

IDENTIFICAÇÃO E REPRODUÇÃO LABORATORIAL DE MECANISMOS DE DESGASTE EM CILINDROS DE LAMINAÇÃO A FRIO*

José Lucio Gonçalves Junior¹

José Daniel Biasoli de Mello²

Henara Lillian Costa³

Resumo

A simulação laboratorial do desgaste é fundamental para o desenvolvimento de pesquisas que objetivem otimizar revestimentos e modificações superficiais utilizados em cilindros de laminação reais. Este trabalho objetivou simular laboratorialmente os mecanismos de desgaste em cilindros de laminação a frio. Para tanto, foram feitas réplicas metalográficas dos cilindros de trabalho antes e após campanhas de laminação normais. Foram utilizadas amostras de aço VC10 temperadas, texturizadas e cromadas. Para reproduzir os mecanismos de desgaste, foram utilizados cilindros e esferas de aço AISI 52100 como contracorpos em ensaios de deslizamento alternado, com cargas normais de 51,01 e 100,06 N para contracorpos cilíndricos e 31,39; 51,01 e 100,06 N para contracorpos esféricos. Os resultados obtidos com contracorpos cilíndricos, carga normal de 100,06N e tempo de ensaio de 5h e contracorpo esférico, 29,4 N foram os que melhor reproduziram as tendências de alteração de topografia de superfícies encontradas nas réplicas dos cilindros após uso. Após, realizou-se a análise tribológica dos pares, constatando-se que a utilização de contracorpo cilíndrico não remove completamente a camada de cromo duro, permitindo assim ver diferenças de comportamento tribológico em função da posição sobre a trilha e a análise experimental da evolução das tribocamadas formadas.

Palavras-chave: Tribologia; Laminação a frio; Simulação de desgaste; Ensaios de deslizamento.

IDENTIFICATION AND LABORATORY SIMULATION OF WEAR MECHANISMS IN COLD ROLLING MILL ROLLS

Abstract

Laboratory simulation of the wear mechanisms is of fundamental importance for research aiming to develop coatings/surface modifications to be used in industrial cold rolling mill rolls. This work aimed to reproduce in laboratory the wear mechanisms found in cold rolling mill rolls. For that, metallographic replication was carried out in cold rolling mills before and after normal production campaigns. VC10 specimens subjected to texturing + hard chrome were produced. To reproduce wear mechanisms, AISI 52100 cylinders and spheres were used as counterbodies in alternated sliding tests under normal loads of 51,01 e 100,06 N for cylindrical counterbodies and 31,39; 51,01 e 100,06 N for spherical counterbodies. The results obtained with cylindrical counterbodies, normal load of 100,06N and duration of 5 h and spherical counterbodies, normal load of 29,4N best reproduced the tendencies of surface topography changes obtained in the replica surfaces of the rolls after use. The tribological analyses of the pairs showed that the use of a cylindrical counterbody did not remove completely the hard chromium plating and with this result it is possible to analyze different positions in the wear track and the experimental tribolayers formed.

Keywords: Tribology; Cold rolling; Wear simulation; Sliding wear tests.

¹ MsC., Bolsista de Doutorado, Laboratório de Tribologia e Materiais, . Mecânica, UFU, MG, Brasil.

² Dr., Professor Titular Emérito, Laboratório de Tribologia e Materiais, UFU, MG, Brasil.

³ PhD., Professora, Laboratório de Tribologia e Materiais, UFU, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os grandes produtores de aço no Brasil encontram-se hoje em um dilema entre sobrevivência e crescimento. Além de competirem entre si, a globalização atual torna o mercado bastante competitivo, obrigando as empresas brasileiras a desenvolverem produtos de alto valor agregado e máxima eficiência no ciclo produtivo [1].

Um dos principais processos de produção de aço adotados pelas empresas no mundo é a laminação, por permitir trabalhar um grande volume de material. Os cilindros atuais devem permitir a obtenção de laminados com elevados padrões de qualidade. Os laminados devem apresentar níveis adequados de resistência mecânica, planicidade, rugosidade e espessura de chapa, no atendimento a consumidores cada vez mais exigentes (indústria automobilística, linha branca, dentre outros) [1].

Em função da exigência dos consumidores de produtos laminados a frio, os produtores necessitam produzir o material laminado com uma textura pré-definida, sendo que esta textura é transmitida à chapa pelos cilindros de acabamento [2].

As superfícies texturizadas desempenham um importante papel na fabricação de carrocerias de automóveis. Durante o processo de conformação, as irregularidades presentes na superfície texturizada do cilindro produzem chapas que exibem refletividade uniforme após a pintura [3].

Durante as primeiras etapas da laminação, alguns picos fraturam-se facilmente, tornando-se debris. Com a deposição de cromo duro, além de aumentar-se a dureza superficial, consegue-se manter a topografia superficial do cilindro por mais tempo. Um estudo feito objetivando comparar topograficamente superfícies texturizadas e não texturizadas revelou que, em geral, não existem diferenças significativas, e mostrou a capacidade do processo de revestimento para preservar a topografia da superfície original da peça [4]. A maioria das amostras de cilindros com revestimentos de cromo duro, no entanto, tem valor um pouco maior de rugosidade média da superfície e também mostra uma ligeira diminuição na contagem de picos. A provável razão para esse fato deve-se ao detalhe de alguns picos e vales menores serem recobertos e "ocultados" pelo revestimento de cromo [4].

Para o desenvolvimento de pesquisas que objetivem otimizar materiais e/ou revestimentos e modificações superficiais de cilindros de laminação a frio, é fundamental a simulação laboratorial do desgaste que ocorre durante uma campanha de laminação. Portanto, o presente trabalho objetiva, inicialmente, determinar os mecanismos de desgaste que ocorrem em cilindros de laminação a frio reais. Para tanto, réplicas obtidas a partir de cilindros industriais antes e após campanhas de laminação normais serão avaliadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e interferometria a laser. Em seguida, serão utilizados ensaios de deslizamento alternado, de forma a encontrar condições tribológicas que melhor reproduzam os desgastes encontrados através das réplicas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Produção das Amostras

A primeira etapa para determinação dos parâmetros para simulação do desgaste ocorrido em cilindros de laminação a frio em laboratório foi a análise de réplicas

topográficas obtidas em cilindros antes e após a laminação de uma campanha considerada normal.

O material das réplicas foi previamente validado por Leite [5]. O material usado foi da marca Zhermack, modelo Colorbite D. As réplicas foram feitas sob responsabilidade da empresa fabricante de cilindros, Gerdau S.A.

As réplicas de cilindros texturizados por EDT e revestidos com cromo duro foram analisadas via microscopia eletrônica de varredura (MEV) e interferometria a laser. O microscópio utilizado foi da marca Zeiss modelo Leo940A. As interferometrias foram feitas em uma área de 5 x 5 mm, usando densidade de pontos de 1000 x 100 em um equipamento UBM MESSTECHNIK MICROFOCUS. Após as medições usou-se o software Digital Surf MountainsMap Universal®, versão 3.0 para o cálculo de parâmetros topográficos que quantificassem as superfícies. As réplicas foram utilizadas para comparação topográfica entre o cilindro real e as amostras desgastadas em laboratório.

Após esta etapa realizou-se a confecção das amostras para os ensaios de deslizamento. As amostras foram obtidas através de um fragmento de cilindro. Este fragmento foi cortado obtendo amostras de 35 x 35 x 5mm. O material do cilindro consiste em um aço VC 10, utilizado pela empresa Gerdau para fabricação de cilindros de laminação a frio.

Após o corte das amostras, adurezaVickersfoimedida utilizando um durômetro universal marca Wolpert. Constatou-se que apesar de o material estar homogêneo (não ocorrer grande variação dos valores de dureza), os valores encontravam-se abaixo dos valores exigidos durante o processo de laminação.

Com esta constatação, foram realizados tratamentos térmicos com o objetivo de atingir-se a dureza recomendada para os cilindros durante a operação. Inicialmente, utilizou-se a sequência de tratamento recomendada pelo fabricante, mas um severo trincamento foi observado nas amostras. A sequência de tratamento térmico que resultou em valores de dureza dentro da faixa esperada e em amostras isentas de trincas consistiu de aquecimento a 950°C por duas horas e resfriamento em caixa de areia.

Após o tratamento térmico, realizou-se uma retificação das amostras. Esta etapa teve como objetivo garantir o paralelismo das amostras e prepará-las para receberem os tratamentos superficiais a serem utilizados neste trabalho.

Para verificar a composição química do material usou-se Espectrometria de Emissão Ótica (ThermoARL-4460).

A texturização por descargas elétricas (EDT)foi feita em um equipamento modelo Engemaq 440 MC utilizando eletrodo de cobre eletrolítico e fluido dielétrico ArcleanEletron à base de hidrocarbonetos em regime de acabamento. Este método tem como objetivo reproduzir a textura utilizada pela indústria laminadora.

O revestimento de cromo duro foirealizado em amostras previamente texturizadas.O método de deposição utilizabanhos sem aditivos, em uma temperatura entre 55 e 60 °Ce corrente entre 20 e 25 A/dm².

Após a deposição do revestimento,cortou-se as amostras, denominadas texturizadas e cromadas, para análise dassuas seções transversais. A microdureza do revestimento foi avaliada utilizando um microdurômetro Shimadzu com carga de 100g e penetrador Vickers.

2.2 Ensaio de Desgaste

Os testes de deslizamento foram feitos em um tribômetro universal da marca PlintandPartners modelo TE 67. Usou-se a configuração de deslizamento alternado para simular o desgaste ocorrido no cilindro de laminação a frio. Esta configuração foi escolhida por promover a inversão do sentido da força de atrito. Sabe-se que durante o processo de laminação, durante o contato do produto com o cilindro, também ocorre a inversão do sentido da força de atrito [6].

Os testes de deslizamento foram feitos utilizando como contracorpo cilindros e esferas de aço AISI 52100. Os cilindros utilizados possuíam comprimento e diâmetro de 9mm e foram alinhados de forma a produzir um contato em linha, ao passo que as esferas (contatos de ponto) possuíam diâmetro de 10mm. O comprimento de deslizamento para ambos os casos foi de 10 mm e a frequência de movimento de 2Hz.

Para o contracorpo cilíndrico usou-se cargas normais de 51,01 e 100,06 N. Para o contracorpo esférico as cargas normais foram de 31,39; 51,01 e 100,06 N. A Tabela 1 mostra as tensões de Hertz para cada ensaio realizado.

Tabela 1 – Tensões de Hertz para cada ensaio realizado

	Cilindro		Esfera		
	51,01 N	100,06 N	31,39 N	51,01 N	100,06 N
Pressão de Contato (Gpa)	0,12	0,17	0,62	0,73	0,92

Os testes foram realizados com diferentes tempos de ensaio e as superfícies das trilhas de desgaste foram analisadas por MEV e interferometria a laser, de forma a acompanhar-se a evolução do desgaste ocorrido nas amostras e compará-lo com o ocorrido nas réplicas dos cilindros de laminação.

Para avaliação topográfica após os ensaios de deslizamento dividiram-se os valores dos parâmetros topográficos finais pelos iniciais e comparou-se com a média dos resultados encontrados nas réplicas dos dois cilindros que foram texturizados por EDT e posteriormente cromados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Produção das Amostras

Análises via interferometria a laser (Figura 5) confirmam a ideia de que o mecanismo de desgaste ocorrido durante a campanha é o desgaste por deslizamento, que aparentemente remove os picos das asperidades mais proeminentes que constituem a topografia original.

Os valores de composição química medidos via Espectrometria de Emissão Ótica mostraram que os principais componentes estavam dentro do intervalo preconizado pela norma.

Os resultados de dureza mostraram que o material antes do tratamento térmico possuía valores de $HV = 305 \pm 12 \text{ Kgf/mm}^2$. Após o tratamento térmico com resfriamento ao ar calmo as amostras apresentaram trincamento. Este trincamento foi associado às pequenas dimensões das amostras, que devem resultar em condições de resfriamento diferentes e mais severas do que aquelas que ocorrem em um cilindro de laminação. Com o resfriamento em caixa de areia o material apresentou dureza de $HV = 611 \pm 30 \text{ Kgf/mm}^2$, sem a presença de trincas.

Após o tratamento térmico as amostras passaram pelo processo de texturização por EDT. Os resultados são mostrados na Figura 1. Esta figura compara os parâmetros de topografia de superfícies desejáveis, obtidos através das réplicas, e os parâmetros obtidos após a texturização. Nota-se que os parâmetros de texturização utilizados resultam em parâmetros de topografia semelhantes aos encontrados nas réplicas dos cilindros antes do uso. O valor do parâmetro R_a foi 6% maior na amostra produzida em laboratório e o parâmetro P_c foi 1% maior na amostra. A importância da texturização na laminação a frio está relacionada com a capacidade das irregularidades produzidas pela textura em armazenar debris que poderiam permanecer no contato chapa/cilindro [7], na sua influência na lubrificação durante a laminação [7] e no aspecto estético final da chapa produzida [2].

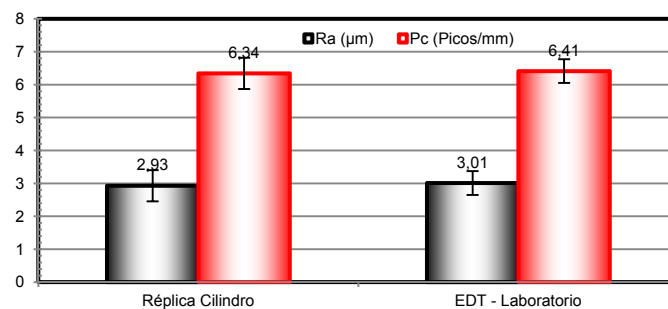


Figura 1 – Comparação dos parâmetros topográficos.

O revestimento de cromo duro apresentou espessura de $6\mu\text{m}$. O valor da dureza do revestimento foi de $Hv_{(0,1)} = 823 \pm 39 \text{ Kgf/mm}^2$, mostrando-se compatível com valores encontrados na literatura [6, 8-10].

3.2 Identificação e Reprodução do Desgaste

Análises via interferometria a laser das réplicas antes e após uma campanha de laminação considerada normal (Figura 2) mostram que o mecanismo de desgaste ocorrido durante a campanha é o desgaste por deslizamento, que aparentemente remove os picos das asperidades mais proeminentes que constituem a topografia original.

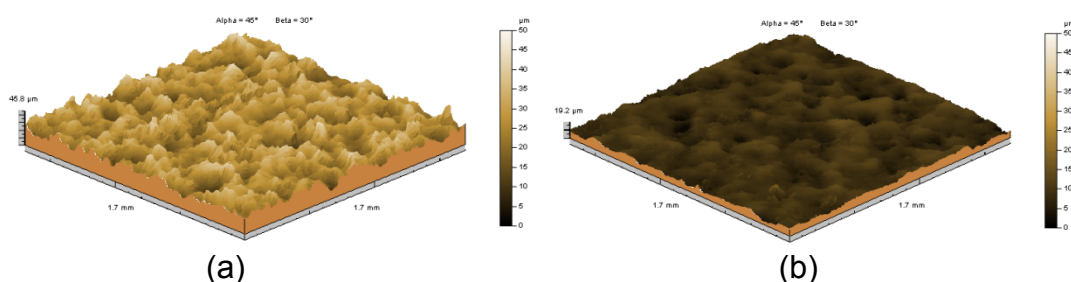


Figura 2 – Mapas topográficos típicos de cilindros laminadores texturizados e cromados (a) antes e (b) após o uso.

Para reprodução do desgaste primeiramente foram feitos testes utilizando contra corpo esférico. Nestes testes variou-se a carga normal e o tempo de deslizamento. A razão entre os parâmetros topográficos finais e iniciais (Figura 3) mostraram a tendência dos ensaios em suavizar os parâmetros topográficos após o deslizamento, assim como havia ocorrido nas réplicas dos cilindros. Porém é possível observar que

para cargas normais de 98 e 48 N a suavização dos parâmetros S_q e S_{dq} foi mais agressiva do que o ocorrido nas réplicas. Ao reduzir a carga para 48 N. Para reduzir a pressão de contato.

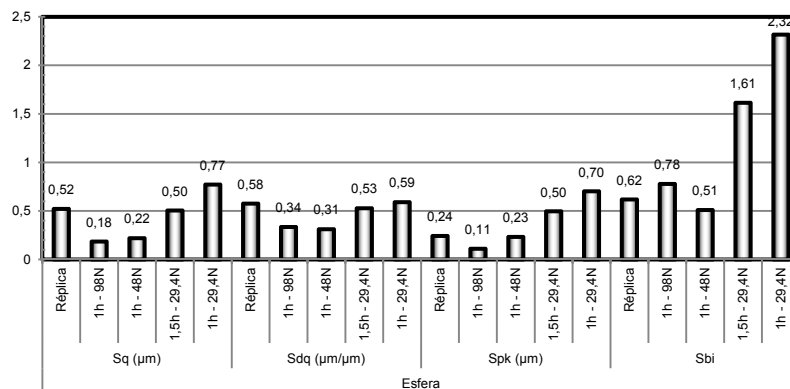


Figura 3 – Variação dos parâmetros topográficos em função da variação da carga normal e do tempo de deslizamento utilizando contracorpo esférico.

A análise da trilha de desgaste via MEV e EDX revelou que não houve arrancamento total do revestimento de cromo duro. Nas partes que entraram em contato com o contracorpo (marcadas em azul na Figura 4) encontrou-se a presença de cromo após o deslizamento. Já a quantificação feita em regiões aparentemente mais baixas (marcadas em vermelho na Figura 4) sugere que não houve alteração do revestimento de cromo duro em função do deslizamento.

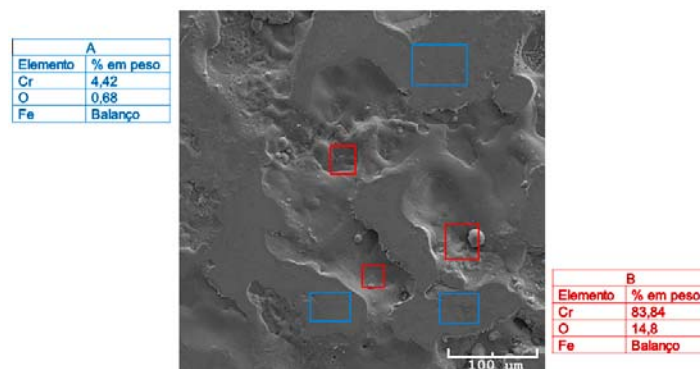


Figura 4 – Imagem produzidas por elétrons secundários e análise química semiquantitativa (a) regiões aparentemente mais altas (b) regiões aparentemente mais baixas da trilha de desgaste produzidas por ensaios de deslizamento utilizando contracorpo esférico.

A evolução do coeficiente de atrito típica é mostrado na Figura 5. A Figura 5(a) mostra a média de cada ciclo em função do numero de ciclos. Já a Figura 5(b) mostra a evolução do coeficiente de atrito em função do numero de ciclos e a posição sobre a amostra. A Figura mostra que o coeficiente de atrito se estabilizou em torno de 0,6. Este valor é maior do que valores encontrados na literatura para o mesmo sistema tribológico [6].

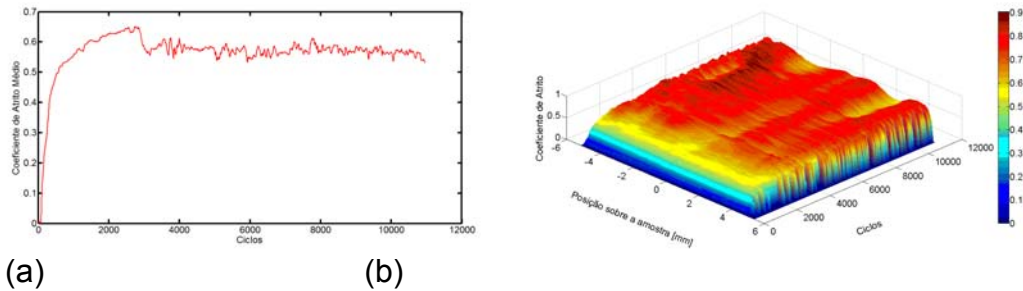


Figura 5 – Evolução do coeficiente de atrito utilizando contracorpo esférico (a) em função do número de ciclos e (b) em função do número de ciclos e posição sobre a amostra.

Objetivando reduzir a pressão de contato, alterando assim o tribosistema usou-se contracorpo cilíndrico com carga normal de 51,01 N. A variação da topografia é mostrada na Figura 6. É possível observar que o teste de deslizamento suavizou os parâmetros topográficos (valores menores que 1), porém a suavização encontrada nas réplicas foi maior do que utilizando a carga normal de 51,01 N.

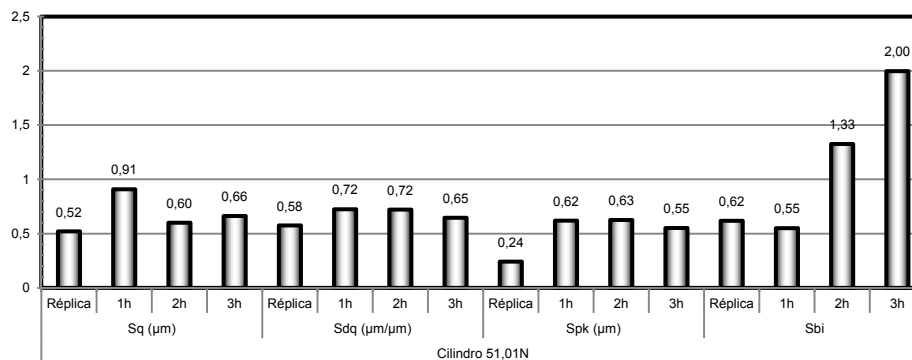


Figura 6 – Variação dos parâmetros topográficos utilizando carga normal de 51,01N em função da variação do tempo de deslizamento utilizando contracorpo cilíndrico.

Com esta constatação elevou-se a carga normal para 100,06N. A Figura 7 mostra a variação dos parâmetros topográficos. Os resultados mostraram que a elevação da carga normal elevou a suavização da maioria dos parâmetros topográficos analisados.

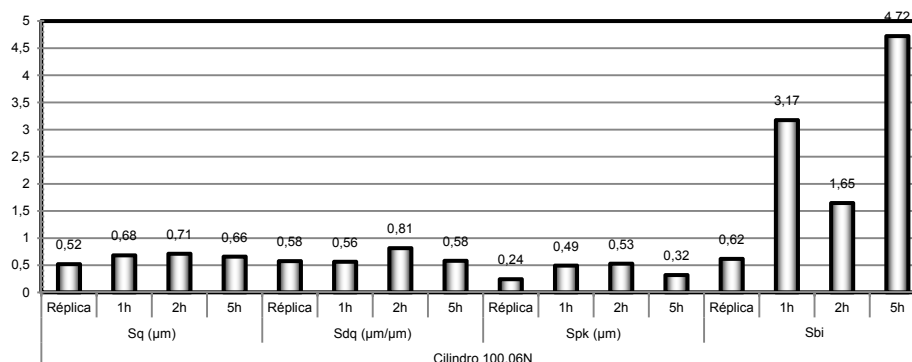


Figura 7 – Variação dos parâmetros topográficos utilizando carga normal de 100,06N em função da variação do tempo de deslizamento utilizando contracorpo cilíndrico.

Além da maior suavização dos parâmetros topográficos o coeficiente de atrito estabilizou em torno de 0,35. Valor semelhante ao encontrado na literatura [6]. A Figura 8(a) mostra a média de cada ciclo em função do número de ciclos. Já a

Figura 8(b) mostra a evolução do coeficiente de atrito em função do numero de ciclos e a posição sobre a amostra.

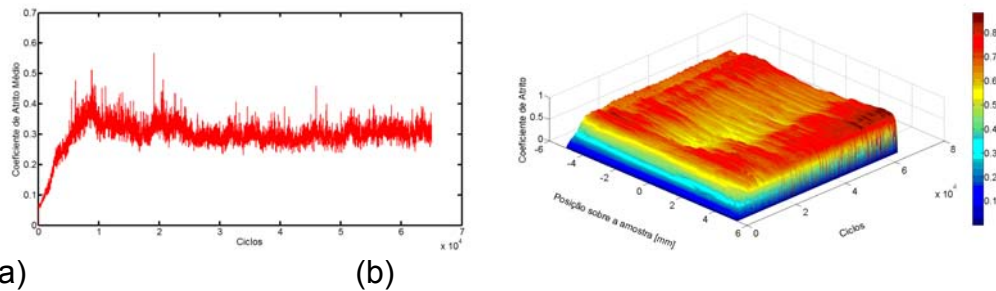


Figura 8 – Evolução do coeficiente de atrito utilizando contracorpo cilíndrico (a) em função do numero de ciclos e (b) em função do numero de ciclos e posição sobre a amostra.

A análise da Figura 8(b) mostra que houve a elevação do coeficiente de atrito nas bordas da trilha de deslizamento. Quando se utiliza contracorpo esférico (Figura 5(b)) este aumento ocorre também no centro da trilha elevando assim o coeficiente de atrito médio.

Os debrís gerados no ensaio de deslizamento foram coletados e analisados por microscopia eletrônica de varredura e EDX. Os resultados mostraram que não houve presença de cromo nos mesmos. A oxidação ocorrida nos debrís pode ser explicada pelo fato de permanecerem por algum tempo na região de contato sendo fortemente aquecidas e fragmentadas durante o deslizamento.

A Figura 9 mostra imagens de microscopia eletrônica de varredura dos debrís. É possível observar que os debrís gerados nos ensaios utilizando contracorpo cilíndrico são maiores, porem em menor quantidade que os debrís gerados utilizando contracorpo esférico. O tamanho e a quantidade de debrís gerados após o deslizamento ainda serão investigados.

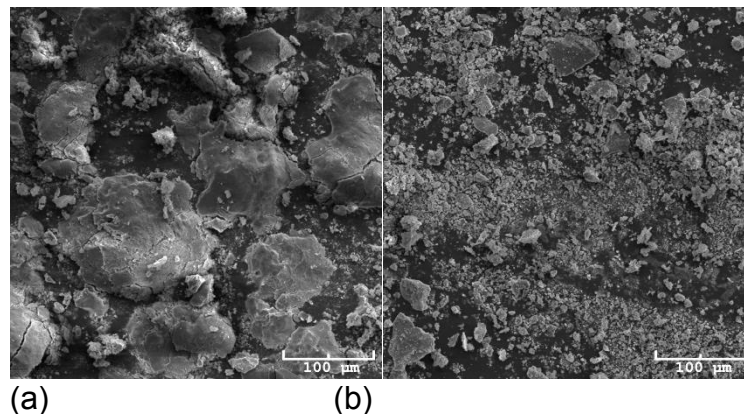


Figura 9 – Microscopia eletrônica de varredura dos debrís (a) contracorpo cilíndrico (b) contracorpo esférico.

A análise do contracorpo, tanto cilíndrico (Figura 10(a)) quanto esférico (Figura 10 (b)), mostrou que não houve transferência de cromo do corpo para o contracorpo. Porem nos contracorpos houve a formação de uma tribocamada rica em ferro e oxigênio nos pontos mais escuros da Figura 10.

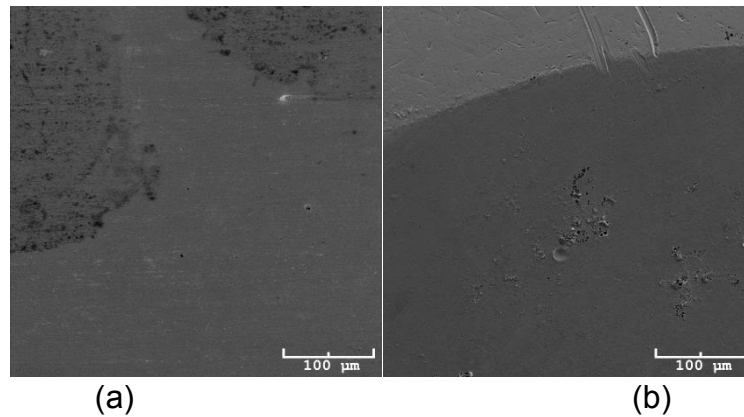


Figura 10 – Microscopia eletrônica de varredura (a) contracorpó cilíndrico (b) contracorpó esférico.

A imagem via MEV combinada análise semiquantitativa por EDX mostrou que de forma semelhante ao ocorrido na trilha de desgaste utilizando contracorpó esférico, ao utilizar contracorpó cilíndrico houve a redução da quantidade de cromo nos picos da textura porém o revestimento não foi totalmente arrancado (Figura 11).

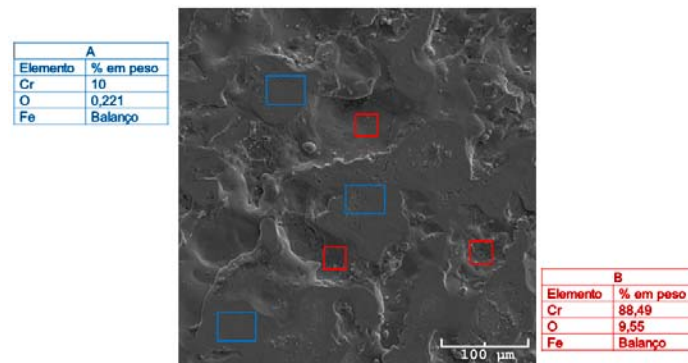


Figura 11 – Imagem produzidas por elétrons secundários e análise química semiquantitativa da trilha de desgaste produzidas por ensaios de deslizamento utilizando contracorpó cilíndrico.

A comparação entre as Figuras 4 e 11 mostra que não houve diferença significativa no mecanismo de desgaste ao usar contracorpó esférico ou cilíndrico. Em ambos os casos ocorreu desgaste com forte componente mecânico, ocorrendo a fratura dos picos mais proeminentes resultando em um “alisamento” da superfície [6].

Durante o processo de laminação a frio o cilindro é substituído em função da suavização da topografia superficial, porém antes que o revestimento de cromo duro seja totalmente removido. Tanto o uso de contracorpó cilíndrico quanto esférico ocorreu a suavização dos parâmetros sem a total remoção do revestimento de cromo duro. Porém a utilização de contracorpó cilíndrico permite a avaliação da trilha desgastada em uma área maior.

Além disso maior tempo de ensaio (5 horas) permite que o ensaio seja interrompido com tempos menores permitindo o acompanhamento da evolução do desgaste na trilha.

4 CONCLUSÃO

Os resultados dos testes de desgaste mostraram que utilizando contracorpó esféricos ou cilíndricos ocorre suavização dos parâmetros topográficos nas amostras. De forma semelhante ao encontrado nas réplicas.

A análise tribológica mostrou que utilizando contracorpo cilíndrico o coeficiente de atrito médio em cada ciclo se estabilizou aproximadamente em 0,35 já para contracorpo esférico o coeficiente de atrito estabilizou em torno de 0,6. Porém o valor de 0,35 é mais coerente com valores encontrados na literatura [6].

Ao usar tanto contracorpo esférico ou cilíndrico ocorreu desgaste com forte componente mecânico, ocorrendo a fratura dos picos mais proeminentes resultando em um “alisamento” da superfície.

Com a análise dos resultados é razoável supor que a utilização de contracorpo cilíndrico permite analisar o desgaste em no início (30 minutos) no meio (3 horas) e no fim (5 horas) sem remoção completa da camada de cromo duro, além de permitir diferenças de comportamento tribológico em função da posição sobre a trilha e a análise experimental das tribocamadas formadas. Portanto recomenda-se a utilização de contracorpo cilíndrico, carga normal de 100,06 N e deslizamento por 5 horas para simulação do desgaste ocorrido em cilindros de laminação a frio.

Agradecimentos

Agradecimentos à Gerdau pelo fornecimento do material replicado, fornecimento do material para obtenção das amostras e realização dos tratamentos térmicos à Fapemig, à CAPES e ao CNPQ pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 Mendes JLT. Influência De Parâmetros Microestruturais No Comportamento Tribológico De Ligas Ferrosas Multicomponentes. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2007.
- 2 Elkoca O. A Study on the Characteristics of Electrical Discharge Textured Skin Pass Mill Work Roll. Surface and Coatings Technology. 2008;202(12):2765-74.
- 3 UTSCH M, Vinke P. Edt: Roll Texturing Technology as a Base of Modern Surfaces in Automotive Cold Mill Flat Products. Iron & Steel technology. 2005:50.
- 4 Simão J, Aspinwall DK. Hard Chromium Plating of Edt Mill Work Rolls. Journal of Materials Processing Technology. 1999;92-93(0):281-7.
- 5 Leite MV, Santos MMd, Mello JDBd, Lima AGd, Ramos GP, Machado JR, et al., editors. Mecanismos De Desgaste De Cilindros De Trabalho Dos Laminadores Tandem De Tiras a Frio Do Brasil. 48º Seminário De Laminação - Processos E Produtos Laminados E Revestidos; 2011; Santos - SP.
- 6 De Mello JDB, Gonçalves Jr JL, Costa HL. Influence of Surface Texturing and Hard Chromium Coating on the Wear of Steels Used in Cold Rolling Mill Rolls. Wear. 2013;302(1-2):1295-309.
- 7 Zum Gahr KH, Mathieu M, Brylka B. Friction Control by Surface Engineering of Ceramic Sliding Pairs in Water. Wear. 2007;263(7-12):920-9.
- 8 Chiu LH, Yang CF, Hsieh WC, Cheng AS. Effect of Contact Pressure on Wear Resistance of Aisi H13 Tool Steels with Chromium Nitride and Hard Chromium Coatings. Surface and Coatings Technology. 2002;154(2-3):282-8.
- 9 Bolelli G, Cannillo V, Lusvarghi L, Riccò S. Mechanical and Tribological Properties of Electrolytic Hard Chrome and HvoF-Sprayed Coatings. Surface and Coatings Technology. 2006;200(9):2995-3009.
- 10 El-Amoush AS, Abu-Rob A, Edwan H, Atrash K, Igab M. Tribological Properties of Hard Chromium Coated 1010 Mild Steel under Different Sliding Distances. Solid State Sciences. 2011;13(3):529-33.