

EFEITO DE MODIFICAÇÕES SUPERFICIAIS (CROMO DURO E TEXTURIZAÇÃO) NA MICRO ABRASÃO DE AÇO UTILIZADO NA FABRICAÇÃO DE CILINDROS DE LAMINAÇÃO A FRIO¹

José Lucio Gonçalves Junio²

Henara Lillian Costa³

José Daniel Biasoli de Mello⁴

Resumo

O presente trabalho analisou a resistência à abrasão de modificações superficiais geralmente utilizadas em cilindros de laminação a frio. As diferentes modificações superficiais feitas em fragmentos de cilindros de laminação a frio foram: texturização por jateamento de esferas de aço (T), deposição de cromo duro (C), texturização com subsequente deposição de cromo duro (TC) e revestimento de cromo duro com posterior texturização (CT). Foram realizados testes de micro abrasão do tipo esfera livre, velocidade tangencial fixa em $0,11 \text{ m.s}^{-1}$ e concentração de abrasivos (SiO_2) de 10 g de abrasivo por 90 g de água. Os resultados mostraram que a texturização superficial elevou a resistência à abrasão em 24% quando comparadas com amostras sem modificações superficiais. Amostras revestidas com cromo reduziram ainda mais o desgaste abrasivo (67%), porém amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro elevaram o desgaste abrasivo (54%) quando comparadas com amostras somente com cromo duro.

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

EFFECT OF SURFACE MODIFICATIONS (HARD CHROMIUM COATING AND TEXTURING) ON THE MICROABRASION OF COLD ROLLING MILL ROLLS

Abstract

The present work analyzed the microabrasion behaviour of surface modifications often used in cold rolling mill rolls. Different surface modifications were carried out on samples produced from a fragment of a rolling mill roll: i) shot blasting texturing using steel spheres; ii) chromium plating; iii) shot blasting texturing with subsequent hard chrome plating; and iv) hard chrome plating with subsequent shot blasting texturing. Before the surface modifications the samples were heat treated and ground on both faces. Abrasion wear tests used a free ball micro-abrasion tester with SiO_2 abrasive particles. The tests were carried out with constant load and speed conditions. The results showed that surface texturing decreased wear coefficients. Additional reduction was observed for the samples coated with hard chromium.

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

¹ Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.

² M.Sc., Bolsista de Doutorado do Departamento de Engenharia Mecânica - UFU, Uberlândia - MG.

³ Ph.D., Professora do Departamento de Engenharia Mecânica - UFU, Uberlândia - MG.

⁴ Dr., Professor Titular Emérito do 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⁾

A laminação consiste de um processo de conformação mecânica no qual o material metálico é deformado plasticamente quando o mesmo passa através de cilindros. Este processo permite a fabricação de diversos tipos de peças tais como, trilhos, lingotes, placas, fios, tiras e perfis de diversas formas.⁽²⁾

Na produção de chapas, a qualidade dos laminados (rugosidade, dimensões, propriedades mecânicas) está diretamente relacionada com o desempenho dos cilindros do trem acabador.

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.⁽³⁾

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.⁽⁴⁾

Com a técnica de deposição de cromo duro, além de aumentar 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 topográficas significativas após o revestimento de cromo duro, e mostrou a capacidade do processo de revestimento para preservar a topografia da superfície original da peça.⁽⁵⁾ A maioria das amostras de cilindros com revestimentos de cromo duro, no entanto, tiveram valor um pouco maior de rugosidade superficial média e também 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.

Apesar de ser amplamente utilizado pela indústria o processo de obtenção de cromo duro utiliza, como fonte do metal, o cromo hexavalente. Os compostos com cromo hexavalente penetram através das membranas biológicas e são reduzidos a cromo trivalente causando danos à estrutura celular. Estes compostos são irritantes e corrosivos, e as partes mais atingidas são a pele e o sistema respiratório, podendo causar ulcerações e até perfuração no septo nasal. A intoxicação torna-se séria quando há adsorção pelo trato intestinal.⁽⁶⁾

Como resultado a agência de proteção ambiental dos Estados Unidos promulgou normas mais restritivas para produção do cromo duro. Adicionalmente o Departamento de Administração de Segurança e Saúde dos Estados Unidos

estabeleceu limites de exposição pra o cromo hexavalente no ambiente de trabalho a níveis de $0,1 \text{ mg/m}^3$.⁽⁷⁾

Um dos mecanismos de desgaste encontrados na laminação a frio é o desgaste por deslizamento. Este tipo de desgaste caracteriza-se pelo movimento relativo entre duas superfícies sujeitas a uma carga aplicada, onde um dano superficial durante o movimento relativo não ocorre pela formação de sulcos profundos oriundos pela penetração de asperidades ou partículas duras⁸. Por outro lado, a abrasão significa perda de material devido ao movimento relativo entre superfícies ou partículas e decorrentes da ação de asperidades duras numa das superfícies, ou partículas abrasivas livres entre as duas superfícies, ou ainda, partículas abrasivas engastadas em uma das superfícies.⁽⁸⁾

Em materiais frágeis, como é o caso do cromo duro, o contato entre asperidades provoca tensões locais elevadas pela total ou quase completa ausência de deformação plástica. Isto induz o processo de nucleação e crescimento de trincas em zonas inicialmente frágeis do material, e finalmente à formação de fragmentos de desgaste.

A formação dos fragmentos de desgaste é causada pela ação das tensões entre as superfícies em contato deslizante. A adesão entre as asperidades pode ocasionar arrancamento de material de uma das superfícies em contato, formando fragmentos de desgaste. Estes fragmentos podem ficar livres na interface ou serem transferidos para outra superfície do sistema. Nos dois casos, os fragmentos de desgaste sofrem ação mecânica devido ao deslizamento.

O desgaste por deslizamento é regido pela oxidação quando as variáveis velocidade de deslizamento e carga conseguem aumentar a temperatura na interface de contato, possibilitando a formação de camada triboquímica. A formação de filmes de compostos triboquímicos tem a capacidade de interferir nos mecanismos de desgaste regidos pela plasticidade. Isto se deve a diminuição da deformação abaixo da interface de contato das superfícies em deslizamento.⁽⁹⁾

Após 1 h de ensaio de deslizamento alternado com frequência de 2Hz, pista de deslizamento de 10 mm, carga de 1N e contra corpo esférico de 10 mm, Mello, Gonçalves Junior e Costa⁽¹⁰⁾ constataram que o revestimento de cromo duro promoveu a formação de uma tribocamada no contra corpo 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 no corpo. Os fragmentos da camada de óxido e do material metálico do cilindro podem atuar como agentes abrasivos causando riscos sobre a superfície dos cilindros.

Para comprovar a existência de abrasão durante a laminação a frio Leite et al.⁽¹¹⁾ utilizaram a técnica de replicação. A análise por réplicas é um método não destrutivo para exame indireto da topografia que permite avaliar o desgaste em materiais metálicos. Os resultados mostraram marcas abrasivas nos cilindros de laminação a frio após uma campanha considerada normal, conforme pode ser visualizado na Figura 1.

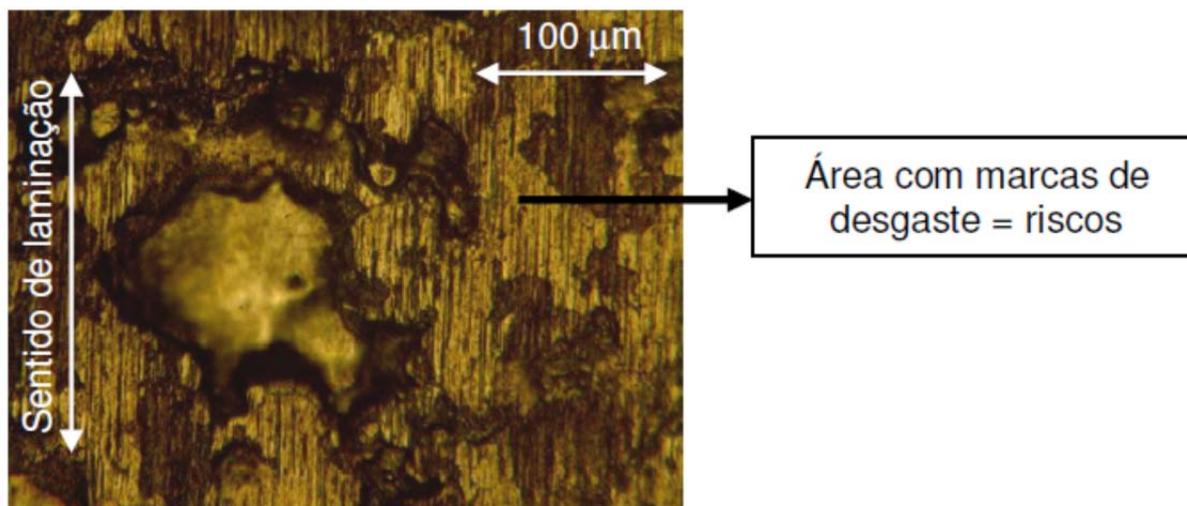


Figura 1 – Topografia típica da ultima cadeia de um laminador após uma campanha considerada normal.⁽¹¹⁾

Em função da determinação da ocorrência do desgaste abrasivo em cilindros de laminação a frio, objetivou-se este estudo a verificar a resistência a abrasão de diferentes modificações superficiais utilizadas em cilindros de laminação a frio: texturização, revestimento de cromo duro, texturização com posterior revestimento de cromo duro e revestimento de cromo duro com posterior texturização.

2 MATERIAIS 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 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 utilizou granalha de aço de diâmetro 0,7 mm, vazão de ar em 4,8 m³/min e pressão do ar de 7kgf/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 2 mostra as etapas de produção das amostras.

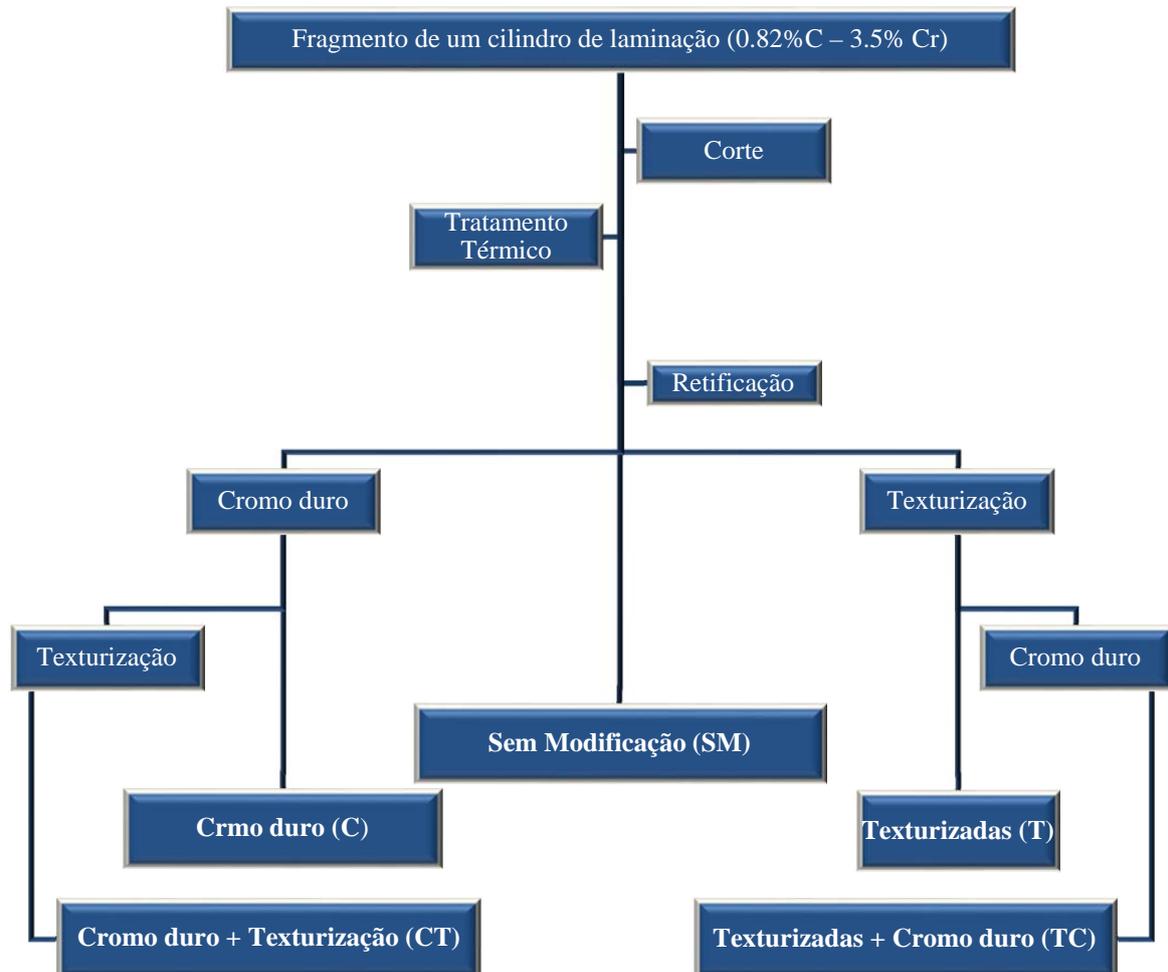


Figura 2 – Etapas de produção das amostras.

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.

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

Os ensaios de desgaste abrasivo foram efetuados em um equipamento de micro abrasão do tipo esfera livre. Nesse tipo de equipamento, a esfera gira sobre a amostra movida por um eixo motor. A amostra é fixa em um porta amostra acoplado a uma célula de carga, que mede continuamente a força normal durante o teste. A esfera, ou contra corpo, é de aço inoxidável martensítico com um raio de 30 mm, sendo devidamente limpa antes de cada teste. O meio abrasivo é composto de partículas abrasivas de SiO₂ em suspensão em água destilada, em uma concentração de 10 g de abrasivo por 90 g de água destilada. O abrasivo macio foi utilizado para simular partículas resultantes de debris oxidados encontrados em uma situação real de laminação a frio. A vazão do abrasivo foi fixada em cerca de 15 gotas por minuto.

Assumindo a geometria desgastada com uma esfera, o coeficiente de desgaste pode ser calculado utilizando a Eq. (1).

$$k = \frac{\pi b^4}{64 RSN}, \text{ for } b \ll R \quad (1)$$

Onde, k é o coeficiente de desgaste com unidade $(\text{m}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1})$, b é o diâmetro da marca de desgaste, S é a distância deslizada e N é a carga normal de contato.

A rotação do eixo motor foi mantida em 150 rpm, gerando uma velocidade entre a superfície da esfera e a amostra de aproximadamente $0,11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. A força normal é medida através de uma célula de carga acoplada ao porta amostra, com média de 370 mN.

As amostras revestidas com cromo duro apresentaram a maior resistência a abrasão e produziram uma calota esférica adequada após 90 minutos de teste. Assim, objetivando atingir o regime permanente de desgaste para todas as amostras, três testes de nove minutos foram feitos após os 90 minutos iniciais. Após a realização dos ensaios, os mecanismos de desgaste foram analisados utilizando o mesmo MEV citado anteriormente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nota-se na Figura 3 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 $\text{HV} = 1100 \text{ Kgf/mm}^2$ reportado na literatura.⁽¹²⁾

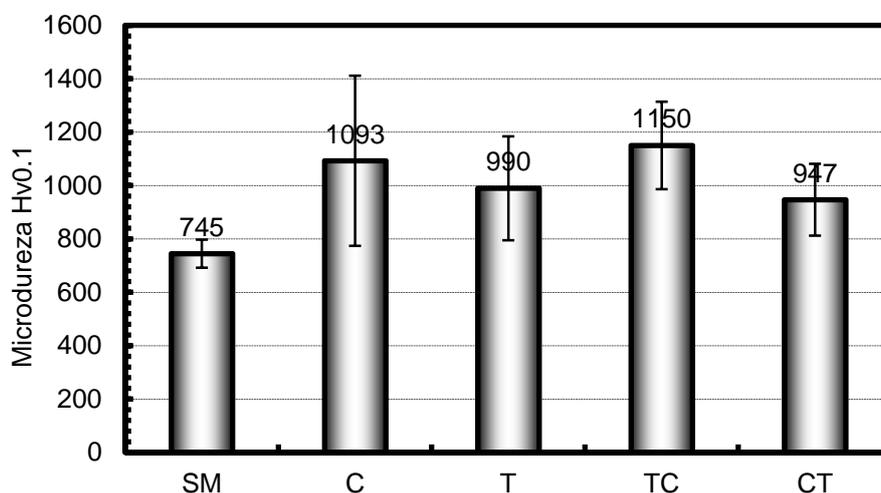


Figura 3 – Valores de microdureza em função das modificações superficiais.

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 $20 \mu\text{m}$. A amostra revestida com cromo e posteriormente texturizada teve o revestimento arrancado pelo processo de texturização (Figura 4). Por esta razão, os resultados das amostras do grupo CT foram excluídos das análises posteriores.

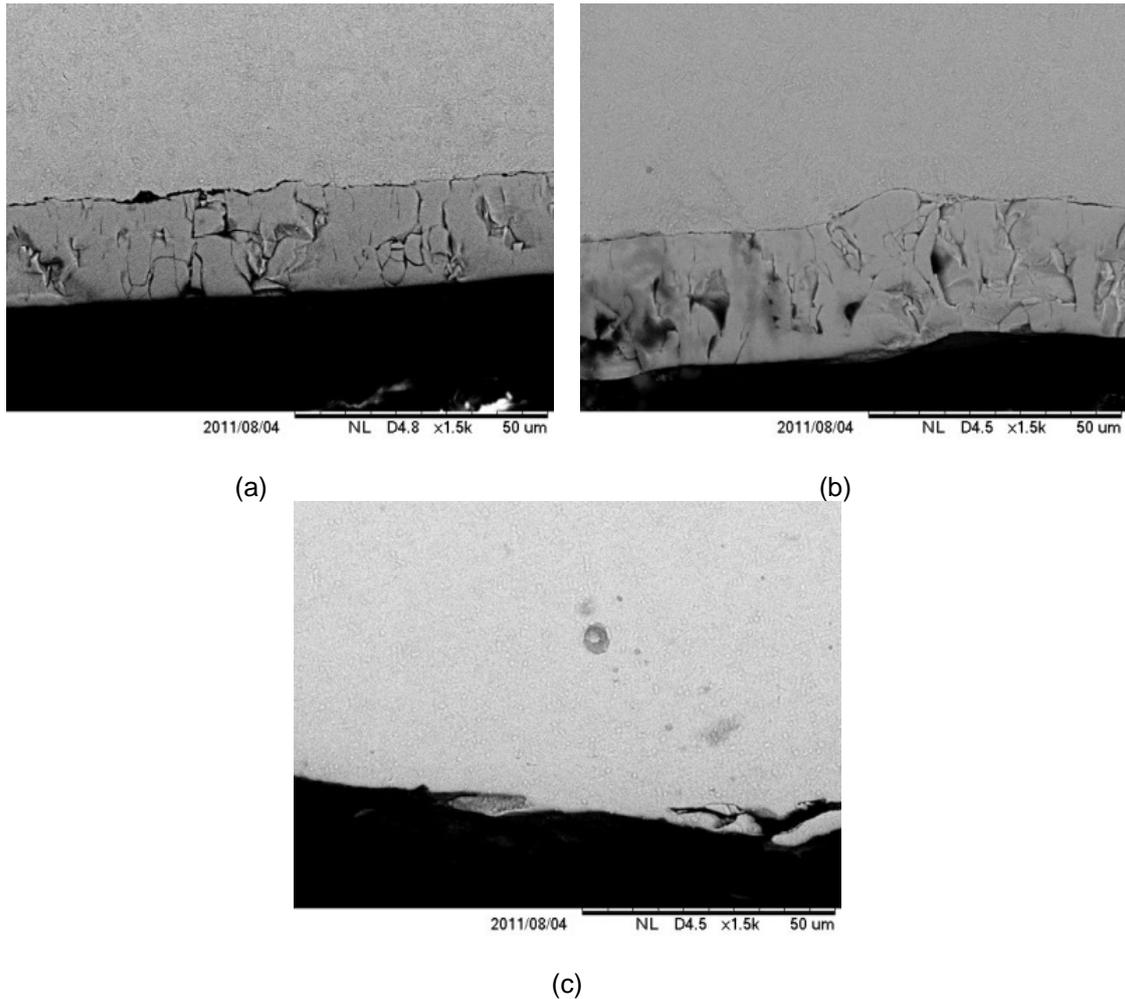


Figura 4 – MEV da seção transversal das amostras (a) C (b) TC e (c) CT.

Objetiva-se com testes de micro abrasão marcas de desgaste circulares (regime permanente). As marcas com geometria adequada para o referido ensaio só foram obtidas em todas as amostras após 90 minutos após o início do ensaio. Portanto realizou-se o teste inicial de 90 minutos e três testes adicionais de 9 minutos para cada amostra (Figura 5).

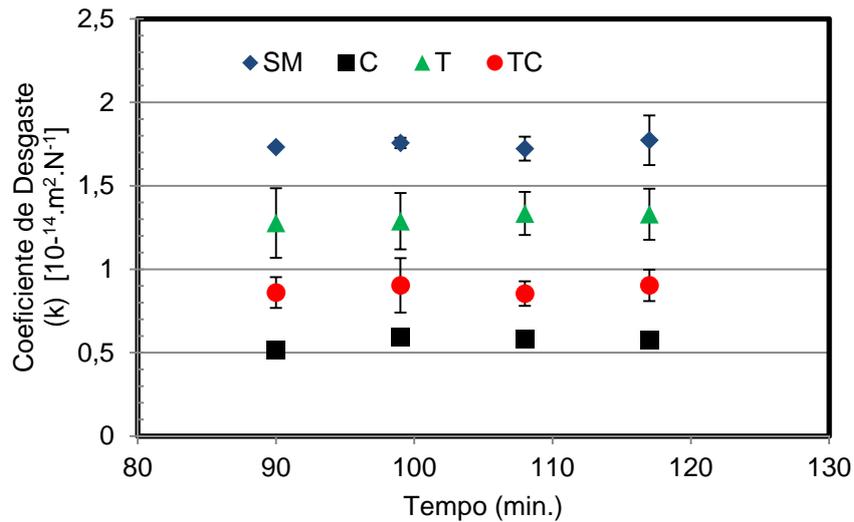


Figura 5 – Coeficiente de desgaste em função do tempo para as diferentes modificações superficiais.

A média do coeficiente de desgaste abrasivo dentro do regime permanente foi calculado e está mostrado na Figura 6.

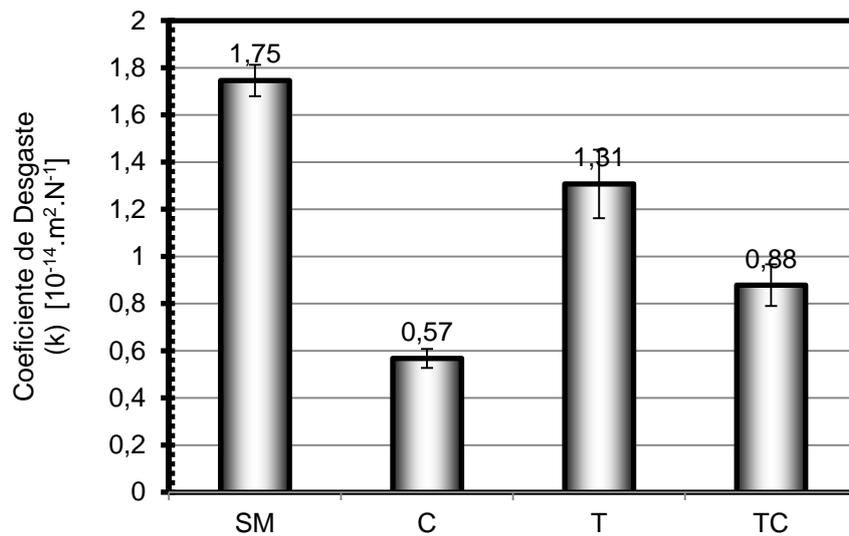


Figura 6 – Média dos valores do coeficiente de desgaste micro abrasivo para as diferentes modificações superficiais.

A Figura 6 mostra que o revestimento de cromo duro reduz o desgaste abrasivo das amostras. Para amostras não revestidas, a texturização aumenta a resistência à abrasão, mas para amostras revestidas a texturização eleva o desgaste abrasivo. Calotas de desgaste típicas são mostradas na Figura 7, que confirmam os resultados mostrados na Figura 6.

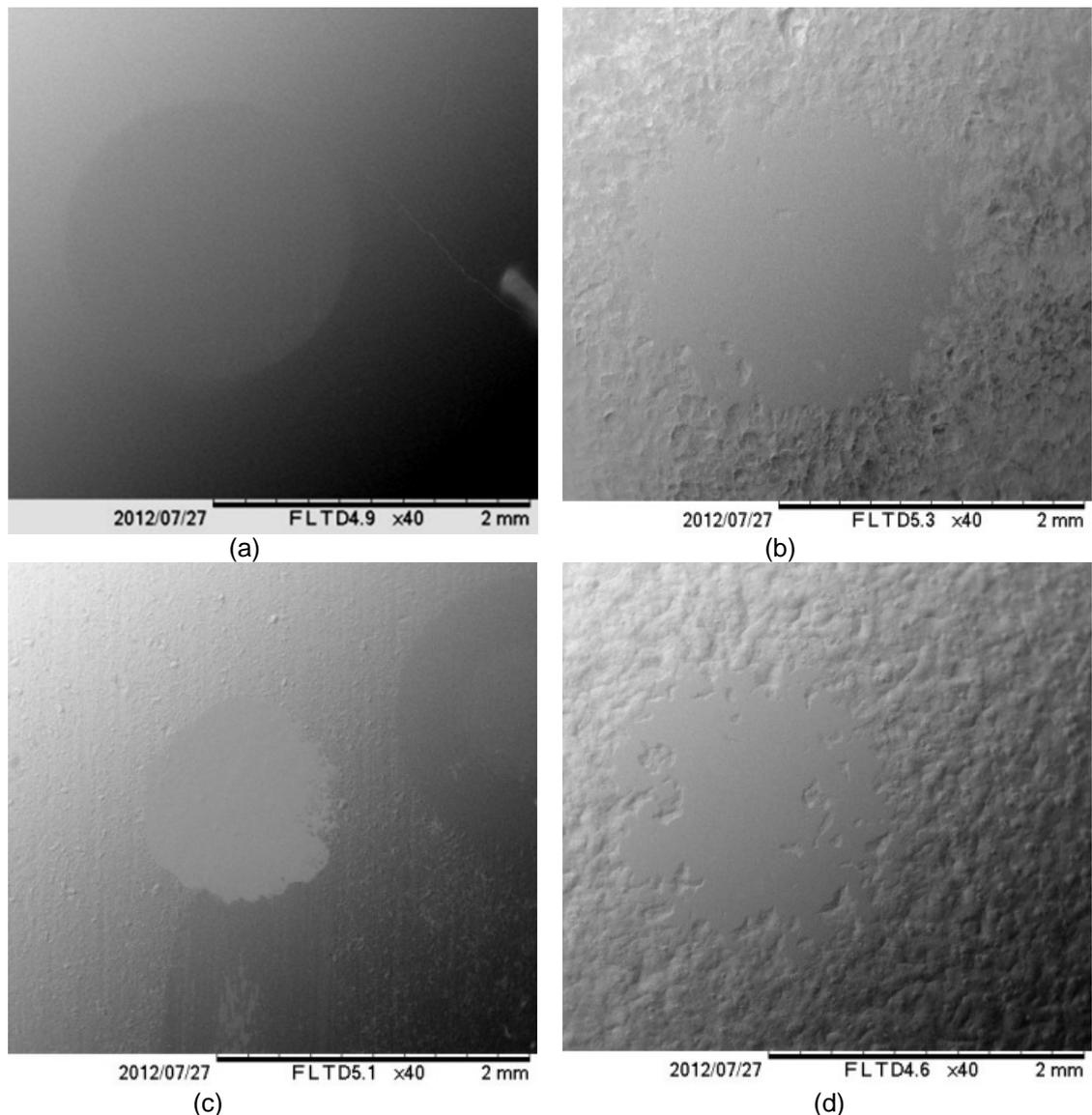


Figura 7 – MEV das marcas de desgaste micro abrasivo (a) SM; (b) T; (c) C; (d) TC.

Com um aumento maior é possível observar que amostras sem revestimento de cromo duro (SM e T) apresentam severas marcas de abrasão, confirmando a sua baixa resistência a abrasão (Figura 7). Também é possível observar que para amostras texturizadas (b) as marcas são menos intensas que para as amostras sem modificações superficiais (a). É razoável supor que esta diferença se deve ao fato de a amostra texturizada apresentar um maior valor de dureza.

Amostras somente com o revestimento de cromo duro (Figura 8c) não apresentaram marcas de abrasão sob o aumento estudado, evidenciando assim, sua maior resistência ao desgaste abrasivo. Porém, vale ressaltar o uso de um abrasivo macio durante os testes. Em amostras previamente texturizadas com posterior deposição de cromo duro (Figura 8d), é possível observar pequenas marcas de abrasão, porém em menor quantidade do que em amostras sem o revestimento de cromo duro. O aparecimento das marcas de abrasão pode ser explicado pelo fato da texturização elevar a pressão de contato devido à rugosidade da superfície, elevando o desgaste abrasivo quando comparado com amostras do grupo C.

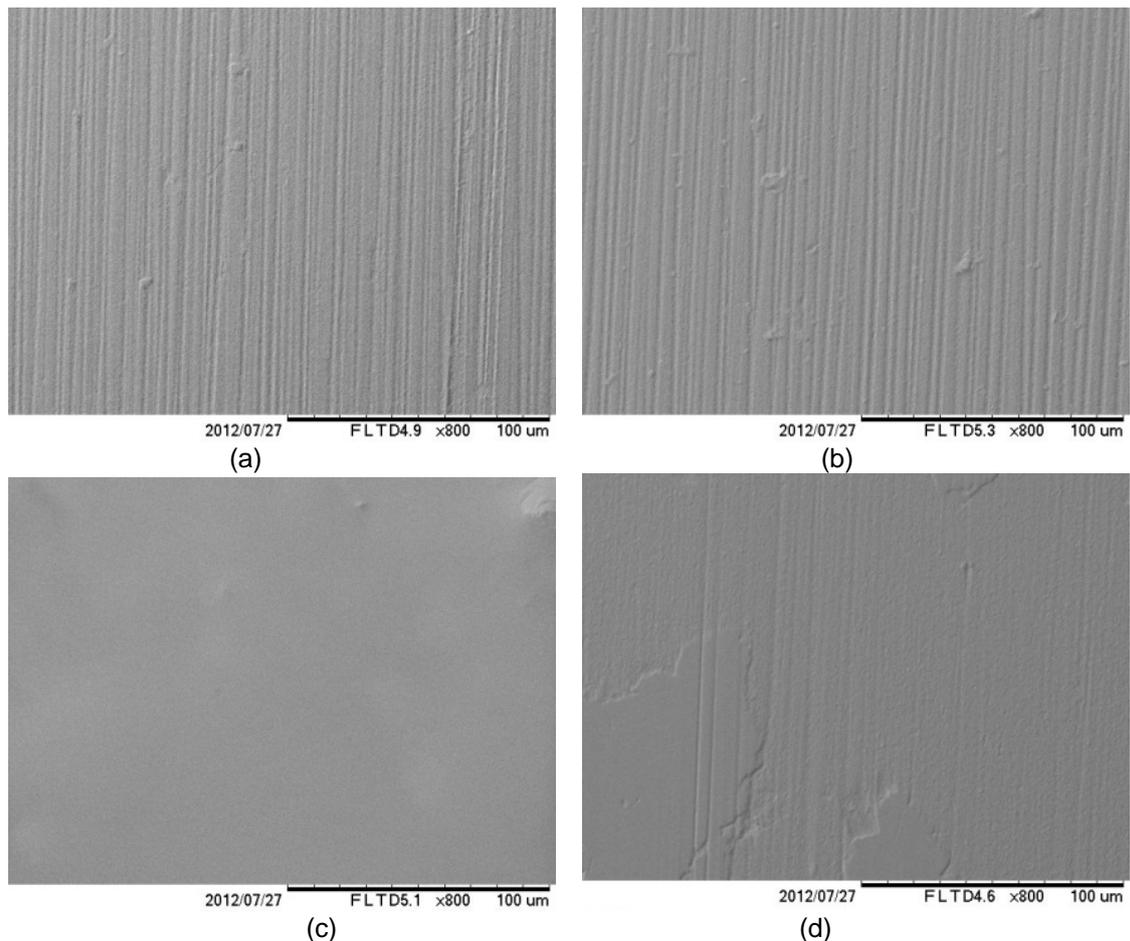


Figura 8 – MEV das marcas de desgaste micro abrasivo com aumento elevado (a) SM; (b) T; (c) C; (d) TC.

4 CONCLUSÃO

A texturização e o revestimento de cromo duro promoveram mudanças significativas no coeficiente de desgaste micro abrasivo das amostras.

A redução do coeficiente de desgaste micro abrasivo em amostras com deposição de cromo duro está associado à dureza intrínseca do cromo duro.

Para amostras sem revestimento de cromo duro, a texturização promoveu a redução do coeficiente de desgaste micro abrasivo.

Em amostras revestidas com cromo duro, a texturização elevou o coeficiente de desgaste micro abrasivo em função da elevação da pressão de contato entre a amostra e o contra corpo esférico.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) pela execução do tratamento térmico e à Fapemig, à CAPES e ao CNPQ pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 MENDES, J. L. T. **Influência de Parâmetros Microestruturais no Comportamento Tribológico de Ligas Ferrosas Multicomponentes**. 2007. 160 (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

- 2 DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. McGraw Hill Book Company, 1988.
- 3 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. 2765-2774, 2008. ISSN 0257-8972.
- 4 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, April 2005.
- 5 SIMÃO, J.; ASPINWALL, D. K. Hard chromium plating of EDT mill work rolls. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 92–93, n. 0, p. 281-287, 1999. ISSN 0924-0136.
- 6 SILVA, E. D. et al. Propostas à Prevenção de Riscos Ambientais relacionados ao Tratamento de Superfície com Cromatos. **Cadernos UniFOA**, v. Edição Especial, p. 48-58, Maio 2008 2008.
- 7 LEGG, K.; SARTWELL, B. **Hard Chromium Alternatives Team Update - Improving Performance While Reducing Cost**. GROUP, R. T. e LABORATORY, N. R.
- 8 ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials**. Elsevier Science, 1987. ISBN 9780080875743.
- 9 HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Edward Arnold, 1992. ISBN 9780340561843.
- 10 DE MELLO, J. D. B.; GONÇALVES JR, J. L.; COSTA, H. L. Influence of surface texturing and hard chromium coating on the wear of steels used in cold rolling mill rolls. **Wear**, v. 302, n. 1–2, p. 1295-1309, 2013. ISSN 0043-1648.
- 11 LEITE, M. V. et al. **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. Santos - SP, 2011. p.
- 12 SIMÃO, J. et al. Mill roll texturing using EDT. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 45, n. 1–4, p. 207-214, 1994. ISSN 0924-0136.