

UTILIZAÇÃO DE CILINDROS DE AÇO RÁPIDO PARA AS PRIMEIRAS CADEIRAS DO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE DA CSN¹

*Danilo Guelli Gonçalves de Oliveira²
Sebastião José Furtado de Azevedo³
Nilber Bhering Cordeiro⁴
Felipe Gustavo Bernardes⁵
Renato Rufino Xavier⁶
Carlos Henrique Silva⁷*

Resumo

Os cilindros de aço rápido têm substituído os cilindros de ferro alto-cromo nas primeiras cadeiras dos laminadores de tiras a quente, mostrando ótimos resultados em qualidade e produtividade. Entretanto, muitos laminadores têm encontrado dificuldades na implementação desses cilindros, não obtendo os resultados esperados. O entendimento dos mecanismos de desgaste nas primeiras cadeiras dos laminadores de tiras a quente, assim como o ajuste dos modelos de previsão de desgaste utilizados pelos laminadores, é importante para a utilização bem sucedida dos cilindros de aço rápido. Esse trabalho apresenta as caracterizações de superfície dos cilindros após laminação e os ajustes feitos no modelo de previsão de desgaste para a utilização de cilindros de aço rápido no laminador de tiras a quente da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). A coleta dos dados foi realizada de forma automatizada utilizando-se o medidor de perfis das retíficas. A partir dos dados coletados para associar estes com os dados da campanha de laminação. Com uma análise de correlação entre os resultados obtidos e as variáveis de laminação analisada foi possível avançar no entendimento do comportamento dos cilindros de aço rápido durante o uso.

Palavras-chave: Cilindro de aço rápido; Ferro fundido branco multi-componente; Laminação a quente; Cilindro de laminação.

¹ Trabalho a ser apresentado no 42º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados Revestidos, 25 a 28 de Outubro, Santos, SP.

² Eng. Metalurgista, Gerente de Cilindros, CSN, Volta Redonda, RJ.

³ Eng. Especialista, Oficina de Cilindros, CSN, Volta Redonda, RJ.

⁴ Mc. Eng. de Produção do Tiras a Quente, CSN, Volta Redonda, RJ.

⁵ Eng. Mecânico, Mestrando em Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP

⁶ Eng. Metalurgista, Supervisor de Desenvolvimento e Aplicação de Cilindros, Aços Villares – Sidenor, Pindamonhangaba SP

⁷ Eng. Mecânico, Assistente de Vendas, Aços Villares – Sidenor, Pindamonhangaba SP

1 INTRODUÇÃO

Entender as solicitações as quais os cilindros de laminação são submetidos é fator imprescindível para avançar no desenvolvimento dos materiais aplicados a estes componentes. Sabe-se que o processo de degradação do cilindro é dependente de uma série de variáveis do processo de laminação, por exemplo: carga de laminação, velocidade relativa entre o cilindro e a tira, material da tira, material do cilindro, dimensões do cilindro e tira, ciclo de temperatura do cilindro e temperatura da tira. O valor de cada uma destas variáveis é determinado e controlado dentro de uma faixa de variação aceitável para garantir que as propriedades necessárias ao produto laminado sejam alcançadas. Esse trabalho tem por objetivo estabelecer um modelo que contemple o efeito das variáveis do processo de laminação a quente na degradação dos cilindros de aço rápido, caracterizar a superfície de desgaste dos mesmos e comparar os resultados dos cilindros de aço rápido com os cilindros de ferro alto-cromo para diferentes cadeiras no Laminador de Tiras à quente (LTQ) da CSN.

1.1 Evolução dos Materiais para Cilindros

Inicialmente, os cilindros de laminação eram compostos de um único material, material este projetado para resistir simultaneamente às solicitações mecânicas e tribológicas. No final dos anos 60 os fabricantes de cilindros passaram a utilizar uma nova técnica para a fabricação dos cilindros, chamada fundição centrífuga. O que permitiu a fundição de cilindros compostos por dois materiais, sendo um material constituinte do núcleo e o outro constituinte da casca do cilindro. Desta forma, os materiais da casca do cilindro passaram a serem projetados, principalmente, para resistir às solicitações tribológicas do processo. Este avanço se traduziu diretamente em aumento da tonelage laminada por cilindro de laminação e da qualidade da chapa laminada e em diminuição dos custos de manutenção, indiretamente relacionadas com os avanços tribológicos.⁽¹⁾

Durante estes poucos anos, a fundição centrífuga passou por muitos avanços. Inicialmente na casca do cilindro empregou-se o ferro fundido branco de alto cromo, posteriormente passou-se para aço de alto cromo (High Chrome Steel – Hi-Cr Steel). Atualmente o mercado está voltado para a utilização do aço rápido (High Speed Steel - HSS), principalmente nas primeiras cadeiras do trem acabador. Na literatura, estas ligas também são denominadas ‘ferro fundido branco multi-componente’.⁽²⁻³⁾

A idéia de utilizar o HSS na fabricação de cilindros para laminação de tiras à quente surgiu em função das propriedades principais destes materiais: ‘dureza à quente’ e ‘resistência ao desgaste’. A partir daí o desenvolvimento dos aços rápidos para cilindros foi baseado na composição química do aço M2, que apresenta uma boa combinação destas propriedades.⁽⁴⁾

Desde então, visando otimizar o emprego dos cilindros de aço rápido nos laminadores, os desenvolvimentos realizados objetivam a otimização das propriedades tribológicas deste tipo de material para as condições específicas do processo de laminação à quente. De uma forma geral, os desenvolvimentos de novas ligas são baseados na caracterização em campo dos mecanismos de degradação do cilindro e na realização de testes de desempenho em laboratório, nos quais são produzidos, na medida possível, os mecanismos verificados em campo.⁽⁵⁻⁷⁾

1.2 Modelos de Desgaste para Cilindros de Laminação

Foram estudados dois modelos de desgaste encontrados na literatura: TAHIR⁽⁸⁾ (Equação 1) e GUO⁽⁹⁾ (equação 2) e comparados o modelo utilizado atualmente na CSN. Os dois modelos estudados são não-fenomenológicos. Ou seja, não são expressões oriundas de leis que governam os fenômenos físicos envolvidos no problema, e sim são ajustes de curva (modelos estatísticos) que permitem saber apenas qual a influência de uma variável sobre uma dentro da faixa de variação investigada.

$$W(x) = b_1 \sum_j (L_i / R'_w) ((P_i / (w_a \cdot ld_{1i}))^{n_i}) + b_2 \sum_i (L_i / R'_w) (P_i / (L_{B_i} \cdot ld_{2i}))^{0.5} \quad (1)$$

onde,

W(x) é o desgaste (diferença entre o raio do cilindro antes e após a laminação) em cada ponto x da mesa do cilindro de trabalho;

j é o número do passe (número da tira laminada);

i é o número da cadeira;

b₁ e **b₂** são fatores de desgaste;

L é comprimento da tira laminada;

1.2.1.1 R'_w é o raio deformado do cilindro de trabalho;

P é a carga de laminação;

w_a é a largura da tira na entrada do trem acabador;

ld₁ é o arco de contato entre o cilindro de trabalho e a tira;

n é a taxa de endurecimento (σ_e à temperatura de laminação/ σ_e à temperatura ambiente);

L_B é a largura da mesa do cilindro de encosto;

ld₂ é o arco de contato entre o cilindro de trabalho e o cilindro de encosto.

$$W(x) = A_m \sum_{k=1}^K Z_{mki} \quad (2)$$

onde,

$$Z_{mki} = \prod_{j=1}^J X_j^{C_j}(x_i)$$

sendo que,

W(x) é o desgaste (diferença entre o raio do cilindro antes e após a laminação) em cada ponto x da mesa do cilindro de trabalho;

m é o número da campanha;

k é o número da bobina;

j é o número da variável;

A_m é o coeficiente de ajuste da curva;

X é o valor escalonado da variável;

x_i é o ponto da mesa do cilindro de trabalho;

C é o expoente determinado a partir dos dados de laminação.

A principal diferença encontrada entre os modelos é o número de variáveis que cada modelo possibilita analisar. Enquanto o modelo de GUO permite analisar quantas variáveis forem necessárias, o modelo TAHIR apresenta conjuntos fixos de variáveis que foram consideradas importantes pelo autor. Além disso, o modelo TAHIR é

obtido via estimativa linear, enquanto que o modelo de GUO é obtido via estimativa não-linear.

O modelo de TAHIR não considera o efeito de movimento relativo 'forward slip'. Esse parâmetro reflete o efeito da velocidade relativa entre o cilindro e a tira. Por outro lado, o modelo de TAHIR considera a 'pressão de contato entre os cilindros de trabalho e encosto' como parâmetro que reflete o desgaste devido ao contato entre os cilindros. A respeito ainda dos modelos de TAHIR, nota-se ainda que as variáveis consideradas estão relacionadas diretamente com os parâmetros do processo de laminação (L, R, w, P, n, L_B, w) enquanto que variáveis relacionadas com as propriedades do material do cilindro são indiretamente contempladas por meio dos fatores de desgaste (b_1, b_2) os quais são determinados para cada tipo de cilindro e cadeira de laminação. Neste sentido, o modelo de GUO é semelhante, pois não contempla diretamente o efeito do material do cilindro.

Fica claro que os modelos de desgaste apresentados não foram desenvolvidos com objetivo de entender a degradação da ferramenta, mas sim de aperfeiçoar o controle do processo de laminação. Fruto deste enfoque é o fato de que as propriedades dos cilindros não são contempladas diretamente em nenhum dos modelos. Mas, do ponto de vista de entender o desgaste do cilindro, é importante estudar não só a influência dos parâmetros de laminação mas também, por exemplo, a relação entre a variação dos fatores de desgaste (Am, b_1, b_2) e as propriedades do material do cilindro (cinética de formação de óxidos, resistência ao desgaste abrasivo, resistência mecânica e à fadiga térmica). Neste sentido, agregar a observação dos fenômenos de desgaste em campo a esta análise permitirá avançar na abordagem do problema passando de uma abordagem estatística para uma abordagem fenomenológica.

Existe um caminho a ser percorrido para que estes modelos avancem de modelos estatísticos com ênfase nas variáveis de laminação para modelos fenomenológicos com ênfase nas variáveis da ferramenta. Neste sentido, a validação dos modelos e posterior comparação dos seus resultados com análises superficiais dos cilindros (indicativo dos fenômenos) podem representar um passo neste caminho.

2 METODOLOGIA

Para a caracterização da superfície de desgaste em cilindros de laminação após uso, foram empregadas duas técnicas de preparação metalográfica: polimento e polimento mais ataque ácido com Nital v/v 2%. A preparação apenas com polimento visa manter os sinais da degradação da superfície. O ataque nessas condições, pode revelar características do mecanismo de degradação.

Para desenvolver uma metodologia de medição de desgaste foram investigadas duas maneiras de obter os perfis dos cilindros: a) via micrômetro manual; b) via medidor automático da retífica. Em seguida os resultados obtidos através de cada uma das formas foram comparados. Para automatizar a etapa de geração dos dados de desgaste desenvolveu-se um programa com uma lógica de programação capaz de processar e gerar os dados de desgaste visando obter o menor nível possível de interferência do homem e com um tempo de processamento dos resultados significativamente menor. O desempenho do cilindro foi analisado a partir da maior diferença de diâmetros na mesa antes e após a laminação.

Adicionalmente, tendo em vista que para testar os modelos de desgaste seria necessário confrontar os dados de desgaste medidos com os valores de alguns dos parâmetros do processo de laminação, o programa foi desenvolvido para processar

também os parâmetros de laminação e confrontar com os valores de desgaste gerados.

A Figura 1 apresenta as principais etapas da lógica de programação desenvolvida durante a criação do programa. A seguir segue uma descrição breve destas etapas: a) cadastrar cilindro; b) importar e gravar dados da retífica; c) solicitar dados do processo; d) importar e gravar dados de processo; e) relacionar dados de retífica com os de processo e gerar curva de desgaste; f) gravar dados de desgaste + processo e; g) exportar dados de desgaste e processo para o Excel.

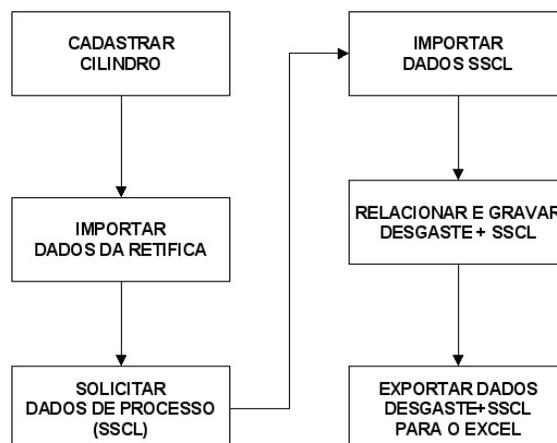


Figura 1. Fluxograma da lógica de programação.

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização da Superfície de Desgaste

A Figura 2 mostra a superfície de desgaste de um cilindro de aço rápido após utilização na cadeira F1. Observa-se a presença de arrancamentos, trincas térmicas primárias e uma malha de trincas mais finas (secundárias).

As Figuras 3 e 4 mostram a mesma superfície com com ataque. Verifica-se que os arrancamentos ocorrem preferencialmente em regiões com carbonetos massivos, assim como a propagação das trincas térmicas. Na Figura 4, é possível verificar que o carboneto encontra-se estilhaçado, indicando que os arrancamentos observados na Figura 3 decorrem, provavelmente, da degradação e posterior arrancamento dos carbonetos.

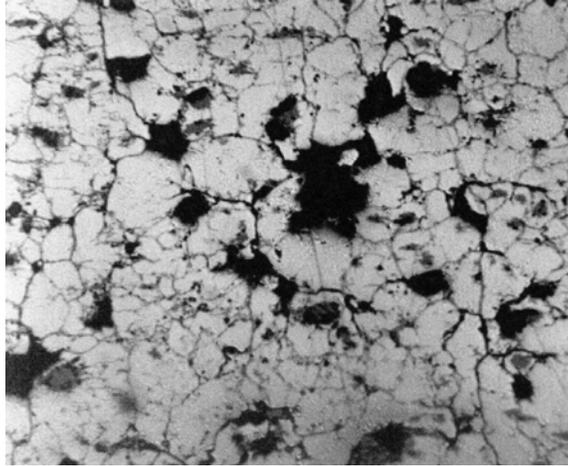


Figura 2. Superfície de desgaste de cilindro de aço rápido após campanha na cadeira F1. Superfície polida. Presença de trincas e arrancamentos. Aumento: 100 X

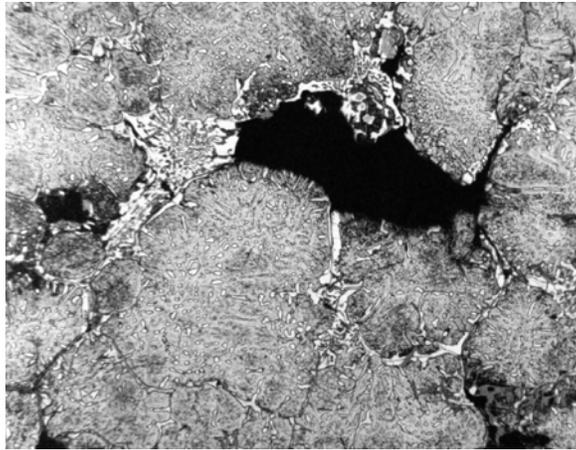


Figura 3. Superfície de desgaste preparada com polimento e ataque (Nital v/v2%). Regiões escuras caracterizando arrancamentos. Presença de trincas nas regiões de carbonetos ou interface carboneto-matriz. Aumento: 200 X

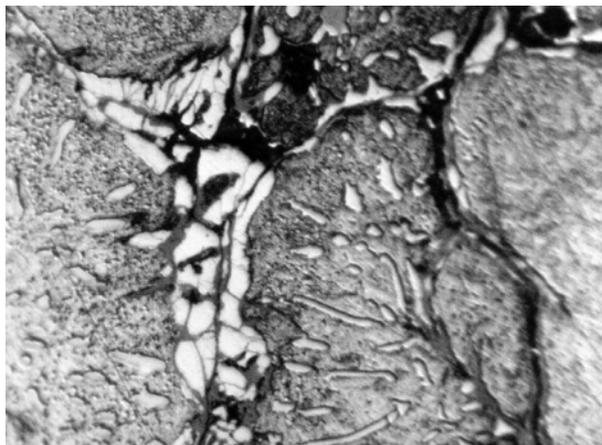


Figura 4. Região mostrando trincamento de carboneto e propagação de trincas. Observa-se o início do arrancamento do carboneto trincado. Ataque: Nital v/v2%. Aumento: 400 X

Através da identificação do mecanismo de desgaste é possível projetar materiais que sejam menos susceptíveis ao dano. No caso observado, o refino e a distribuição mais homogênea dos carbonetos podem melhorar o desempenho em serviço.

3.2 Medidas de Desgaste

A Figura 5 apresenta um exemplo dos resultados de perfil do cilindro antes e após da laminação medidos via retífica e via micrômetro. Não há diferenças significativas nos valores absolutos de diâmetro quando são comparadas as medidas realizadas com o micrômetro e com o medidor da retífica.

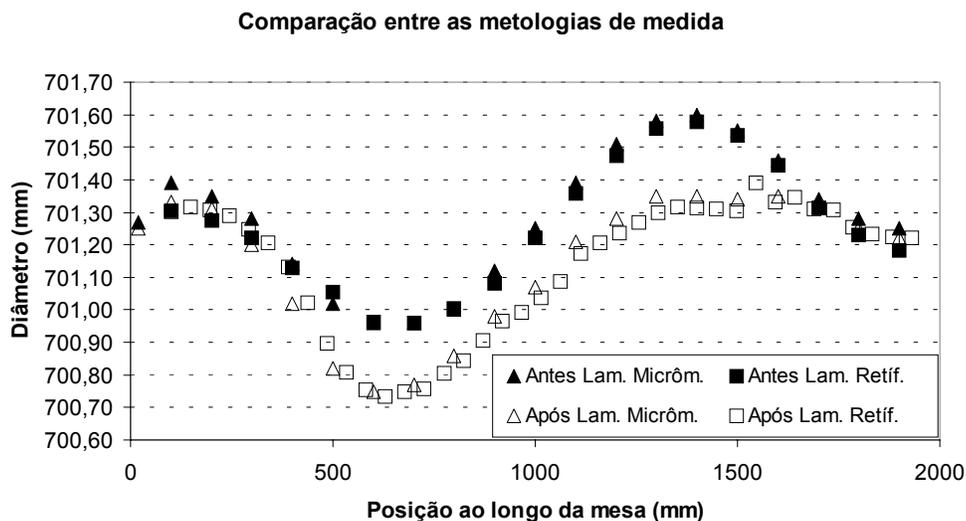


Figura 5. Perfil do cilindro medido com retífica e com micrômetro

A Figura 6 apresenta o programa criado para coletar dados de laminação e de retífica, relacionar esses dados e criar as curvas de desgaste dos cilindros utilizados. As Figuras 6 e 7 mostram os dados comparativos de desempenho entre os cilindros de aço rápido e ferro alto-cromo utilizados nas cadeiras F1 e F2 respectivamente. Nota-se que o desgaste nos cilindros de aço rápido é inferior cerca de 4 vezes na cadeira F1 e cerca de 3 vezes na cadeira F2. Nota-se que o modelo atual empregado para previsão de desgaste em cilindros, tem maior aderência para os cilindros de ferro alto-cromo do que para os cilindros de aço rápido. Esses resultados são importantes para aferição do modelo utilizado ou para propor um novo modelo.

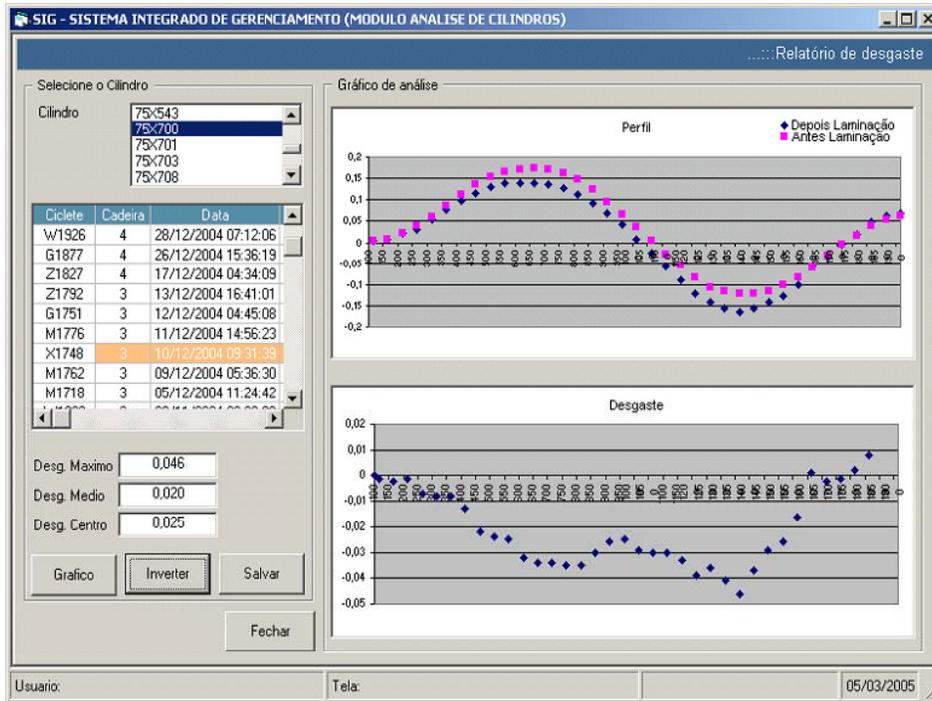


Figura 6. Programa de coleta e análise de dados.

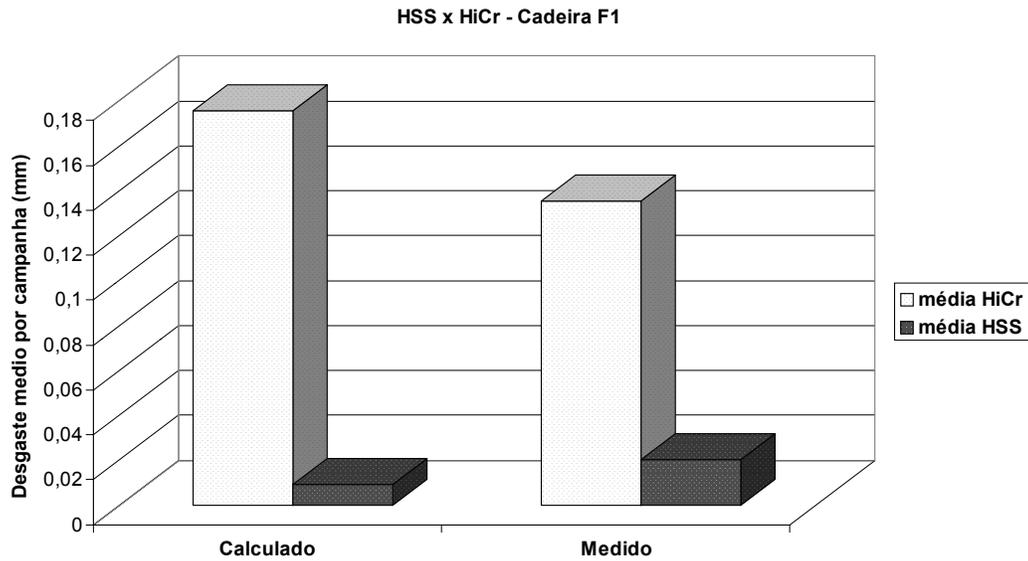


Figura 7. Comparação de desempenho entre cilindros de ferro alto-cromo HiCr e aço rápido HSS na cadeira F1.

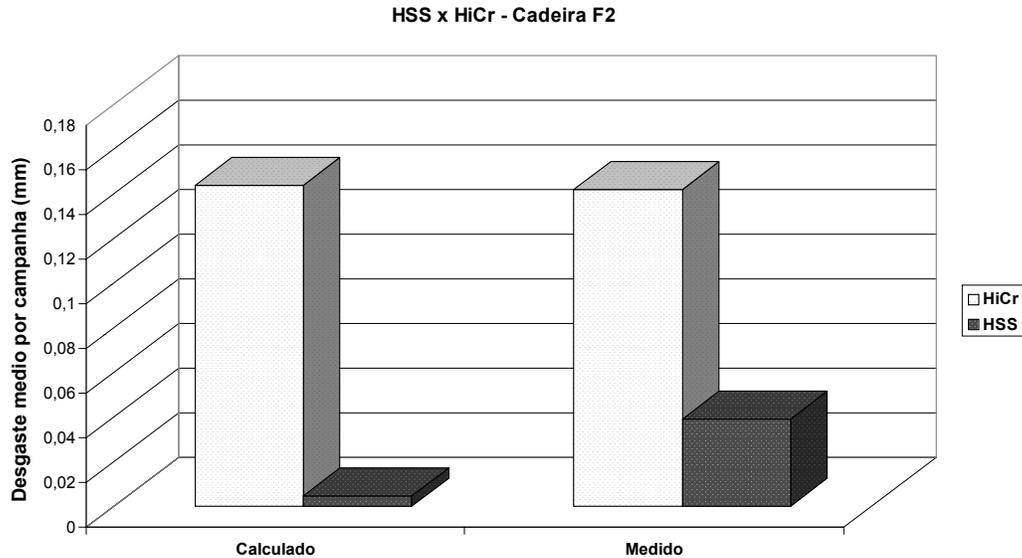


Figura 8. Comparação de desempenho entre cilindros de ferro alto-cromo HiCr e aço rápido HSS na cadeira F2.

4 CONCLUSÕES

A utilização de cilindros de aço rápido nas primeiras cadeiras do laminador de tiras a quente da CSN, tem permitido ganhos consideráveis em relação aos cilindros de ferro alto-cromo. Entre os ajustes realizados para utilização dos cilindros de aço rápido, faz-se necessário o contínuo ajuste do modelo de desgaste utilizado no laminador. A coleta sistemática e planejada de dados de desgaste de cilindros, assim como a correlação destes com as variáveis de laminação, é importante para melhorar o desempenho desses cilindros.

O entendimento dos mecanismos de deterioração da superfície de cilindros através da caracterização em campo, fornece subsídios para o desenvolvimento de novos materiais mais resistentes ao desgaste. No caso estudado, a superfície dos cilindros utilizados nas primeiras cadeiras do LTQ se deteriora principalmente através do trincamento e arrancamento dos carbonetos presentes no material.

Os resultados obtidos através da metodologia empregada mostram um desgaste de 3 a 4 vezes menor para os cilindros de aço rápido. Essa diferença foi mais acentuada na cadeira F1. A metodologia empregada permitirá prever com maior precisão a extensão das campanhas dos cilindros no laminador, assim como o melhor entendimento do papel das variáveis do processo de laminação no desgaste dos cilindros.

Agradecimentos

Ao CNPq que, através do Fundo Verde Amarelo, financiou o projeto “Materiais avançados para cilindros de laminação a quente” - processo CNPq n.400622//2004-1.

Às instituições que participaram do projeto: Laboratório de Fundição do IPT, Laboratório de Fenômenos de Superfície da EPUSP, Laboratório de Tribologia e Materiais UFU, Departamento de Metalurgia e Materiais- PUC-RJ.

REFERÊNCIAS

- 1 CAITHNESS, L.; COX, S. X.; EMERY S. "Surface behavior of HSS in hot strip mills", In: ROLLS 2000 CONFERENCE OF INSTITUTE OF MATERIALS AT BIRMINGHAM, U.K., and April, 1999.
- 2 MATSUBARA, Y.; SASAGURI, N.; WU, H.; ALBERTIN, E.; BOCCALINI, M.. In: PROCEEDINGS OF THE 1ST INTERNATIONAL CONGRESS ON METALLURGY AND MATERIALS TECHNOLOGY, São Paulo, Oct. 1994, edited by ABM, p.1.
- 3 WU, H.-Q., Sasaguri, Matsubara, Y., and Hashimoto, M.: Solidification of multi-component white cast iron: Type and morphology of carbides. **AFS Transactions**, vol. 104, pp. 103-108, 1996.
- 4 M. BOCCALINI. JR.; H. GOLDENSTEIN, Solidification of high speed steels. **International Materials Review**, vol. 46, no 2, pp. 92, 2001.
- 5 KALS, H.J.J., Preface, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 103, p. ix, 2000.
- 6 LI, C. S.; LIU. X. H.; WANG G. D.; YANG, G., Experimental investigation on thermal wear of high speed steel rolls in hot strip rolling. **Materials Science and Technology**, v. 18, pp. 1581-1584, dec. 2002.
- 7 BOCCALINI, JR. M.; SINATORA, A., Microstructure and wear resistance of high speed steel for rolling mill roll. In: PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL ROLLING CONFERENCE, Sweden, pp. 426-437, 2002.
- 8 TAHIR, M.; WIDELL, B.; LARGERGREN, J., Improved modeling of work-roll wear prediction. **Submitted to Journal of Materials Processing Technology**, Oct. 2003
- 9 GUO, R. M., Development, verification, and application of a statistical roll wear model of rolling mills. In: PROCEEDINGS OF 6TH INTERNATIONAL ROLLING CONFERENCE, Düsseldorf, June, pp. 65-77, 1994.

UTILIZATION OF HSS ROLLS AT THE CSN HOT MILL¹

Danilo Guelli Gonçalves de Oliveira²
Sebastião José Furtado de Azevedo³
Nilber Bhering Cordeiro⁴
Felipe Gustavo Bernardes⁵
Renato Rufino Xavier⁶
Carlos Henrique Silva⁷

Abstract

High speed steel rolls have replaced the high chromium iron rolls in the first stands of hot strip mills, showing very good results for quality and productivity improvements. However, many hot strip mills have experienced difficulties on the implementation of these roll materials. The understanding of the wear mechanisms in the first stands and the adjustment of the wear prediction model are the utmost importance for the successful high speed steel rolls implementation. This paper presents the surface characterization and the wear model adjustments for high speed steel rolls utilization in the Hot Strip Mill at CSN.

Key words: High speed steels rolls; Multi-component white cast iron rolls; Hot strip rolling; Mill rolls.

¹ *Paper to be presented at 42^o Seminário de Laminação – Processes, Rolled and Coated Products, October 25th – 28th, Santos, SP.*

² *Metallurgical Engineer, Roll Shop Manager, CSN Volta Redonda RJ.*

³ *Specialist Engineer, Roll Shop, CSN, Volta Redonda, RJ.*

⁴ *MSc. Production Engineer, Hot Strip Mill, CSN, Volta Redonda, RJ.*

⁵ *Mechanical Engineer, Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP.*

⁶ *Metallurgical Engineer, Development and Application Supervisor, Aços Villares, Pindamonhangaba, SP.*

⁷ *Mechanical Engineer, Sales Assistant, Aços Villares, Pindamonhangaba, SP*