

DESEMPENHO DOS CILINDROS EQUALIZER NO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE DA CSN¹

Luiz Alberto Pereira Campbell²
Sebastião José Furtado de Azevedo³
Danilo Guelli Gonçalves de Oliveira⁴
Luciano José Farias Nicodemos⁵
Felipe Gustavo Bernardes⁶
Cláudia Regina Serantoni⁷
Marco Aurélio Rosso Santana Mendes⁸
Michelle Vilela Melo⁹

Resumo

O processo de laminação está em constante evolução na busca de melhorias de produtividade e qualidade, representadas principalmente pela forma e condição superficial da tira. Estas características são diretamente influenciadas pelos cilindros de laminação. Atualmente os cilindros utilizados nas últimas cadeiras do trem acabador são de ferro fundido de coquilhamento indefinido (ICDP) e representam uma limitação no tamanho das campanhas de laminação. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um cilindro em substituição ao ICDP, que apresente maior resistência à degradação superficial, possibilitando um aumento na campanha de laminação. A liga denominada "Equalizer" foi fundida em centrífuga piloto e caracterizada quanto à microestrutura, propriedades químicas, desgaste, fadiga térmica e oxidação. A partir dos resultados obtidos, foram fundidos cilindros protótipos para utilização nas cadeiras n.º 5 e n.º 6 do Laminador de Tiras a Quente n.º 2 (LTQ-2) da CSN. Os resultados obtidos em laboratório apresentaram melhorias significativas de resistência à fadiga térmica e abrasão em relação ao ICDP. O desempenho dos cilindros Equalizer após a utilização no Laminador foi superior aos obtidos pelos cilindros ICDP. É possível concluir que os cilindros Equalizer são uma alternativa viável ao aumento das campanhas de laminação, possibilitando um aumento de produtividade do Laminador.

Palavras-chave: Cilindros; Desgaste; Laminação a quente; Produtividade LTQ.

PERFORMANCE OF EQUALIZER ROLLS ON THE HOT STRIP MILL FROM CSN

Abstract

A constant evolution is observed in the rolling process looking for productivity and strip quality (dimension and surface quality). The rolls performances influence directly both of these characteristics in terms of wear performance and surface quality. Nowadays, the indefinite chill cast iron rolls (ICDP) are applied in the last stands of the finishing mill and represent a threshold in the extent of the rolling mill campaigns. The objective of this paper was to develop a roll to replace the ICDP and allowing an increase in the rolling mill campaign by means of best superficial degradation resistance. It was developed an alloy named Equalizer. It was done after to perform tests at a pilot centrifuge machine, to characterize the microstructure and to measure the wear, thermal fatigue and oxidation resistance. After that rolls prototypes were produced to be tested on the stands F5 and F6 in the CSN's Hot Strip Mill. The laboratory results showed significant improvements on thermal fatigue resistance and abrasion in comparison to ICDP. The performance of Equalizer after employment on the rolling mill was superior to that obtained by ICDP rolls. It was possible to observe that the Equalizer rolls are a viable alternative to increase rolling campaigns, allowing a expansion on the rolling mill productivity.

Key words: Roll; Wear; Hot rolling; HSM productivity.

¹ Contribuição técnica ao 45º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 21 a 24 de outubro de 2008, Ipojuca - Porto de Galinhas - PE

² Eng. Metalurgista, Eng. Especialista da Gerência de Cilindros da Companhia Siderúrgica Nacional

³ Eng. Metalurgista, Gerente, Gerência de Cilindros da Companhia Siderúrgica Nacional

⁴ Eng. Metalurgista, Gerente, Gerência de Laminados a Quente da Companhia Siderúrgica Nacional

⁵ Técnico Metalúrgico, Técnico de Desenvol., Gerência Laminados a Quente, Companhia Siderúrgica Nacional

⁶ M.Sc. Eng. Mecânica, Gestor de Contas de Cilindros de Laminação, Aços Villares/Sidenor, Pindamonhangaba, SP

⁷ D.Sc. Engenharia Materiais, Supervisora de Desenvolvimento, Departamento de Desenvolvimento Aços Villares/Sidenor, Pindamonhangaba, SP

⁸ Engenheiro Mecânico, Mestrando, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP

⁹ Engenheira Metalurgista, Estagiária de Engenharia da Gerência de Cilindros da Companhia Siderúrgica Nacional

1 INTRODUÇÃO

O processo de laminação está em constante evolução na busca de melhorias de produtividade e qualidade, particularmente no que diz respeito à forma e condição superficial da tira. Ambos os aspectos dependem diretamente dos cilindros de laminação utilizados. O primeiro é relacionado ao tamanho da campanha de laminação e o segundo à qualidade superficial do cilindro.

No fim dos anos 60, os fornecedores de cilindros de laminação começaram a utilizar uma técnica nova para produzir cilindros, o processo de fundição centrífuga. Esta técnica permitiu a produção de cilindros com 2 tipos de materiais diferentes, um no núcleo e outro na casca. A melhoria dos materiais aplicados à casca do cilindro conduziu a um aumento no desempenho dos cilindros, melhorou a qualidade da tira, e reduziu custos de manutenção.

A evolução destes materiais passou pela utilização do ferro fundido branco de alto cromo, aço de alto cromo, ferro fundido de coquilhamento indefinido e mais recentemente chegando no aço rápido (HSS).

Atualmente os cilindros HSS são utilizados nas primeiras cadeiras do trem acabador do Laminador de Tira a Quente (LTQ) e os cilindros de ferro fundido de coquilhamento indefinido (ICDP) nas últimas cadeiras. Em comparação com os outros materiais, os cilindros HSS apresentam melhor dureza a quente e maior resistência ao desgaste.

Nos últimos anos os cilindros ICDP também têm passado por evoluções significativas. Sua microestrutura tem sido otimizada em termos de aumento de dureza na matriz, mudanças na fração volumétrica, forma e distribuição de carbonetos e grafitas.⁽¹⁻³⁾ Com isso os cilindros ICDP atingiram uma relação de resistência ao desgaste, condutibilidade térmica e dureza que o leva a ser o material mais recomendado para utilização nas últimas cadeiras do LTQ.

A grafita presente na microestrutura destes cilindros é indicada como um elemento importante no sucesso deste material, sua presença na superfície do material melhora a resistência ao choque térmico e fadiga térmica devido a sua condutibilidade térmica mais elevada. Igualmente reduz o módulo Young diminuindo a tensão durante a laminação. O efeito da grafita como um lubrificante sólido foi observado em algumas experiências para estudar o fenômeno de sticking.⁽⁴⁾ Os testes recentes mostraram que a taxa de propagação de trincas é mais baixa nos cilindros ICDP do que no Alto Cromo ou em HSS e estes resultados foram associados à presença da grafita.⁽⁵⁾

Mesmo com todas estas melhorias a campanha do laminador ainda é limitada pelo desempenho dos cilindros ICDP nas últimas cadeiras.⁽⁶⁾

Embora os ganhos decorrentes de melhorias no desempenho de cilindros tenham possibilitado evoluções significativas, conforme descrito acima, muito ainda se pode fazer no sentido de aumentar a disponibilidade e a produtividade do laminador.

Por este motivo foi desenvolvido o cilindro "Equalizer", projetado para substituir os cilindros ICDP nas últimas cadeiras do LTQ. Neste trabalho são mostrados os resultados obtidos tanto no desenvolvimento quanto na utilização deste produto no LTQ-2 da CSN.

2 METODOLOGIA

2.1 Desenvolvimento em Laboratório

Utilizando os recursos do Centro de Desenvolvimento de Cilindros, foram conduzidos experimentos com diferentes composições químicas. As ligas foram fundidas em uma centrífuga piloto (Figura 1).

Foram realizadas caracterizações qualitativa e quantitativa da microestrutura e ensaios de microdureza da matriz. Também foram realizados ensaios de fadiga térmica, desgaste abrasivo e flexão a quatro pontos.

A microestrutura foi caracterizada utilizando-se um microscópio ótico. Mediu-se a fração volumétrica de carbonetos eutéticos, distância livre entre carbonetos e continuidade da rede de carbonetos. Estas medidas para caracterização da microestrutura foram realizadas utilizando-se um programa de análise de imagens. As medidas foram realizadas em amostras submetidas à ampliação de 500X. Cada medida representa a média encontrada em 30 campos analisados.

A distribuição de carbonetos eutéticos foi caracterizada pelo parâmetro da continuidade (C). A continuidade foi determinada utilizando-se a função chamada “esqueleto”. Esta função é tal que quanto mais contínua a rede de carbonetos, maior o valor do C.

Foram realizadas medidas da dureza da matriz utilizando-se um durômetro Bühler com carga 100gf e a ampliação x1000 (5 medidas por a amostra).

Os testes de fadiga térmicas foram realizados em um equipamento específico, conforme mostra a foto da Figura 2.

Este equipamento permite a realização de diversos ciclos de aquecimento e resfriamento de um corpo de prova. O aquecimento do corpo de prova é realizado por meio de uma bobina indutiva. O resfriamento é realizado via a submersão do corpo de prova em um tanque com água. O equipamento realiza o movimento do corpo de prova via um sistema pneumático e permite controle do tempo em cada etapa do ciclo e da temperatura da bobina e do tanque de água.



Figura 1. Foto da centrífuga piloto



Figura 2 – Foto do equipamento de teste de fadiga térmica

Após o ensaio de fadiga térmica foram realizados ensaio de líquido penetrante na seção transversal do corpo de prova.

Foram medidas a quantidade e as profundidades das trincas, os resultados foram apresentados em termos de densidade de trincas (equação 1) e da profundidade máxima das trincas (Pmax).

$$Dt = \frac{Nt}{0,25 \cdot (\pi \cdot d)} \quad : \text{Equação [1]}$$

onde Nt representa o número de trincas e d é o diâmetro da amostra.

Estas medições foram realizadas utilizando-se um microscópio ótico com ampliações de 100X e 500X.

Os testes de desgaste abrasivos foram feitos em uma máquina de desgaste, utilizando uma rotação de 60 RPM e carga de 4,6 N. Para cada composição química, 3 medidas foram executadas. Como contra corpo foram utilizadas lixas abrasivas com grãos de alumina com granulometria 320. A distância total percorrida no ensaio foi 423 m.

Os testes de flexão foram conduzidos utilizando uma configuração de flexão a 4 pontos, com velocidade de 0,5 mm/min. A aquisição de dados foi obtida a cada 0,5 s dentro de uma escala de 25 KN.

2.2 Desenvolvimento no Laminador

O Laminador de Tiras a Quente da CSN possui capacidade de produção nominal de 5,4 milhões de t/ano de bobinas a quente com espessuras que variam de 1,2 mm a 12,7 mm e largura de 680 mm a 1.575 mm. A linha é composta de 04 fornos de reaquecimento de placa de 250 t/h, 04 laminadores desbastadores, sendo 1 laminador duo e 3 quádruo, 4 laminadores verticais, um trem acabador de 7 cadeiras, uma mesa de resfriamento e 3 bobinadoras

O laminador possui as mais recentes tecnologias para controles de temperatura, dimensão, forma e qualidade superficial das tiras. No trem acabador, dispõe-se de recursos como resfriamento entre cadeiras, controle automático de espessura, força de *bending*, *shifting* e cilindros com perfil em curva para um sistema conhecido como CNP, *Combined Numerical Profile*.

Com a crescente produção de materiais com espessura fina, os cilindros tem sido cada vez mais submetidos à maiores esforços durante a laminação.

Conseqüentemente, deve-se ter um maior cuidado com os cilindros e um trabalho eficaz na oficina de cilindros para inspeção e preparação da superfície dos mesmos. Por outro lado, os fabricantes de cilindros devem buscar desenvolver materiais mais resistentes ao desgaste e que, ao mesmo tempo, sejam tenazes para suportar os esforços de laminação sem a ocorrência de acidentes.

A unidade de cilindros responsável pelo abastecimento do laminador de Tiras a Quente dispõe de instalações e equipamentos compatíveis com o que existe de referência para realização de inspeções e preparações de cilindros. Possui 3 retificadoras de cilindros com operação manual e 3 retificadoras automáticas equipadas com *Eddy Current* para detecção de trincas e marcas nos cilindros de trabalho. A tecnologia de ultra-som para detecção de defeitos sub-superficiais e defeitos internos nos cilindros não é instalada nas retificadoras, mas é realizada por uma equipe altamente qualificada que inspeciona os cilindros após o processo de retificação. A equipe de inspeção é de vital importância na garantia da qualidade dos conjuntos de cilindros enviados ao laminador.

Foram realizados testes no laminador nas cadeiras n.º 5 (F-5) e n.º 6 (F-6) utilizando 2 pares de cilindros Equalizer, os resultados obtidos foram avaliados em termos de qualidade superficial, desempenho dos cilindros (t/mm) e mecanismos de degradação encontrados.

Os cilindros foram usados em cinco tipos de campanhas de laminação diferentes: G, E, W, M e Y. Na tabela 01 mostra as características destas campanhas em termos de largura, espessura do material laminado e tonelagem médias da campanha.

Tabela 1 – Características das campanhas de laminação

Campanha	Espessura Média Final (mm)	Largura Média Final (mm)	Tonelagem Média (t)
E	2,2	930	1.615
W	2,3	915	1.510
M	3,5	1.100	2.250
Y	3,4	1.100	2.398
G	8,8	1.210	4.260

A qualidade superficial dos cilindros foi avaliada através de inspeção visual. O desempenho dos cilindros foi avaliado em termos de tonelagem laminada por mm de cilindro removido durante a retificação (t/mm). Os mecanismos de desgaste foram observados na superfície dos cilindros após a laminação, através de preparação metalográfica.

Com objetivo de ter um parâmetro de comparação foram avaliados também, no mesmo período, os desempenhos em termos de t/mm de quatro cilindros ICDP (qualidade Villares: CI82S). Na tabela 02 são apresentadas as quantidades de campanhas realizadas em cada um dos materiais analisados de acordo com as cadeiras

Tabela 2 – Quantidade de campanhas realizadas

Material	Cadeira	Tipo de campanha					Total
		E	W	M	Y	G	
Equalizer	F5	46	20	18	6	-	96
	F6	26	14	20	6	58	130
ICDP (CI82S)	F5	2	4	12	2	2	24
	F6	28	24	76	24	8	184
						Total	434

Foram obtidos também os perfis de desgaste dos cilindros Equalizer após algumas utilizações, sendo que o perfil de desgaste é definido como a diferença do perfil do cilindro obtido após a laminação e o obtido antes da laminação. Estes perfis foram realizadas aleatoriamente em 52 cilindros das 434 campanhas realizadas. A partir dos perfis de desgaste obtidos foram determinados os valores máximos de desgaste encontrados ao longo da mesa do cilindro.

3 RESULTADOS

3.1 Resultado Laboratorial

São apresentados a seguir os resultados dos teste obtidos em laboratório na liga “Equalizer”.

A caracterização da microestrutura é mostrado na Figura 3, a microestrutura da liga é constituída de carbonetos eutéticos do tipo MC com morfologia *coral-like* (A) e M_7C_3 com morfologia *rod-like*(B). O MC se apresenta como um carboneto eutético irregular, e o M_7C_3 se encontra nas regiões interdendríticas.

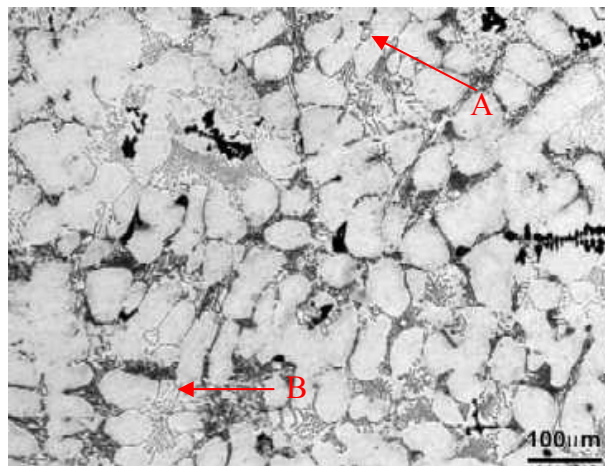


Figura 3 – Microestrutura da liga

A Tabela 3 apresenta os resultados das medições da fração volumétrica de carbonetos, continuidade da rede de carbonetos e microdureza da matriz. O erro foi calculado considerando um intervalo de confiança de 95% para uma distribuição normal.

Tabela 3 – Propriedades microestruturais da Liga

Fração volumétrica total de carbonetos (%)	14,1 ± 0,9
Continuidade (C)	7,1 ± 0,4
Microdureza (HV 100g)	754 ± 14

A Tabela 4 apresenta os valores de macrodureza, microdureza da matriz, densidade de trincas, profundidade máxima de trincas, taxa de desgaste e fração volumétrica de carbonetos tanto para o “Equalizer” quanto para o ICDP.

Nota-se que com um valor de microdureza da matriz maior, mas com uma menor fração volumétrica de carbonetos ainda assim o “Equalizer” apresenta uma macrodureza maior que o ICDP. A melhor resistência à flexão apresentada pelo “Equalizer”, que pode ser associada à tenacidade do material, pode estar relacionada com a menor fração volumétrica de carbonetos (fase frágil). A menor taxa de desgaste encontrada no “Equalizer” foi relacionada com a maior dureza da matriz, que apresenta tanto maior resistência ao riscamento quanto melhor sustentação aos carbonetos. Os resultados de fadiga térmica do ICDP não foram determinados devido a uma dificuldade da confecção dos corpos de prova, que para esta liga apresentaram trincas durante a fabricação.

Tabela 4 – Resultados comparativos entre Equalizer e ICDP

Propriedades	Equalizer	ICDP
Macrodureza [LD]	808 ~810	780 ~795
Microdureza [HV100]	600	480
Flexão a 4 pontos [MPa]	1300	630
Volume total de carboneto [%]	12 ~14	25 ~ 27
Densidade de trincas [trincas/mm]	8 ~10	-
Máxima profundidade de trinca [mm]	2 ~ 5	-
Taxa de desgaste [mg/m]	125	173

3.2 Resultados no Laminador

3.2.1 Qualidade Superficial

O aspecto visual dos cilindros Equalizer após utilização na cadeira F-6 está apresentado nas fotos da Figura 4. Não se observa região com desgaste diferenciado, arrancamento de óxidos ou rugosidade excessiva, ou seja, o Equalizer apresentou um aspecto superficial excelente ao longo da região de contato com a tira.



Figura 4 – Fotos do aspecto superficial da tira

3.2.2 Mecanismos de degradação

Os mecanismos de degradação observados após utilização nas cadeiras F-5 e F-6 se mostraram similares. Na Figura 5 apresentam-se imagens das micrografias da superfície dos cilindros Equalizer após utilização na cadeira F-5. Na condição bruta de laminação notam-se trincas térmicas, arrancamentos e riscos de abrasão. Após lixamento e polimento da superfície alguns riscos foram eliminados. Após a realização de ataque nas superfícies nota-se que as trincas estão tanto na região interdendrítica como na matriz e que os arrancamentos encontra-se concentrados nas células eutéticas.

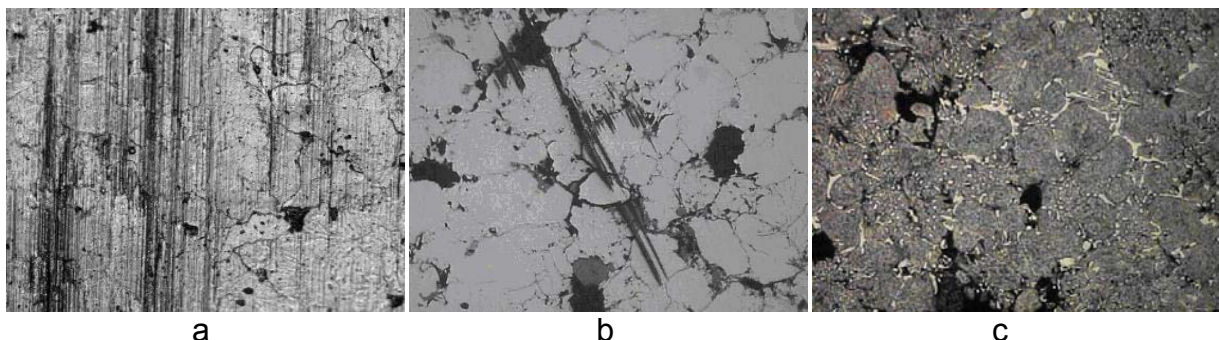


Figura 5 – Aspecto microscópico da superfície do Equalizer após utilização. a) superfície bruta de laminação; b) superfície após lixamento e polimento; c) superfície após lixamento, polimento e ataque. Aumento: 100x.

3.2.3 Desempenho

Na Tabela 5 são apresentados os resultados de desempenho (t/mm) dos cilindros Equalizer e ICDP. Notam-se diferenças significativas de performance em função do tipo de campanha. Os cilindros ICDP apresentaram desempenho igual nos

desbastes sem acidentes ao do desbaste com acidentes, ou seja, no período avaliado os cilindros ICDP não se envolveram em acidentes.

Tabela 5 - Desempenho dos cilindros Equalizer em relação ao ICDP (t/mm)

Tipo de Cilindros	Ciclete E		Ciclete W		Ciclete Y		Ciclete M		Ciclete G	
	F-5	F-6	F-5	F-6	F-5	F-6	F-5	F-6	F-5	F-6
Equalizer (sem acidentes)	6.826	9.848	7.245	14.902	16.727	9.921	16.634	19.562	-	34.300
Equalizer (com acidentes)	2.962	8.435	7.245	789	10.424	9.921	16.634	19.562	-	21.711
ICDP (sem acidentes)	2.895	4.339	2.575	4.176	3.981	5.850	4.821	5.399	9.820	8.170
ICDP (com acidentes)	2.895	3.692	2.575	3.050	3.981	5.042	3.343	4.833	9.820	8.170

A Figura 6 apresenta a performance dos cilindros Equalizer e ICDP excluindo os desbastes por acidentes, onde convencionamos como ciclete médio (M e Y) e estreito (E e W) de acordo com os dados da Tabela 1 por possuir as faixas de largura e espessura aproximadas.

Para o ciclete médio observa-se uma performance do Equalizer aproximadamente 3 vezes maior ao ICDP e 2 vezes maior para o ciclete estreito.

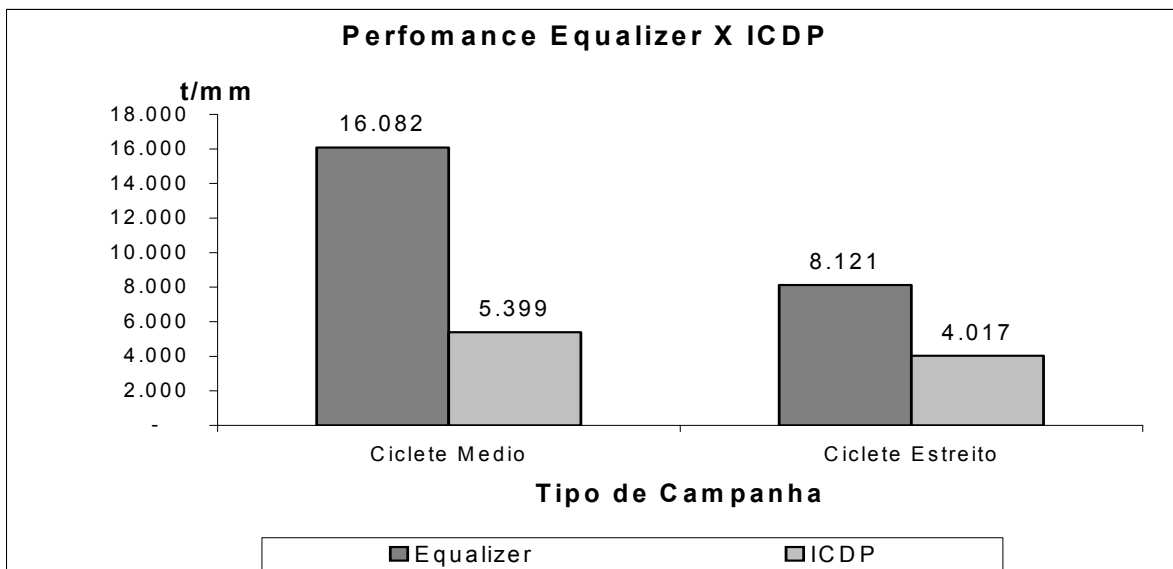


Figura 6 – Gráfico de performance Equalizer x ICDP.

Considerando o desempenho incluindo os desbastes por acidentes, observa-se que ciclete estreito o desempenho do equalizer foi bastante afetado, devido a duas ocorrências, provocando trincas na superfície, sendo uma delas de origem mecânica e a outra de origem térmica.

A Figura 7 apresenta um gráfico que contém o perfil de desgaste de um cilindro Equalizer e um cilindro ICDP após a laminação de cicletes estreitos. Esta figura

exemplifica a análise comparativa realizada entre os perfis de desgaste. Pode-se observar que o Equalizer apresenta menor desgaste em relação ao ICDP. Em média o cilindro Equalizer apresentou desgaste 4,5 vezes menor que o ICDP.

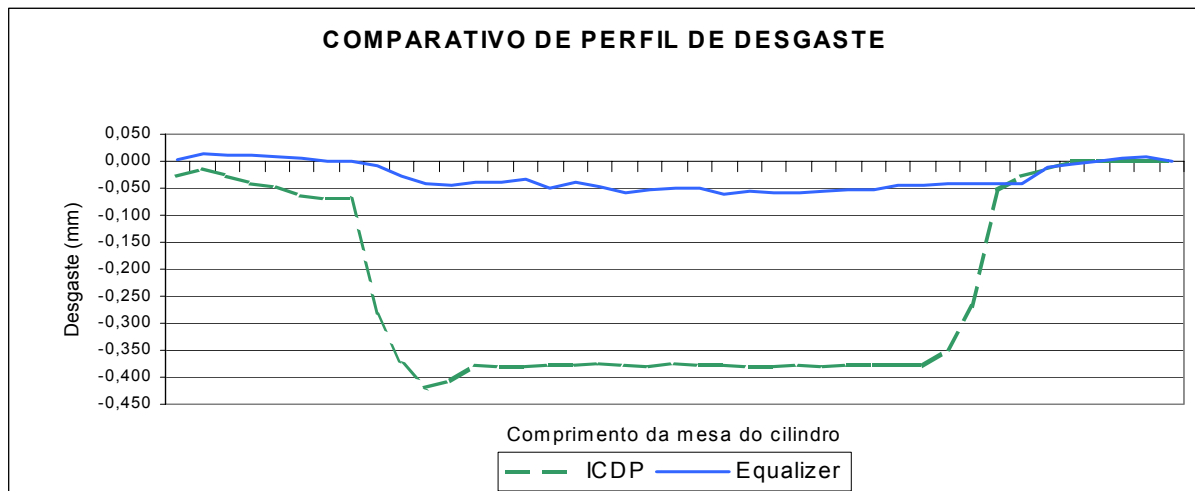


Figura 7 – Comparação de perfil de desgaste ICDP x Equalizer

4 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na laminação confirmam os resultados obtidos em laboratório. Os melhores resultados de desempenho apresentados pelo Equalizer podem ser associados à presença de carbonetos M_7C_3 e MC que apresentam dureza maior em relação ao M_3C encontrado no ICDP. Adicionalmente o Equalizer apresenta uma dureza de matriz mais elevada permitindo melhor sustentação destes carbonetos, ou seja, inibindo a ocorrência de arrancamentos. Esta maior dureza da matriz também melhora a resistência ao riscamento, tanto por ser mais dura quanto por sustentar melhor o carboneto de elevada dureza.

Considerando os resultados de aspecto superficial macroscópico e de consumo (t/mm) observados neste trabalho, entende-se que o cilindro Equalizer possibilita aumentar a campanha de laminação em pelo menos 2 vezes. Com aumento da campanha espera-se que os resultados de consumo do Equalizer sejam ainda maiores. Isto porque a comparação dos resultados de desgaste com os resultados de desbaste realizados nos cilindros indicam que parte do desbaste realizado não está associado ao desgaste e sim a outros fatores.

O fato de ter-se observado um aumento do consumo do Equalizer quando considerados os dados com acidentes não deve ser visto com preocupação, por três motivos. Primeiramente porque estatisticamente temos poucas laminações com estes cilindros e qualquer ocorrência de acidente é diluída em poucas utilizações tendo um impacto negativo grande. Em segundo lugar, o ciclete estreito na qual o resultado do Equalizer foi mais prejudicado pela ocorrência de acidentes não é o ciclete mais crítico do ponto de vista de ocorrência de acidentes. Isto indica que a ocorrência de acidentes não estão associadas com uma baixa resistência a acidentes do cilindro Equalizer. Por último, mesmo desconsiderando o fato exposto acima, os ganhos associados à possibilidade de aumentar a tonelagem laminada por campanha são muito mais significativos do que aqueles associados ao consumo de cilindros (custo de cilindro/tonelada laminada). O exemplo a seguir ilustra este fato.

Se considerarmos que o Equalizer irá permitir uma campanha 2 vezes maior que a atualmente realizada com os ICDP, podemos assumir que o número de trocas programadas de cilindro será reduzida em 50%, neste caso, haveria um aumento na produção de 2,7%.

Atualmente o consumo total de cilindro de trabalho no LTQ equivale a 0,1 % do preço da bobina a quente, fica claro que o ganho de disponibilidade no laminador é da ordem de grandeza maior que aqueles relacionados ao desempenho de cilindros (custo de cilindro/tonelada laminada).

Existem outros ganhos indiretos que devem ser mencionados:

- Redução de estoque de cilindros;
- Redução de custo com a operação na oficina de cilindros;
- Redução de custo da transformação devido à diluição de custos fixos.

O trabalho aborda a possibilidade de aumento da campanha de laminação do ponto de vista de cilindros, mas outras melhorias no processo devem ser realizadas para que o aumento de campanha seja alcançado.

5 CONCLUSÕES

Os resultados de desempenho do cilindro “Equalizer” obtidos no laminador confirmam os resultados obtidos em laboratório, onde o cilindro Equalizer apresenta melhor performance que o ICDP .

A melhoria de desempenho apresentado pelo cilindro “Equalizer” possibilita um aumento da campanha de laminação e este ganho é mais significativo que aquele associado à redução do consumo de cilindros.

REFERÊNCIAS

- 1 CAITHNESS, L.; COX, S. X.; EMERY S. “Surface behaviour of HSS in hot strip mills”, Rolls 2000 Conference of Institute of Materials, Birmingham, U.K., April, 1999;
- 2 KERR, E. J., “High Speed Steel work roll at Dofasco”, Iron and Steel Maker USA, vol. 27, no. 1, pp. 27-30, Jan. 2000;
- 3 BOCCALINI JR., M.; C.L. SERANTONI, A. SINATORA., Y. MATSUBARA, Science of Casting and Solidification, Brasov, May 2001, edited by D.M. Stefanescu (Lux Libris, Brasov, 2001) 393;
- 4 CHOI, J.W., KIM, D., “Mechanisms of Surface Deterioration of High-Ni Grain Roll for Hot Strip Rolling”, ISIJ International, Vol. 39 (1999), No. 8, p.823-828;
- 5 KUBO, O, HASHIMOTO, M., MATSUBARA, Y., “Influence of Microstructure on Crack Propagation Property and Wear Resistance of White Cast Iron Rolling Mill Rolls” Conference on the Science of Casting and Solidification, Brasov, Romênia, (2002), p.399-406;
- 6 XAVIER, R. R., OLIVEIRA, M. J., MURAD, B., CARVALHO, J. G., “Desenvolvimento de Cilindros para as Últimas Cadeiras do Laminador de Tiras a Quente da CST”, 41º Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, ABM, Joinville/SC, 2004;