

AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DO CROMO DURO E TEXTURIZAÇÃO APLICADAS EM AÇOS PARA A FABRICAÇÃO DE CILINDROS DE LAMINAÇÃO A FRIO

José Lucio Gonçalves Junior ¹
José Daniel Biasoli de Mello ²

Resumo

O presente trabalho analisa o comportamento tribológico de modificações superficiais geralmente utilizadas em cilindros para laminação a frio. Amostras provenientes de cilindros reais foram tratadas termicamente, retificadas e modificadas superficialmente (cromagem, texturização, cromagem com posterior texturização e texturização com posterior cromagem). Os testes tribológicos foram realizados em modo alternado de deslizamento, utilizando a configuração de esfera (Aço SAE 52100) – plano utilizando-se carga de 9,8 N. Observa-se que não há alteração significativa do coeficiente de atrito, em função das modificações superficiais, e que a texturização promove um aumento significativo no desgaste do contracorpo, enquanto o revestimento de cromo duro promove uma redução do mesmo. A adição do revestimento de cromo duro promove a formação de uma tribocamada no contracorpo constituída de cromo e oxigênio. Em contrapartida, em corpos sem o recobrimento de cromo duro, ocorre a formação de uma tribocamada constituída de ferro e oxigênio no corpo.

Palavras-chave: Tribologia; Laminação a frio; Cromo duro; Texturização.

TRIBOLOGICAL EVALUATION OF SURFACE TEXTURING AND HARD CHROMIUM COATING APPLIED TO COLD ROLLING MILLS ROLLS STEELS

Abstract

The present work analyzes the tribological behavior of surface modifications often used in cold rolling mill rolls. Different surface modifications were carried out on samples produced from a fragment of the rolling mill roll: i) texturing; ii) chromium plating; iii) texturing with subsequent hard chrome plating; iv) and hard chrome plating with subsequent texturing. Before the surface modifications the samples were heat treated and ground on both faces. Wear tests were performed using a reciprocating movement of a ball over flat configuration under a load of 9.8 N. It is observed that there is no significant change in the coefficient of friction as a function of surface modification. Surface texturing increases the wear of the counter body, while the hard chromium coating reduces it. The addition of hard chromium coating promotes the formation of a tribolayer on the counter body consisting of chromium and oxygen. On the other hand, for the samples without hard chrome coating, the tribolayer consists of iron and oxygen.

Key words: Tribology; Cold rolling mill roll; Hard chrome; Surface texturing.

¹Mestre, Bolsista de Doutorado, Laboratório de Tribologia e Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Av. João Naves de Avila, 2121, Campus Santa Mônica, Cep 38408-144, Uberlândia, MG, Brasil.

E-mail: jlucio@mecanica.ufu.br

²Doutor, Professor Titular Emérito, Laboratório de Tribologia e Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Av. João Naves de Avila, 2121, Campus Santa Mônica, Cep 38408-144, Uberlândia, MG, Brasil.

E-mail: ltm-demello@ufu.br

I INTRODUÇÃO

Os grandes produtores de aço no Brasil encontram-se, atualmente, 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, 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 a chapa pelos cilindros de acabamento.⁽²⁾

As superfícies texturizadas desempenham um importante papel na fabricação de carrocerias de automóveis. Durante o processo de conformação, os sulcos formados pela superfície texturizada do cilindro exibem uma refletividade uniforme após a pintura.⁽³⁾

Durante as primeiras etapas da laminação, alguns picos fraturam facilmente tornando-se *debris*. Com a deposição de cromo duro, além de aumentar a dureza superficial, consegue-se manter a topografia superficial do cilindro por mais tempo. O estudo feito objetivando comparar topograficamente superfícies texturizadas e não texturizadas revela que, em geral, não existem diferenças significativas, e mostra a capacidade do processo de revestimento para preservar a topografia da superfície original da peça. 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 apresenta 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⁾

Um dos estudos existentes⁽⁵⁾ analisa o comportamento do atrito e do desgaste em amostras de aço ferramenta AISI H13 apresentando, para efeito comparativo, ensaios em amostras revestidas com cromo duro e em amostras sem revestimentos. Os autores observam que o coeficiente de atrito das amostras revestidas com cromo duro sofre uma ampla flutuação. Entretanto, para

amostras não revestidas, o coeficiente de atrito mostra-se mais estável. Isto ocorre devido à rugosidade superficial do revestimento, que contém um grande número de pontos de contato em relação à superfície polida e o início do ponto de colapso do revestimento resulta na flutuação do atrito. A flutuação do atrito surge da produção e ruptura de *debris*.

Apesar da existência de inúmeros estudos laboratoriais mostrando os pontos positivos da texturização e do revestimento de cromo duro, a aplicação desses revestimentos por clientes da empresa parceira neste trabalho, Gerdau S.A., tem apresentado resultados diferentes dos apresentados pela literatura. A controvérsia entre resultados práticos e laboratoriais, bem como entre diferentes tribosistemas motivou a realização do presente trabalho.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material analisado na produção das amostras para testes de desgaste foi um aço para cilindro de laminação a frio, VC9, fornecido pela Divisão de Cilindros da Gerdau S. A. A Tabela I apresenta a composição química do aço.

Após cortes transversais no fragmento de cilindro, obtiveram-se amostras de aproximadamente 30 x 30 mm, onde foram realizadas 30 medições de dureza (15 em cada face) por amostra, para verificar a homogeneidade da superfície. O equipamento utilizado foi um Durômetro Universal Wolpert com carga de 20 kgf

A partir da constatação da não homogeneidade da dureza do material, fez-se um tratamento que consistiu em normalização a 920°C por 2 horas com resfriamento ao ar soprado, seguido de um revenimento a 600°C por 2 horas e posterior têmpera a 920°C com revenimento a 280°C por 2 horas.

Após o tratamento térmico, retificaram-se as amostras para garantir o paralelismo entre faces e, em seguida, realizaram-se testes de indentação, microindentação, preparação metalográfica convencional e observação por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), em equipamento modelo Hitachi modelo TM-3000, novamente para verificação da homogeneidade das amostras.

Com a homogeneidade superficial comprovada, iniciou-se o processo de modificação superficial. O processo de texturização consistiu em jateamento com granalha de aço de diâmetro 0,7 mm, vazão de ar em 4,8 m³/min e pressão de ar de 7 kgf/cm² durante 15 segundos. A deposição de cromo foi realizada com banho ausente de flúor com corrente de 200 A e tensão de 2 V por 2 horas. A Figura 1 mostra as etapas de produção das amostras.

Tabela I. Composição química do aço VC9 (% p)

Elemento	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	P	S	Al	Cu
Mínimo	0,81	0,20	0,2	0,0	3,4	0,33	0,0	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo	0,84	0,35	0,3	0,2	3,6	0,43	0,1	0,10	0,02	0,02	0,02	0,25

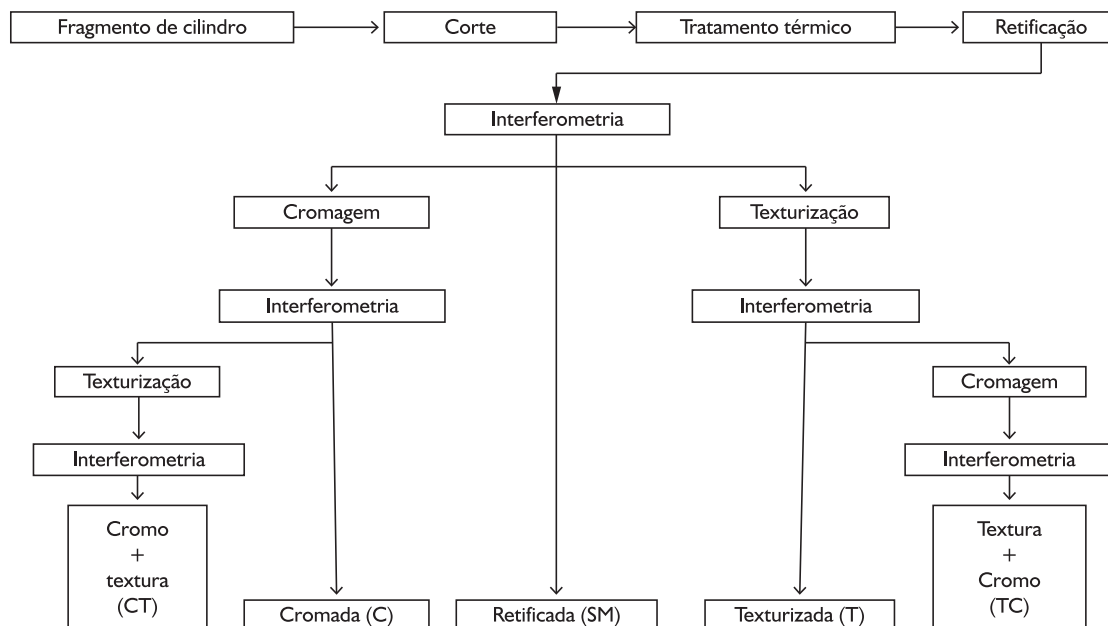


Figura 1. Etapas de produção das amostras.

Para a verificação da dureza após as modificações superficiais, realizaram-se cinco medições de microdureza Vickers por amostra, carga de 100 g, tempo de aplicação de 10 s, em microdurômetro HMV Micro Hardness Tester da Shimadzu.

Para servir de contracorpo nos ensaios de deslizamento, usaram-se esferas de aço SAE 52100 com diâmetro de 10 mm.

Os ensaios de desgaste por deslizamento foram realizados em um tribômetro da marca CETR, modelo UMT, na configuração movimento alternado com pista de deslizamento de 10 mm de comprimento e aplicação de carga de 9,8 N.

Com o objetivo de mensurar o desgaste ocorrido no contracorpo durante os ensaios de desgaste utilizou-se um microscópio da marca Olympus modelo BX60M, para fotografar a esfera e medir o diâmetro da calota esférica formada durante o teste. Com a determinação do diâmetro da calota esférica e considerando-se a superfície como nivelada pode-se calcular o volume desgastado durante o ensaio de deslizamento.

Para quantificar o desgaste das amostras primeiramente empregou-se o método de medição gravimétrico utilizando uma balança da marca Mettler Toledo e modelo XS205 Dual Range. As medições e os ensaios foram feitos em sala com temperatura controlada de 25°C e umidade relativa de 60%.

Ainda com o objetivo de mensurar o desgaste ocorrido na amostra, utilizou-se o método de interferometria a laser 3D, em equipamento da marca UBM MESSTECHNIK. Após a realização da medição, fez-se a análise das imagens utilizando o *software* Digital Surf Mountains Map Universal®, versão 3.0, com *cut-off* definido de 0,8 mm.

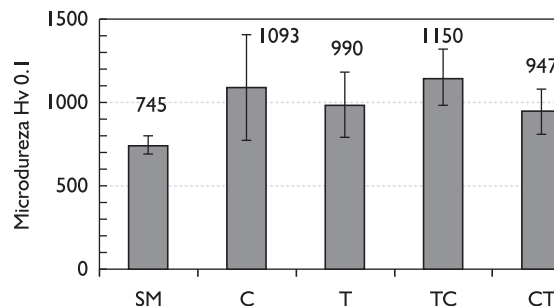


Figura 2. Valores de microdureza em função das modificações superficiais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Metalográfica e Dureza

As microestruturas encontradas, tanto no corpo quanto no contracorpo foram martensíticas e os testes de indentação Vickers realizados resultaram em valores de 624 ± 47 HV₂₀, para o corpo, e 772 ± 5 HV₂₀, para o contracorpo.

A Figura 2 mostra que o menor valor de microdureza refere-se às amostras sem modificação superficial (SM). Nota-se ainda que tanto a texturização quanto o revestimento de cromo aumentam a dureza das amostras. As amostras texturizadas depois da cromagem apresentam maior dureza se comparadas às amostras sem modificação, porém menor dureza se comparadas às amostras simplesmente cromadas. As amostras texturizadas e posteriormente cromadas apresentam valores da dureza intrínseca do cromo duro de aproximadamente HV = 1.100 kgf/mm², conforme reportado na literatura.⁽⁴⁾

A análise via MEV revela que tanto as amostras revestidas com cromo duro quanto as amostras texturizadas e posteriormente cromadas apresentam camadas com espessura de aproximadamente $20\ \mu\text{m}$. A amostra revestida com cromo, e posteriormente texturizada, teve o revestimento arrancado pelo processo de texturização. Por esta razão, os resultados das amostras do grupo CT são excluídos das análises posteriores.

3.2 Testes de Desgaste por Deslizamento

A Figura 3 mostra a evolução do coeficiente de atrito em função do tempo de teste para as diferentes modificações superficiais. Nota-se que o comportamento das diferentes modificações superficiais está bem próximo ao comportamento da amostra sem modificação (0,38).

Qualitativamente, é possível observar, na Figura 4, que o revestimento de cromo duro atua reduzindo o desgaste do contracorpo. Com a adição do revestimento ocorre elevação da resistência de contato elétrico, indicando a presença de uma tribocamada isolante. O aspecto macroscópico das marcas de desgaste observados nas Figura 4b, d evidenciam a presença de uma espessa tribocamada inexistente nos contracorpos utilizados nos ensaios com amostras não revestidas (Figura 4a, c).

Ainda analisando o desgaste do contracorpo, agora de forma quantitativa, é possível comprovar que texturização causa aumento no desgaste do contracorpo, enquanto o revestimento de cromo duro causa redução no mesmo (Figura 5).

A superfície da amostra texturizada, que apresenta uma maior rugosidade superficial, em função de possuir picos mais proeminentes, induz maior desgaste abrasivo no

contracorpo. Em amostras texturizadas, o contato ocorre nas pontas dos picos, elevando a pressão de contato tendo como consequência o aumento do desgaste abrasivo.⁽⁶⁾

Análises via microscopia eletrônica de varredura no contracorpo ensaiado com amostras revestidas com cromo duro mostram tratar-se de uma tribocamada rica em cromo (Figura 6), permitindo especular que a presença da camada rica em cromo e oxigênio seja constituída parcialmente por óxido de cromo, garantindo maior resistência ao desgaste.

Analisando com mais detalhes as marcas de desgaste no contracorpo, observa-se acúmulo de matéria nas suas bordas (Figura 7). A Tabela 2 mostra, de uma maneira semiquantitativa, que a natureza do material acumulado é diferente e que se trata de uma tribocamada rica em oxigênio e ferro, no caso das amostras sem revestimento de cromo, e ricas em ferro, oxigênio e cromo, nas amostras revestidas com cromo duro.

É razoável supor que os óxidos mistos de ferro e cromo sejam mais protetores que os óxidos de ferro. A transferência de cromo do corpo para o contracorpo promove a formação de uma tribocamada com dureza suficientemente elevada para aumentar a resistência ao desgaste abrasivo.⁽⁷⁾

O mecanismo de desgaste predominante nas amostras é o desgaste por deslizamento, com a formação de uma tribocamada que aparece ou na amostra ou no contracorpo. Esta tribocamada é proveniente da cominuição das partículas de desgaste, sua deformação e oxidação. Observa-se, nas Figura 8a, b, o fenômeno citado, onde é possível observar a formação de “ilhas” de terceiro corpo, em que a imagem gerada por elétrons retroespalhados revela serem essas “ilhas” formadas por elementos leves, que são confirmados, utilizando-se a técnica de EDX, como sendo oxigênio (Figura 8c, d). Notam-se ainda, na Figura 8, os riscos de abrasão ocasionados pelo deslizamento.

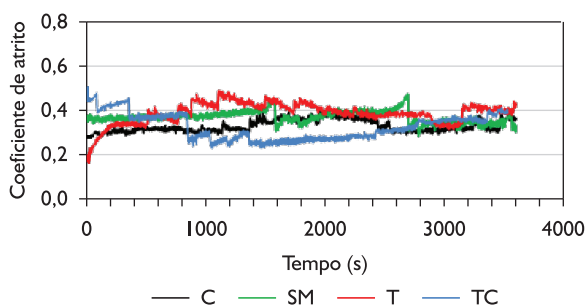


Figura 3. Evolução do coeficiente de atrito para diferentes modificações superficiais.

Tabela 2. Composição química da tribocamada (% p)

	O	Cr	Fe
SM	27,30	0,97	Balanço
TC	28,90	18,70	Balanço

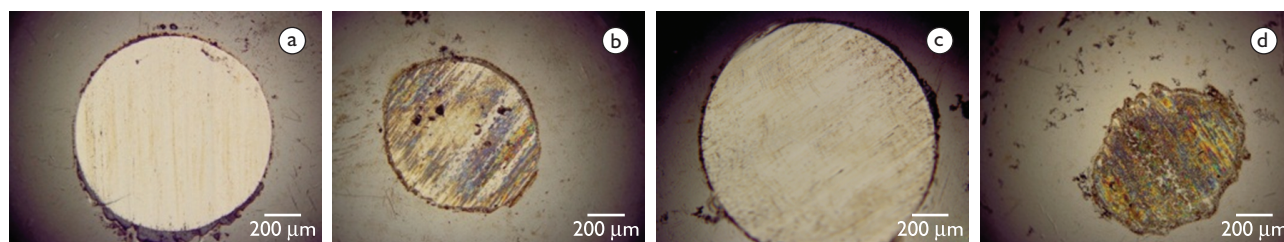


Figura 4. Desgaste do contracorpo para diferentes modificações superficiais: a) SM; b) C; c) T; d) TC.

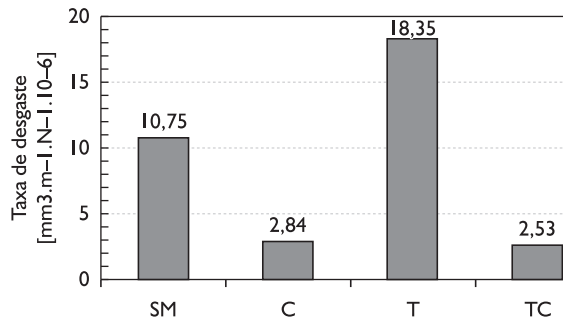


Figura 5. Taxa de desgaste do contracorpo em função do revestimento.

Ao analisar as amostras texturizadas, nota-se grande semelhança com as amostras sem revestimento. Segundo Zum Gahr, Mathieu e Brylk,⁽⁸⁾ um dos objetivos da texturização é o acúmulo de *debris* nos sulcos da textura. Na Figura 9, nota-se, na seta em destaque, o acúmulo de partículas de desgaste, ainda não deformadas, nas reentrâncias produzidas pela texturização

A análise de amostras revestidas com cromo duro revela um forte componente mecânica, com a quebra dos picos, levando ao alisamento da superfície, conforme ilustrado na Figura 10.

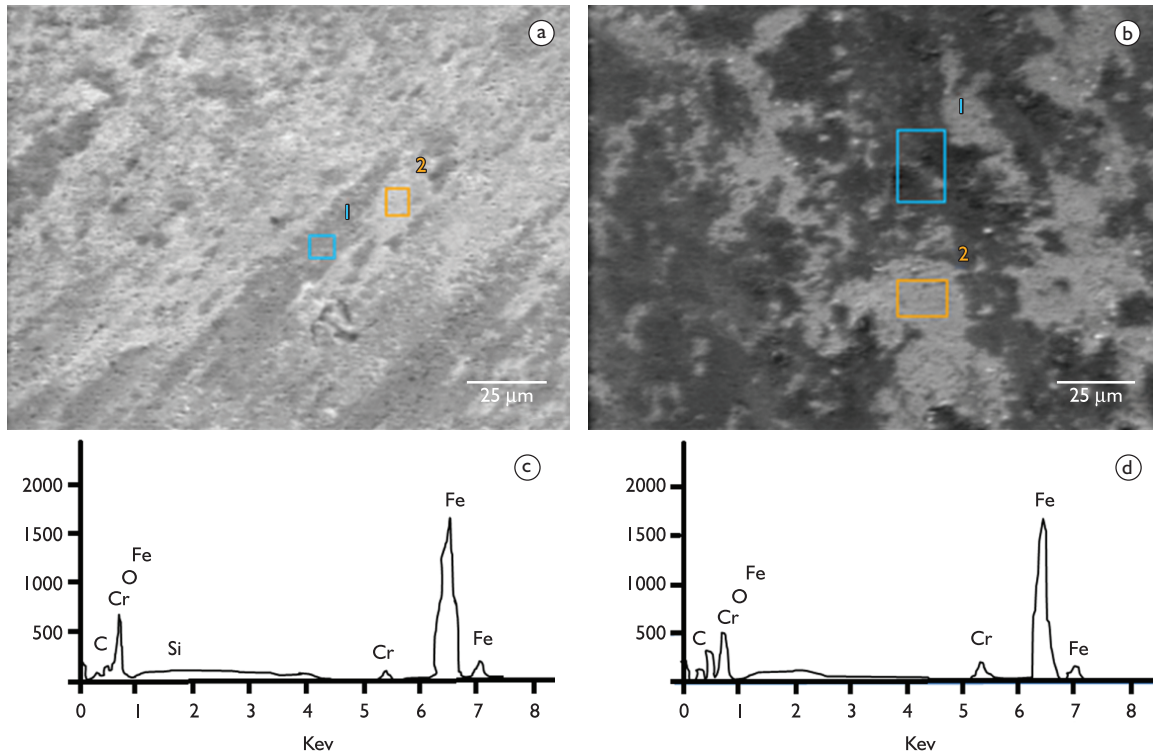


Figura 6. Aspectos típicos das marcas de desgaste em contracorpos atuantes em amostras revestidas com cromo: a) cromada; b) texturizada e cromada; c) espectro típico da região clara obtida por EDX; d) espectro típico da região escura obtida por EDX.

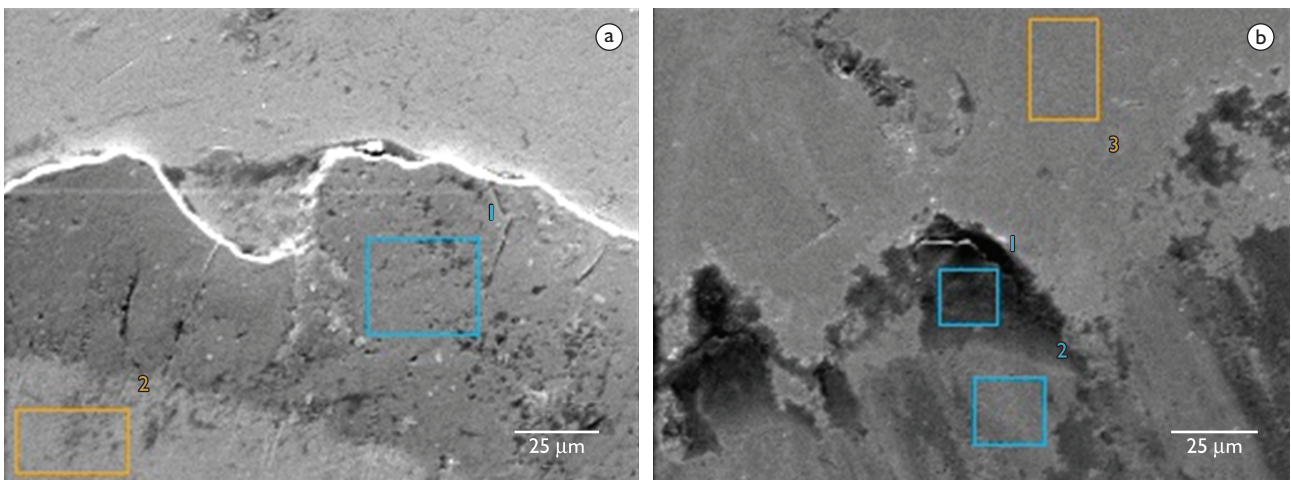


Figura 7. Detalhes no acúmulo de matéria encontrados nas bordas da marca de desgaste do contra corpo: a) ensaiado com amostra sem modificação superficial; b) ensaiado com amostras texturizadas e posteriormente cromadas.

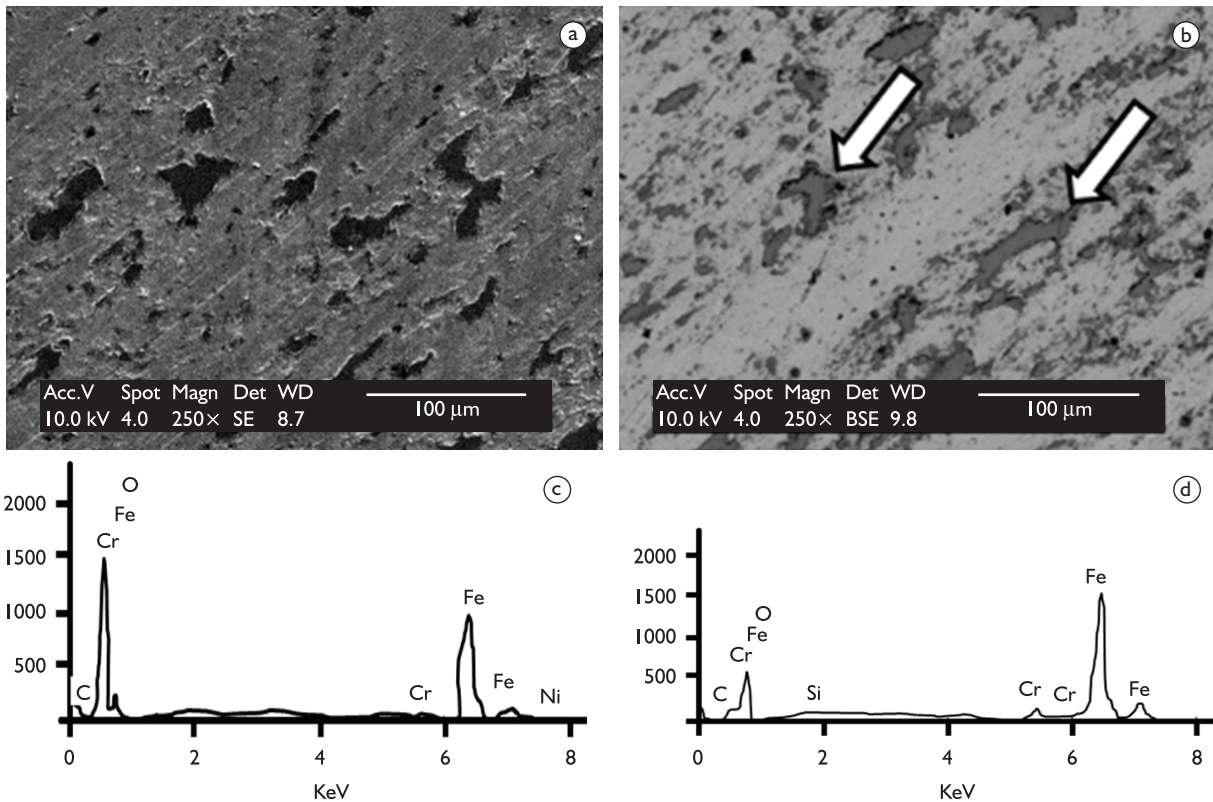


Figura 8. Micrografias obtidas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura na marca de desgaste em amostras sem modificação superficial: a) elétrons secundários; b) elétrons retroespalhados; c) EDX na região escura; d) EDX na região clara.

Para confirmar a teoria da forte predominância do componente mecânico no desgaste de amostras revestidas com cromo duro, utilizou-se a técnica de EDX como mostrado na Figura 11. As análises feitas por EDX, tanto na região da marca de desgaste (Figura 11b) quanto na região fora da marca de desgaste (Figura 11c), revelam a predominância de cromo, evidenciando que as alterações induzidas são predominantemente de caráter mecânico (alteração na topografia de superfície).

As amostras texturizadas e posteriormente cromadas apresentaram mecanismos de desgaste equivalentes, com predominância de formação de tribocamada rica em oxigênio nos picos das protuberâncias desgastadas, conforme a Figura 12. Segundo Milan et al.⁽⁹⁾ esses desgastes formam pequenos fragmentos que permanecem na região de ensaio, são fortemente deformados e sofrem oxidação e este mecanismo de desgaste induz uma transferência mútua de matéria entre o corpo e o contracorpo.

Nota-se, na Figura 13, que no contracorpo que deslizou contra amostras texturizadas e posteriormente cromadas, ocorre um acúmulo de material na borda da região desgastada. Esses acúmulos de matéria são gradativamente fraturados, contribuindo para a formação da tribocamada.

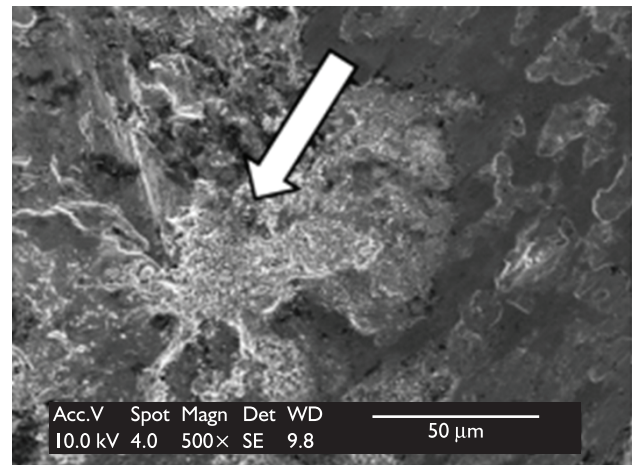


Figura 9. Micrografia obtida pela técnica de microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários, na marca de desgaste de amostra texturizada.

A principal diferença do contracorpo ensaiado com amostras revestidas com cromo e sem revestimento de cromo está na composição química do material acumulado nas bordas da marca de desgaste. O contracorpo ensaiado com amostras revestidas com cromo duro apresentou uma tribocamada rica em ferro, cromo e oxigênio (Figura 13), enquanto o contracorpo ensaiado com amostras sem revestimento de cromo apresentou uma tribocamada rica em ferro e oxigênio (Figura 7).

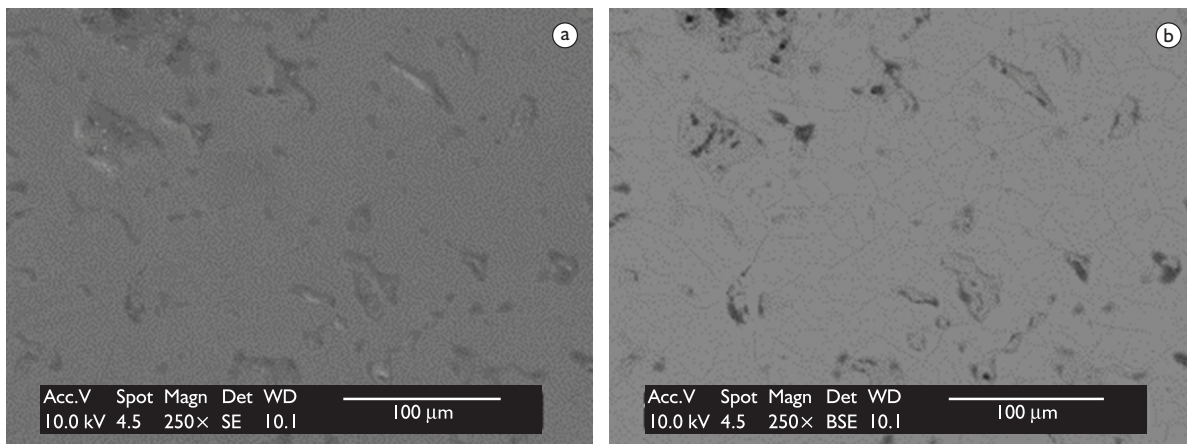


Figura 10. Micrografias obtidas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura na marca de desgaste de amostras revestidas com cromo duro: a) imagem por elétrons secundários; b) imagem por elétrons retroespalhados.

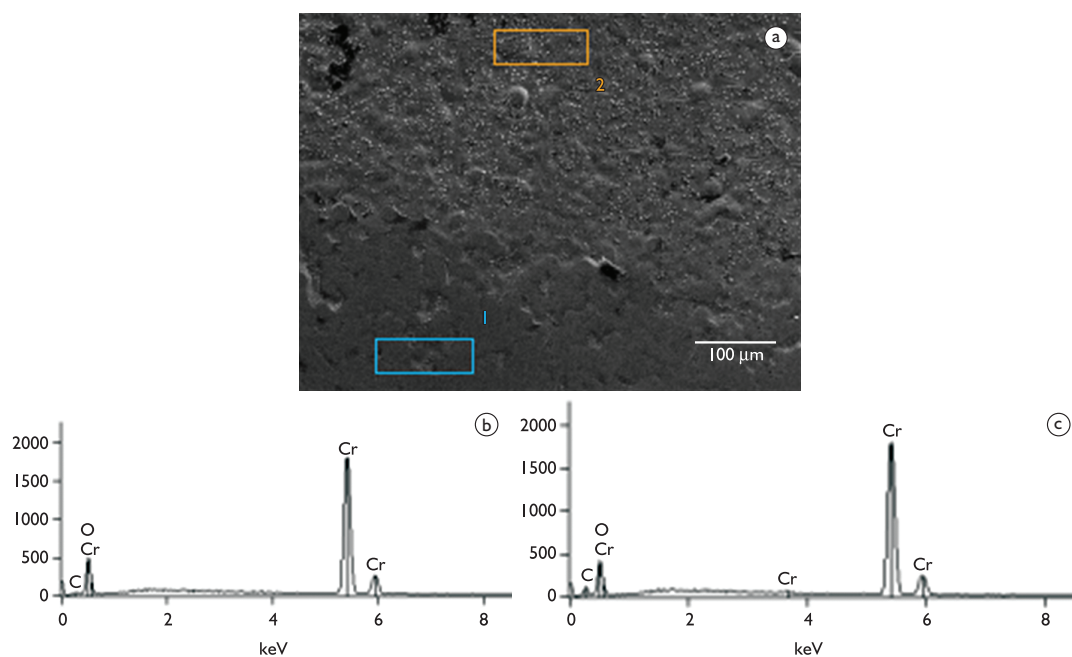


Figura 11. Micrografia obtidas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura na marca de desgaste de amostras revestidas com cromo duro a) imagem por elétrons retroespalhados b) EDX na marca de desgaste c) EDX fora da marca de desgaste.

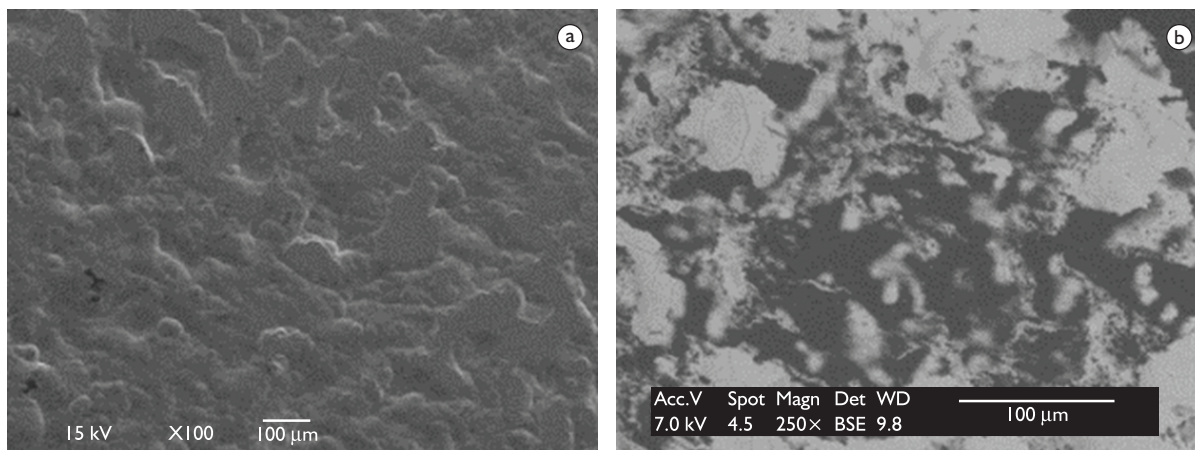


Figura 12. Micrografias obtidas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura em amostras texturizadas e posteriormente cromadas: a) imagem por elétrons secundários; b) imagem por elétrons retroespalhados.

Em síntese, os fenômenos são controlados pela gênese e estabilidade de uma tribocamada rica em oxigênio que se forma, ora na amostra (amostras não revestidas), ora no contracorpo (amostras revestidas). Nesse último caso, a tribocamada é rica em cromo e oxigênio.

Para mensurar o desgaste ocorrido nas amostras, primeiramente utilizou-se o método gravimétrico; mas em função de uma possível “magnetização” durante o deslizamento, ocorreu interferência nos resultados mostrados pelo equipamento eletrônico.

Em seguida, buscou-se avaliar o desgaste pela técnica interferométrica (Figura 14). É possível notar, em amostras sem revestimento, acúmulo de material na região ensaiada (Figura 14a). Em contrapartida, em

amostra revestida com cromo duro, nota-se leve marca de desgaste (Figura 14b). Já em amostras submetidas ao processo de texturização, fica impossível identificar a região ensaiada (Figura 14c, d).

Como evidenciado pela Figura 14, não é possível quantificar o desgaste utilizando-se a técnica interferométrica.

Conclui-se que, em função da combinação da baixa carga aplicada e do curto intervalo de tempo, torna-se impossível a quantificação do desgaste nas amostras por meio das diferentes técnicas empregadas e que deverá ser realizado o aumento da severidade do contato e/ou tempo de ensaio para permitir uma investigação futura.

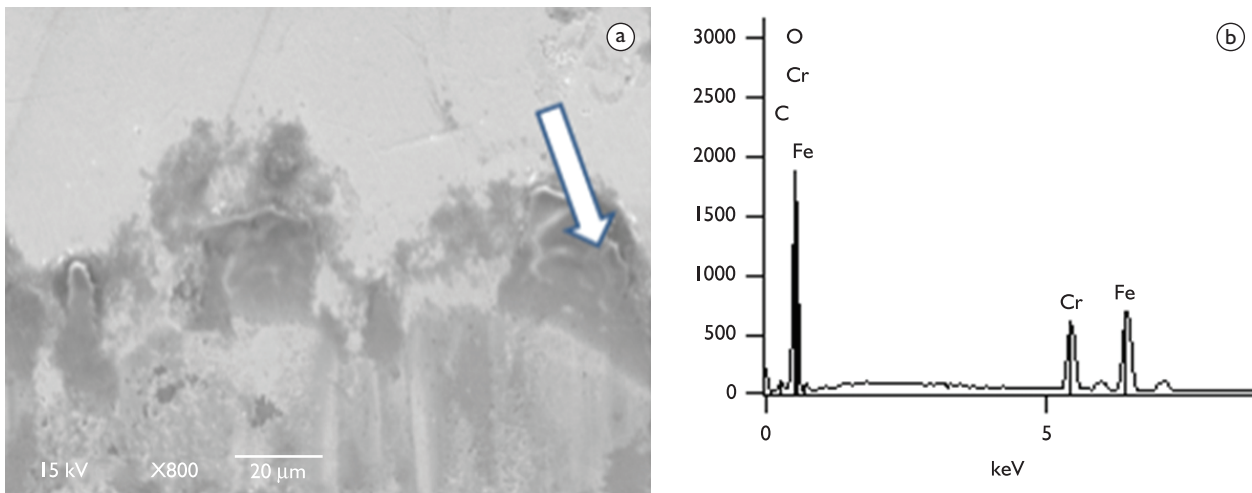


Figura 13. Micrografia obtidas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura em amostra texturizada e posteriormente cromada: a) Imagem por elétrons secundários; b) EDX na região clara da marca de desgaste.

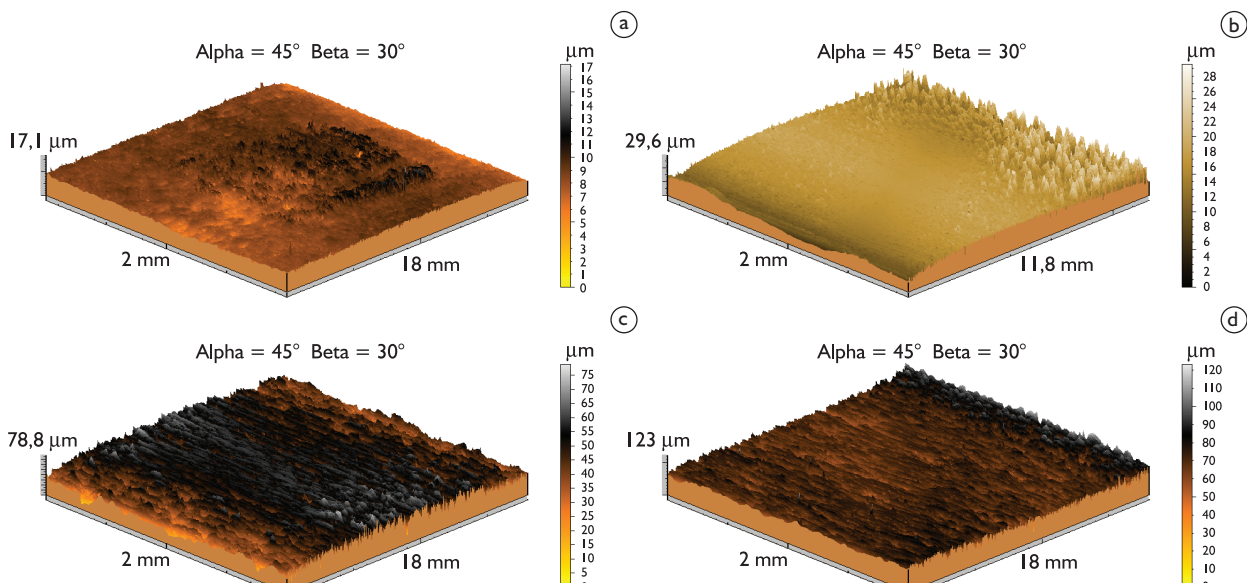


Figura 14. Topografia de superfície 3D de amostras ensaiadas: a) SM; b) C; c) T; d) TC.

4 CONCLUSÃO

A texturização promove aumento significativo nos parâmetros topográficos, enquanto o revestimento de cromo duro os suaviza.

Não há alteração significativa do coeficiente de atrito em função das modificações superficiais.

A texturização promove aumento significativo no desgaste do contracorpo, enquanto o revestimento de cromo duro produz a sua redução.

A adição do revestimento de cromo duro promove a formação de uma tribocamada no contracorpo constituída de cromo e oxigênio. Em contrapartida, em amostras sem o recobrimento de cromo duro ocorre, nas amostras, a formação de uma tribocamada constituída de ferro e oxigênio.

Em função da combinação da baixa carga aplicada e do curto intervalo de tempo, torna-se impossível a quantificação do desgaste nas amostras por meio das diferentes técnicas empregadas.

Em síntese, as modificações superficiais (texturização e cromeamento) influenciam significativamente a topografia e o comportamento tribológico de aços para cilindro de laminação a frio.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Prof^a. Henara Lillian Costa Murray, pelas contribuições que enriquecem este trabalho; à empresa Gerdau S. A., pelo apoio e fornecimento de amostras, ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas S. A. (IPT), pela execução do tratamento térmico; ao LabMat, da Universidade Federal de Santa Catarina, por permitir a utilização do tribômetro para os testes de deslizamento, e à CAPES, pelo apoio financeiro durante a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 MENDES, J. L. T. *Influência de parâmetros microestruturais no comportamento tribológico de ligas ferrosas multicomponentes*. 2007. 160 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- 2 ELKOCA, O. A study on the characteristics of electrical discharge textured skin pass mill work roll. *Surface and Coatings Technology*, v. 202, n. 12, p. 2765-74, Mar. 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.10.004>
- 3 UTSCH, M.; VINKE, P. EDT: roll texturing technology as a base of modern surfaces in automotive cold mill flat products. *Iron and Steel Technology*, v. 2, n. 9, p. 50-5, Apr. 2005.
- 4 SIMÃO, J.; ASPINWALL, D. K. Hard chromium plating of EDT mill work rolls. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 92-93, p. 281-7, Aug. 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00124-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00124-7)
- 5 CHIU, L. H. et al. Effect of contact pressure on wear resistance of AISI H13 tool steels with chromium nitride and hard chromium coatings. *Surface and Coatings Technology*, v. 154, n. 2-3, p. 282-8, May 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00011-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00011-7)
- 6 KOVALCHENKO, A. et al. Friction and wear behavior of laser textured surface under lubricated initial point contact. *Wear*, v. 271, n. 9-10, p. 1719-1725, July 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.049>
- 7 AHN, H.-S.; KWON, O.-K. Tribological behaviour of plasma-sprayed chromium oxide coating. *Wear*, v. 225-229, Part 2, p. 814-24, Apr. 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00390-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00390-1)
- 8 ZUM GAHR, K. H.; MATHIEU, M.; BRYLKA, B. Friction control by surface engineering of ceramic sliding pairs in water. *Wear*, v. 263, n. 7-12, p. 920-9, Sep. 2007.
- 9 MILAN, J. C. G. et al. Effect of temperature, normal load and pre-oxidation on the sliding wear of multi-component ferrous alloys. *Wear*, v. 259, n. 1-6, p. 412-23, July-Aug. 2005.

Recebido em: 17/10/2012

Aceito em: 20/11/2012