

## Cálculo da profundidade de retificação de cilindros de encosto em laminadores de produtos planos

Antonio Augusto Gorni

*Dr., Analista do Suporte Técnico da Laminação a Quente, COSIPA  
E-mail: gorni@cosipa.com.br*

### Resumo

Nos laminadores quádruplos de produtos planos é necessário retificar periodicamente a superfície de seus cilindros de encosto para se eliminar a camada subsuperficial encruada, que foi gerada pela sua co-rotação com os cilindros de trabalho. Tal procedimento é necessário para se evitar que surjam trincas de fadiga nessa camada encruada, as quais podem provocar lascamentos no cilindro de encosto, cujo reparo encurta significativamente sua vida útil. Uma vez que esses cilindros são feitos de aço ou ferro fundido de alta liga, materiais extremamente caros, é fundamental que a profundidade da retífica aplicada seja a menor possível, mas sem que permaneça material excessivamente fadigado no cilindro. Esse trabalho apresenta os princípios de um modelo matemático destinado a estimar essa profundidade de retífica otimizada com base no grau previsto de fadiga sofrido pelo cilindro. O algoritmo foi implementado na forma de planilha Excel, facilitando o processo de entrada de dados e o respectivo cálculo.

**Palavras-chave:** cilindro de encosto, retificação, fadiga.

### Abstract

*The backup rolls of 4-Hi flat-product rolling stands need to be periodically dressed to eliminate the strain hardened subsuperficial layer generated by continuous co-rotation between these rolls and the work rolls. This procedure is necessary since fatigue cracks can appear in such strain-hardened subsuperficial layers and originate severe spallings in the backup rolls. Their repair could significantly lower their useful life. As these rolls are made of high quality alloy steel or iron, they are very expensive and it is vital that the dressing depth be kept to a minimum but, simultaneously, avoid the presence of excessively fatigued material. This paper shows the principles of a mathematical model that calculates this optimized dressing depth according to the predicted fatigue that the roll was subjected. This algorithm was implemented in an Excel spreadsheet, making data input and calculation easy and quick.*

**Keywords:** Backup roll, dressing, fatigue.

# 1. Introdução

Os cilindros de encosto de um laminador quádruplo para produtos planos têm como função suportar a carga que a conformação gera sobre seus cilindros de trabalho, conforme mostra a Figura 1. Consegue-se, dessa forma, minimizar os desvios de planicidade que são impostos ao laminado em decorrência da flexão dos cilindros de trabalho. A contínua rotação dos cilindros faz com que uma força compressiva atue de forma repetida sobre a superfície de contato entre os cilindros de trabalho e de encosto. Isso provoca a ocorrência de fadiga de rolamento, que, após certo período de solitação, provoca lascamento das camadas superficiais dos cilindros (Nakagawa, 1975).

No caso dos cilindros de trabalho, a ocorrência dessa fadiga não chega a representar problema, pois a rápida degradação e o desgaste em sua superfície, provocados pelas altas cargas de laminação e o contato direto com os esboços de metal sob alta temperatura, fazem com que sua campanha no laminador seja relativamente curta. A retífica subsequente é relativamente profunda para que se possa eliminar todas as irregularidades superficiais, sendo mais do que o suficiente para remover uma eventual camada encruada que contenha possíveis danos provocados por fadiga. Além disso, geralmente a resistência à fadiga do material dos cilindros de trabalho é maior do que a do cilindro de encosto.

Já a superfície dos cilindros de encosto é relativamente preservada durante o processo de laminação a quente, uma vez que ela somente entra em contato com o cilindro de trabalho, que se encontra relativamente frio. Por essa razão, as campanhas dos cilindros de encosto são dezenas de vezes mais longas do que as dos cilindros de trabalho. Os danos visuais no cilindro de encosto causados pelo desgaste decorrente do seu contato com o cilindro de trabalho são muito pequenos, mas os efeitos decorrentes da fadiga de contato são significativos. Após alcançarem determinado grau de magnitude, provocam o lascamento da camada subsuperficial do cilindro de encosto, danificando-o de for-

ma grave. Nesse caso, é necessário usá-lo profundamente para se eliminar o defeito, reduzindo significativamente sua vida útil e afetando seu desempenho. Isso é particularmente sério quando se lembra que os custos associados aos cilindros de laminação estão entre os três maiores itens de dispêndio de uma usina siderúrgica, uma vez que são componentes de alto custo feitos de aço ou ferro fundido especiais de médio a alto teor de liga.

As ocorrências de lascamento podem ser minimizadas ou mesmo evitadas através do uso de cilindros de encosto com materiais resistentes a essa ocorrência, controle adequado da operação de laminação e da remoção, através de retificação periódica, da camada subsuperficial danificada pelo contínuo contato com o cilindro de trabalho. Surge aqui um problema: como determinar a profundidade de retificação a ser aplicada? Se essa profundidade for insuficiente, os defeitos gerados pela fadiga atingirão nível crítico antes do final programado da campanha do cilindro de encosto, o que poderá provocar seu lascamento e os pesados prejuízos que já foram citados aqui. Se ela for alta demais, o consumo de cilindro de encosto será

excessivo, o que também oneraria os custos da usina (Ohkomori, 1988, Liddle, 1998).

Logo, é necessário que se faça um cálculo adequado dessa profundidade de retificação, para que se consiga maximizar a vida útil do cilindro de encosto, evitando-se tanto a ocorrência de lascamentos como a retificação de material ainda suficientemente são. A seção a seguir mostrará uma das metodologias de cálculo usada com essa finalidade.

## 2. Cálculo da profundidade Ideal de retificação de um cilindro de encosto

O algoritmo aqui usado para a determinação da profundidade ideal para retificação de cilindros de encosto foi proposto por Nambu (Nambu, 1986), incluindo-se a contribuição de vários outros autores (Nakagawa, 1975, Nakagawa, 1976, Nakagawa, 1982). O cálculo é realizado para cada passe de laminação aplicado pela cadeira, somando-se cada contribuição ao valor previsto para a profundidade ideal de retificação.

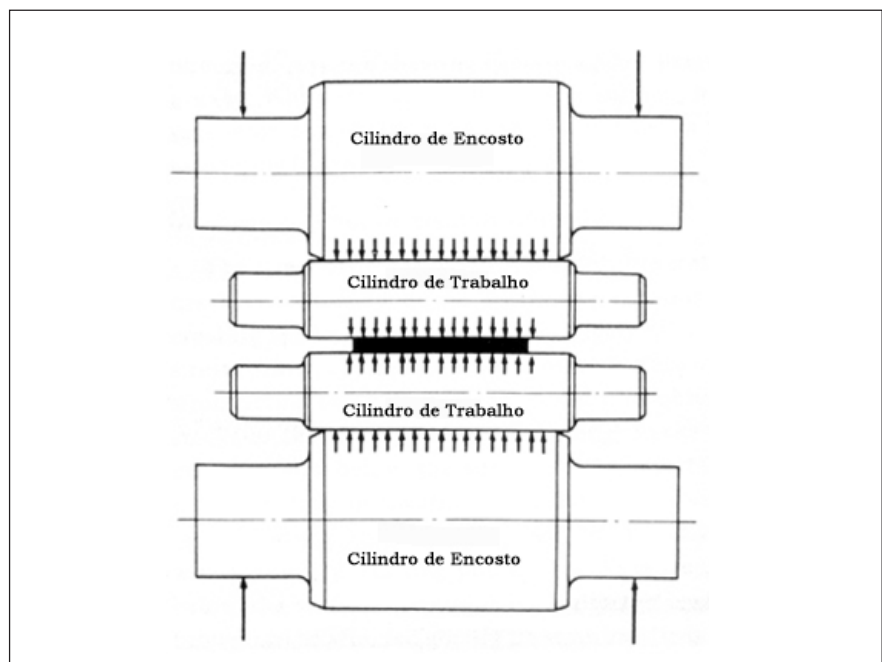


Figura 1 - Esquema das cargas atuantes numa cadeia quádrupla de laminação: forças compressivas atuam de forma repetida sobre as superfícies de contato dos cilindros em operação.

O primeiro passo é calcular a pressão máxima  $P_{max}$  atuante na superfície de contato entre os dois cilindros, conforme proposto pela teoria de Hertz:

$$P_{max} = 0,591 \sqrt{\frac{P}{l} \left( \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \right) \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)} \quad (1)$$

onde  $P$  é a carga de laminação,  $l$  é o comprimento de contato entre os cilindros,  $E$  é o módulo de Young e  $R$ , os raios dos cilindros; os índices 1 e 2 designam, respectivamente, os cilindros de trabalho e encosto.

Essa fórmula, contudo, vale para cilindros com formato perfeito e ideal. Esse não é o caso da laminação a quente, uma vez que ambos os cilindros vão se desgastando ao longo de suas campanhas em função das pesadas cargas a que são submetidos e, no caso específico dos cilindros de trabalho, dos sucessivos choques térmicos que ocorrem em função de seu contato com o esboço quente. Isso faz com que paulatinamente os cilindros deixem de se tocar na região central de suas mesas em função do maior desgaste verificado nessa região. A área de contato entre os cilindros se restringe progressivamente às suas periferias à medida que os cilindros vão sendo desgastados. Foi constatado na prática que o desgaste pode provocar aumento de até 250% na quantidade de danos de fadiga em relação à situação em que ele não existe, conforme mostrado na Figura 2 (Nakagawa, 1975, Ohkomori, 1988).

Portanto é necessário levar em conta o efeito do desgaste no cálculo da pressão existente entre o cilindro de encosto e o de trabalho. Com esse intuito, foi determinado um novo parâmetro, a pressão de contato linear total  $p_r$ , a qual substituirá a relação  $P/l$  usada na fórmula (1), nos casos em que deve ser considerada a ocorrência de desgastes nos cilindros envolvidos:

$$p_r = \frac{1}{L} \left[ P_s w + \frac{G}{4} (d_w + d_b) (w_{max} + w_{min}) \right] \quad (2)$$

onde  $L$  é o comprimento do cilindro de encosto,  $P_s$  é a carga específica de laminação por unidade de largura,  $w$  é a largura do laminado,  $G$  é o coeficiente de deformação elástica na interface entre os dois cilindros,  $d_w$  e  $d_b$  são os desgastes observados

nos cilindros de trabalho e encosto, respectivamente, e  $w_{max}$  e  $w_{min}$  são a largura máxima e mínima dos laminados processados.

O coeficiente de deformação elástica na interface entre os dois cilindros  $G$  é um parâmetro que é função da configuração específica da cadeira; um valor típico desse coeficiente está por volta de 2900 kg/mm<sup>2</sup>.

O cálculo dos desgastes dos cilindros de trabalho ( $d_w$ ) e encosto ( $d_b$ ) para cada laminado processado pode ser determinado a partir das seguintes fórmulas:

$$d_w = \frac{4,7 P_s L_r}{10^{12}} \quad (3)$$

$$d_b = \frac{0,23 N_b 2^{[0,1(68 - H_s)]}}{10^6} \quad (4)$$

onde  $H_s$  é o valor de dureza da mesa do cilindro expressa em unidades Shore,  $L_r$  é o comprimento do laminado e  $N_b$ , o número de rotações a que o cilindro de encosto foi submetido:

$$L_r = \frac{1000 t}{\rho h w} \quad (5)$$

$$N_b = \frac{L_r}{\pi D_b} \quad (6)$$

onde  $t$  é o peso do laminado,  $\rho$  é a densidade do aço,  $h$  e  $w$  são, respectivamente, a espessura e largura do laminado e  $D_b$ , o diâmetro do cilindro de trabalho.

Uma vez determinada a pressão máxima atuante na superfície de contato entre os dois cilindros  $P_{max}$ , pode-se, agora, calcular o número total de ciclos de fadiga que o material que constitui o cilindro de encosto pode suportar,  $NP_{max}$ , quando exposto à  $P_{max}$ , e, supondo-se que o lascamento seja provocado por tensões de cisalhamento:

$$N_{P_{max}} = e^{(Z P_{max} + Y)} \quad (7)$$

Essa fórmula é empírica; os valores dos coeficientes  $Z$  e  $Y$  podem variar conforme o tipo de laminador. No caso de um laminador a quente, temos a seguinte proposta para  $Z$ :

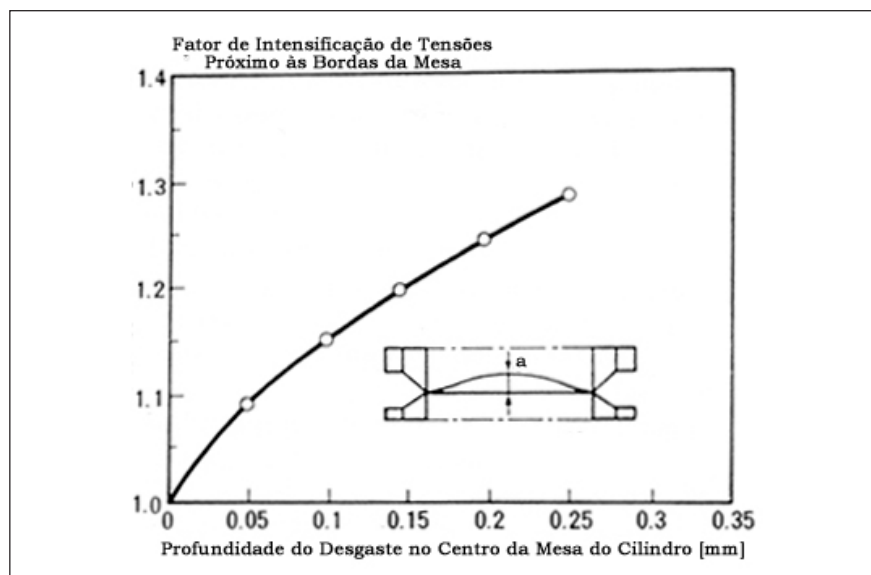


Figura 2 - Relação entre a profundidade do desgaste observada no cilindro de encosto e a intensificação da tensão de contato entre ele e o cilindro de trabalho, tomando-se como referência o ponto situado a 100 mm da borda da mesa (adaptado de Ohkomori 1988).

$$Z = \frac{-2,303}{(0,74 H_s + 1,4)} \quad (8)$$

e  $Y$  é definido pela fórmula:

$$Y = 16,12 - Z (2,93 H_s - 46,7) \quad (9)$$

Finalmente, o acréscimo na profundidade de retificação  $\Delta D$  relativo à laminação de um esboço, expresso em mm, é definido pela seguinte equação:

$$\Delta D = 6,0 (0,0561 N_{P_{max}}^{0,091}) \frac{N_b}{N_{P_{max}}} b \quad (10)$$

Nessa equação,  $b$  é metade da área de contato entre os cilindros de trabalho e de encosto, cujo valor também é determinado de acordo com a teoria de Hertz, mas substituindo-se a relação  $P/l$  pela pressão de contato linear total  $p_r$ , da mesma forma como havia sido feito no cálculo de  $P_{max}$ :

$$b = 0,764 \sqrt{p_r \left( \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \right) \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)} \quad (11)$$

A equação (10) baseia-se na regra de Miner, que estabelece que os danos de fadiga são lineares e proporcionais à razão entre o número de ciclos aplicados e o número máximo de ciclos de fadiga que o material pode suportar. Sua dedução foi feita de forma tal que ao final das campanhas previstas a parte mais afetada da região subsuperficial do cilindro de encosto já estaria prestes a atingir o limite de fadiga, ou seja, essa região já teria 100% dos danos previstos que poderiam ser causados pela fadiga; o lascamento estaria prestes a acontecer. Outros autores (Ohkomori, 1998) preferem trabalhar com um coeficiente de segurança, ou seja, seu modelo calcula uma profundidade de retífica tal que, ao final da campanha, a parte da região subsuperficial mais afetada do cilindro de encosto apresentaria no máximo de 75 a 80% do total de danos que a fadiga poderia causar antes do surgimento de lascamento.

Portanto, a princípio, o modelo proposto por Ohkomori (Ohkomori, 1998) é mais conservador que o de Nambo (Nambo 1986). A avaliação da adequabilidade desses modelos depende muito das condições específicas em que ele é aplicado. Por exemplo, note-se que a resistência à fadiga de contato do cilindro de encosto também depende das condições operacionais da cadeira, especialmente em termos da lubrificação aplicada. Esse fator deve ser levado em conta no ajuste fino do modelo quando o mesmo for aplicado sob condições industriais.

### 3. Implantação do algoritmo em planilha excel

O algoritmo de Nambo (Nambo, 1986), para o cálculo da profundidade mínima de retificação de cilindros de encosto de laminadores quádruplos descrito na seção anterior, foi implementado numa planilha Excel. Ela é composta de três formulá-

rios para entrada de dados, um para a saída dos resultados e a rotina em Visual Basic que efetua os cálculos. Essa planilha pode ser obtida gratuitamente na internet, na página com a seguinte URL:

[http://www.geocities.com/agorni/bur\\_drss.html](http://www.geocities.com/agorni/bur_drss.html).

Para se efetuar o cálculo, deve-se primeiramente preencher os seguintes formulários de dados presentes na planilha:

- **STAND:** dados da cadeira e cilindros de laminação.
- **WIDTH:** histograma das larguras processadas durante o período de tempo que se está analisando.
- **PASS:** histograma dos esquemas de passe aplicados durante o período de tempo que se está analisando, incluindo o valor de carga específica relativo a cada abertura de cilindros, ou seja, a carga de laminação por unidade de largura.

Após o fornecimento dos dados o cálculo é executado apertando-se o botão virtual "RUN" que está presente em qualquer um desses formulários de dados. Os resultados obtidos serão colocados na seção "RESULTS". Antes de se efetuar um novo cálculo, pode-se, se necessário, limpar todos os dados anteriormente fornecidos, apertando-se o botão virtual "CLEAR" presente nos formulários de dados. Obviamente tal procedimento não é necessário, caso se deseje alterar apenas alguns poucos dados.

## 4. Conclusões

Foi apresentado nesse trabalho os princípios de um procedimento matemático para se calcular a profundidade de retificação de cilindros de encosto usados em cadeiras quádruplas para laminação de produtos planos. O valor é calculado objetivando-se evitar tanto o lascamento decorrente de trincas de fadiga como o descarte de material ainda suficientemente são. Esse algoritmo foi codificado na forma de uma planilha Excel, a qual facilita a entrada dos dados e execução dos cálculos. Contudo nota-se que seu uso em condições industriais reais deve ser feito com cautela, uma vez que o modelo matemático incorpora diversas equações e constantes empíricas, as quais devem ser devidamente adaptadas para que possam refletir adequadamente as características operacionais de uma instalação específica.

## Referências Bibliográficas

- LIDDLE, A.J. e outros. Backup roll maintenance for preventing spalling accidents. *SEAISS Quarterly*, January 1998, p. 48-64.
- NAKAGAWA, M. A Consideration on decision of suitable regrinding amount of back-up roll for 4-high mills. *Hitachi Review*, v. 24, n. 12, p. 467-472, 1975.
- NAKAGAWA, M. Influence of maintenance on backup roll life in four-high mills. *Hitachi Review*, v. 25, n. 9, p. 311-315, 1976.
- NAKAGAWA, M. e outros. Effect of maintenance on backup roll life. *Iron and Steel Engineer*, p. 23-27, August 1982.
- NAMBU, Y. Suitable dressing amount calculation to prevent fatigue spalling. In: MEETING OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF STECKEL MIL OPERATORS, 3. *Anais...* Timóteo, March 1986.
- OHKOMORI, Y. e outros. Cause and prevention of spalling of backup rolls for hot strip mill. *Transactions of the ISIJ*, v. 28, n. 1, p. 68-74, 1988.

Artigo recebido em 19/12/2002 e aprovado em 09/04/2003.