

DESCRIÇÃO DOS MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DE CILINDROS LAMINADORES DE BARRA E FIO MÁQUINA¹

Mario Vitor Leite²
Waldemar Braatz Krueger²
Gilson Teixeira Cornélio²
Renato Lucas Aparecido da Silva³
José Américo Santos Silva Junior³
Marcelo Tatsuo Kawasaki³
Pedro Koiti Ikeda³

Resumo

Os mecanismos de degradação de cilindros para laminação de produtos longos mais citados entre os usuários são: fadiga térmica e desgaste por deslizamento e abrasivo. Porém, há divergências sobre qual desses mecanismos prevalece na determinação da vida útil dos cilindros. Neste trabalho foram caracterizados dois pares de cilindros do conjunto desbastador e um par de cilindros do conjunto acabador. Os resultados obtidos permitiram concluir que o desgaste resultante do desprendimento de material devido a conexão de trincas de origem térmica e mecânica predomina apenas no primeiro cilindro do conjunto desbastador enquanto que no outro cilindro deste conjunto há, além deste mecanismo, a presença do desgaste por abrasão. No cilindro do conjunto acabador predomina a abrasão com uma parcela menor de lascamento por conexão de trincas térmicas e mecânica. A partir desses resultados será possível conduzir um projeto de liga, ou especificação mais adequada, visando aumentar a desempenho dos cilindros em cada aplicação.

Palavras-chave: Cilindros de laminação; Mecanismos de degradação; Abrasão; Trincas térmicas.

DESCRIPTION OF SUPERFICIAL DAMAGE MECHANISMS IN ROLLING MILL ROLLS FOR BAR AND WIRE ROD

Abstract

The most mentioned mechanisms of superficial damage in rolling mill rolls used for long products are: thermal fatigue, sliding and abrasive wear. However, there are some divergences concerning which one is more important to predict roll life. In this article a couple of roll pairs for rougher and another for finishing stands had been characterized after use. The gotten results had allowed to conclude that the small parts material loss due the connection of thermal and mechanical cracks predominates only in the first rougher rolls whereas in the others rolls of this set it has, beyond this mechanism, abrasive wear. In the finishing rolls predominates the abrasion, being observed in a smaller scale a material loss by web cracks connection. After theses results it will be possible to conduct an alloy design project, or a more suitable specification, to enhance the rolls performance for this application.

Key words: Rolling mill rolls, superficial damage mechanisms, abrasion, thermal cracks.

¹ Contribuição técnica ao 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.

² Gerdau – Villares Rolls, Rod. Luiz Dumont Villares, km 2 - Cx. Postal: 162. Pindamonhangaba.

³ Gerdau – Aços Especiais Brasil, Rod. Luiz Dumont Villares, km 2 - Cx. Postal: 162. Pindamonhangaba.

1 INTRODUÇÃO

O processo de laminação de barras e fio máquina exige um rigoroso controle de qualidade, o qual necessita estar focado na detecção de imperfeições como: trincas internas, acabamento superficial e tolerâncias dimensionais. Com exceção aos danos internos, a qualidade superficial e as tolerâncias dimensionais podem ser relacionadas diretamente com a qualidade dos cilindros de laminação, pois as modificações que ocorrem no cilindro na região de conformação são refletidas diretamente no produto laminado.

A maioria dos trabalhos dedicados ao entendimento dos danos sofridos pelos cilindros durante a laminação e sua relação com a qualidade do produto acabado estão voltados para a laminação de produtos planos.⁽¹⁾ Byon e Lee⁽¹⁾ realizaram um trabalho de desenvolvimento de um método para prever o desgaste dos cilindros para a laminação de barras e apresentaram relações entre o desgaste e variáveis do processo, como força de laminação, velocidade e comprimento de contato. Os resultados destes pesquisadores mostraram que o desgaste é fortemente influenciado pela força de laminação.

O efeito de cada uma das variáveis do processo de laminação, citadas anteriormente, ainda encontra divergências quanto a sua relação com os mecanismos de desgaste. Exemplo disso é o resultado encontrado por Kim *et al.*⁽²⁾ que mostraram, para o caso particular da conformação oval-redondo, que a velocidade é a variável que tem maior efeito sobre o desgaste. Estes pesquisadores mostraram também que o desgaste aumenta continuamente, mesmo com a redução da pressão de contato, e atribuíram este resultado ao fato de que a dureza do ferro fundido nodular (material estudado) diminui com o aumento da temperatura do cilindro durante o processo de laminação.

Na tentativa de resumir os diversos estudos sobre o assunto desgaste, seja em qualquer área do conhecimento que envolva superfícies em contato com movimento relativo, pode-se dizer que o principal objetivo é antecipar suas formas de manifestação e então projetar componentes com maior resistência aos fenômenos de desgaste.

Os primeiros estudos dedicados a estimar os ganhos financeiros resultantes da aplicação de conhecimentos relacionados ao desgaste mostram que podem ser atingidos valores entre 1,3 e 1,6 % do PNB, neste estudo o país em questão era a Inglaterra no ano 1965.⁽³⁾

A complexidade de um estudo de desgaste pode ser medida pelo número de interações das variáveis do processo com as diversas formas de manifestação do desgaste. Na laminação, por exemplo, as variáveis que afetam o desgaste dos cilindros⁽⁴⁾ são: i/ tipo do material dos cilindros, ii/ acabamento superficial dos cilindros (i.e., amplitude topográfica ou a presença de revestimentos, Cr-duro), iii/ tipo do material laminado, iv/ geometria do material laminado, v/ lubrificação, vi/ refrigeração, vii/ presença de óxidos na interface de contato, viii/ tipo dos óxidos, ix/ temperatura, x/ velocidade, xi/ força de laminação e todas estas variáveis multiplicadas pelo número passes. A interação entre as onze variáveis listadas resultam em desgaste como: lascamento (em cilindros de encosto), colamento (em cilindros para laminação a quente), sulcamento (em cilindros para laminação a frio e cilindros para laminação de longos).

Com o propósito de abordar o desgaste de forma sistemática e facilitar a descrição das suas formas de manifestação, a norma DIN 50320 classificou o desgaste de acordo com o tipo de movimento (deslizamento, rolamento, oscilatório e

de impacto), estado físico dos corpos que se interagem e os mecanismos que geram o desgaste, que são: adesão, abrasão, reações triboquímicas, fadiga superficial e deformação plástica.⁽⁵⁾

Uma vez definido o mecanismo de desgaste, pode-se partir para a elaboração de modelos que auxiliam na sua predição. No caso dos trabalhos citados anteriormente, Byon e Lee⁽¹⁾ e Kim *et al.*⁽²⁾ o mecanismo de desgaste estabelecido por estes é aquele causado por abrasão e o modelo utilizado por estes autores, tem como base um dos modelos para predição do desgaste mais difundido na literatura do assunto, o modelo Archard, que estabelece uma relação entre o volume ou massa de material removido durante um período ou uma distância em que os corpos permanecem em contato com movimento relativo (Q), chamada de taxa de desgaste, com três variáveis do processo: a primeira é referente à fração do material na qual efetivamente ocorre o contato, também conhecida como constante de desgaste (K); a segunda é referente à força normal que atua sobre os corpos (F) e a terceira é a parcela referente a uma propriedade do material, a dureza (H). Esta relação é apresentada pela Equação 1.⁽⁶⁾

$$Q = K \frac{F}{H} \quad \text{Eq. 1.}$$

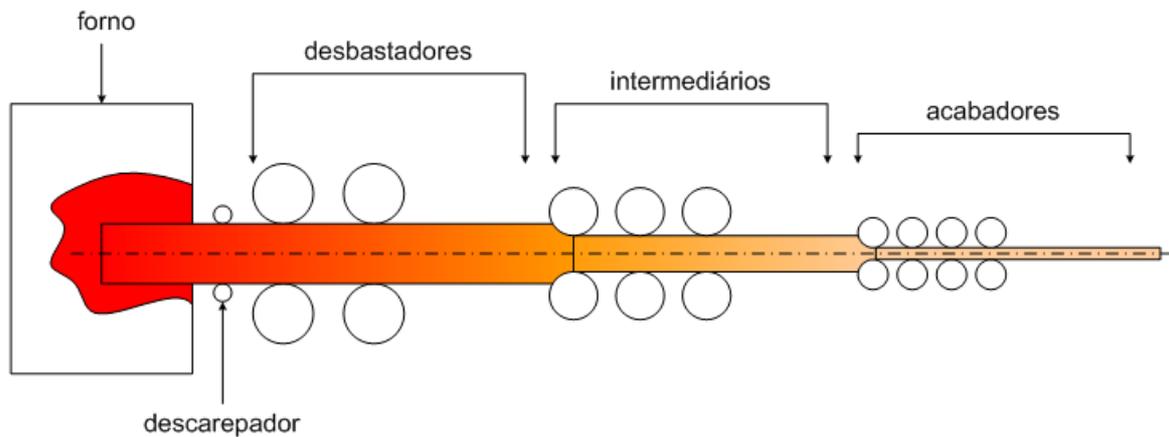
Como pode ser observado pelo modelo de Archard, também outros pesquisadores, como Khrushchov *apud* Tylczak e Oregon,⁽⁷⁾ encontraram uma relação inversamente linear entre a dureza e o desgaste; o aumento da dureza resulta numa redução do desgaste. Assim se compreende os grandes esforços em aumentar a dureza de componentes sujeitos ao desgaste.

Segundo Hutchings,⁽⁸⁾ um projetista precisa ter em mente dois conceitos principais sobre desgaste: estabelecer o quão significativo seria o desgaste se ocorresse em serviço e se o mesmo ocorrer, como reduzir sua taxa ou evolução, alterando o projeto de forma econômica e funcional.

Uma vez que em cada sistema existe uma particularidade, e por isso a importância em identificar as variáveis do processo, e como cada uma destas particularidades está relacionada com os mecanismos de desgaste, o objetivo deste trabalho é apresentar detalhes do desgaste sofrido pelos cilindros laminadores de barra e fio máquina de um laminador de perfis leves.

2 DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO

Foram caracterizados os cilindros de duas cadeiras desbastadoras e uma cadeira de cilindros acabadores. A Figura 1 apresenta de forma esquemática a disposição dos cilindros analisados.



Características e variáveis do processo respectivas a cada cilindro estudado

denominação: cilindro 1-caixa	denominação: cilindro 2-oval	denominação: cilindro 3-redondo
posição no laminador: desbastador	posição no laminador: desbastador	posição no laminador: acabador
tipo do canal: caixa	tipo do canal: oval	tipo do canal: redondo
tipo do material: NOD AA	tipo do material: NOD AA	tipo do material: CD75I
dureza do material: 40 - 48 (HSc)	dureza do material: 40 - 48 (HSc)	dureza do material: 75 - 80 (HSc)
velocidade ⁽¹⁾ : 1	velocidade relativa ⁽¹⁾ : 1,3	velocidade relativa ⁽¹⁾ : 7
força ⁽²⁾ : 1	força relativa ⁽²⁾ : 0,98	força relativa ⁽²⁾ : 0,2
redução ⁽³⁾ : 1	redução ⁽³⁾ : 2	redução ⁽³⁾ : 2,2
produção ⁽⁴⁾ : 1	produção ⁽⁴⁾ : 0,9	produção ⁽⁴⁾ : 0,2

(1): velocidade tangencial relativa ao cilindro 1-caixa

(2): força de laminação calculada a partir da potência e relativa ao cilindro 1-caixa

(3): redução percentual por passe relativa ao cilindro 1-caixa

(4): massa de material laminado por canal relativa ao cilindro 1-caixa

Figura 1. Representação esquemática das cadeiras onde os cilindros foram estudados e as variáveis do processo.

Os cilindros da primeira cadeira desbastadora possuem canal do tipo caixa, enquanto que os cilindros da segunda cadeira analisada do conjunto desbastador, possuem canal tipo oval e os cilindros da terceira cadeira analisada do conjunto acabador, canal do tipo redondo. Para a descrição das caracterizações serão utilizadas as seguintes nomenclaturas: 1-caixa, 2-oval e 3-redondo, respectivamente conforme descrito anteriormente.

Toda a região do canal dos cilindros analisados foi caracterizada por fotografia e microscopia óptica. Para o cilindro 1-caixa foi realizada uma réplica da topografia na região do fundo do canal para análise em um perfímetro de contato e também foi removida uma amostra do fundo do canal para caracterizações mais detalhadas por microscopia óptica.

A quantificação do desgaste foi realizada com o auxílio de um micrometro e do sistema de coordenadas do torno utilizado para usinagem do canal.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Medidas de desgaste, realizadas com referência as dimensões iniciais e finais do canal obtidas a partir das coordenadas medidas no torno CNC dos cilindros 1-caixa apresentaram os seguintes resultados:

- não houve desgaste mensurável na região das laterais do canal; e
- o desgaste mensurado esteve concentrado na região do fundo do canal e os valores medidos estiveram entre 0,5 mm e 0,8 mm.

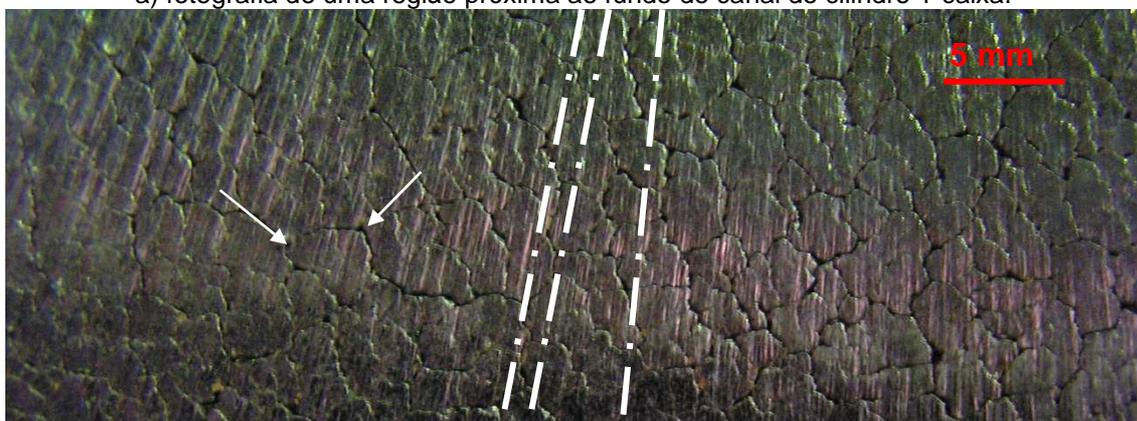
Nos cilindros 2-oval e 3-redondo não foi possível realizar as medições por meio do sistema de coordenadas do torno e assim foi utilizado um micrometro de profundidade. Os resultados não apresentaram variações dimensionais nos canais medidos. Esta incoerência, uma vez que os canais dos cilindros apresentaram uma superfície de desgaste (Figura 2) pode ser atribuída ao método de medição.

Byon e Lee⁽¹⁾ desenvolveram um método para medir o desgaste dos canais de perfil oval e redondo que utiliza um molde, nas dimensões iniciais do canal e uma resina para preencher o espaço resultante do desgaste. Apenas para comparação, pois o desgaste é fortemente dependente das variáveis do processo, Byon e Lee⁽¹⁾ apresentaram profundidades de desgaste de cilindros de ferro fundido nodular máxima de 1,4 mm o que indica que mesmo as medidas de desgaste dos cilindros 1-caixa podem apresentar valores maiores.

A Figura 2 apresenta fotos dos canais dos cilindros analisados com os principais danos: trincas, indicados pelas setas e sulcos, indicados pelas linhas traço e ponto.



a) fotografia de uma região próxima ao fundo do canal do cilindro 1-caixa.



b) fotografia de uma região próxima ao fundo do canal do cilindro 2-oval.



c) fotografia de uma região do fundo do canal do cilindro 3-redondo.

Figura 2. Fotografias das superfícies dos cilindros após laminação. a) 1-caixa, b) 2-oval e c) 3-redondo.

Observa-se na Figura 2 que a superfície de desgaste dos cilindros 1-caixa e 2-oval apresenta uma grande quantidade de trincas, representadas pelas setas. Os cilindros 3-redondo não apresentam tais trincas quando observadas com o aumento próximo àquele das Figuras 2 (a) e (b). O que pode ser observado na Figura 2 (b) e (c) são riscos, denominados como sulcos, característica não identificada na Figura 2 (a).

Medições do perfil topográfico da superfície de desgaste do cilindro 1-caixa resultaram em valores de amplitude entre pico e vale superiores a 0,8 mm. Este valor é equivalente a amplitude máxima de medição do perfilômetro de contato utilizado nesta caracterização. Devido a esta limitação do equipamento, não foi possível obter medidas do perfil topográfico da superfície de desgaste do cilindro 1-caixa.

A amostra retirada de uma região próxima ao fundo do canal do cilindro 1-caixa permitiu analisar as trincas presentes na superfície do cilindro em um microscópio óptico. Durante a retirada da amostra pode ser identificado que as trincas atingem profundidades de até 7 mm.

A Figura 3 apresenta a superfície polida do fundo do canal do cilindro 1-caixa.

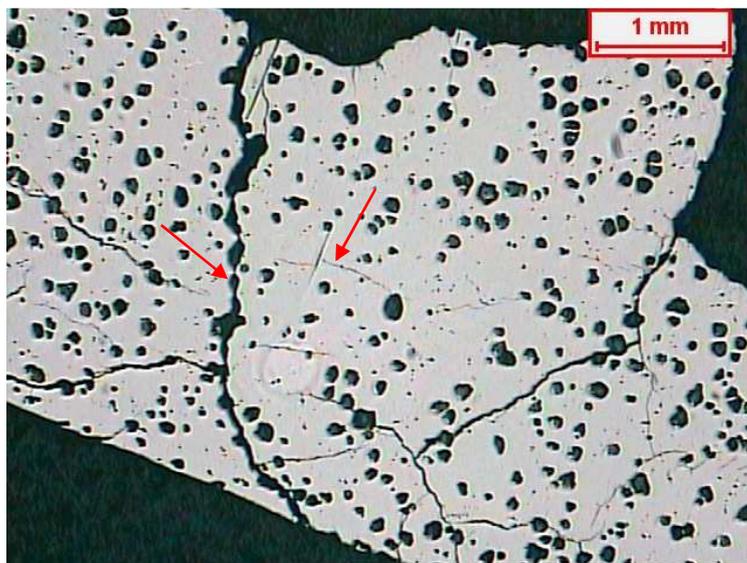


Figura 3. Malha de trincas na superfície do cilindro 1-caixa.

Observa-se na Figura 3 que existem trincas com diferentes espessuras. As trincas com menor espessura estão associadas a características microestruturais do material, conforme apresentado na Figura 4.

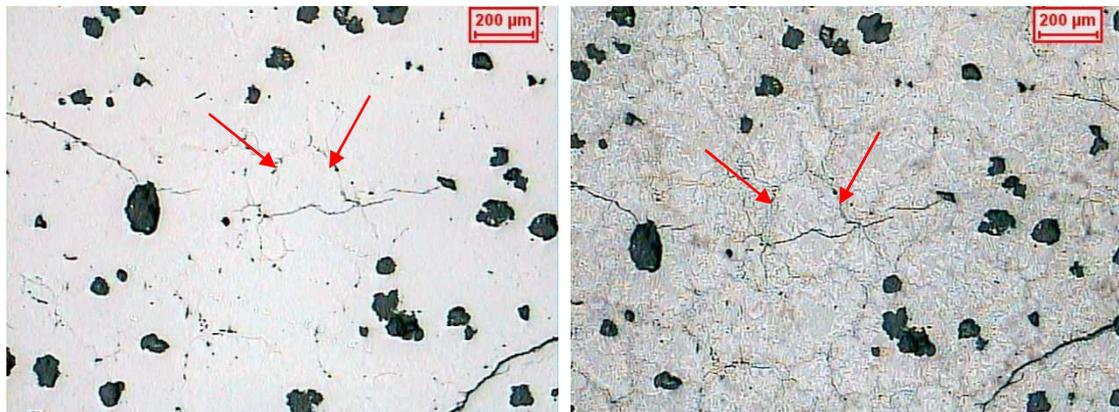


Figura 4. Observações com microscopia óptica da superfície do canal 1-caixa. Caminho de propagação da malha de trincas térmicas devido as características microestruturais. a) região da superfície do cilindro, com pequenas trincas. b) região com pequenas trincas após ataque químico com reagente de Nital (3%).

As trincas indicadas pelas setas da Figura 4 seguem um caminho que coincide com os contornos de grão. O material utilizado na fabricação deste cilindro possui $9 \pm 1\%$ de nódulos de grafita, $3,2 \pm 0,7\%$ de carbonetos eutéticos do tipo M_3C e uma matriz perlítica e bainítica. Os carbonetos eutéticos possuem coeficiente de expansão térmica e módulo de elasticidade diferente da matriz, e isto pode resultar em concentrações de tensões que podem ser a origem destas trincas.⁽⁹⁾

Observações por microscopia óptica da seção transversal da superfície do canal 1-caixa (Figura 5), permitiram identificar que uma trinca de grande espessura, com comprimento aproximado de 1,6 mm, tem sua origem na superfície, evidenciada pela maior largura quando comparada a extremidade inferior, e orientação perpendicular a superfície do canal. Esta característica de orientação perpendicular indica que a trinca tem origem de solicitações térmicas.

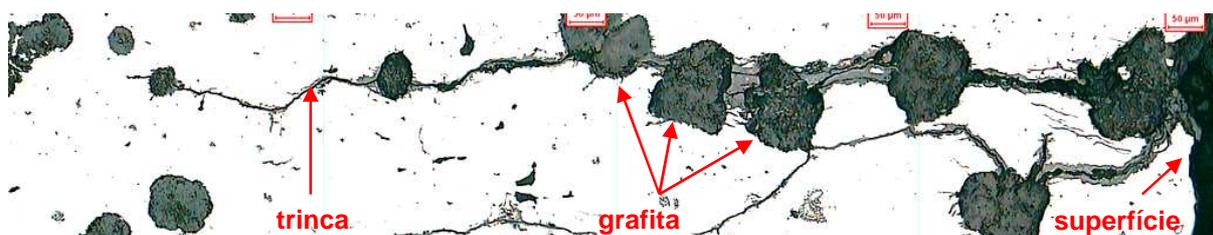


Figura 5. Trinca de origem térmica perpendicular e com propagação partindo da superfície de contato no fundo do canal. Cilindro 1-caixa.

Ainda na Figura 5 observa-se que a trinca segue preferencialmente um caminho conectado por nódulos de grafita. A Figura 6 apresenta com maior detalhe uma região da trinca próxima a um nódulo de grafita, onde se observou propagação através do nódulo e formação de óxido no interior da trinca ao longo de toda sua extensão.

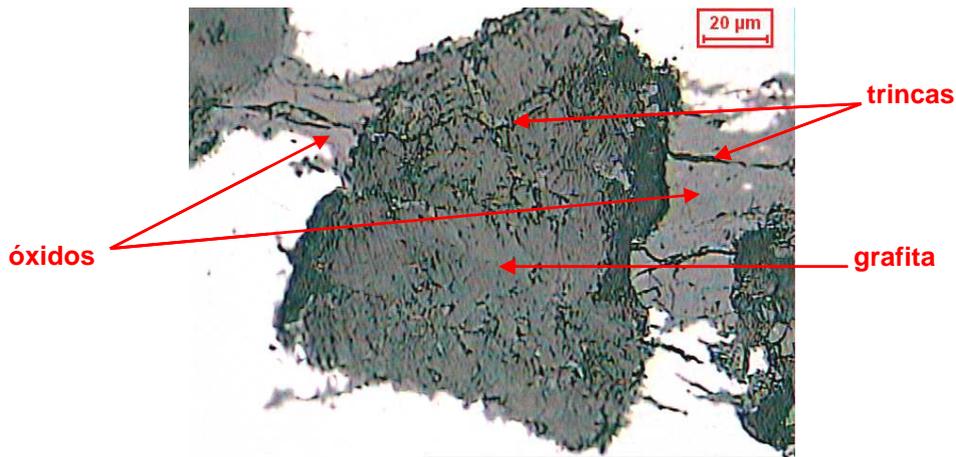


Figura 6. Detalhe da propagação da trinca próxima a um nódulo de grafita.

A presença de óxidos no interior de uma trinca pode acelerar o desgaste do cilindro. Segundo Stachowiak e Batchelor,⁽¹⁰⁾ materiais que sofrem oxidação, quando expostos em uma atmosfera oxidante, sofrem um aumento na sua taxa de desgaste e uma redução de sua vida em fadiga. Isso se deve ao óxido formado na extremidade da trinca impedir a possibilidade de fechamento da trinca por forças de adesão, como apresentado esquematicamente na Figura 7.

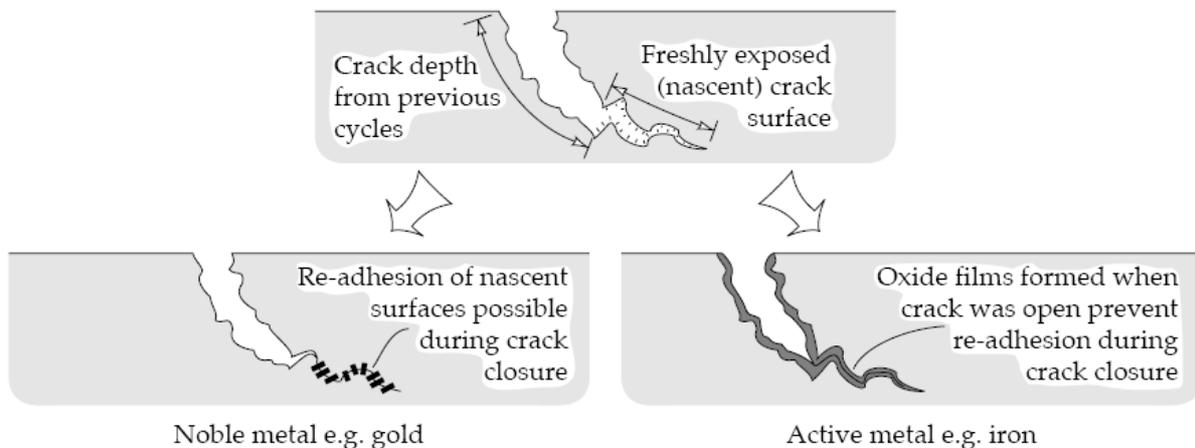


Figura 7. Efeito da presença de óxidos no interior de uma trinca.⁽¹⁰⁾

A Figura 2 (b) e (c) apresentam uma característica de dano superficial em comum, que são os riscos, que neste trabalho foram denominados como sulcos.

Os sulcos são produzidos por ação de um corpo com dureza superior a dureza do cilindro. Este corpo pode estar preso a barra laminada ou solto entre a barra e o cilindro. Observações num microscópio óptico de uma região no fundo canal do cilindro 2-oval (Figura 8) permitem concluir que os sulcos são orientados com a direção da laminação.



Figura 8. Imagem obtida a partir de uma réplica da superfície do cilindro 2-oval.

A Figura 9 apresenta com mais detalhe uma região onde houve o sulcamento.

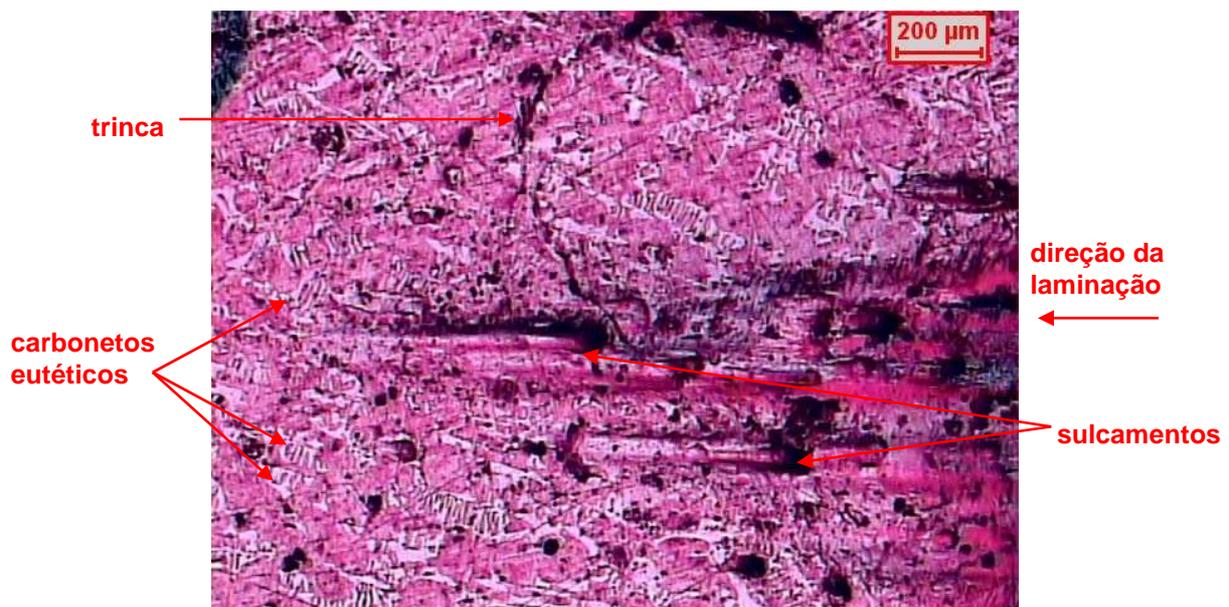


Figura 9. Fotografia por microscopia óptica da réplica de uma região do fundo do canal do cilindro 2-oval.

Os sulcamentos apresentados na Figura 8 e na Figura 9 indicam que estes foram produzidos pela indentação de uma partícula com dureza mais elevada que a dureza do material do cilindro seguida por um deslocamento. A largura de aproximadamente $30\ \mu\text{m}$ mostra que a presença do carboneto eutético tipo M_3C (dureza entre 800 HV e 1050 HV⁽¹¹⁾) tem pouca influência sobre o caminho do abrasivo, ou seja, não oferece resistência a ação do abrasivo.

As variáveis do processo de laminação que podem alterar os danos de desgaste do cilindro 1-caixa, onde não podem ser observados riscos como nos cilindros 2-oval e 3-redondo, podem ser os seguintes:

- presença do removedor de carepas: o removedor de carepa tem como função remover a camada de óxidos. Sua posição anterior ao cilindro 1-caixa pode

diminuir a presença dos óxidos que podem ser um dos principais agentes causadores de abrasão devido a sua dureza que pode atingir valores de até 1.030 HV.⁽¹²⁾ Os sulcos presentes no cilindro 2-oval podem ser resultado da formação de óxidos sobre o material laminado entre as cadeiras do cilindro 1-caixa e 2-oval.

- velocidade de laminação: o aumento da velocidade periférica do cilindro 1-caixa para o 2-oval é de aproximadamente 27% e o aumento da velocidade do cilindro 1-caixa para o 3-redondo é 3 ordens de grandeza, ou seja, um aumento de aproximadamente 1.500%. Sabe-se que o desgaste por partículas abrasivas aumenta com o aumento da velocidade, pois aumentar a velocidade significa aumentar a frequência de contato de uma região do cilindro com a barra laminada. O aumento da frequência de contato do cilindro 1-caixa para o cilindro 2-oval é de aproximadamente 66%.
- temperatura de laminação. a menor frequência de contato do cilindro 1-caixa resulta num maior tempo de contato entre o cilindro e o material laminado. Dessa forma o cilindro fica exposto por um tempo maior a temperatura de laminação. O efeito que isto pode causar no cilindro é aumentar e propagar novas trincas de origem térmica e mecânica. O aumento e propagação das trincas resulta no desprendimento de uma porção de material (lascamento).

Nos cilindros 3-redondo, pode ser observado que, além do sulcamento, ocorre também o desprendimento de uma porção de material devido a conexão de trincas, conforme apresentado na Figura 10.

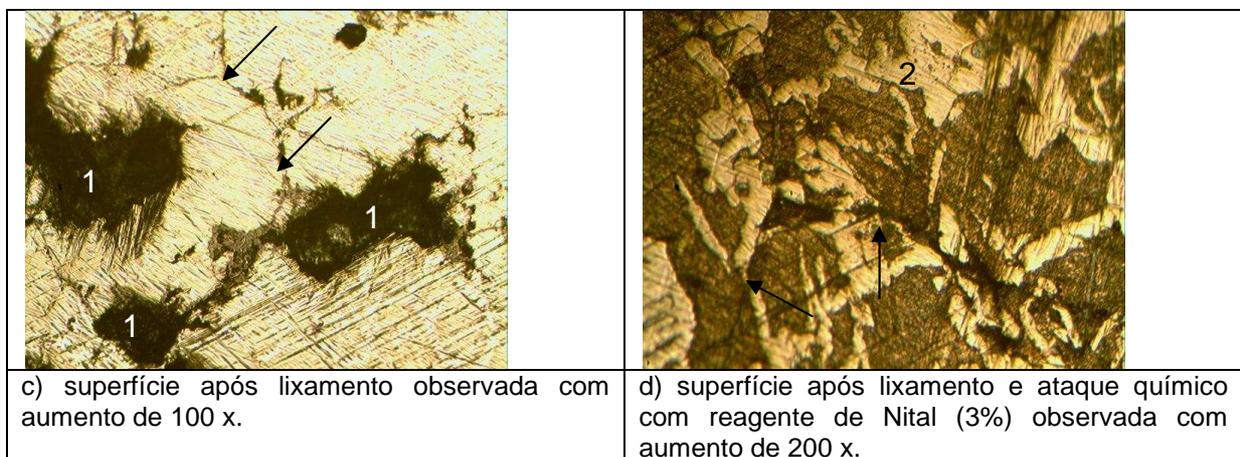
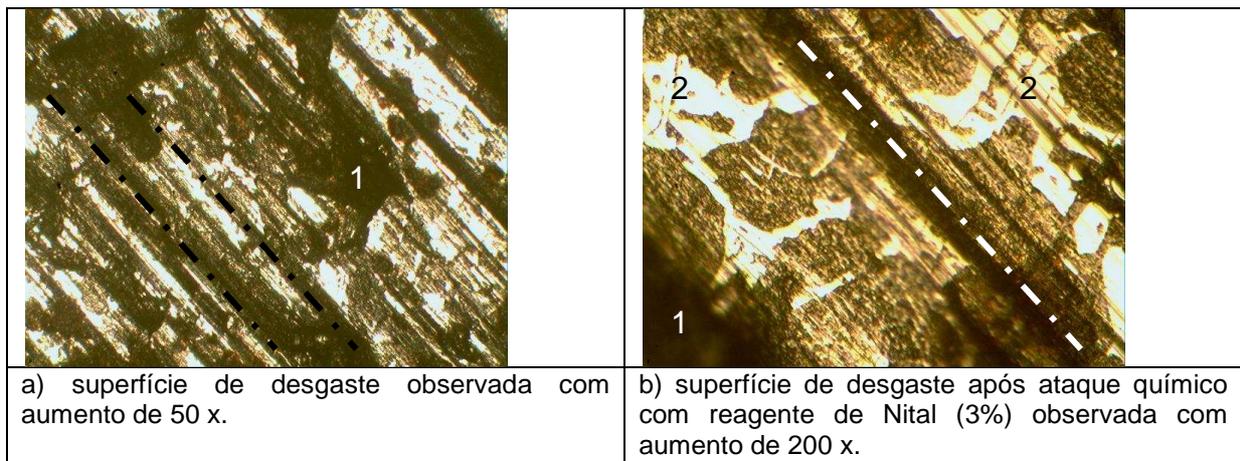


Figura 10. Caracterização da superfície de desgaste do cilindro 3-redondo. Linha traço e ponto = sulcos; setas = trincas; 1 = lascamento e 2 = carbonetos eutéticos do tipo M_3C .

A Figura 10 (a) assim como na Figura 2 (c) mostra que o principal mecanismo de desgaste é o abrasivo. Observa-se com maior detalhe, na Figura 10 (b) que o carboneto do tipo M_3C presente no material CD75I não foi efetivo para bloquear o deslocamento do abrasivo.

As microscopias ópticas apresentadas nas Figuras 10 (c) e (d) correspondem a superfície de desgaste apresentadas nas Figuras 10 (a) e (b) após o lixamento. Após a preparação metalográfica pode ser observado, com maior nitidez, a presença de lascamentos, indicados pelo número 1 na Figura 10 (a) e (c). Este lascamento é semelhante aquele descrito para o cilindro 1-caixa. As trincas provavelmente são de origem térmica e mecânica porém, devido a maior eficiência de extração de calor promovida pelo menor tempo de contato do cilindro com o material, resulta em trincas com profundidades e ramificações menores.

Para concluir esta discussão sobre a caracterização dos mecanismos de desgaste dos cilindros estudados, cita-se ainda o efeito da quantidade de material laminado por canal em cada um dos cilindros. Em termos de massa os cilindros 2-oval laminam aproximadamente 87 % da massa laminada pelos cilindros 1-caixa enquanto que os cilindros 3-redondo laminam o equivalente a 20 % da massa laminada pelos cilindros 1-caixa. Mas para o estudo do desgaste a melhor forma de acompanhar o desempenho de um cilindro é por meio da distância laminada, que representa o comprimento de contato do cilindro com o laminado. Dessa forma, o comprimento de material laminado pelos cilindros 2-oval é 45 % maior o comprimento laminado pelos cilindros 1-caixa e o comprimento laminado pelos cilindros 3-redondo é 272 % maior que os cilindros 1-caixa.

A representação do desgaste por comprimento de barra laminada auxilia no entendimento de que mesmo com as mesmas características de desgaste os cilindros 3-redondo laminam uma massa menor que os cilindros 2-oval e 1-caixa.

5 CONCLUSÃO

O trabalho de caracterização permitiu concluir que:

- o principal mecanismo de desgaste dos cilindros 1-caixa é aquele devido a conexão de trincas com provável origem térmica e mecânica. Nestes cilindros não foi possível observar sulcos resultantes de um desgaste abrasivo;
- os cilindros 2-oval apresentaram característica de desgaste por conexão de trincas de provável origem térmica e mecânica assim como regiões características de desgaste abrasivo; e
- nos cilindros 3-redondo predomina o desgaste abrasivo, contudo há ainda o lascamento associado a trincas com provável origem térmica e mecânica.

A continuidade deste trabalho será conduzida da seguinte forma:

- desenvolver um método para a medição da alteração na geometria do canal;
- medição da temperatura da barra laminada durante cada etapa do processo de laminação;
- conduzir um projeto de desenvolvimento de uma nova liga, mais adequada a resistir ao mecanismo de abrasão nas gaiolas acabadoras; e
- adequar a especificação de cilindros para estas aplicações.

Agradecimentos

Os autores agradecem a dedicação desprendida pelo Sr. Ricardo Ribeiro, operador do torno CNC, para o auxílio nas medidas dos canais dos cilindros estudados.

REFERÊNCIAS

- 1 BYON, S. M., LEE, Y. Experimental and semi-analytical study of wear contour of roll groove and its applications to rod mill. *ISIJ*, 2007, Vol. 47, N. 7, pp. 1006 – 1015.
- 2 KIM, D. H., LEE, Y., YOO, S. J., CHOO, W. Y., KIM, B. M. Prediction of the wear profile of a roll groove in rod rolling using an incremental form of wear model, *Proceedings Institute of the Mechanical Engineering, Part B: J. Engineering Manufacture*, Vol. 217, pp. 111 – 126.
- 3 JOST, H.P. Tribology – origin and future. *Wear*, 136, 1990. p. 1-17.
- 4 STEKLY, J.J.K, ATAMERT, S. Surface deterioration of steel mill rolls: an overview and some solutions. England: *Welding Alloys Group*, 1997. 9 p.
- 5 ZUM GAHR, K. H. *Microstructure and wear of materials*. Elsevier, 1987.
- 6 ARCHARD, J.F., *Contact and Rubbing of Flat Surfaces*. *J. Appl. Phys.* 241, 1953, p. 891-988.
- 7 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *Friction, Lubrication and Wear Technology*. In: *Metals Handbook*, Vol. 18. 1992. p. 942.
- 8 HUTCHINGS, I. M. *Tribology: Friction and wear of engineering materials*. Inglaterra: Edward Arnold, 1992. 273 p.
- 9 SERANTONI, C. R., *Fadiga térmica de ferros fundidos brancos multicomponentes*. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Dep. de Engenharia Metalúrgica, 2003, 131 p.
- 10 STACHOWIAK, G. W., BATCHELOR, A. W., *Engineering Tribology*, 2nd edition., Butterworth-Heinemann, 2000, 744 p.
- 11 BERNIS, H., THEISEN, W., *Ferrous Materials – Steel and Cast Iron*, Springer, 2008, 418 p.
- 12 DIALETACHI, F., *Cilindros para Laminação de Desgaste de Produtos Não Planos*. In: *Simpósio de Laminação e Manutenção da ABM*, 1978, 24 p.