

AUMENTO DA ESTABILIDADE DO PROCESSO DO LAMINADOR DE TIRAS A FRIO COM A UTILIZAÇÃO DE CILINDROS REVESTIDOS COM CROMO

Sergio Luiz Muratori ¹

Alexandre Ribeiro Nascimento Santos ²

Antonio Fabiano de Oliveira ³

Célio Souza do Rosário ⁴

Cristiano Ozores Siqueira ⁵

José Dias Blanco ⁶

José Valdir Amorim Dantas ⁷

Karl Kristian Bagger ⁸

Marcio Ferreira Arruda ⁹

Resumo

A estabilidade de um laminador de tiras a frio é fundamental para a garantia do controle de espessura, o principal atributo de aços planos laminados a frio. Essa estabilidade pode ser definida como a capacidade de se controlar variáveis de processo que atuam diretamente na espessura. Dentre as variáveis mais importantes está a velocidade linear da primeira cadeia (de laminação) e da tira no vão à sua frente. O presente trabalho mostra como a utilização de cilindros revestidos com camada de cromo melhora esse controle sobre a velocidade e, conseqüentemente, a estabilidade, o que possibilita o aumento da campanha (programa) de laminação de forma significativamente superior em relação à utilização dos cilindros sem revestimento. Como resultados, são apresentados aumentos significativos das campanhas dos cilindros e, em conseqüência, da disponibilidade do equipamento para produzir.

Palavras-chave: Processos; Estabilidade; Cilindros; Cromo.

TANDEM COLD MILL PROCESS STABILITY IMPROVEMENT WITH CHROME PLATED WORK ROLLS APPLICATION

Abstract

The stability of a tandem cold mill is essential to assure the thickness control, the main attribute of cold rolled steel sheets. This stability can be defined as the capability to control the process variables that act direct at the thickness. Among the most important variables are the first stand (mill) linear speed and the sheet speed at the interstice ahead of it. This work shows how the chrome plated work rolls application improved this speed control and consequently the stability, which enabled an increase in the work roll rolling campaign (rolling sequence program) in such a way significantly higher, compared to when using a non chrome plated work rolls. As results, significantly improvements of work rolls campaigns and the consequent increase of the equipment availability are presented.

Key words: Processes; Stability; Work rolls; Chrome.

¹Engenheiro Eletricista, Engenheiro de Manutenção da Laminação a Frio da Usiminas Cubatão, Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/n, Jardim das Indústrias, Cep 11573-900, Cubatão, SP, Brasil. E-mail: sergio.muratori@usiminas.com

²Técnico em Metalurgia, Técnico de Produção da Laminação a Frio da Usiminas Cubatão, Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/n, Jardim das Indústrias, Cep 11573-900, Cubatão, SP, Brasil. E-mail: alexandresantosriba@hotmail.com

³Engenheiro Metalurgista, Especialista de Processos da Laminação a Frio da Usiminas Cubatão, Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/n, Jardim das Indústrias, Cep 11573-900, Cubatão, SP, Brasil. E-mail: antonio.oliveira.usiminas.com

⁴Engenheiro Mecânico, Engenheiro de Produção da Laminação a Frio da Usiminas Cubatão, Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/n, Jardim das Indústrias, Cep 11573-900, Cubatão, SP, Brasil. E-mail: celio.rosario@usiminas.com

⁵Técnico em Instrumentação e Elétrica, Técnico de Produção da Laminação a Frio Usiminas Cubatão, Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/n, Jardim das Indústrias, Cep 11573-900, Cubatão, SP, Brasil. E-mail: cristiano.siqueira@usiminas.com

⁶Técnico em Metalurgia, Assistente Técnico Industrial da Laminação a Frio da Usiminas Cubatão, Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/n, Jardim das Indústrias, Cep 11573-900, Cubatão, SP, Brasil. E-mail: jose.blanco@usiminas.com

⁷Técnico em Eletrônica, Assistente Técnico de Produção da Laminação a Frio da Usiminas Cubatão, Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/n, Jardim das Indústrias, Cep 11573-900, Cubatão, SP, Brasil. E-mail: jose.dantas@usiminas.com

⁸Engenheiro Metalurgista, Gerente Técnico da Laminação a Frio Usiminas Cubatão, Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/n, Jardim das Indústrias, Cep 11573-900, Cubatão, SP, Brasil. E-mail: karl.bagger@usiminas.com

⁹Analista de Sistemas, Analista de Gestão da Laminação a Frio da Usiminas Cubatão, Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/n, Jardim das Indústrias, Cep 11573-900, Cubatão, SP, Brasil. E-mail: marcio.arruda@usiminas.com

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho mostra um estudo da aplicação de cilindros revestidos com cromo na primeira cadeira de laminação do laminador de tiras a frio e as influências desta aplicação, cujo principal objetivo é justamente a melhoria da estabilidade do processo de laminação.

Com as demandas crescentes do mercado por produtos de melhor qualidade e menores custos, melhorias são continuamente necessárias para a manutenção da competitividade no mercado. No caso do laminador de tiras a frio, um atributo que afeta diretamente o resultado do produto final – e consequentemente a sua qualidade – é a sua estabilidade.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O laminador de tiras a frio (LTF) da Usiminas Cubatão, cujo diagrama esquemático é ilustrado pela Figura 1, é composto de uma desenroladeira, quatro cadeiras dispostas em cascata e uma enroladeira. A espessura máxima de entrada para os materiais a serem laminados é 5,00 mm e a espessura de saída mínima é 0,38 mm, com largura entre 600 e 1.600 mm, dentro de um esquema de redução de até 81%.

Para entender-se os fundamentos de obtenção da estabilidade do laminador, apresenta-se a Lei do Fluxo de Massa – *Mass Flow Law*. Segundo Helman,⁽¹⁾ essa lei garante que a massa do material na entrada de uma cadeira de laminação é igual à massa do material na saída da referida cadeira, considerando-se desprezível a variação de largura na laminação a frio. Assim, obtém-se a Equação 1:

$$h_i \cdot v_i = h_o \cdot v_o \quad (1)$$

onde:

- h_i = espessura da tira na entrada da cadeira;
- v_i = velocidade da tira na entrada da cadeira;
- h_o = espessura da tira na saída da cadeira;
- v_o = velocidade da tira na saída da cadeira.

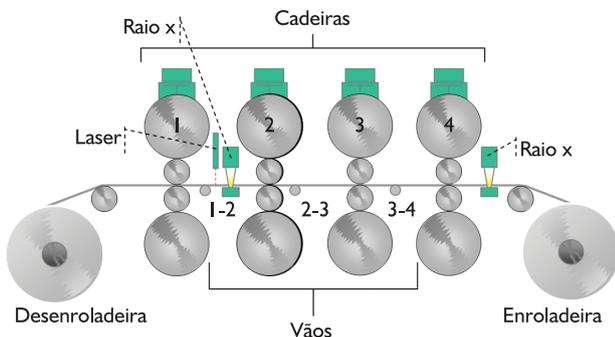


Figura 1. Diagrama esquemático do laminador de tiras a frio da Usiminas Cubatão.⁽³⁾

É possível entender, pela Equação 1 que, ao se controlar a velocidade da tira nos vãos anterior e posterior à uma cadeira de laminação qualquer controla-se a redução de espessura do material em processo na saída dessa cadeira.

Contudo, deve ser compreendido que não é possível controlar diretamente a velocidade da tira, mas isso deverá ocorrer de forma indireta pela atuação na velocidade dos cilindros que a tracionam, velocidade que é denominada comumente de velocidade da cadeira, porque os motores do laminador estão acoplados indiretamente aos cilindros de trabalho, através de uma redutora.

Para atuar-se na velocidade da cadeira e controlar-se corretamente a velocidade da tira é importante o conhecimento da relação entre elas. Surge, então, outro conceito importante que é o escorregamento avante – *forward slip*.

Segundo Helman,⁽¹⁾ o escorregamento avante pode ser definido como a relação entre a velocidade da tira na saída da cadeira e a velocidade periférica dessa cadeira (em referência), como se pode observar na Equação 2:

$$S_f = \frac{v_o - v}{v} \quad (2)$$

onde:

- v_o = velocidade da tira no plano de saída da cadeira;
- v = velocidade periférica dos cilindros da cadeira.

Assim, a velocidade da tira poderá ser calculada pela velocidade da cadeira, levando-se em consideração o valor do escorregamento avante instantâneo.

Larke⁽²⁾ afirma que existe um ponto na área de contato entre a tira e a cadeira no qual as velocidades da tira e dos cilindros são iguais, como se visualiza na Figura 2. Esse ponto é conhecido como *ponto neutro* e a linha imaginária que une os pontos neutros dos cilindros superior e inferior é conhecida como *linha neutra*.

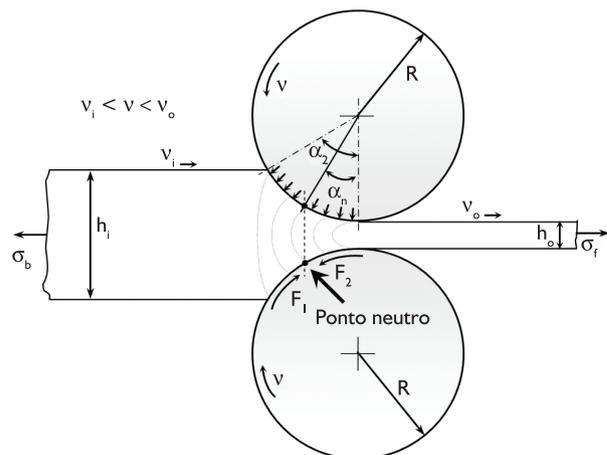


Figura 2. Ponto neutro, linha neutra e forças de atrito.⁽²⁾

Larke⁽²⁾ também afirma que o ângulo formado entre o plano de saída e o raio do cilindro até o ponto neutro é chamado de *ângulo neutro* (α_n), o que fisicamente indica o local no qual se tem um equilíbrio entre as forças do arco de contato que estão a favor do movimento da tira (antes da linha neutra – F_1) e as forças que estão contrárias ao movimento da tira (após a linha neutra – F_2), como pode ser visto também na Figura 2.

O ponto neutro tem seu posicionamento automaticamente determinado pela potência requerida para deformar a tira e superar a resistência oferecida pelo atrito à entrada da tira. Quando o escorregamento apresenta valor negativo, fisicamente isto representa que o local do equilíbrio das forças se encontra em um ponto fora da região do arco de contato e, logo, o controle do processo de laminação torna-se instável.

Muratori et al.⁽³⁾ por sua vez, conclui que o escorregamento, por depender do equilíbrio de forças, tem como fatores que podem diretamente alterá-lo: a tensão, o coeficiente de atrito, a lubrificação, a redução do material e a própria força de laminação aplicada.

Com base nestes equacionamentos, para atingir-se uma situação de estabilidade, é importante o controle da velocidade da tira e fisicamente isto só é possível quando há atrito suficiente entre a tira e os cilindros de laminação. Se o atrito não for suficiente não será possível tracionar a tira, havendo uma situação de “escorregamento” ou “derrapagem” dos cilindros sobre ela. Nesse instante de derrapagem, o valor do escorregamento avante é negativo, indicando que os cilindros estão mais rápidos do que a tira, isto é, o atrito para “puxar” a tira não está sendo suficiente para alterar as condições físicas superficiais de contato tira-cilindro. Assim, a relação desejada ocorre quando a velocidade da tira é maior do que a velocidade periférica da cadeira (Equação 3).

$$v_0 > v_1 \quad (3)$$

onde:

- v_0 = velocidade da tira na saída da cadeira;
- v_1 = velocidade da tira na entrada da cadeira.

Portanto, se o valor do escorregamento avante for positivo e pequeno tem-se uma situação estável para laminar, o que reflete em um controle efetivo da velocidade da cadeira e, conseqüentemente, da espessura. Assim, será obtida a qualidade do material no que diz respeito às tolerâncias de espessura.

Conforme estudo realizado no laminador de tiras a frio por Muratori et al.⁽³⁾ e baseando-se nos conhecimentos já discutidos, o desgaste natural ao longo da campanha de um cilindro de trabalho tem influência direta no aparecimento do escorregamento negativo, como se visualiza na Figura 3. Deve-se observar no gráfico a tendência do valor do escorregamento avante calculado em direção a valores negativos.

A relação entre o comprimento laminado pelo cilindro de trabalho ou sua rugosidade e o escorregamento avante é apresentado nas Equações 4 e 5, obtidas por meio de regressões multivariáveis dos dados de campanha do LTF.

Cálculo do escorregamento em função de um grupo de variáveis presentes no LTF:

$$S_f = 10 - 4,866 \cdot h_1 + 4,955 \cdot h_2 - 22,690 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_0 + 206,106 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_f + \dots \quad (4)$$

$$\dots - 37,786 \cdot 10^{-3} \cdot st_{km} - 2,170 \cdot 10^{-3} \cdot R_f$$

Cálculo do escorregamento em função de um segundo grupo de variáveis presentes no LTF:

$$S_f = 10 - 10,935 \cdot h_1 + 11,607 \cdot h_2 - 78,557 \cdot \sigma_0 + 459,176 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_f + \dots \quad (5)$$

$$\dots + 13,213 \cdot rg - 4,124 \cdot 10^{-3} \cdot R_f$$

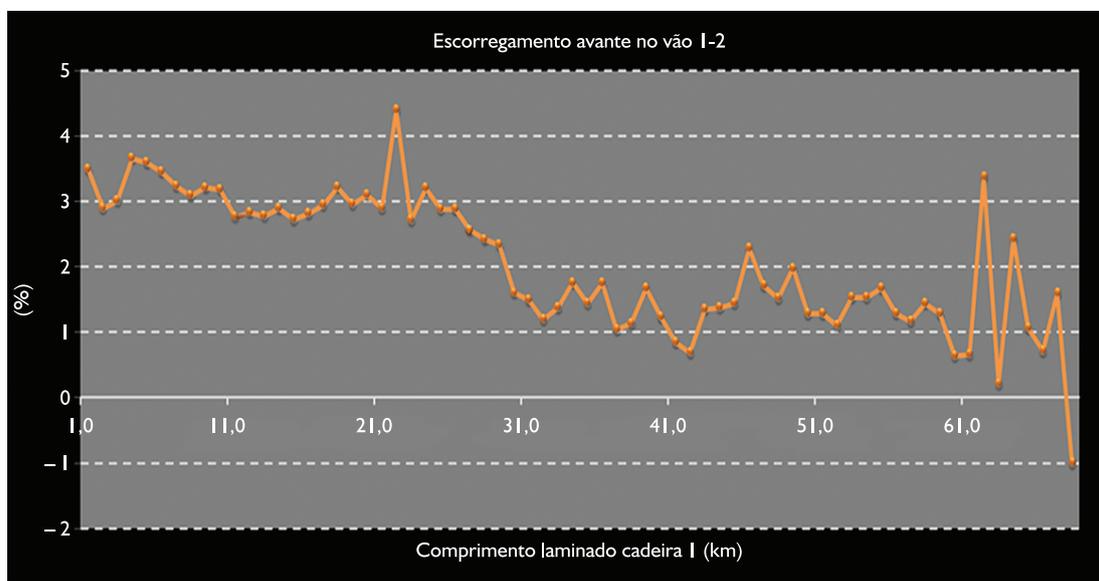


Figura 3. Escorregamento avante no vão 1-2 do LTF em relação ao comprimento laminado pelos cilindros da cadeira I.

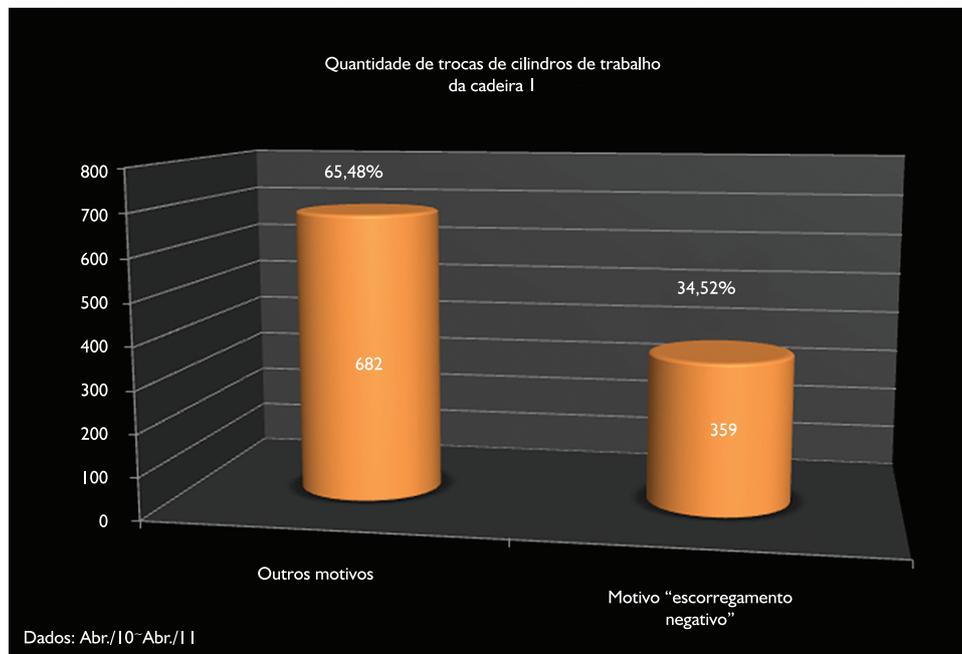


Figura 4. Motivo das trocas dos cilindros de trabalho da cadeira I.

onde:

- h_o = Espessura de Saída (mm);
- h_i = Espessura de Entrada (mm);
- σ_b = Tensão a Ré (T);
- σ_f = Tensão Avante Média (T);
- R_f = Força de Laminação Média (T);
- st_{km} = Comprimento Laminado (km);
- rg = Rugosidade Média (μmRA).

Sendo assim, a substituição do cilindro de trabalho fica também atrelada ao aparecimento do escorregamento negativo, objetivando a manutenção da estabilidade do sistema com a consequente garantia de espessura.

Com esta ação obtém-se uma melhoria significativa na estabilidade do sistema, como esperado. Porém, surgiu uma nova questão que motivou o presente trabalho: grande parte das trocas de cilindros de trabalho realizadas passaram a ser necessárias devido ao aparecimento de escorregamento negativo. Isso pode ser observado na Figura 4.

3 UTILIZAÇÃO DE CILINDROS DE TRABALHO NA CADEIRA I REVESTIDOS COM CROMO

No estudo apresentado neste trabalho, os cilindros revestidos com cromo foram utilizados na cadeira I em substituição aos cilindros de trabalho não revestidos, como apresentado na Figura 5.

O revestimento consiste na aplicação de uma camada de cromo de aproximadamente 4 a 6 μm sobre o cilindro de trabalho após a sua retificação, durante o seu processo convencional de recuperação. Na Figura 6, apresenta-se uma representação da aplicação da camada de cromo sobre o cilindro.

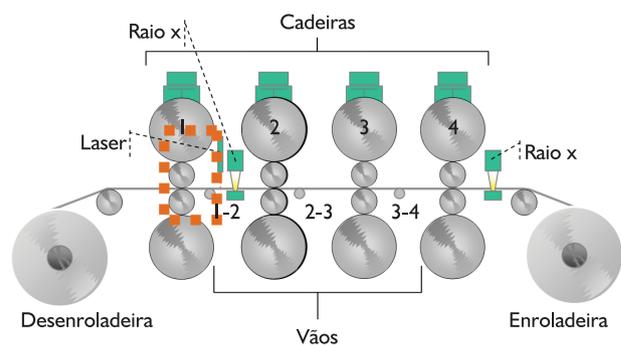


Figura 5. Posicionamento dos cilindros revestidos com cromo.⁽³⁾



Figura 6. Representação da camada de cromo aplicada no cilindro de trabalho.

4 RESULTADOS

Um dos ganhos obtidos com a utilização dos cilindros revestidos com cromo é o aumento do comprimento médio laminado, como se visualiza na Figura 7.

Como consequência do aumento do comprimento laminado há um ganho no peso médio laminado, como se visualiza na Figura 8.

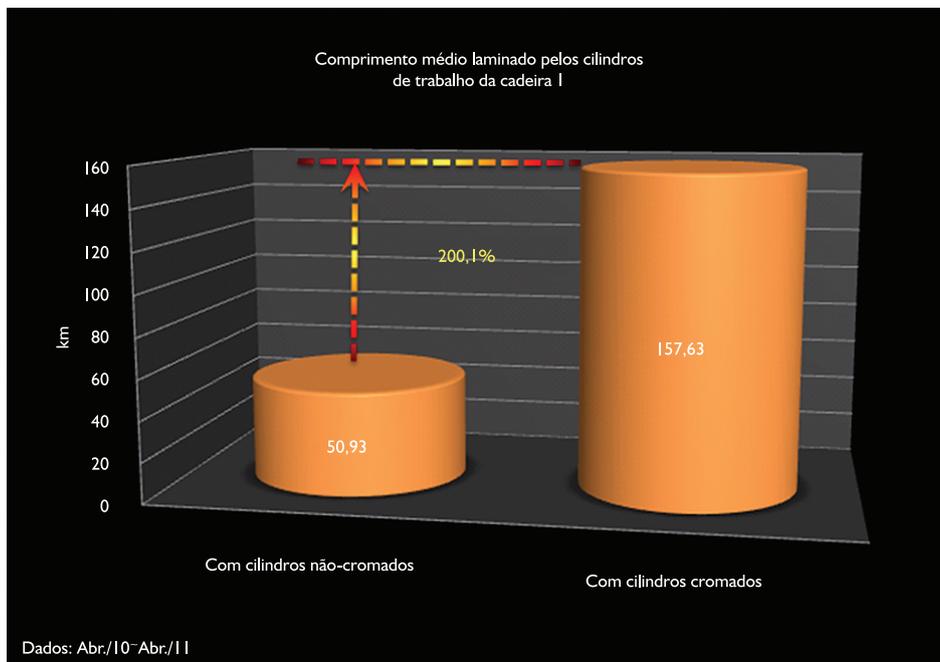


Figura 7. Comprimento médio laminado pelos cilindros de trabalho da cadeira I revestidos com cromo e não revestidos.

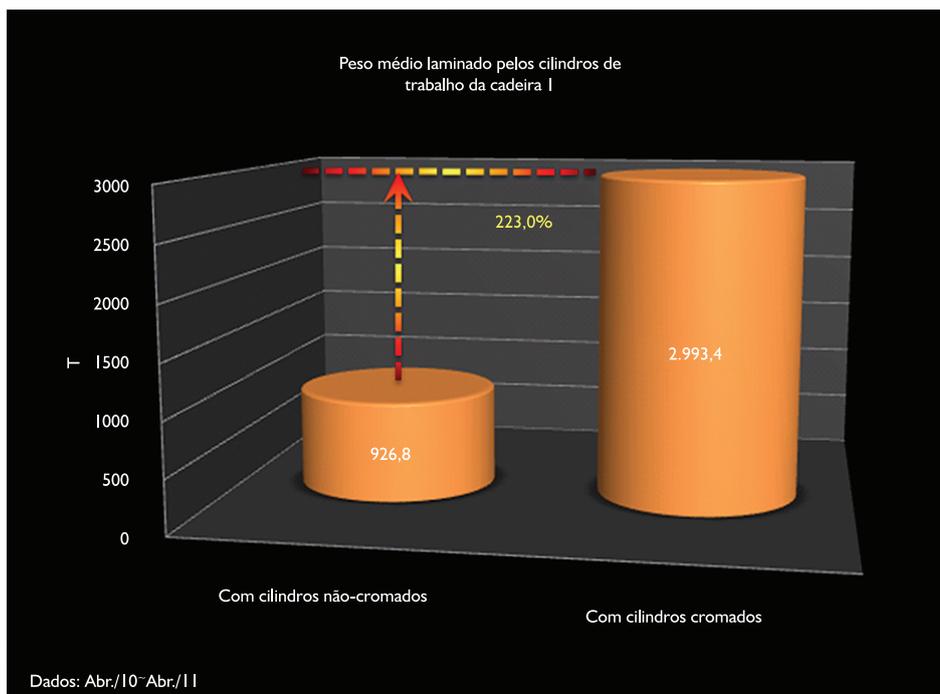


Figura 8. Peso médio laminado pelos cilindros de trabalho da cadeira I revestidos com cromo e não revestidos.

Os cilindros revestidos com cromo proporcionaram uma campanha muito superior em relação aos cilindros não revestidos, graças à manutenção da rugosidade e portanto, do coeficiente de atrito, o que garantiu o escorregamento sempre positivo em uma campanha muito maior, conforme apresentado na Figura 9.

Além de manter um escorregamento superior aos cilindros não revestidos ao longo do mesmo compri-

mento laminado, os cilindros cromados conseguiram manter o escorregamento positivo e propiciaram uma campanha cerca de três vezes maior.

Deve ser ressaltado que o cilindro de trabalho com revestimento de cromo analisado no gráfico da Figura 9 teve sua campanha interrompida por uma condição de programação do *mix* dos materiais que seriam processados, ou seja, caso esta mudança não ocorresse o mesmo

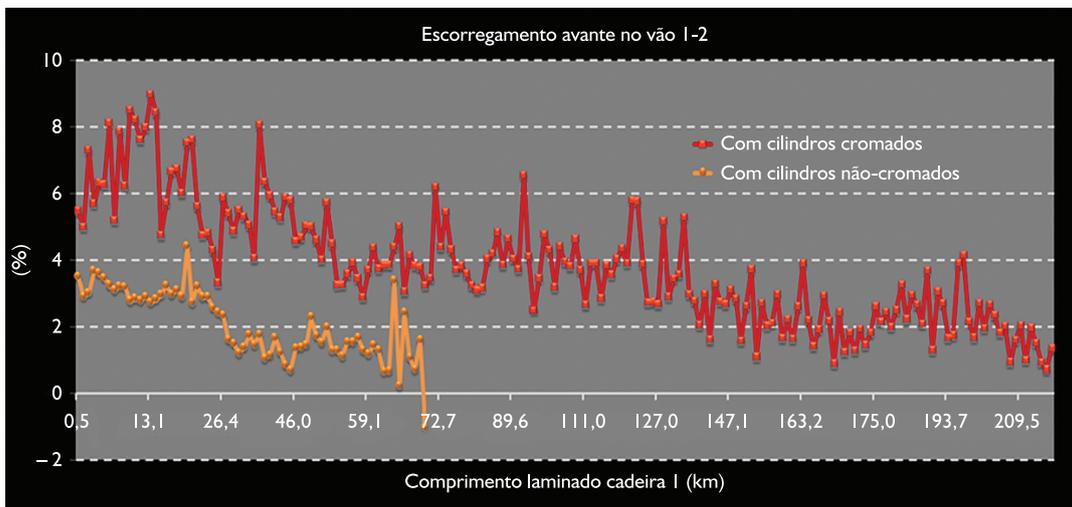


Figura 9. Escorregamento avante no vão 1-2 com a utilização de cilindros revestidos e não revestidos com cromo em relação ao comprimento laminado.

apresentava plenas condições de permanecer em utilização, pois apresentava um escorregamento positivo ainda no momento da troca. Esse fato reforça ainda mais o ganho proporcionado pela aplicação deste tipo de cilindros de trabalho, que contribuem com a afirmação que ainda existem inúmeros benefícios a serem explorados e utilizados com sua aplicação.

5 DISCUSSÃO

Comparando os resultados apresentados neste estudo com os resultados obtidos por Muratori et al.⁽³⁾, onde o surgimento do escorregamento negativo é apontando como uma das principais causas pelas trocas dos cilindros de trabalhos do laminador a frio, verifica-se que a aplicação dos cilindros cromados pode proporcionar, além de um ganho de estabilidade como já apresentado, uma redução de custo com a diminuição das trocas de cilindros de trabalho.

Sem dúvida esta é uma possibilidade a ser estudada futuramente em novos trabalhos, podendo confirmar ou não este ganho financeiro proporcionado pela aplicação de cilindros de trabalho revestidos com cromo.

6 CONCLUSÃO

Este estudo permite concluir que é possível obter um aumento significativo da estabilidade do laminador de tiras a frio da Usiminas Cubatão pela manutenção do escorregamento positivo por um período de tempo superior ao convencional. Tal estabilidade do processo garante a baixa variabilidade no desempenho (bitola dentro das tolerâncias exigidas, mesmo quando restrita). Esta conclusão está baseada no resultado obtido na campanha dos cilindros de trabalhos revestidos com cromo, pois essa camada diminui o desgaste superficial dos cilindros de forma significativa.

Com o aumento do comprimento laminado (maior campanha dos cilindros) há uma consequente diminuição no número de trocas de cilindros de trabalho, propiciando o aumento da disponibilidade do laminador para produzir.

Fica claro, também, que a aplicação de cilindros cromados tem o potencial de proporcionar outras formas de ganhos para o processo, por exemplo, a redução de custo com a diminuição do número de retificações dos cilindros, o que também diminui consumos de insumos das retíficas. Estas hipóteses devem ser validadas por estudos futuros que poderão confirmar e reforçar os benefícios da utilização de cilindros revestidos com cromo.

REFERÊNCIAS

- 1 HELMAN, H. *Fundamentos da laminação de produtos planos*. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1988.
- 2 LARKE, E. C. *The rolling of strip, sheet and plate*. Londres: Chapman and Hall, 1957.
- 3 MURATORI, S. L. et al. Influência das variáveis de processo sobre o escorregamento avante na primeira cadeira do laminador de tiras a frio da Cosipa. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO, PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 43., 2006, Curitiba. *Anais...* São Paulo: ABM, 2006. p. 826-35.

Recebido em: 26/03/2012

Aprovado em: 13/06/2012