

AJUSTE DO MODELO MATEMÁTICO DE DESGASTE DOS CILINDROS DE TRABALHO DA LAMINAÇÃO A QUENTE DA ACESITA ⁽¹⁾

*Arísio de Abreu Barbosa ⁽²⁾
André Luiz Gonçalves Santos ⁽³⁾
Ricardo Pinheiro Domingues ⁽⁴⁾*

RESUMO

Neste trabalho estabeleceu-se uma metodologia que permitiu (1) conhecer como ocorre a evolução do desgaste dos cilindros de trabalho, (2) avaliar o desempenho do modelo de desgaste até então empregado e (3) fazer os ajustes necessários nesse modelo. O coeficiente de desgaste do modelo foi recalculado pelo método inverso: dados reais de laminação que influenciam o desgaste foram extraídos diretamente do sistema supervisório e o desgaste dos cilindros foi medido a partir dos perfis de desgaste emitidos por um perfilômetro acoplado à retificadora de cilindros. A metodologia estabelecida mostrou-se consistente e facilmente aplicável na laminação, além de possibilitar uma avaliação quantitativa mais realística do desgaste dos cilindros. Mudanças no processo de laminação e a conseqüente melhoria de desempenho dos cilindros possibilitaram corrigir a distorção existente no coeficiente de desgaste empregado anteriormente no modelo do laminador. A obtenção do desgaste dos cilindros por meio da medição de seu perfil de desgaste viabilizou a coleta de dados num grande número de montagens, sem afetar o tempo de retificação. O ajuste feito no coeficiente de desgaste através da metodologia aqui desenvolvida, já implantado no sistema supervisório do Laminador Steckel da Acesita, proporcionou uma melhoria significativa no cálculo do desgaste dos cilindros de trabalho.

Palavras-chave: Modelo de Desgaste, Cilindros de trabalho, Laminador Steckel.

⁽¹⁾ *Contribuição Técnica ao 41º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Joinville, SC, 26 a 28 de outubro de 2004.*

⁽²⁾ *Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, M.Sc., Gerência Técnica do Controle de Processo da Laminação a Quente da ACESITA; Timóteo - MG.*

⁽³⁾ *Membro da ABM; Graduando em julho de 2004 no Curso de Engenharia Metalúrgica, Escola de Minas / UFOP; Ouro Preto - MG.*

⁽⁴⁾ *Membro da ABM; Eng.º Metalurgista, M.Sc., Dr., Professor no DEMET / Escola de Minas / UFOP e na REDEMAT; Ouro Preto - MG.*

1. INTRODUÇÃO

O desgaste dos cilindros de laminação sempre foi alvo de estudos, desde o início da produção dos primeiros perfis e chapas, por razões óbvias, mas que vale a pena citar. Primeiramente, trata-se de um insumo bastante caro. No caso da Acesita, e possivelmente também em outras plantas, os cilindros representam o terceiro mais significativo item de despesa entre todos os insumos utilizados no processo de transformação de placas em chapas ou bobinas, perdendo apenas para GLP e energia elétrica.

Além disso, a operação de substituição dos cilindros do laminador, independentemente do motivo, gera paradas no processo produtivo, diminuindo a produtividade da linha, aumentando o consumo de combustível e quebrando o ritmo de produção. A laminação a quente da Acesita perde, por ano, aproximadamente 200 horas com trocas de cilindros de trabalho.

Por último, outro aspecto também muito importante é a influência dos cilindros de trabalho na qualidade do produto laminado, seja no aspecto superficial, seja no dimensional ou no de forma. Estando os cilindros de trabalho em contato direto com a tira, sua rugosidade superficial é transmitida integralmente, ou pelo menos em parte, para a superfície da tira e o desgaste excessivo dos cilindros pode introduzir defeitos do tipo variação da espessura transversal e/ou defeitos de planicidade, como ondulações de bordas.

Diante deste cenário, os cilindros de laminação sofreram, ao longo das últimas décadas, uma verdadeira revolução, tanto por parte dos fabricantes quanto por parte dos usuários. Os fabricantes de cilindros vêm, a cada ano, desenvolvendo novas ligas e aprimorando seus processos de fabricação, com o objetivo de tornar os cilindros cada vez mais resistentes ao desgaste, às trincas e aos choques mecânicos. Por outro lado, os usuários vêm tentando otimizar sua aplicação, não somente para reduzir os custos, mas também no sentido de melhorar a qualidade de seus produtos.

Este trabalho foi desenvolvido com foco na utilização mais racional dos cilindros de trabalho do Laminador Steckel da Acesita, ou seja, objetivou-se estabelecer uma metodologia consistente para, primeiramente, conhecer com mais profundidade a maneira como ocorre a evolução do desgaste desses cilindros, de modo a permitir a avaliação do desempenho do modelo de desgaste até então empregado no sistema supervisório do laminador e fazer os ajustes eventualmente necessários.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 O material analisado

Apesar de ser o grupo de aços de menor volume de produção da Acesita, este trabalho foi direcionado aos aços ao carbono, devido à maior diversidade de produto e processo, o que torna o modelo de desgaste de cilindros um recurso ainda mais importante no processo de laminação. Este fato fica mais claro se tomarmos, como exemplo, o de uma situação oposta à dos aços ao carbono: a laminação do aço silício GO, cujo processo é constante em termos de temperatura, velocidades, plano de passes e dimensões de placas e bobinas. Em tese, o aço silício de grão

orientado, em particular, não precisaria de um modelo de desgaste de cilindros, pois uma simples correlação entre o desgaste e o número de tiras laminadas forneceria uma boa estimativa para o desgaste.

Quanto ao processo, os aços ao carbono são laminados em dois padrões diferentes de temperatura de placa: padrão “A” para temperatura de placa mais alta e padrão “B” para temperatura de placa mais baixa. O processamento dos aços ao carbono segundo o padrão “A” ou “B” se dá em função do tipo de aço e da espessura final.

A tabela 1 apresenta a relação de todos os tipos de aços, com suas respectivas características dimensionais e de processo, envolvidos na análise do desgaste dos cilindros de trabalho.

TABELA 1
Relação dos aços utilizados na análise do desgaste dos cilindros de trabalho do Laminador Steckel.

Cod. Aço SAE	Padrão	Largura (mm)	Espessura (mm)
1050	A - B	1000 – 1200	2,0 – 4,5
1060	B	1200	6,0
1070	A	1000 – 1100	2,25
1085	B	1220	3,0 – 4,5 – 6,0
1075	A	1100	2,0
1075	A - B	1000 – 1200	2,0 – 3,75 – 4,5
1095	A - B	1050	2,25 – 6,0
6158	B	1200	5,0
6158	B	1200	3,5 – 4,5
8660	B	1220	3,5
15B30	B	1200 – 1430	3,0 – 6,0

2.2 Os cilindros de trabalho do laminador Steckel

Atualmente, a Acesita tem trabalhado com cilindros fabricados pela Villares (Brasil), Akers (Suécia) e ESW (Áustria), sendo a Villares o fornecedor com a maior participação. O cilindro de cada fornecedor tem suas particularidades, seja no teor dos elementos de liga, na microestrutura e seus constituintes, mas todos eles se enquadram em uma mesma categoria de cilindros para aplicação em cadeiras acabadoras, no caso de laminadores contínuos, ou para laminadores do tipo Steckel. São cilindros de ferro fundido branco com altos teores de cromo e níquel e fabricados através do processo de centrifugação.

2.3 A medição do desgaste dos cilindros

A medição do desgaste feita através de um micrômetro consiste na aferição do diâmetro do cilindro após a retífica, ou seja, antes da sua utilização no laminador e após a laminação. É importante lembrar que a medição após a laminação deve ser feita com o cilindro à temperatura ambiente, para que não sofra influência da coroa térmica. Assim, o desgaste é obtido pela diferença entre o diâmetro antes e após a laminação.

Entretanto, a medição do desgaste utilizando-se o micrômetro mostrou-se pouco prática, pois o micrômetro é muito grande, o que dificulta bastante o seu manuseio. Para resolver este problema, foi estabelecido um método indireto para obtenção do desgaste, através dos perfis de desgaste, conforme mostrado na figura 1, obtidos através de um perfilômetro acoplado na retificadora de cilindros.

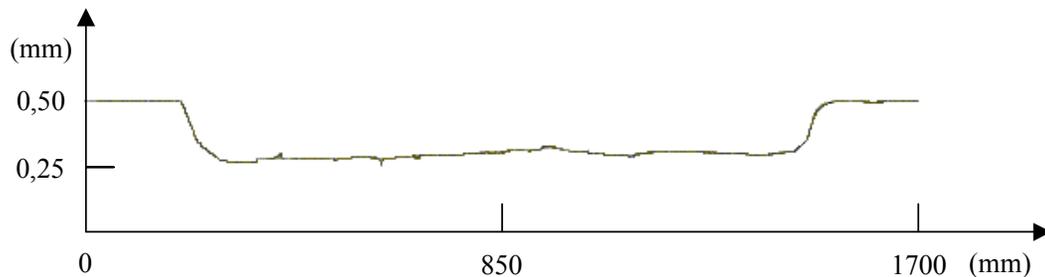


Figura 1 - Perfil de desgaste de um cilindro de trabalho

Para se obter o valor do desgaste do cilindro através de um perfil, como o da figura 1, foi estabelecido o seguinte procedimento. Traça-se uma linha, paralela ao eixo do cilindro, tangente às extremidades do cilindro, nas regiões que não sofreram desgaste. Essa linha representa o perfil inicial do cilindro, sem coroamento, após a retificação. Mede-se, a distância entre a linha traçada e o perfil do cilindro em três pontos ao longo do canal de desgaste (figura 2). Calcula-se a média desses três pontos e multiplica-se este valor pela constante da equação de regressão linear, obtida pela correlação entre o valor de desgaste medido através do micrômetro e o medido por meio do perfil de desgaste. Finalmente, para se obter o desgaste do cilindro, deve-se considerar a coroa mecânica inicial da montagem. A coroa mecânica inicial deve ser somada, se for positiva, ou subtraída, se for negativa.

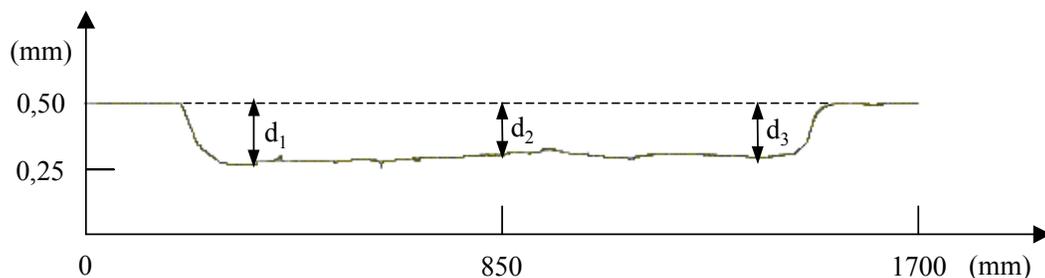


Figura 2 - Desenho esquemático das posições onde foram realizadas as medidas para cálculo da média do canal de desgaste.

2.4 Obtenção dos parâmetros de laminação que influenciam o desgaste

O desgaste dos cilindros, no processo de laminação a quente, é um fenômeno tribológico complexo, dado o grande número de variáveis que interagem simultaneamente. Nessa fase, além dos parâmetros utilizados pelo modelo de desgaste atual, procura-se coletar outros parâmetros que, segundo a literatura, influenciam o desgaste dos cilindros, tais como: velocidade de laminação, temperatura da tira, vazão de água do sistema de refrigeração, etc.

A coleta dos parâmetros de laminação é facilitada graças ao nível de automação da laminação a quente da Acesita. Todos os dados são extraídos diretamente do sistema supervisorio, nível II. Para isso, é necessária a inclusão de algumas linhas de programa, no próprio modelo de desgaste. A função dessa alteração é gerar, para cada bobina laminada, uma tabela com os parâmetros selecionados.

2.5 O modelo matemático para cálculo de desgaste

O modelamento físico do desgaste dos cilindros de trabalho de um laminador a quente é bastante complexo, visto a grande quantidade de parâmetros envolvidos durante a laminação que interferem no desgaste. Conforme colocado por Favery (1986, p.36) [1] “o atrito e o desgaste não são propriedades dos materiais e devem ser entendidos como processos complexos, pois dependem de uma série de parâmetros”. Para contornar esta limitação, tem-se utilizado modelos obtidos por correlação através de dados experimentais, que são de uso específico de cada planta industrial (FARIA, 2001) [2]. A seguir, é apresentado o modelo de desgaste do laminador Steckel da Acesita.

O modelo matemático de desgaste da Acesita é uma sub-rotina, denominada USUTR, do modelo matemático de laminação PLATE^(*) (KAVERNER METALS CLECIM, 1977) [3]. Esta sub-rotina é executada após o final de cada passe de laminação. O desgaste é calculado somente para a região do cilindro em contato com a tira. Para isso, o cilindro é dividido em vários segmentos “IT” (figura 3).

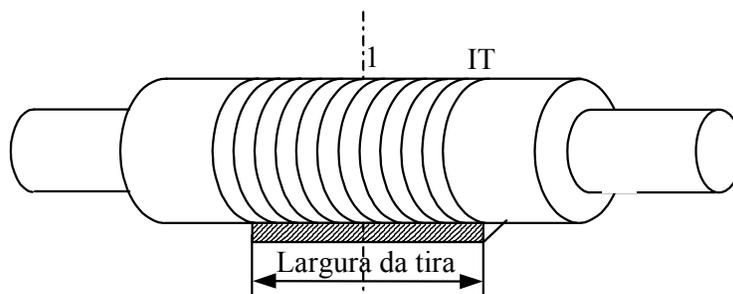


Figura 3 - Seccionamento do cilindro para cálculo do desgaste; 1 = Segmento central do cilindro; IT = número de segmentos em contato com a tira. (KAVERNER METALS CLECIM, 1977)

O desgaste de cada segmento do cilindro é calculado pela equação (1):

$$Desgaste = K \times \sum_{i=1}^n \frac{F_i L_i}{2\pi R W_i} \times \alpha(j) \quad (1)$$

onde i é o número do passe de laminação, K é o coeficiente de desgaste, F é a força de laminação, L é o comprimento laminado, R é o raio do cilindro, W é a largura da tira, n é o número total de passes e $\alpha(j)$ é o coeficiente de forma por segmento, ou seja: $\alpha(j) = 1$ para os segmentos em contato com a tira e $\alpha(j) = 0$ para os segmentos que não têm contato com a tira.

^(*) Iniciais em francês de *Programme de Laminage Automatisé pour Tôle Épaisse*: Programa de Laminação Automatizado para Chapas Grossas.

2.6 Ajuste do modelo de desgaste

De posse dos parâmetros de laminação e do desgaste dos cilindros superior e inferior, referentes à utilização do par de cilindros no laminador, procede-se o cálculo do coeficiente de desgaste do modelo. Para tanto, o coeficiente K da equação (1) é evidenciado e as demais variáveis são substituídas com os valores conhecidos, conforme a equação (2):

$$K = \frac{\text{Desgaste}}{\sum_{i=1}^n \frac{F_i L_i}{2\pi R W_i} \times \alpha(j)} \quad (2)$$

Desta forma, o valor do coeficiente K é calculado para cada utilização do par de cilindros no laminador. Para a obtenção do novo valor corrigido do coeficiente de desgaste, é calculada a média de K das utilizações de cilindros.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de regressão da medição do desgaste dos cilindros de trabalho

Para validar a obtenção do desgaste dos cilindros de trabalho através do seu perfil de desgaste, fornecido pelo perfilômetro, em relação ao desgaste medido diretamente com um micrômetro, correlacionaram-se 29 medidas feitas utilizando-se os dois métodos.

Obteve-se um coeficiente de correlação de 97%, demonstrando uma estreita relação entre os dois métodos, o que possibilita obter o desgaste do cilindro de trabalho por meio dos perfis de desgaste fornecidos pelo perfilômetro, sem afetar significativamente os resultados deste trabalho.

3.2 As montagens de cilindros analisadas

Foram analisadas 47 montagens de cilindros, no período de 28/10/2002 a 12/02/2003, escolhidas aleatoriamente. Nesse período, foi laminada a maioria dos aços ao carbono produzidos pela Acesita. Evidentemente, as montagens de cilindros que apresentaram dados inconsistentes foram eliminadas, mas, mesmo assim, a amostra pode ser considerada bem representativa.

3.3 O coeficiente de desgaste K

Aplicando-se o método descrito no item 2.6, o coeficiente de desgaste K teve que ser alterado de $2,40 \times 10^{-5}$ para $2,98 \times 10^{-5}$, valor este obtido pela média dos valores de K recalculado para cada montagem de cilindro, no período de 28/10/2002 a 12/02/2003 (figura 4). Considerando-se a equação (1), utilizada pelo modelo PLATE para calcular o desgaste dos cilindros de trabalho, é notório que houve um aumento, em média, de 24% no desgaste.

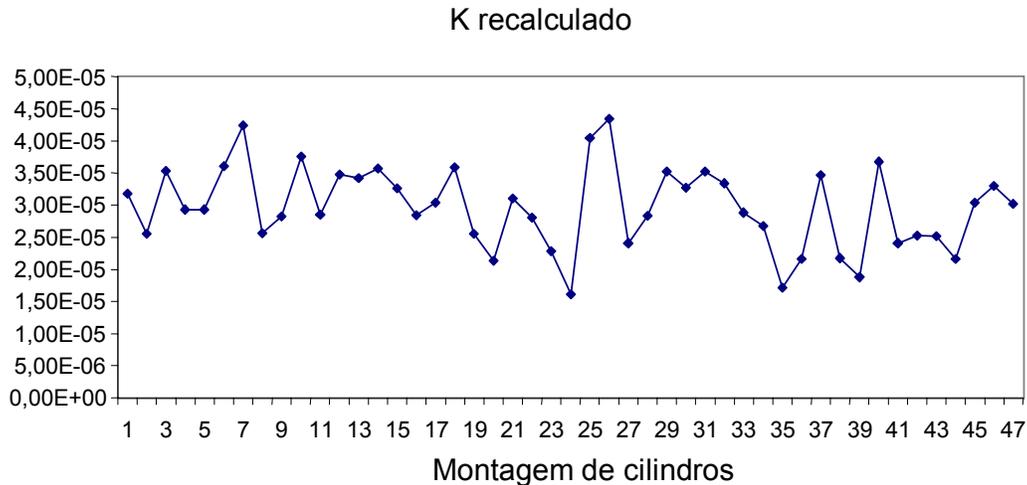


Figura 4 - Coeficiente K recalculado por montagem de cilindros

Baseando-se na bibliografia estudada, podem-se citar, aqui, alguns fatores que certamente levaram a esse acréscimo no desgaste dos cilindros de trabalho do laminador Steckel. É importante lembrar que, quando o modelo PLATE foi comissionado, ou seja, quando os vários coeficientes de suas equações foram ajustados, a laminação a quente da Acesita processava bobinas com peso médio de 11,6t. Com a implantação, em março de 2002, do projeto “Bobina Pesada”, o peso das bobinas foi aumentando paulatinamente, chegando ao final daquele ano a um valor médio de 16,7t.

O aumento do peso das bobinas implicou algumas mudanças no processo que podem, segundo a literatura, gerar um maior desgaste dos cilindros de trabalho. A seguir, discutem-se as principais variáveis investigadas:

A temperatura do esboço passou de 947 °C para 1022 °C, devido ao acréscimo na espessura, que saiu de 15,5 mm para 25,0 mm e, também, à redução de dois passes no número total de passes no laminador desbastador, que passou de 9 para 7 passes, em alguns casos. Segundo os estudos de Williams e Boxall (1965) [4], a temperaturas acima de 900°C tem-se, na superfície da tira, uma maior proporção de óxidos do tipo Fe_3O_4 e Fe_2O_3 , de maior dureza, do que de óxido do tipo FeO , de dureza mais baixa, o que favorece o desgaste por abrasão.

Com o aumento da espessura do esboço, foi necessário aumentar as reduções no Steckel, principalmente nos passes que apresentam temperaturas mais altas (primeiros). Consegue-se, assim, evitar o aumento do número total de passes. Tal aumento é indesejável porque diminui a produtividade do laminador e afeta, também, a qualidade do produto final; por exemplo: maior formação de carepa e maior dificuldade em se laminar as pontas (cabeça e cauda), devido à queda de temperatura nessa região, típica de laminadores reversíveis do tipo Steckel. Logo, redução maior implica um maior arco de contato entre tira e cilindro que, por sua vez, aumentará o desgaste dos cilindros, conforme modelo de desgaste proposto por Shatalov et al. (1987) [5]. Para se ter uma idéia, a redução média no Steckel passou de 2,34 mm para 4,14 mm.

Com o aumento das reduções, era de se esperar também um aumento na força de laminação. Entretanto, o aumento da temperatura do esboço, na ordem de 75 °C em média, atuou de maneira favorável, fazendo com que a força de laminação não aumentasse. Tomando-se as produções dos meses de outubro/2000 e outubro/2002

como referência, a força de laminação média dos passes no Steckel, para os aços carbono, praticamente não apresentou alteração: 1572 t em outubro/2000 contra 1542 t em outubro/2002. Assim, baseada na relação direta da força de laminação com o desgaste dos cilindros, apresentada tanto pelo modelo de Shatalov [5], quanto pelo modelo PLATE da Acesita – equação (1) – a força média de laminação não aumentou e, por consequência, não contribuiu para o aumento do desgaste dos cilindros de trabalho do Steckel.

Não se sabe, ao certo, o quanto a força de contraflexão afeta o desgaste dos cilindros de trabalho, mas, segundo Spuzic (1994) [6], a força de contraflexão, utilizada para ajuste da planicidade da tira, acelera a propagação de microtrincas originadas na superfície do cilindro, devidas à fadiga térmica, contribuindo, assim, para aumentar o desgaste.

Os valores das forças de contraflexão aplicadas nos diversos passes de laminação não foram coletados, mas foi avaliado se houve, ou não, aumento dessas forças, por meio da diferença, ΔF , entre os valores das forças de laminação no corpo e nas extremidades das tiras. Estas forças são usadas para compensar a maior flexão dos cilindros ao laminar as extremidades da tira, devido ao aumento da força de laminação decorrente da queda de temperatura. Temperaturas mais baixas nas extremidades, em relação ao corpo da tira, são características inerentes ao processo de laminação em laminadores Steckel.

A análise dos valores de ΔF para bobinas leves e pesadas, mostrou que, em relação à cabeça, houve um aumento médio de 50t e, em relação à cauda, diminuiu em média 50t. Logo, não houve aumento significativo da força de contraflexão para bobinas mais pesadas.

3.4 O desgaste calculado com o coeficiente corrigido

Uma vez estabelecido o novo coeficiente de desgaste dos cilindros de trabalho, o modelo de desgaste foi validado para montagens de cilindros posteriores que laminaram aços ao carbono. O desempenho do modelo pode ser visto na fig. 2, para 19 montagens de cilindros. O período amostrado foi de 26 a 28/03/2003.

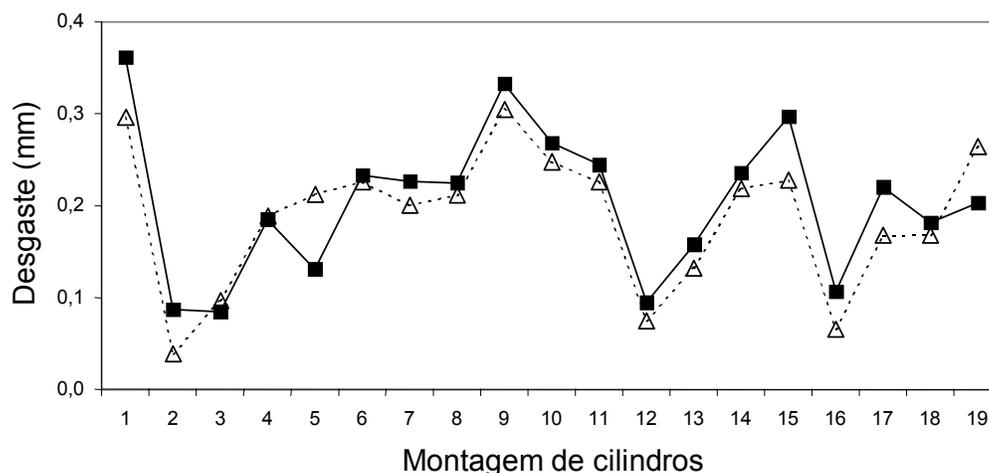


Figura 5 - Comparação entre o desgaste real dos cilindros (—■—) e o desgaste calculado com o coeficiente k corrigido (---△---).

É notória a boa aproximação do desgaste calculado pelo modelo corrigido com o desgaste real dos cilindros. Com base neste bom resultado, em março de 2003, o coeficiente K, do modelo de desgaste, foi atualizado.

4. CONCLUSÃO

A metodologia estabelecida mostrou-se consistente e de fácil aplicação na laminação a quente, capaz de avaliar quantitativamente o desgaste dos cilindros de trabalho. Foi possível corrigir a distorção existente no coeficiente de desgaste do modelo atual, provocada pelas mudanças no processo de laminação e melhoria de desempenho dos cilindros. A obtenção do desgaste dos cilindros, por meio de seu perfil de desgaste, viabilizou a coleta de dados, em um grande número de montagens, sem afetar o tempo de retificação. O ajuste feito no coeficiente de desgaste, por meio da metodologia apresentada, proporcionou uma melhoria significativa no cálculo do desgaste dos cilindros de trabalho.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FAVERY JR., D. M. Tribologia e os fundamentos de desgaste. *Máquinas e Metais*, São Paulo, p. 36-39, maio 1986.
- [2] FARIA, Geraldo Magela de. *Análise de perfil e forma de tiras laminadas a quente*. 2001. 119 p. Dissertação (Mestrado em Metalurgia de Conformação) Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.
- [3] KAVERNER METALS CLECIM. P.L.A.T.E Model, 1. ed, 1977, 173 p.
- [4] WILLIAMS, R. V., BOXALL, G. M. Roll surface deterioration in hot strip mills. *Journal of the Iron and Steel Institute*, p. 369-377, Apr. 1965.
- [5] SHATALOV, R. L. et al. Development of structure and construction of regression model of sheet mill work rolls, *Steel in the USSR*, v. 17, p. 416-419, Sep. 1987.
- [6] SPUZIC, K. N. et al. Wear of hot rolling mill rolls: an overview. *WEAR*, v. 176, p. 261-271, Apr. 1994.

TUNING OF ACESITA'S HOT ROLLING WORK-ROLLS WEARING MODEL ⁽¹⁾

*Arísio de Abreu Barbosa ⁽²⁾
André Luiz Gonçalves Santos ⁽³⁾
Ricardo Pinheiro Domingues ⁽⁴⁾*

ABSTRACT

This study has established a methodology that allowed (1) to know in more details the work-rolls wearing evolution, (2) to evaluate the performance of model's wear coefficient until then employed and (3) to do the necessary fittings in that model. The model's wear coefficient was recalculated by the inverse method: real rolling data, that influence the wear, were directly extracted from the supervisory system and the work-rolls wearing was measured starting from the wear profiles provided by a profile meter coupled to the roll grinding machine. The established methodology was shown consistent and easily applicable to the hot rolling process, besides making possible a more realistic quantitative evaluation of the work-rolls wearing. Changes in the rolling process, and the consequent improvement in the work-rolls performance, made possible to correct the existent distortion in the wear coefficient used previously in the rolling mill supervisory model. The determination of the work-rolls wearing, by measuring the rolls' wear profiles, made possible the collection of data in a great number of work roll sets, at a minimum roll grinding delay time. The wear coefficient tuning developed in this study, already implanted in the Acesita's Steckel Rolling Mill supervisory system, provided a significant improvement in the work-rolls wearing calculation.

Keywords: Wear model, Work rolls, Steckel rolling mill

⁽¹⁾ *Technical contribution to the 41st Rolling Seminar – Processes, Rolled and Coated Products - International, Joinville, SC, Brazil – October 26 to 28, 2004.*

⁽²⁾ *ABM Member; Mechanical Engineer, M.Sc., ACESITA Hot Strip Mill Process Control Technical Department; Timóteo, MG, Brazil.*

⁽³⁾ *ABM Member, Metallurgical Engineering Student at UFOP School of Mines, Ouro Preto, MG, Brazil.*

⁽⁴⁾ *ABM Member; Metallurgical Engineer, M.Sc., Dr., Associate Professor at UFOP School of Mines and at REDEMAT Materials Engineering Post Graduate Program, Ouro Preto, MG, Brazil.*