

INFLUENCIA DA CROMAGEM E TEXTURIZAÇÃO NO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE AÇOS PARA A FABRICAÇÃO DE CILINDROS DE LAMINAÇÃO A FRIO¹

José Lucio Gonçalves Junio²
José Daniel Biasoli de Mello³

Resumo

O presente trabalho analisou o comportamento tribológico de modificações superficiais geralmente utilizados 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. Os resultados permitiram concluir que a texturização aumentou os parâmetros topográficos, enquanto o revestimento de cromo duro diminuiu os mesmos. Observou-se que não houve alteração significativa do coeficiente de atrito em função das modificações superficiais e que a texturização promoveu um aumento significativo no desgaste do contracorpo, enquanto o revestimento de cromo duro promoveu uma redução do mesmo. A adição do revestimento de cromo duro promoveu a formação de uma tribocamada no contracorpo constituída de cromo e oxigênio. Em contrapartida, em corpos sem o recobrimento de cromo duro ocorreu a formação de uma tribocamada constituída de ferro e oxigênio no corpo.

Palavras-chave: Laminação a frio; Revestimento de cromo duro; Texturização.

INFLUENCE OF SURFACE TEXTURING AND HARD CHROMIUM COATING ON THE TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF COLD ROLLING MILLS ROLLS STEELS

Abstract

The present work analyzed 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. The results showed that surface texturing increased the topographic parameters whereas hard chrome coating decreased them. It was observed that there was no significant change in the coefficient of friction as a function of surface modification. Surface texturing increased the wear of the counter body, while the hard chromium coating reduced it. The addition of the hard chromium coating promoted 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 consisted of iron and oxygen.

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

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² MsC., Bolsista, Doutorado do Depto. de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, MG.

³ Dr., Professor Titular Emérito, Departamento de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia, MG.

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, 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 exibe uma refletividade uniforme após a pintura.⁽³⁾

Durante as primeiras etapas da laminação, alguns picos se fraturam facilmente se tornando 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 revelou que em geral, não existe diferenças significativas, e mostrou 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 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⁾

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 observaram 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.⁽⁵⁾

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 1 apresenta a composição química do aço.

Tabela 1. Composição química do aço VC9 (porcentagem em peso)

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

Após cortes transversais no fragmento de cilindro, obteve-se amostras de aproximadamente 30 mm 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 2h, resfriamento ao ar soprado, seguido de um revenimento a 600°C por 2hs e posterior têmpera a 920°C com revenimento a 280°C por 2hs.

Após o tratamento térmico, retificou-se a amostras para garantir o paralelismo entre faces e em, seguida, realizou-se testes de dureza, microdureza, preparação metalográfica convencional e observação por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), 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 por jateamento foi feito pela empresa Uberjato Ltda ME utilizando bico reto com comprimento total de 29 mm, diâmetro do furo de 2,5 mm, granalha de aço de diâmetro 0,7 mm, vazão de ar em 4,8 m³/min e pressão do ar de 7 kgf/cm² durante 15 segundos. A deposição de cromo foi realizada pela empresa Mecânica Industrial Schiavinato Ltda 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.

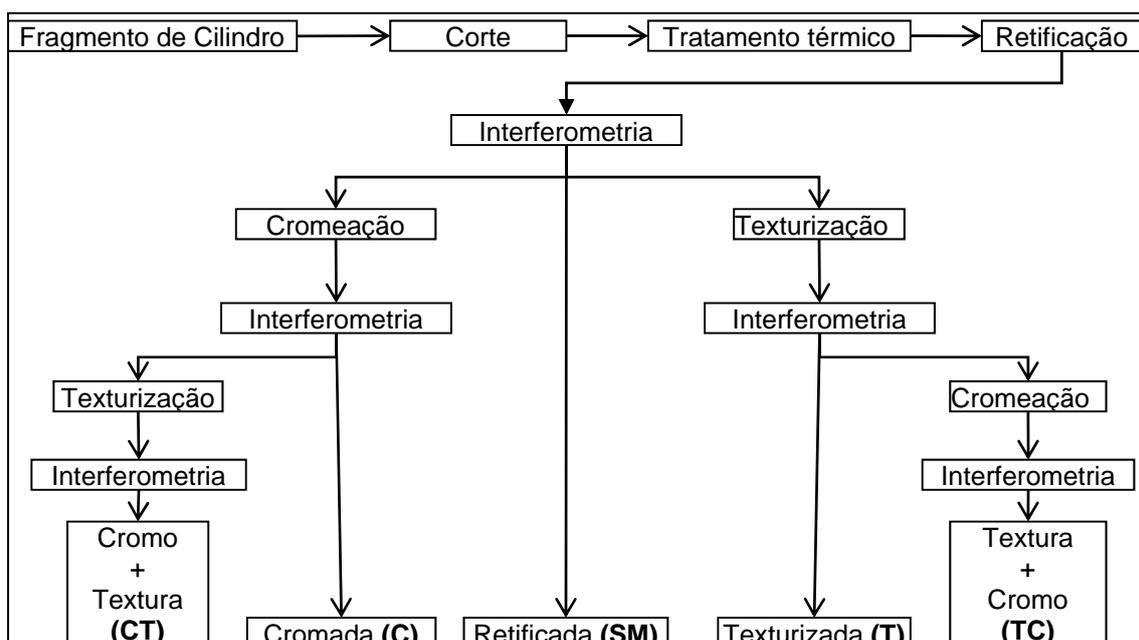


Figura 1. Etapas de produção das amostras.

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

A técnica da interferometria a laser 3D foi realizada utilizando-se um equipamento da marca UBM Messtechnik, e empregada para a avaliação das modificações superficiais e para tentativa de cálculo de desgaste.

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. Os parâmetros de rugosidade medidos analisados foram S_q , S_{dq} , S_{pk} , S_{bi} , conforme sugerido pela literatura.^(6,7)

Para servir de contracorpo nos ensaios de deslizamento, usaram-se esferas de aço SAE 52100 com diâmetro de 10 mm. A composição química do aço é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química do aço SAE 52100 (porcentagem em peso)

| Elemento | C | Si | Mn | P | S | Cr |
|-------------|-------|------|------|-------|-------|------|
| Porcentagem | 0,994 | 0,27 | 0,32 | 0,013 | 0,005 | 1,49 |

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, frequência de 2 Hz 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 assumindo-se a superfície como nivelada calcula-se o volume desgastado durante o ensaio de deslizamento.

Para quantificar o desgaste da amostras, primeiramente usou-se o método de medição gravimétrico utilizando uma balança da marca Mettler Toledo e modelo XS205 Dual Range. As medições e os ensaios foram feitas em uma 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.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Metalográfica e Dureza

Notou-se que tanto o aço VC9 quanto as esferas de aço AISI 52100 a microestrutura característica é martensítica e os testes de dureza Vickers realizados resultaram em valores de 624 ± 47 Hv para o corpo e 772 ± 5 Hv para o contracorpo.

Notou-se na Figura 2 que o menor valor de microdureza refere-se às amostras sem modificação superficial (SM). Observou-se ainda que tanto a texturização quanto o revestimento de cromo aumentaram a dureza das amostras. As amostras texturizadas, depois do cromeamento, apresentaram maior dureza se comparadas às amostras sem modificação, porém menor dureza se comparadas às amostras simplesmente cromadas. As amostras texturizadas e posteriormente cromadas apresentaram valores da dureza intrínseca do cromo duro. Nota-se ainda que o valor apresentado pela amostra revestida com cromo duro equivale ao valor de aproximadamente $HV = 1.100 \text{ Kgf/mm}^2$ reportado na literatura.⁽⁴⁾

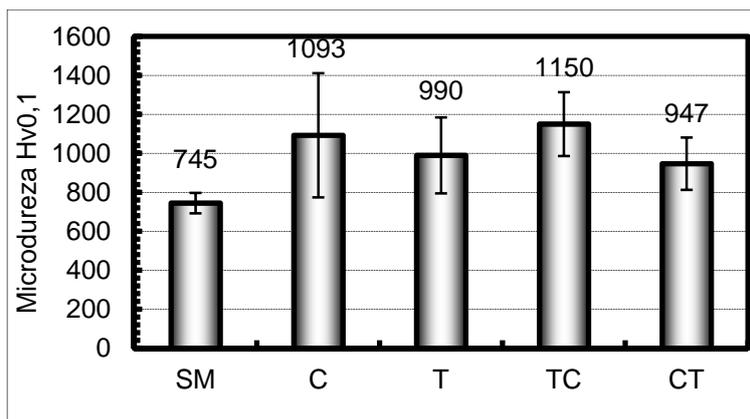


Figura 2. Valores de microdureza em função das modificações superficiais.

A análise via MEV revelou que tanto as amostras revestidas com cromo duro quanto as amostras texturizadas e posteriormente cromadas apresentaram camadas com espessura de aproximadamente 20 μm . 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 foram 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.

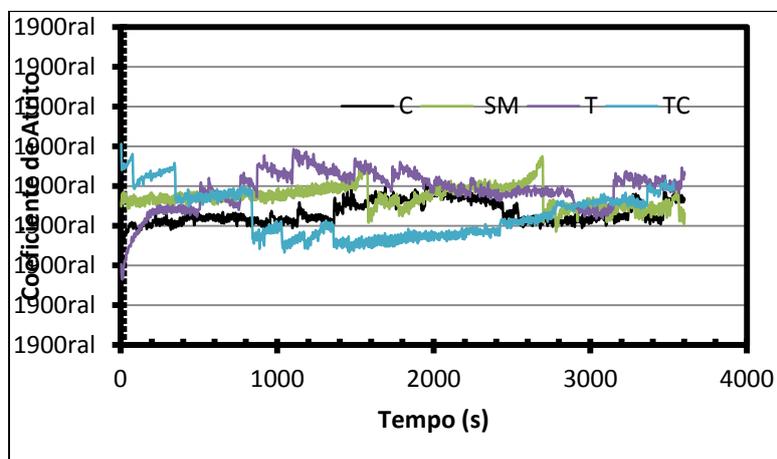


Figura 3. Evolução do coeficiente de atrito para diferentes modificações superficiais.

A avaliação do coeficiente de atrito mostrou que independentemente do tipo de modificação superficial estudado, o coeficiente de atrito foi de aproximadamente 0,38. Os resultados obtidos não apresentaram redução do coeficiente de atrito em função da texturização ou do revestimento de cromo.

Qualitativamente, é possível observar (Figura 4) o desgaste do contracorpo em função das diferentes modificações superficiais. Nota-se que o revestimento de cromo duro atuou tanto em amostras cromadas como em amostras texturizadas e posteriormente cromadas, reduzindo o desgaste do contracorpo. Em contra partida, amostras texturizadas aumentaram o desgaste do contracorpo.

Com a adição do revestimento de cromo duro, ocorre elevação da resistência de contato elétrico, indicando a presença de uma tribocamada isolante. O aspecto macroscópico das marcas de desgastes observados nas Figuras 4b e 4d mostram a presença de uma tribocamada inexistente nos contracorpos utilizados nos ensaios com amostras não revestidas (Figuras 4a e 4c).

Ainda analisando o desgaste do contracorpo, agora de forma quantitativa, é possível notar na Figura 5 o que foi evidenciado qualitativamente. A texturização causa aumento no desgaste do contracorpo, enquanto o revestimento de cromo duro causa redução no mesmo.

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.⁽⁸⁾

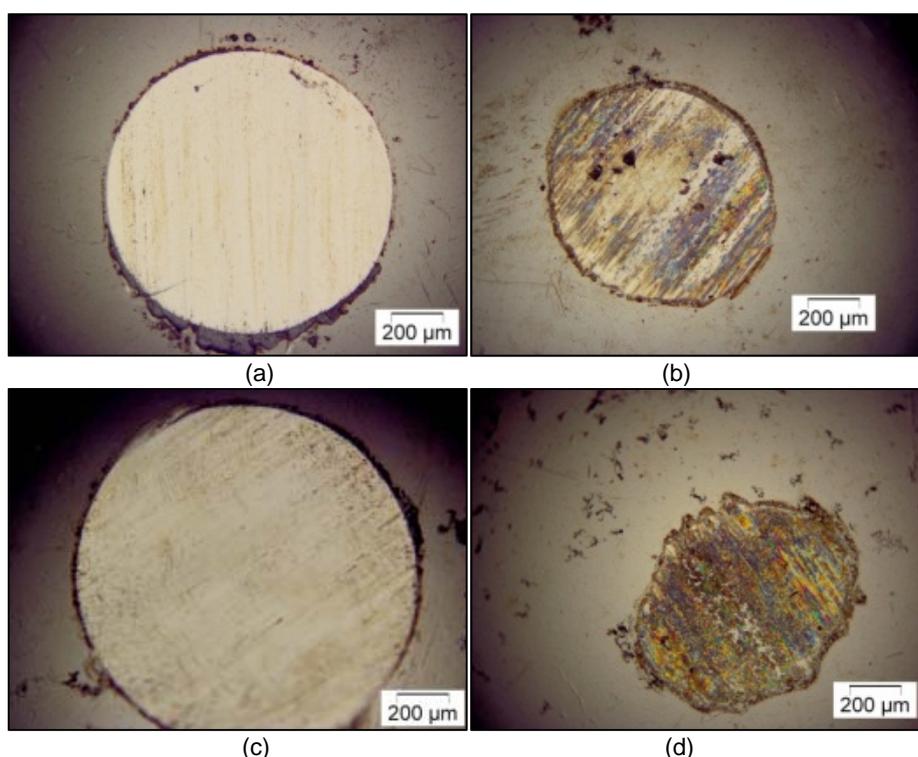


Figura 4. Desgaste do contracorpo para diferentes modificações superficiais (a) SM; (b) C; (c) T; e (d) TC.

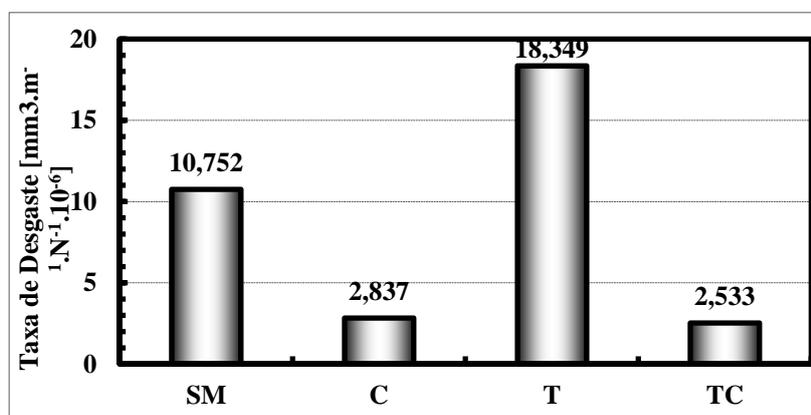


Figura 5. Taxa de desgaste do contracorpo em função do revestimento.

Análises via microscopia eletrônica de varredura no contracorpo ensaiado com amostras revestidas com cromo duro mostrou se tratar 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 3 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.

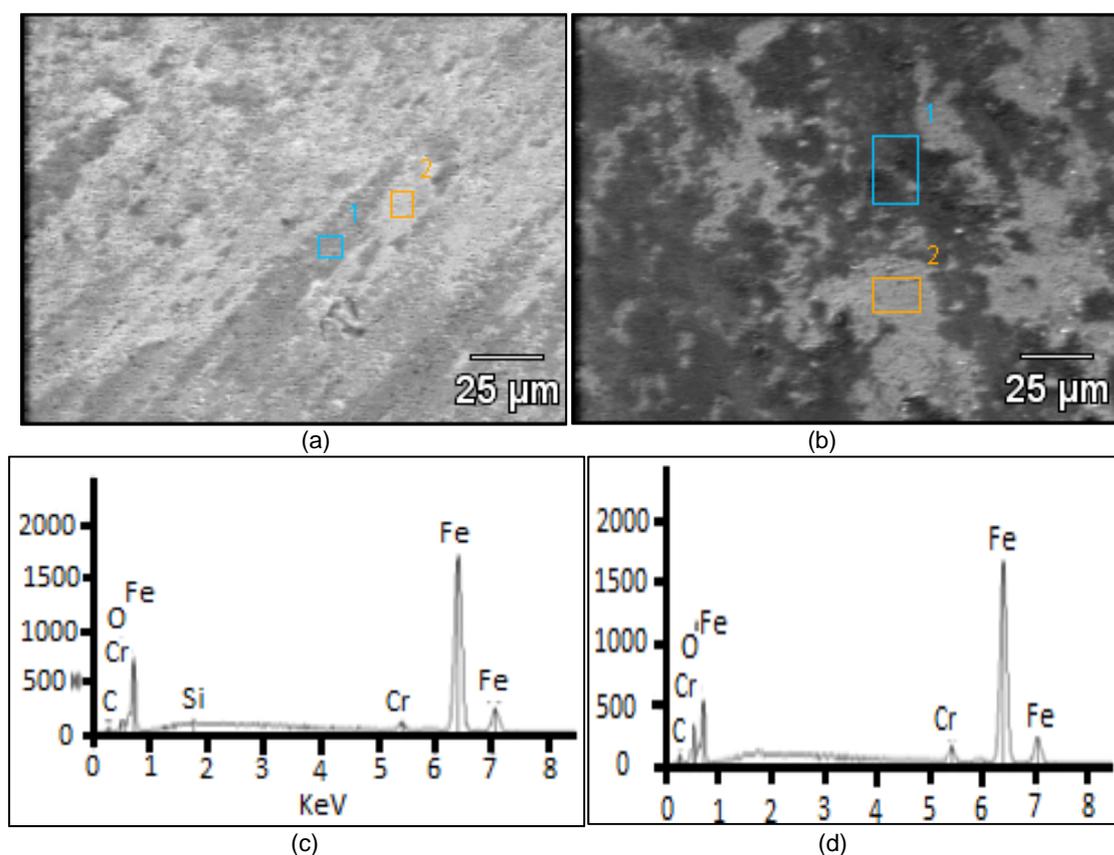


Figura 6. Aspecto típico das marcas de desgaste em contracorpos atuantes em amostras revestidas com cromo (a) cromada; (b) texturizada e cromada; (c) espectro típico da região clara obtida por EDX; e (d) espectro típico da região escura obtida por EDX.

Tabela 3. Composição química da tribocamada (porcentagem em peso)

| | O | Cr | Fe |
|----|------|------|---------|
| SM | 27,3 | 0,97 | Balanço |
| TC | 28,9 | 18,7 | Balanço |

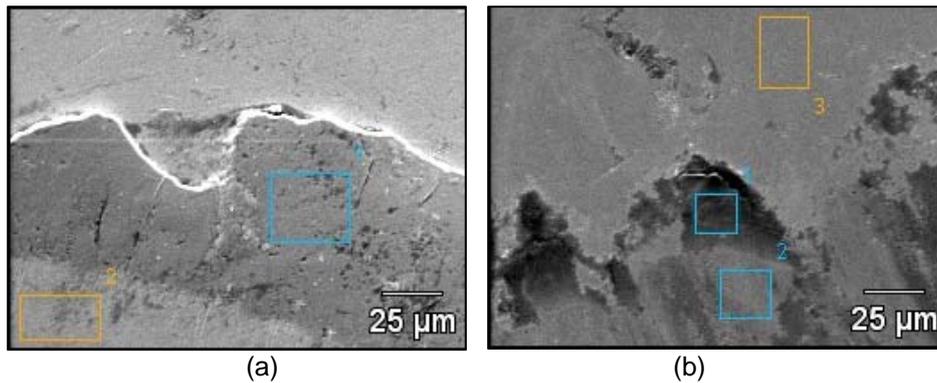


Figura 7. Detalhe no acúmulo de matéria encontrado nas bordas da marca de desgaste do contra corpo (a) ensaiado com amostra sem modificação superficial; e (b) ensaiado com amostras texturizadas e posteriormente cromada.

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 contracopo promove a formação de uma tribocamada com dureza suficientemente elevada para aumentar a resistência ao desgaste abrasivo.⁽⁹⁾

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 contracopo. Esta tribocamada é proveniente da cominuição das partículas de desgaste, sua deformação e oxidação. Observa-se na Figura 8 o fenômeno citado.

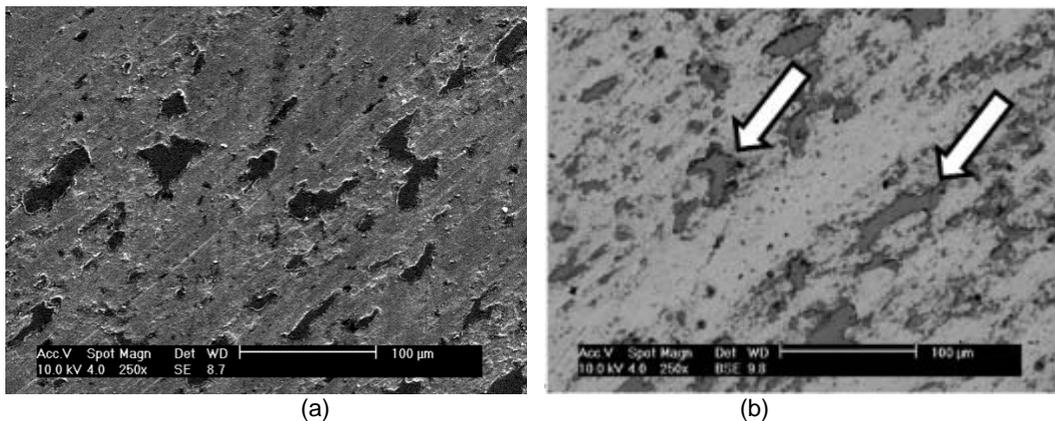


Figura 8. Microscopia eletrônica de varredura na marca de desgaste em amostras sem modificação superficial (a) elétrons secundários; e (b) elétrons retroespalhados.

Ainda na Figura 8b 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 (Figuras 9b e 9c). Notam-se ainda (Figura 9), os riscos de abrasão ocasionados pelo deslizamento.

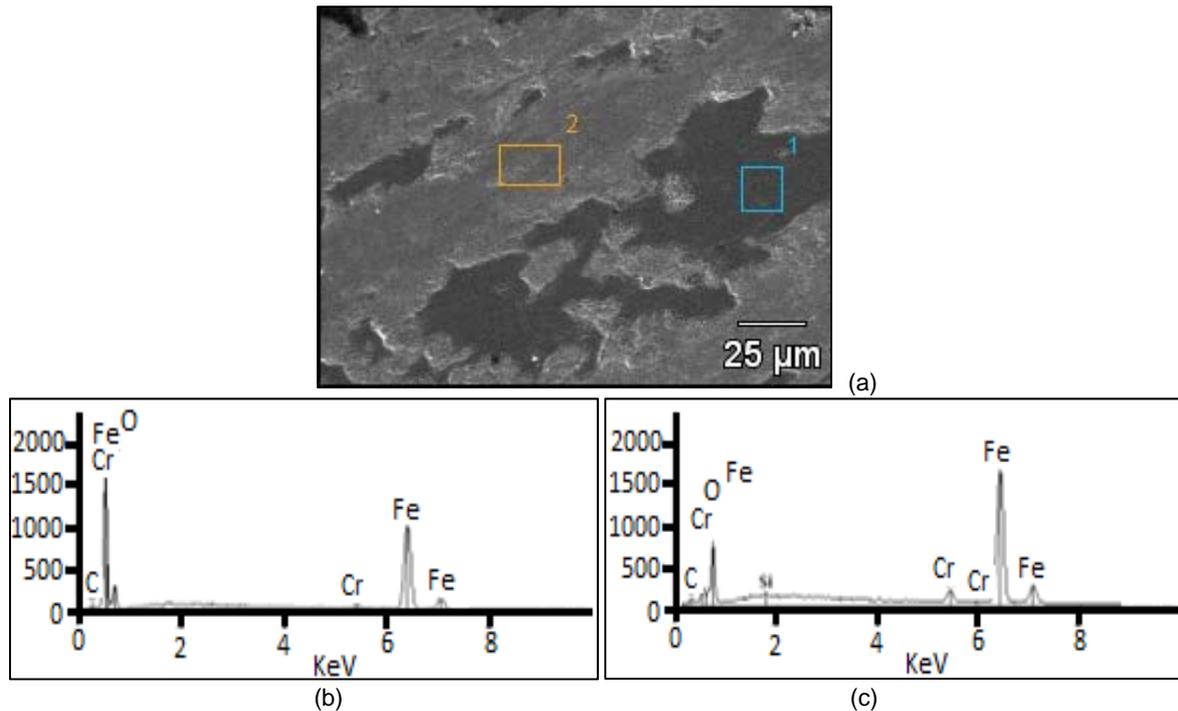


Figura 9. Microscopia eletrônica de varredura em amostra sem modificação superficial (a) Imagem por elétrons retroespalhados; (b) EDX na região escura; e (c) EDX na região clara.

Ao analisarem-se as amostras texturizadas, notou-se grande semelhança com as amostras sem revestimento. Segundo Zum Gahr, Mathieu, Brylk,⁽¹⁰⁾ um dos objetivos da texturização é o acúmulo de debris nos sulcos da textura. Na Figura 10, nota-se, na seta em destaque, o acúmulo de partículas de desgaste ainda não deformadas nas reentrâncias produzidas pela texturização.

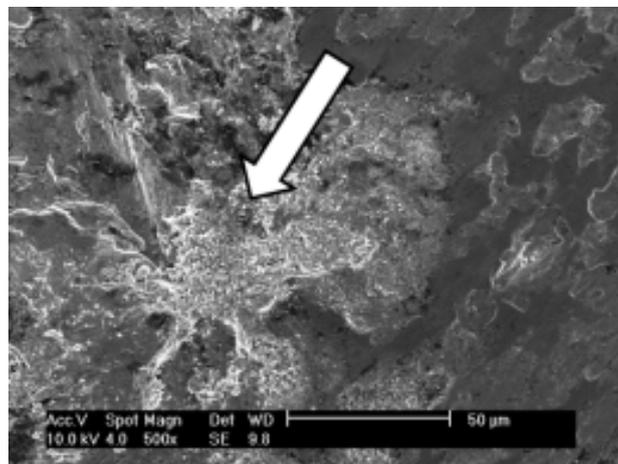


Figura 10. Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários na marca de desgaste de amostra texturizada.

A análise de amostras revestidas com cromo duro revelou uma forte componente mecânica, com a quebra dos picos, levando ao alisamento da superfície (Figura 11).

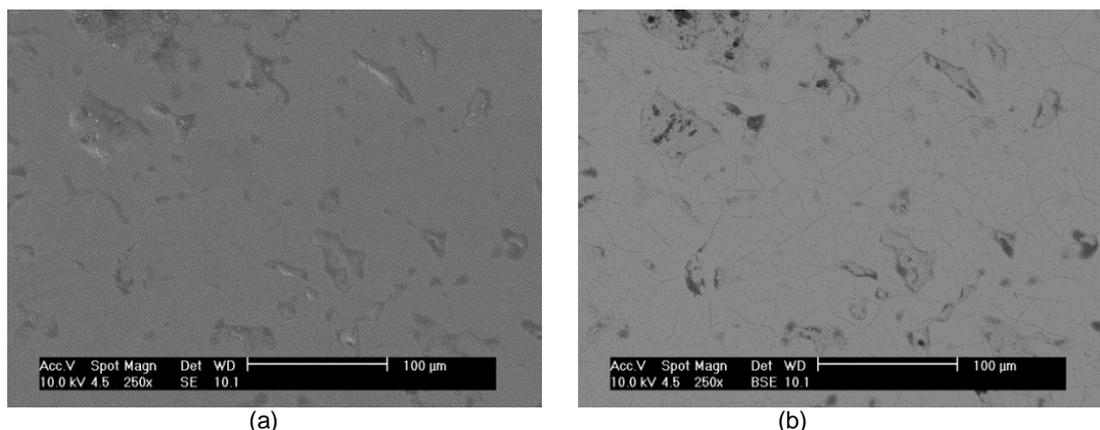


Figura 11. Microscopia eletrônica por varredura na marca de desgaste de amostras revestidas com cromo duro (a) imagem por elétrons secundários; e (b) imagem por elétrons retroespalhados.

Para confirmar a teoria da forte predominância da componente mecânica no desgaste de amostras revestidas com cromo duro, utilizou-se a técnica de EDX (Figura 12).

A análise feita por EDX, tanto na região da marca de desgaste (Figura 12b) quanto na região fora da marca de desgaste (Figura 12c), revela a predominância de cromo, evidenciando que as alterações induzidas foram 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 (Figura 13). Segundo Milan et al.⁽¹¹⁾ esses desgastes formam pequenos fragmentos que permanecem na região de ensaio, são fortemente deformados e sofrem oxidação.

Conforme ilustrado por Milan et al.,⁽¹¹⁾ o mecanismo de desgaste induz uma transferência mútua de matéria entre o corpo e o contracorpo.

Nota-se (Figura 14) que no contracorpo que deslizou contra amostras texturizadas e posteriormente cromadas, ocorreu um acúmulo de material na borda da região desgastada. Esses acúmulos de matéria são gradativamente fraturados, contribuindo para a formação da tribocamada.

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 14), enquanto o contracorpo ensaiado com amostras sem revestimento de cromo apresentou uma tribocamada rica em ferro e oxigênio (Figura 7).

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.

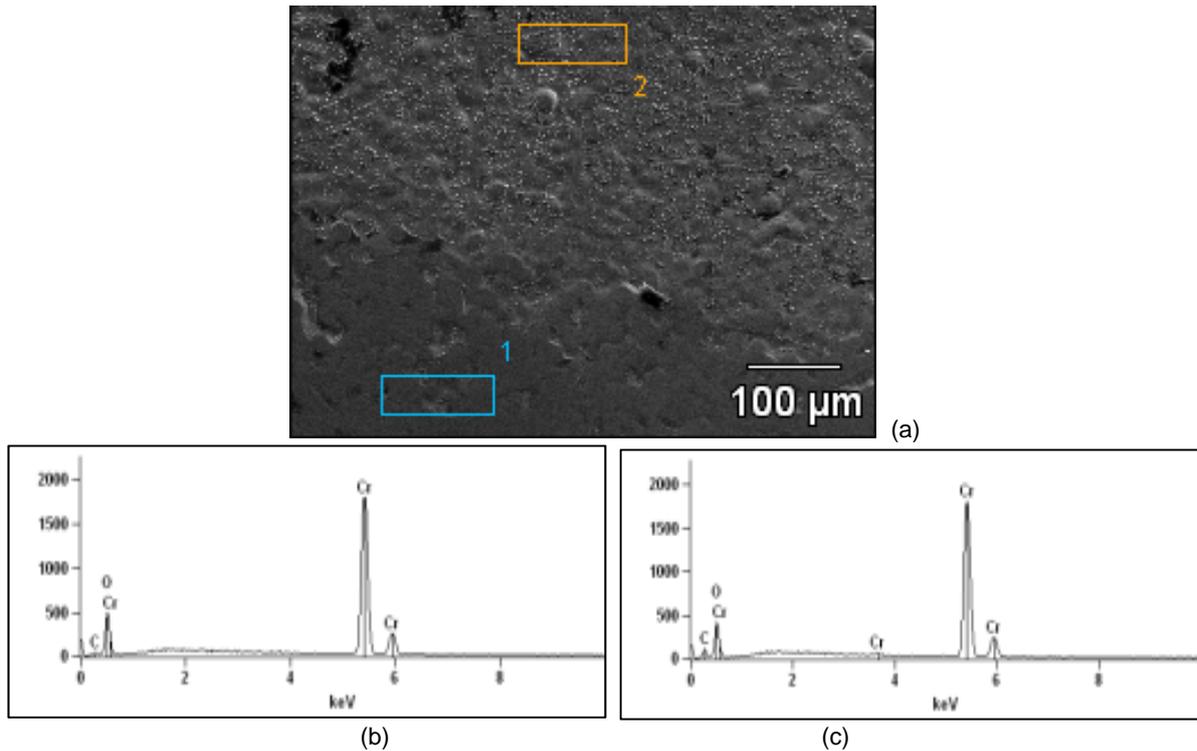


Figura 12. Microscopia eletrônica por varredura na marca de desgaste de amostras revestidas com cromo duro (a) imagem por elétrons retroespalhados (b) EDX na marca de desgaste (c) EDX fora da marca de desgaste.

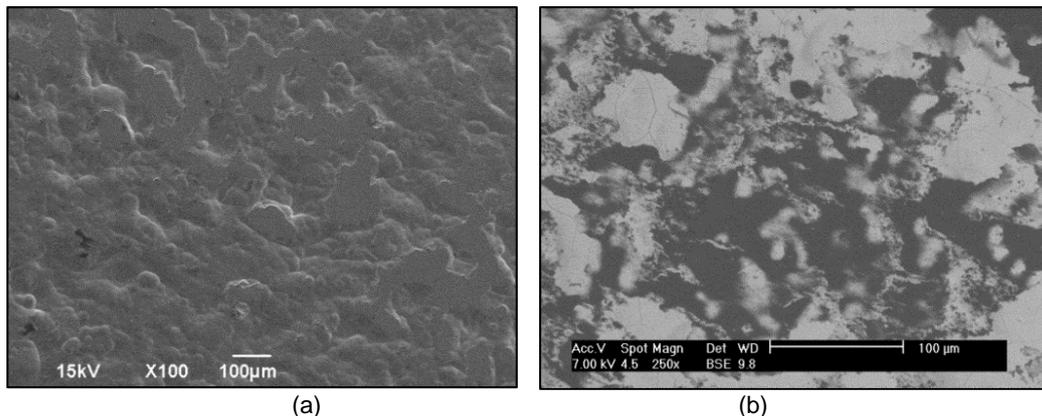


Figura 13. Microscopia eletrônica por varredura em amostras texturizadas e posteriormente cromadas (a) imagem por elétrons secundários (b) imagem por elétrons retroespalhados.

Para mensurar o desgaste ocorrido nas amostras, primeiramente utilizou-se o método gravimétrico, mas em função de uma possível “magnetização” durante o deslizamento, esse interferiu nos resultados mostrados pelo equipamento eletrônico. Em seguida, buscou-se avaliar o desgaste pela técnica interferométrica (Figura 15). É possível notar, em amostras sem revestimento, acúmulo de material na região ensaiada (Figura 15a). Em contrapartida, em amostra revestida com cromo duro, nota-se leve marca de desgaste (Figura 15b). Já em amostras submetidas ao processo de texturização, fica impossível identificar a região ensaiada (Figuras 15c e 15d).

Como evidenciado pela Figura 15, não foi possível quantificar o desgaste utilizando-se a técnica interferométrica.

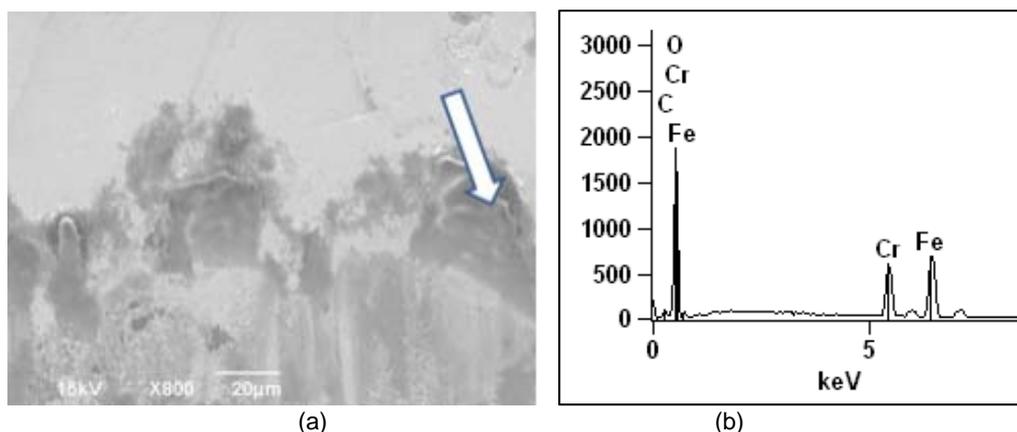


Figura 14. Microscopia eletrônica por varredura em amostra texturizada e posteriormente cromada (a) Imagem por elétrons secundários; e (b) EDX na região clara da marca de desgaste.

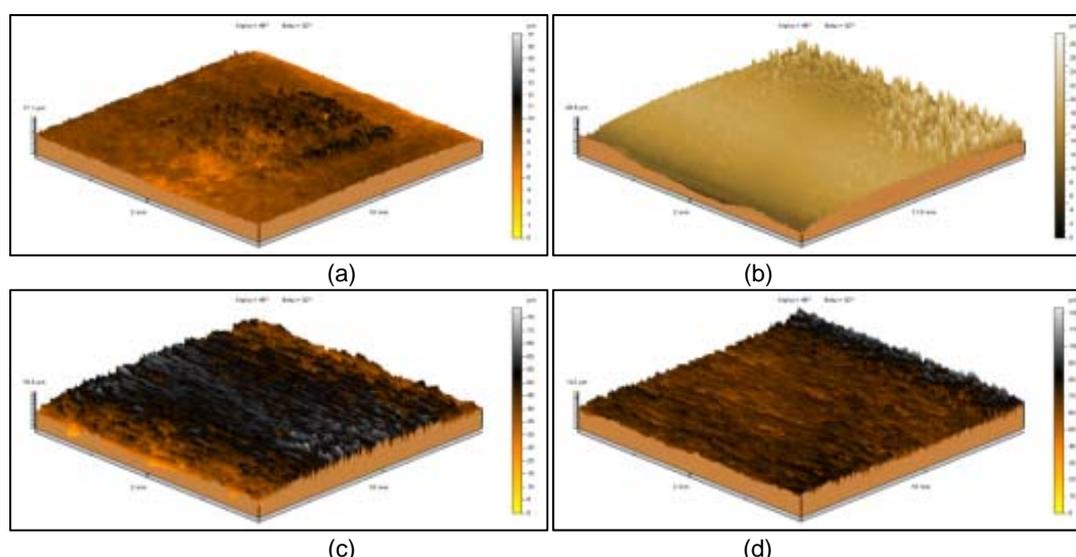


Figura 15. Topografia de superfície 3D de amostras ensaiadas (a) SM; (b) C; (c) T; e (d) TC.

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

4 CONCLUSÃO

A texturização promoveu o aumento significativo nos parâmetros topográficos, enquanto o revestimento de cromo duro suavizou os mesmos.

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

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

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

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

Em síntese, as modificações superficiais (texturização e cromeamento) influenciaram significativamente tanto na topografia quanto no comportamento tribológico de aços para cilindro de laminação a frio.

Agradecimentos

Agradecimentos a Prof. Henara Lillian Costa Murray pelas contribuições que vieram enriquecer este trabalho, a empresa Gerdau pelo apoio e fornecimento de amostras, ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) pela execução do tratamento térmico. Ao LabMAat da Universidade Federal de Santa Catarina por permitir a utilização do tribômetro para os testes de deslizamento e a Capes pelo apoio financeiro durante a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 MENDES, J. L. T. Influência de Parâmetros Microestruturais no Comportamento. 2007. 160 p. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- 2 ELKOCA, O. A study on the characteristics of electrical discharge textured skin pass mill work roll. *Surface & Coatings Technology*, p 2765–2774, 2008.
- 3 UTSCH, M.; VINKE, P.; EDT: Roll Texturing Technology as a Base of Modern Surfaces in Automotive Cold Mill Flat Products. *Iron & Steel technology*. p 50, 2005.
- 4 SIMÃO, J ; ASPINWALL D. K.. Hard chromium plating of EDT mill work rolls. *Journal of Materials Processing Technology*,. p 281-287, 1999.
- 5 CHIU L. H.; YANG C.F.; HSIEH W.C.; CHENG A.S. Effect of contact pressure on wear resistance of AISI H13 tool steels with chromium nitride and hard chromium coatings. *Surface Coatings and Technology*, p. 282-288, 2002.
- 6 DONG, W.P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. Comprehensive Study of Parameters for Characterizing Three-Dimensional Surface Topography I: Some Inherent Properties of Parameter Variation, *Wear*, volume 159, p 161-171, 1992
- 7 DONG, W.P.; MAINSAIL, E.; STOUT, K. J. Reference Planes for the Assessment of Surface Roughness in Three Dimensions, *International Journal of Machine Tools as Manufacture*, volume 35, numero 2, p 263-271, 1995.
- 8 KOVALCHENKO, A.; AJAYI, A.; ERDEMIR, A.; FENSKE, G.; Friction and wear behavior of laser textured surface under lubricated initial point contact. *Wear*. V. 271. p. 1719-1725, 2011.
- 9 AHN, H. S.; KWON, O. K. Tribological behaviour of plasma-sprayed chromium oxide coating. *WEAR*, v. 225-229, p 814-824, 1999.
- 10 ZUM GAHR, K. H.; MATHIEU, M.; BRYLK, B. Friction control by surface engineering of ceramic sliding pairs in water. *Wear*, v. 263, p 920–929, 2007.
- 11 MILAN, J.C.G.; CARVALHO, M.A.; XAVIER, R.R., FRANCO, S.D.; De Mello J.D.B. Effect of temperature, normal load and pre-oxidation on the sliding wear of multi-component ferrous alloys. *Wear*. V. 259. p. 412–423, 2005.