi definido um plano de ação objetivando-se a realização de um novo teste. As principais medidas do plano de ação foram:

- Troca do óleo de laminação de base semi-sintética para 100% sintético, visando redução do coeficiente de atrito, e maior lubrificidade;
- Maior rigor nas faixas permitidas para concentração e índice de saponificação da emulsão, também visando maior lubrificidade;
- Requisição de espessura a quente inferior a 2mm para redução a frio inferior a 0,30mm, a fim de reduzir o limite de escoamento do material no último passe;
- Implementação do controle EDC (“*Edge Drop Cooling*”), que enfatiza refrigeração dos cilindros de trabalho nas bordas para atenuar o “roll-kissing”.

Após a implementação deste plano, foi realizado um novo teste em abril de 2005, em foram atingidas espessuras inferiores a 0,25mm, conforme era esperado. Os resultados do teste estão apresentados na

Tabela 4.

**Tabela 4.** Resultados obtidos com estratégia convencional.

Bobina	Esp. Quente (mm)	Esp. Frio Set-up (mm)	Esp. Frio Real (mm)	Largura (mm)	Num. Passes
1	2,1	0,25	0,273	1180	6
2	1,98	0,25	0,25	1180	6
3	1,55	0,23	0,253	1200	5
4	1,54	0,20	0,21	1200	5

Apesar de agora se ter chegado próximo da espessura objetivada, a carga de laminação foi duas vezes maior do que a prevista pelo modelo, o que comprometeu a qualidade da tira devido ao forte ondulado lateral e ao excessivo comprimento “off-

*gauge*”. Além disso, foram necessárias intervenções manuais nos controles de espessura e planicidade.

Para determinarmos a mínima espessura possível para esta estratégia de laminação utilizada no teste, utilizamos os seguintes dados médios coletados pelo sistema de aquisição do Laminador Reversível a Frio (LRF) no último passe:

$$\begin{aligned} T &= 23 \text{ kNm/m} & f &= 7,5 \text{ MN/m} \\ R &= 220 \text{ mm} & f_s &= 0,028 \\ r &= 13,4\% \end{aligned}$$

Aplicando-se na equação (2), temos que  $\mu = 0,093$ . Neste caso, o último passe é enrolado com tensão avante de apenas  $60 \text{ N/mm}^2$ , para evitar colapso do núcleo da bobina. O limite de escoamento compressivo no ponto médio do último passe foi determinado a partir da curva obtida do modelo matemático adaptativo para esta liga, considerando-se que neste estágio a redução é de 80%, assim:

$$\begin{aligned} E &= 206 \text{ kN/mm}^2 & D &= 440 \text{ mm} \\ \sigma_c &= 700 \text{ N/mm}^2 & \sigma_1 &= 230 + 60 = 290 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Aplicando-se esses dados na equação (1), obtemos  $0,29 \text{ mm}$  como espessura mínima possível para o LRF, o que representa substancialmente mais do que a espessura desejada. Reduzir ainda mais a redução relativa do último passe não surtia efeito. Além disso, também não era possível reduzir ainda mais o coeficiente de atrito na cadeira, pois isto causaria risco de arrebatamento no primeiro passe devido ao baixo deslizamento avante.

## 5 DESENVOLVIMENTO DA ESTRATÉGIA

Analisando-se a fórmula de Stone,<sup>(1)</sup> percebe-se que o plano de ação aplicado reduziu o limite de escoamento compressivo ( $\sigma_c$ ) e o coeficiente de lubrificidade ( $\mu$ ). Considerando-se que restrições mecânicas impedem alteração da faixa do diâmetro dos cilindros de trabalho especificada no projeto, restava atuar sobre a tensão específica total ( $\sigma_1$ ). A tensão específica à ré já era alta e o simples aumento da tensão avante no último passe causaria colapso do núcleo da bobina na sua retirada.

Sendo assim, foi definido no teste seguinte concentrar a laminação nos quatro passes iniciais e, depois de atingida a espessura final, efetuar-se um passe de rebobinamento com a cadeira aberta apenas para ajuste da tensão de bobinamento (em torno de  $40 \text{ N/mm}^2$ ). Os resultados estão apresentados na Tabela 5:

**Tabela 5.** Resultados obtidos com nova estratégia.

Bobina	Esp. Quente (mm)	Esp. Frio Set-up (mm)	Esp. Frio Real (mm)	Largura (mm)	Num. Passes
1	1,55	0,20	0,20	980	4+1
2	1,55	0,23	0,23	1200	4+1
3	1,89	0,28	0,28	1000	4+1
4	1,89	0,26	0,26	1000	4+1

Neste caso, as forças de laminação ficaram de acordo com aquelas previstas pelo modelo e assim não houve problemas de aplainamento no produto final. A espessura permaneceu dentro da tolerância mesmo durante a aceleração e desaceleração sem necessitar de intervenções manuais de força e tensão por parte dos operadores. Além disso, o comprimento “*off-gauge*” foi reduzido.

Para esta nova estratégia, os seguintes dados médios no quarto passe foram coletados:

$$\begin{array}{ll} T = 24 \text{ kNm/m} & f = 6 \text{ MN/m} \\ R = 220 \text{ mm} & f_s = 0,06 \\ r = 26,3\% \end{array}$$

Aplicando-se na equação (2), temos que  $\mu=0,101$ . Neste caso, o passe é enrolado com tensão avante e a ré de  $240 \text{ N/mm}^2$ , pois será feito o passe de rebobinamento posteriormente. Os demais valores são os mesmos do caso anterior:

$$\begin{array}{ll} E = 206 \text{ kN/mm}^2 & D = 440 \text{ mm} \\ \sigma_c = 700 \text{ N/mm}^2 & \sigma_1 = 240 + 240 = 480 \text{ N/mm}^2 \end{array}$$

Aplicando-se os dados acima na equação (1), obtemos  $0,17\text{mm}$  como espessura mínima possível para o LRF, o que torna seguro a laminação das espessuras desejadas.

## 6 AUTOMATIZAÇÃO DA ESTRATÉGIA

O primeiro passo foi criar a estratégia no computador de processos (nível 2) que define as diretivas de laminação (tensões velocidade, força e redução máxima) para cada passe. A partir dessas diretivas, o modelo matemático calcula todos os *setpoints* necessários à laminação (redução, força, torque, deslizamento, etc.). Também foi definido no modelo o critério de acesso à diretiva para quando a espessura de saída for inferior a  $0,29\text{mm}$ , conforme o resultado de espessura mínima obtido pela equação (1).

O segundo passo foi programar os CLPs do LRF para iniciar o passe de rebobinamento ao fim do último passe, sempre quando a bobina for enrolada com tensão avante superior a  $180\text{N/mm}^2$ .

Em seguida, foram automatizados os seguintes movimentos auxiliares ao iniciar o bobinamento:

- Abertura total rápida do gap da cadeira, para evitar contato entre a tira e o cilindro de trabalho superior;
- Abaixamento total da cunha que suporta o cilindro de encosto inferior, para evitar contato entre a tira e o cilindro de trabalho inferior;
- Desativação dos bicos de emulsão, pois não há geração de calor;
- Ativação dos sopradores no lado da saída, para garantir ausência de resíduos;
- Desativação da desaceleração automática nos defeitos;
- Retirada do motor principal da cadeira da seqüência;
- Envio de tensões iguais nas duas enroladeiras e tensionamento adicional (“*taper tension*”) no início do bobinamento, para evitar colapso na retirada da bobina;

- Invalidados os valores reais de processo adquiridos durante este passe, pois o modelo matemático sofreria uma adaptação incorreta;
- Alteração da condição de descalibração da cadeira, pois esta estava descalibrando assim que a cunha era baixada, o que é desnecessário.

Com isto, a produtividade se aproximou da obtida com a estratégia antiga, porém ainda havia perda, devido ao aumento do comprimento laminado total da ordem de 10% quando se utiliza rebobinamento. Para compensar este efeito, foi aumentado o limite de velocidade do passe de bobinamento para 1500m/min. Este valor é além da capacidade nominal do LRF, que é de 1350m/min. Porém, neste caso não há riscos, pois o motor da cadeira permanece parado, e assim o limite de velocidade passa a ser determinado apenas pelas bobinadeiras reversíveis, da seguinte forma:

Considerando-se que:

$$V_{máx} = \frac{\eta_{máx} \cdot (D_{mín} \cdot \pi)}{RFac} \quad (3)$$

E que os seguintes dados do equipamento são:

$\eta_{máx}$ : Velocidade máxima dos motores = 1500 rpm

$RFac$ : Fator de redução = 1,687

$D_{mín}$ : Diâmetro mínimo do mandril = 508mm

Temos que a velocidade máxima seria de 1473m/min. Porém, jamais o motor chegará nesta velocidade com 508mm de diâmetro, pois a aceleração não é instantânea e o diâmetro aumenta a cada espira enrolada até que se estabilize a velocidade. Assim, teremos a velocidade máxima determinada calculando-se o comprimento bobinado no instante em que a velocidade chega ao setpoint e aplicando-o na equação (3). Considerando aceleração máxima de  $\pm 1\text{m/s}^2$  (parada rápida), temos:

$$v_{máx} = \frac{D_{mín} \cdot \pi}{\sqrt{\frac{2,849}{n^2} - 2\pi \cdot hmín}} \quad (4)$$

Sendo:

$D_{mín} = 508 \text{ mm}$

$n = 1500 \text{ rpm}$

$hmín = 0,2 \text{ mm}$

Teremos:  $v_{máx} = 1666 \text{ m/min}$

Na prática, a velocidade de bobinamento foi definida em 1500m/min. Com isto, o efeito do aumento do comprimento laminado é compensado e podemos igualar a produtividade da estratégia convencional.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Embora o aumento da tensão avante tenha tornado possível laminar materiais finos, é importante estabelecer limites e contornar as conseqüências que este estiramento excessivo pode causar. Os seguintes efeitos indesejáveis foram observados no processamento desta estratégia:



- Maior sensibilidade a arrebentamentos por defeito de borda;
- Redução de largura;
- Marcas impressas pelo mandril nas primeiras espiras da bobina;
- Aquecimento excessivo da tira, já que a geração de calor ficou mais concentrada nos passes intermediários, chegando a atingir 130°C na saída.  
Para evitar estes efeitos, as seguintes ações foram tomadas:
- Maior rigor na inspeção de defeitos de borda nas bobinas antes de processá-las;
- Requisição de sobre largura (+3mm) para compensar a perda sofrida;
- Limitação das tensões específicas avante e a ré no modelo matemático em 35% do limite de escoamento do aço;
- Maior rigor na manutenção e limpeza do sistema de refrigeração do laminador.

## 8 CONCLUSÕES

O modelo desenvolvido utiliza reduções maiores nos primeiros passes e a utilização de um passe sem redução, apenas para acerto de tensão. A implementação deste trabalho viabilizou a laminação a frio de chapas com espessura entre 0,20mm e 0,30mm na CSN-PR. A produção comercial de produtos planos galvanizados nesta faixa de espessuras foi iniciada nos meses subseqüentes aos testes, e hoje representa parte significativa do mix de produção da planta.

Características como arrebentamentos, problemas de planicidade, arranhados de refrigeração e fora de bitola estão na mesma ordem de grandeza de outras faixas de espessuras laminadas, confirmando o sucesso da estratégia adotada. A estratégia vem sendo utilizada para todas as espessuras menores ou iguais a 0,29mm.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. Jürgen Klöckner (SMS-Demag) pelas contribuições aos resultados obtidos.

### REFERÊNCIAS

- 1 STONE, M. D. **Rolling of Thin Strip**. Iron and Steel Engineer Year Book, 1953. p. 115-128.
- 2 ROBERTS, W. L. **Cold Rolling of Steel**. Manufacturing Engineering and Materials Processing, 1978. p. 293-295, p. 559-564.