

# INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO SOBRE O ESCORREGAMENTO AVANTE NA PRIMEIRA CADEIRA DO LAMINADOR DE TIRAS A FRIO DA COSIPA <sup>1</sup>

*Carlos Thadeu de Ávila Pires* <sup>2</sup>

*Karl Kristian Bagger* <sup>3</sup>

*Mateus Alexandre da Silva* <sup>4</sup>

*Maurício de Freitas Giovannetti* <sup>5</sup>

*Sergio Luiz Muratori* <sup>5</sup>

## Resumo

Este trabalho descreve os estudos realizados para a determinação das causas de variações de espessura, específicas, em bobinas processadas no Laminador de Tiras a Frio da COSIPA. Através de dados de produção foi evidenciado que o problema estava relacionado com o valor negativo do *escorregamento avante* na primeira cadeira. Analisando as forças atuantes no arco de contato e utilizando teorias clássicas de laminação, foi constatado que tais variações ocorriam principalmente durante as mudanças na rampa de velocidade do laminador, associadas a um desgaste da rugosidade dos cilindros de trabalho, em razão da redução do coeficiente de atrito na cadeira. Após implantação de medidas que incluíram alterações em parâmetros de processo, como os valores das tensões entre vãos e controle rigoroso da rugosidade dos cilindros, houve uma sensível diminuição de ocorrências de variação de espessura com a conseqüente garantia da qualidade do produto. Como benefício extra aos procedimentos operacionais, foi possível o estabelecimento da quilometragem média para a troca dos cilindros de trabalho na primeira cadeira.

**Palavras-chave:** Laminador de tiras a frio; Escorregamento avante; Rugosidade.

## INFLUENCE OF PROCESS VARIABLES ON FORWARD SLIP AT THE FIRST STAND OF COSIPA'S TANDEM COLD MILL

### Abstract

This work describes the studies undertaken to determine the causes of specific thickness variations in coils processed in COSIPA's Tandem Cold Mill. Through production data could be evidenced that the problem was related to the forward slip's negative value at first stand. Analyzing the forces that act on the contact arc and using rolling classic theories, was noticed that such variations occurred mainly during tandem mill's speed ramp changes, associated to wear of work roll's roughness, due to the reduction of friction coefficient in first stand. After the implementation of actions that included changes on process' parameters, such as the values of interstand tensions and strict control of the work roll roughness, there was a sensible decreasing of occurrences of such thickness variations with a consequent guarantee of the product quality. As an extra benefit to the operational procedures, was possible to establish the mean length to the change of the first stand work roll's.

**Key words:** Tandem cold mill; Forward slip; Roughness.

<sup>1</sup> Trabalho a ser apresentado no 43º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Acabados – Outubro de 2006 – Curitiba, PR - Brasil.

<sup>2</sup> Sócio da ABM, Engenheiro Eletricista, M.Sc, Analista de Operação da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Frio da Companhia Siderúrgica Paulista COSIPA - Cubatão, SP - Brasil.

<sup>3</sup> Sócio da ABM, Engenheiro Metalurgista, Gerente do Suporte Técnico da Laminação a Frio da Companhia Siderúrgica Paulista COSIPA - Cubatão, SP - Brasil.

<sup>4</sup> Sócio da ABM, Engenheiro Metalurgista, Analista de Operação da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Frio da Companhia Siderúrgica Paulista COSIPA - Cubatão, SP - Brasil.

<sup>5</sup> Sócio da ABM, Engenheiro Eletricista, Analista de Manutenção da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Frio da Companhia Siderúrgica Paulista COSIPA - Cubatão, SP - Brasil.

## Objetivo

O principal objetivo deste trabalho foi determinar as causas de variações de espessura que ocorriam durante algumas fases específicas do processo de laminação e ocasionavam desvios de produtos por estarem fora da tolerância de espessura especificada.

## 1 INTRODUÇÃO

O *Laminador de Tiras a Frio* da COSIPA (*LTF*), 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 1600 mm, dentro de um esquema de redução de até 81%.

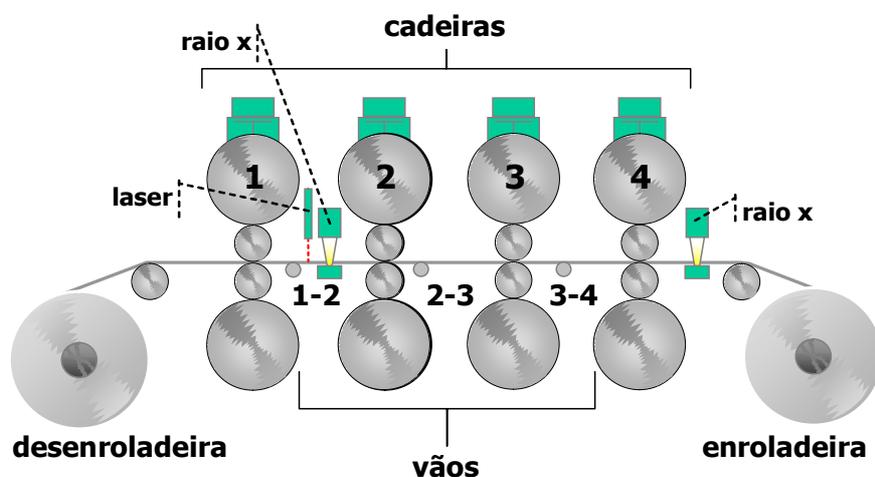


Figura 1. Diagrama esquemático do Laminador de Tiras a Frio.

O processo de laminação e conseqüentemente suas variáveis estão periodicamente sofrendo alterações, necessárias por diversos motivos: solução de problemas que possam causar desvios ao processo ou à qualidade do produto, otimização do próprio processo de produção ou exigências dos clientes.

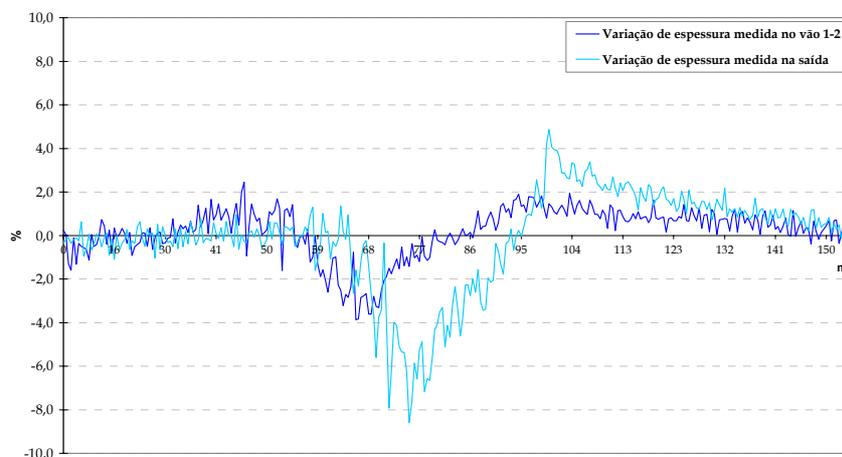


Figura 2. Variação de espessura medida no vão 1-2 e na saída do laminador.

No laminador da COSIPA estas modificações também se fazem presentes e uma delas, a diminuição dos limites de rugosidade dos cilindros de trabalho – principalmente na primeira cadeira –, com o objetivo de melhorar a limpeza superficial do material pode ser citada como exemplo.

As ações atingem seus objetivos propostos, porém após várias mudanças passaram a ocorrer variações de espessura ocasionais nas tiras (como ilustrado pela Figura 2), em algumas regiões específicas ao longo das bobinas laminadas e, em alguns casos essas variações eram significativas, ultrapassando os valores limites máximo ou mínimo permitidos.

## 2 ESTUDOS E AÇÕES

Analisando o processo de laminação foi constatado que tais variações ocorriam durante ou próximas às mudanças da rampa de velocidade do laminador – acelerações e desacelerações – ou então quando na região da bobina que estava sendo laminada havia uma *mancha de óxido*<sup>1</sup>.

No instante em que a espessura variava, o *escorregamento avante* calculado da primeira cadeira possuía um valor negativo. O *escorregamento avante* (*forward slip*) é definido como a relação entre a velocidade da tira na saída de uma cadeira e a velocidade periférica dos cilindros de trabalho desta mesma cadeira. De acordo com a equação abaixo o *escorregamento avante* é calculado por:

$$S_f = \frac{v_x - v}{v} \quad \text{Eq. 1 ,}$$

onde:  $v_x$  = velocidade da tira no plano de saída da cadeira;  
 $v$  = velocidade periférica dos cilindros da cadeira.

Este valor é utilizado para corrigir, de uma forma indireta, a velocidade da tira, através da atuação sobre a velocidade dos motores que acionam os cilindros de trabalho. As relações de velocidade determinam a espessura da tira em cada um dos vãos, o que pode ser explicado pela *Lei do Fluxo de Massa – Mass Flow Law*.

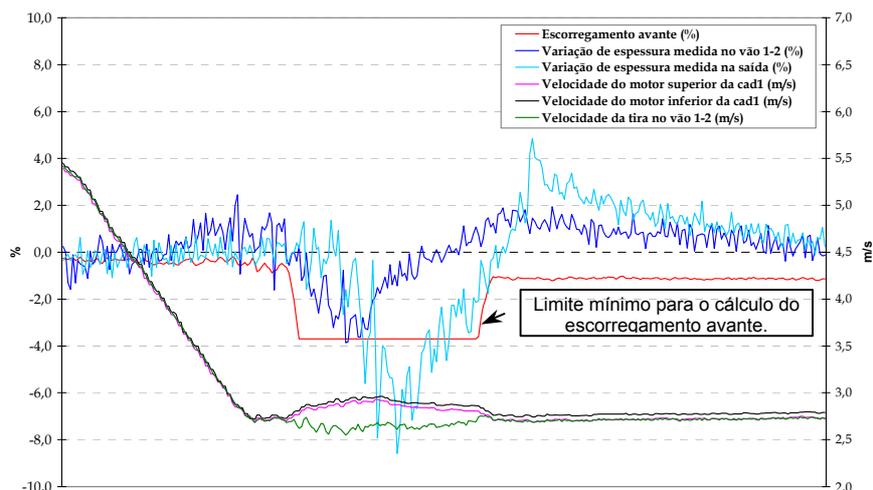
Fundamentalmente esta lei afirma que o volume do material que entra em uma cadeira de laminação é igual ao volume que sai. Considerando desprezível a variação da largura na laminação a frio (*laminação plana* ou *plane strain*), a equação do fluxo vale:

$$h_x \cdot v_x = h_{x+1} \cdot v_{x+1} = \Lambda = h_{x+n} \cdot v_{x+n} \quad \text{Eq. 2 ,}$$

onde:  $h_x$  = espessura da tira no vão;  
 $v_x$  = velocidade da tira no vão.

A Figura 3 apresenta o comportamento das velocidades dos motores e da tira, bem como o *escorregamento avante* calculado quando ocorreu uma variação de espessura.

<sup>1</sup> Causada em razão de uma parada da linha de produção de Decapagem de tiras. As propriedades físicas da superfície do material neste ponto estão alteradas.



**Figura 3.** Variações de espessura, velocidades dos motores da primeira cadeia e da tira e escorregamento avante.

Como já mencionado, a velocidade da tira é controlada indiretamente através da velocidade dos cilindros, que a tracionam. A relação entre estas duas variáveis é exatamente o escorregamento. No caso apresentado na Figura 3, quando o escorregamento calculado passou a um valor negativo pode ser observado que a velocidade da tira diminuiu em relação à velocidade dos cilindros.

O sistema de controle (AGC) atuou para a correção da espessura acelerando os cilindros, que sem o atrito necessário, não levaram a um aumento da velocidade do material. Ao contrário do esperado, ele desacelerou, demonstrando uma instabilidade no processo e por conseqüência uma impossibilidade de controle sobre a espessura.

## 2.1 Substituição dos Cilindros de Trabalho por Escorregamento Negativo

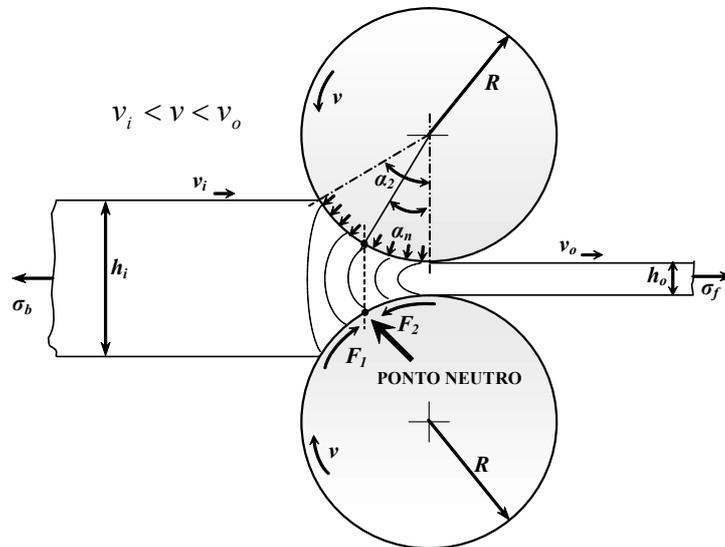
A partir do que foi apresentado ficou estabelecido que os cilindros da primeira cadeia deveriam ser substituídos, independentemente do comprimento de material por eles laminado, quando o escorregamento avante calculado tendesse a valores negativos. Com isto, o número de trocas da primeira cadeia por motivo de *escorregamento negativo* aumentou consideravelmente, porém diminuí-se a praticamente zero os problemas de variação de espessura decorrentes de perda de atrito entre os cilindros e a tira.

## 2.2 Estudo do Escorregamento Avante

Em um processo de laminação, na entrada do arco de contato, a tira possui velocidade menor do que a componente da velocidade periférica dos cilindros de trabalho e, na saída deste arco, possui velocidade maior que essa componente de velocidade em função da redução de espessura do material. Portanto, existe um ponto na área de contato em que as velocidades da tira e dos cilindros são iguais. Este é conhecido como *ponto neutro* e a linha imaginária que une os pontos neutros dos cilindros superior e inferior é conhecida como *linha neutra*.

O ângulo formado entre o plano de saída e o raio do cilindro até o ponto neutro é chamado de *ângulo neutro* ( $\alpha_n$ ). O seu significado físico é de um local onde há um equilíbrio entre as forças do arco de contato que estão a favor do movimento da tira (antes da linha neutra –  $F_I$ ) e as forças que estão contrárias ao movimento da tira

(após a linha neutra –  $F_2$ ). De acordo com (Helman, 1988) a posição do ponto neutro pode ser calculada formando a condição de equilíbrio de todas as forças elementares atuando na superfície do arco de contato entre a tira e os cilindros, isto é, a pressão dos cilindros e as forças de atrito.



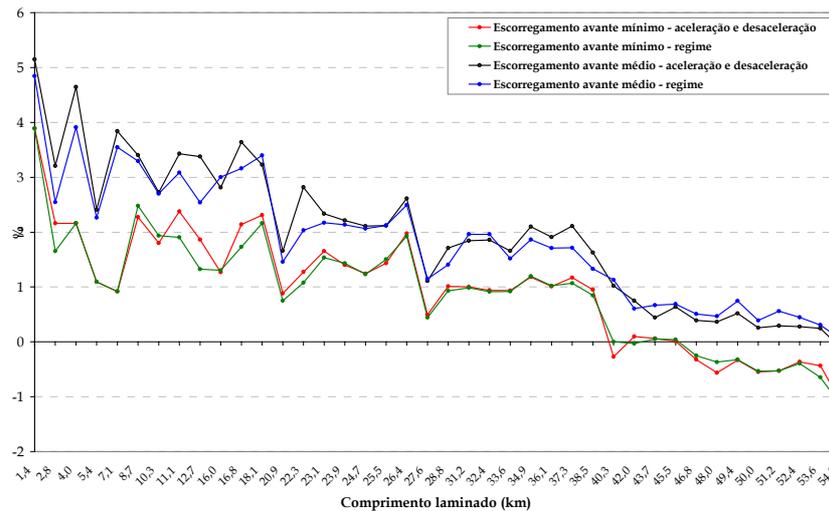
**Figura 4.** Ponto neutro, linha neutra e forças de atrito

A posição do ponto neutro é automaticamente determinada pela potência requerida para deformar a tira e superar as perdas por atrito. Como o escorregamento do caso em estudo estava tendendo a um valor negativo, o local do equilíbrio das forças estava em um ponto fora da região do arco de contato e por conseqüência o controle do processo de laminação se tornou instável. Se o escorregamento depende do equilíbrio de forças, concluímos que: a tensão, o coeficiente de atrito, a lubrificação, a redução do material e a própria força de laminação aplicada podem alterá-lo, desde um valor positivo e relativamente alto até um valor negativo.

A Figura 5 mostra o comportamento do escorregamento avante a partir de seus valores médios e mínimos, calculados e medidos respectivamente, durante os processos das bobinas dentro de uma *campanha*<sup>2</sup> dos cilindros de trabalho. Os valores indicam uma tendência de redução do escorregamento à medida que o comprimento laminado aumenta, porém, devido às diferentes características das bobinas que compõem diferentes campanhas, tais como a espessura de entrada e saída e reduções, outras curvas obtidas podem ter um comportamento semelhante, porém com alguma variação (a figura apresenta os valores durante as variações na rampa de velocidade e durante o regime).

Enquanto o valor do escorregamento avante é positivo o processo está totalmente controlado, isto é, há uma estabilidade que garante o controle sobre a espessura.

<sup>2</sup> Período compreendido entre a entrada dos cilindros novos em uma cadeia de laminação até o momento em que saem por algum motivo.



**Figura 5.** Escorregamento avanço médio e mínimo em função do comprimento laminado.

Com as curvas apresentadas foi possível prever o desgaste da rugosidade dos cilindros e o momento em que eles deveriam ser trocados, porém ainda de uma forma não tão precisa. Como este valor está correlacionado ao desgaste da rugosidade dos cilindros, traduzido nos gráficos proporcionalmente ao comprimento laminado, foi necessário um levantamento que possibilitasse a análise do comportamento deste desgaste, à medida que o comprimento laminado aumentava.

### 2.3 Modificação da Faixa de Rugosidades para os Cilindros de Trabalho da Primeira Cadeira

A partir dos estudos realizados até aqui foi possível afirmar que os valores de rugosidade que estavam sendo praticados eram insuficientes para garantir o coeficiente de atrito mínimo, refletido pelo valor positivo do escorregamento, para um comprimento laminado que considerávamos como mínimo a ser atingido.

Foram então realizadas alterações na faixa de rugosidade até que fosse possível estabelecer os valores limites adequados, os quais ficaram entre 0,9 e 1,2  $\mu\text{mRA}$ .

### 2.4 Acompanhamento do Desgaste da Rugosidade

Nesta etapa do trabalho houve um acompanhamento do desgaste da rugosidade dos cilindros de trabalho da primeira cadeira. Foi observado que, somente com a *zeragem da cadeira* e conseqüentemente aplicação de força, as rugosidades medidas caíram para valores em torno de 75% daqueles iniciais.

As curvas traçadas com os resultados obtidos são apresentadas abaixo. Através da Figura 6 vemos como ocorreu o desgaste da rugosidade em relação ao comprimento laminado. Com aproximadamente 85 Km de material laminado os cilindros foram substituídos, pois o escorregamento avanço já tendia a valores negativos. Deste ponto em diante há uma probabilidade de ocorrerem variações de espessura, devido aos efeitos já explicados. A figura destaca a equação característica.

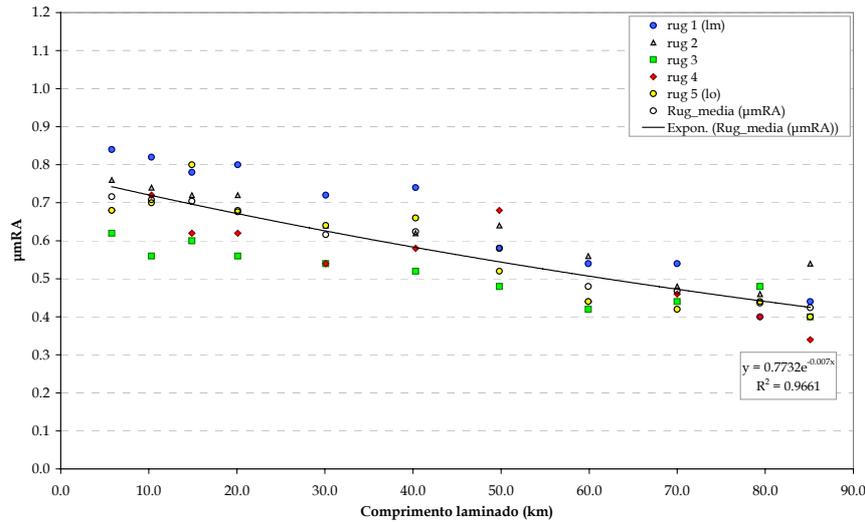


Figura 6. Rugosidade do cilindro de trabalho em relação ao comprimento laminado.

## 2.5 Variáveis que Influenciam no Escorregamento Avante

Além da rugosidade foi necessário identificar outras variáveis que também interferem no comportamento do escorregamento avante. Deste modo seria possível determinar a influência (sensibilidade) de cada uma delas e atuar para que fosse obtido o maior comprimento laminado pelos cilindros da primeira cadeira, sem causar qualquer outro tipo de problema ou desvio ao processo.

A partir de dados colhidos durante a laminação foram levantadas equações lineares, utilizando-se regressão multivariável, com o objetivo de determinar a que melhor representaria o comportamento do escorregamento, sempre em relação ao comprimento laminado. A diferença entre tais equações estava justamente na combinação das variáveis de processo que foram consideradas em seus cálculos, como por exemplo a força de laminação, a redução, a tensão e etc. A Figura 7 apresenta todas as curvas obtidas a partir dos diferentes equacionamentos.

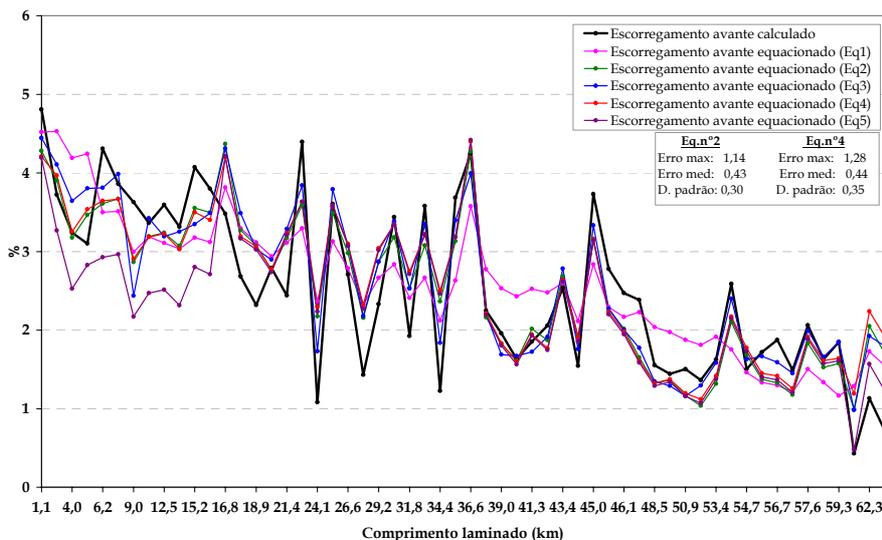


Figura 7. Escorregamento avante médio em regime calculado e equacionado em relação ao comprimento laminado.

As equações Eq.nº2 e Eq.nº4 da figura acima (traçadas em verde e em vermelho respectivamente) obtiveram os melhores desempenhos na determinação da curva, em relação àquela calculada com dados reais medidos (traçada em preto). A diferença fundamental entre elas é que a primeira considera o comprimento laminado, e a segunda o valor da rugosidade. Suas formulações são apresentadas, respectivamente, abaixo:

$$10 - 4,866 \cdot h_i + 4,955 \cdot h_o - 22,690 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_b + 206,106 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_f + \Lambda$$

$$\Lambda - 37,786 \cdot 10^{-3} \cdot st_{km} - 2,170 \cdot 10^{-3} \cdot R_f \quad \text{Eq. 3 ,}$$

$$10 - 10,935 \cdot h_i + 11,607 \cdot h_o - 78,557 \cdot \sigma_b + 459,176 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_f + \Lambda$$

$$\Lambda + 13,213 \cdot rg - 4,124 \cdot 10^{-3} \cdot R_f \quad \text{Eq. 4 ,}$$

onde:  $h_i$  = espessura de entrada (mm);  
 $h_o$  = espessura de saída (mm);  
 $\sigma_o$  = tensão à ré (T);  
 $\sigma_f$  = tensão avante média (T);  
 $st_{km}$  = comprimento laminado (km);  
 $R_f$  = força de laminação média (T);  
 $rg$  = rugosidade média ( $\mu\text{mRA}$ ).

Analisando as equações podemos constatar que a tensão avante possui uma importante influência sobre o valor do escorregamento, o que direcionou a uma ação que melhores resultados nos apresentou, para o objetivo inicialmente proposto.

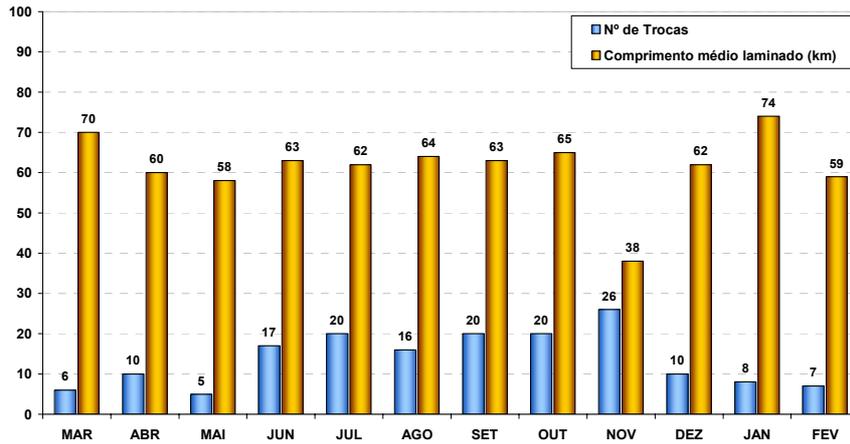
## 2.6 Alteração da Tabela de Tensão Avante

Com base nas observações acima foram aumentadas as faixas permitidas para o cálculo das tensões entre os vãos. Os novos valores ficaram 5% maiores para a tensão calculada no vão 1-2 e 15% maiores para o cálculo no vão 2-3.

## 3 RESULTADOS OBTIDOS

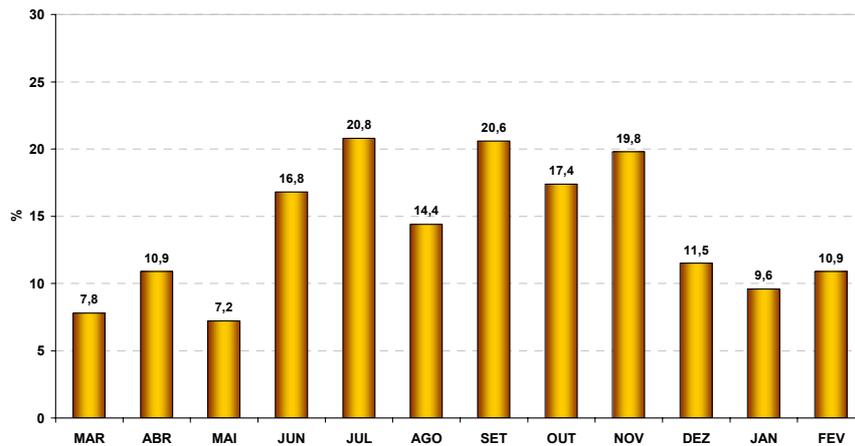
A Figura 8 apresenta a quantidade de trocas da primeira cadeira por motivo de escorregamento negativo, também associado ao comprimento médio laminado. A título de comparação, também é apresentado o percentual de trocas por escorregamento em relação ao total de trocas, isto é, qual a sua representatividade em relação a todos os outros motivos (Figura 9).

Um dos principais problemas gerados pela quantidade excessiva de trocas é a sua contribuição para o consumo de cilindros, – medido em milímetros retificados por quilo tonelada de aço laminado (mm/kT) –, pois ele está diretamente ligado aos custos de produção. Assim, quanto maiores as campanhas dos cilindros menores serão os custos.



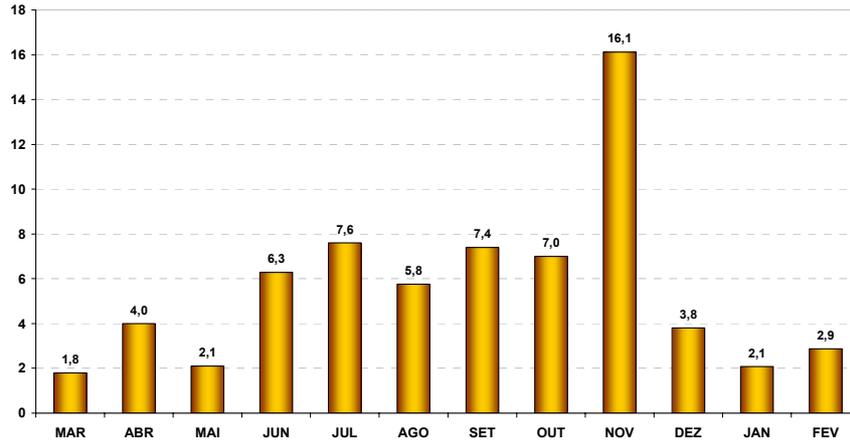
**Figura 8.** Trocas de cilindros da primeira cadeira por escorregamento negativo.

Para apresentar os ganhos reais foi realizada uma comparação considerando uma vida útil de 100 km para os cilindros de trabalho – determinada pela experiência sobre o processo de laminação –, possibilitando uma análise do número de trocas geradas “a mais” somente devido ao escorregamento negativo. O objetivo é mostrar que a quantidade de trocas realizadas por este motivo diminuiu nos últimos três meses, após a mudança na tabela de tensão, gerando uma economia real de cilindros. O resultado é apresentado no gráfico da Figura 10.



**Figura 9.** Percentual de trocas de cilindros da primeira cadeira por escorregamento negativo em relação ao total de trocas.

Se considerarmos que uma troca por escorregamento gera um consumo (por retificação) de 0,5 mm em cada um dos dois cilindros, cada troca que evitarmos haverá uma economia considerável. Além disso há um aumento da disponibilidade de laminador, por não ser necessário uma parada da produção para substituição dos mesmos e das máquinas que não terão que retificar estes cilindros.



**Figura 10.** Número de trocas “a mais” da primeira cadeira geradas devido às trocas por escorregamento negativo.

## 4 CONCLUSÕES

Com o trabalho apresentado é possível concluir que existe um valor de rugosidade para garantir o coeficiente de atrito mínimo entre os cilindros de trabalho e a tira laminada no arco de contato. É através do atrito que os cilindros transmitem energia para o material. Quando ele se torna pequeno (insuficiente) poderá ocorrer o deslizamento dos cilindros sobre a tira, causando uma instabilidade no processo por não ser possível controlar a velocidade do material. Sem o controle sobre a velocidade não há como garantir a espessura.

Também foi constatado que algumas variáveis de processo, como as tensões entre as cadeiras, podem ajudar e compensar a diminuição do atrito, contribuindo positivamente para o equilíbrio das forças no arco de contato.

## REFERÊNCIAS

- 1 **HELMAN**, H.; Fundamentos da Laminação de produtos Planos; Associação Brasileira de Metais. 1988.
- 2 **LARKE**, E. C., The rolling of strip, sheet and plate; Chapman and Hall Ltd.; 1967