

RICARDO SPINI PARANAIBA

AVALIAÇÃO DA NITRETAÇÃO A PLASMA COMO
ALTERNATIVA AO REVESTIMENTO DE CROMO
DURO EM CILINDROS DE LAMINAÇÃO A FRIO.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2017

RICARDO SPINI PARANAIBA

**AVALIAÇÃO DA NITRETAÇÃO A PLASMA COMO ALTERNATIVA
AO REVESTIMENTO DE CROMO DURO EM CILINDROS DE
LAMINAÇÃO A FRIO.**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao curso de graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
ENGENHEIRO MECÂNICO.

Área de Concentração: Materiais e
Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Washington Martins da
silva Júnior

Uberlândia – MG

2017

RICARDO SPINI PARANAIBA

**AVALIAÇÃO DA NITRETAÇÃO A PLASMA COMO ALTERNATIVA
AO REVESTIMENTO DE CROMO DURO EM CILINDROS DE
LAMINAÇÃO A FRIO.**

Trabalho de conclusão de curso
APROVADO pelo curso de graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia,

Área de Concentração: Materiais e
Processos de Fabricação.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior– FEMEC

Prof. Dr. Alberto Arnaldo Raslan – FEMEC

Prof. Msc. Mário Martins de Oliveira júnior – FEMEC

Uberlândia, 07 de Agosto de 2017.

À minha mãe Glenda e ao meu irmão Victor.

Agradecimentos

Agradeço a minha mãe e ao meu irmão pelo apoio incondicional. Agradeço aos Professores Washington Martins, José Lúcio Gonçalves e José Daniel pela orientação durante minha formação acadêmica e profissional. Aos membros do LTM pelo apoio e companheirismo. Agradeço à Gerdau pelo fornecimento do material para obtenção das amostras e realização dos tratamentos térmicos e à Fapemig, a CAPES e ao CNPQ pelo apoio financeiro.

PARANAIBA, R. S. **Avaliação Da Nitretação A Plasma Como Alternativa Ao Revestimento De Cromo Duro Em Cilindros De Laminação A Frio**. 2017. Trabalho de conclusão de curso, Universidade federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

O objetivo deste trabalho é avaliar se a nitretação a plasma é capaz de substituir o revestimento de cromo duro em cilindros de laminação a frio. Na indústria laminadora, o cromo duro é utilizado tanto em cilindros retificados quanto em cilindros texturizados por descargas elétricas. Para estas duas topografias avaliaram-se os comportamentos tribológicos da nitretação e do cromo duro. Foram apresentados trabalhos que buscaram reproduzir o desgaste em cilindros de laminação a frio. Deste modo, o presente trabalho de conclusão de curso utilizou a metodologia sugerida pela literatura para avaliar a viabilidade do uso da nitretação a plasma em cilindros de laminação a frio. Após os ensaios, concluiu-se que o uso da nitretação a plasma em cilindros de laminação a frio é promissor. O coeficiente de atrito para as amostras nitretadas foi similar às amostras revestidas com cromo duro e a texturização da superfície provocou a estabilização deste parâmetro em ambas as condições. A taxa de desgaste em amostras das amostras nitretadas e sem texturização foi compatível com os valores encontrados para as amostras com cromo duro. No entanto, o desempenho da nitretação em amostras texturizadas foi ligeiramente inferior. A texturização reduziu consideravelmente a taxa de desgaste das amostras. A nitretação não permitiu conservar os parâmetros topográficos S_q e S_{dq} após o desgaste. Porém, os parâmetros S_{pk} e S_{bi} apresentaram comportamento similar à amostra cromada.

Palavras Chave: Laminação a Frio, Cromo Duro, Nitretação a plasma, Texturização Por Descargas Elétricas, Tribologia.

PARANAIBA, R. S. **Evaluation of Plasma Nitriding as an Alternative to Hard Chromium Coating In Rolling Mill Rolls.** 2017. Work of Conclusion of Course, Universidade Federal De Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

The objective of this study is to evaluate if plasma nitriding is capable of replacing the hard chromium coating in rolling mill rolls. In the rolling industry, hard chrome is used in both rectified and textured rolls. For these two conditions, the tribological behaviour of nitriding and hard chromium were evaluated. This study presents papers that aim to reproduce the wear on rolling rolls. The methodologies suggested in the literature were used to evaluate the performance of plasma nitriding in rolls. After the tests, it was concluded that the use of plasma nitriding in rolling mill rolls is promising. The friction coefficient of the nitride samples was similar to the samples coated with hard chromium. The texture of the surface provoked the stabilization of this parameter in both conditions. The wear rate in samples of the nitrided and non-texturing samples was compatible with the values found for samples with hard chromium. However, the performance of nitriding in textured samples was slightly lower. The texturing considerably reduced the wear rate of the samples. Nitriding did not allow maintaining the topographic parameters S_q and S_{dq} after the wear. But, the S_{pk} and S_{bi} parameters presented similar behaviour to the chrome sample.

Keywords: Rolling Mill Rolls, Hard Chromium, Nitriding, Electric Texturing, Tribology.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
2.1. Processo de laminação.....	9
2.2. Texturização	10
2.3. Cromo duro.....	11
2.4. Nitretação	14
3. METODOLOGIA	16
3.1. Produção das amostras	17
3.2. Caracterização topográfica	18
3.3. Ensaio de Desgaste	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
4.1. Cromo duro.....	21
4.2. Nitretação a plasma	23
4.3. Ensaio de deslizamento	25
5. CONCLUSÃO:	57
6. Agradecimentos	4
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

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 (MENDES, 2007).

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) (MENDES, 2007).

Em função das diversas aplicações dos produtos laminados, em alguns casos é necessário produzir o material com uma textura pré-definida, sendo que esta textura é transmitida à chapa pelos cilindros de acabamento (ELKOCA, 2008). As chapas texturizadas desempenham um importante papel na fabricação de carrocerias de automóveis, pois exibem refletividade uniforme após a pintura (UTSCH et al., 2005).

Durante as primeiras etapas da laminação com cilindros texturizados, alguns picos fraturam-se facilmente, tornando-se debris. Para aumentar a durabilidade da superfície dos cilindros de laminação, é comum deposição de cromo duro que além de aumentar a dureza superficial, permite manter a topografia superficial do cilindro por mais tempo. Antes que o produto laminado apresente um acabamento fora do especificado, é necessário refazer a superfície do cilindro, removendo o volume desgastado e refazendo as etapas de texturização e revestimento da superfície (SIMÃO et al., 1999).

Apesar dos resultados positivos para a laminação, o revestimento de cromo duro é obtido a partir de processos envolvendo substâncias tóxicas e cancerígenas. Devido ao impacto na saúde dos trabalhadores e no meio ambiente, agências internacionais promulgaram normas mais restritivas para produção do cromo duro. Para minimizar os riscos ambientais e pessoais produzidos pelo cromo hexavalente, países europeus são orientados a não colocar a venda veículos contendo cromo duro desde primeiro de julho de 2003.

O presente trabalho de conclusão de curso buscou avaliar uma alternativa ao cancerígeno cromo duro utilizado na indústria laminadora. Os trabalhos apresentados na seção 2.4 indicam que a nitretação a plasma possui potencial para substituir este revestimento. Deste modo, camadas nitretadas e cromadas

foram avaliadas e submetidas a testes tribológicos a partir de uma metodologia definida pela literatura para reproduzir o desgaste em cilindros de laminação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Processo de laminação

O processo de laminação consiste na redução da espessura do material laminado devido à passagem do mesmo por um cilindro laminador (PODGORNIK, 1998). Durante a laminação ocorre o deslizamento entre as superfícies dos componentes, pois, inicialmente, o produto está com uma velocidade inferior à velocidade da superfície do cilindro, posteriormente, a velocidade da chapa é superior (Figura1). Este fenômeno provoca uma variação no sentido da força de atrito presente no sistema, deste modo, com o objetivo de reproduzir os mecanismos de desgaste encontrados na indústria faz-se necessário o uso de testes de deslizamento alternado.

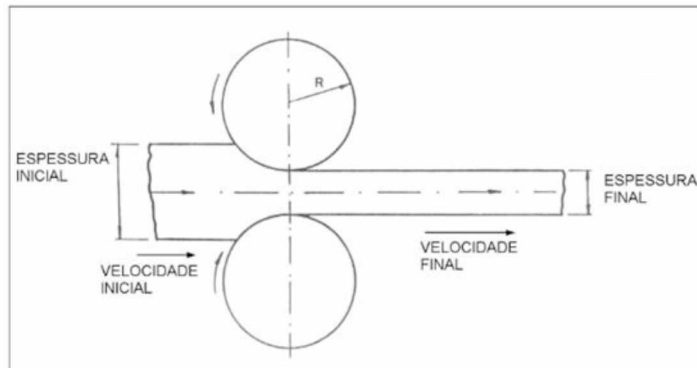


Figura 2.1 – Características do processo de laminação (PODGORNIK, B., 1998).

Com uma topografia adequada do produto laminado, pode-se promover uma homogeneidade de reflexão da luz após a pintura, melhor retenção de óleo lubrificante, maior suporte mecânico da superfície e entre outras aplicações. Com o objetivo de atender aos elevados níveis de exigência com relação à forma e a aparência de seus produtos, a indústria de laminação a frio tem empregado texturas na superfície dos cilindros de acabamento (ELKOCA, 2008).

Uma vez que as condições de operação do cilindro laminador incluem elevadas pressões de contato, a topografia conferida pela texturização tende a ser deteriorada devido ao desgaste superficial do cilindro. O revestimento de cromo duro vem sendo amplamente utilizado para manter a topografia de superfície do cilindro por mais tempo, permitindo maior intervalo entre trocas deste componente. Porém, uma vez que o cromo duro é cancerígeno e oferece sérios impactos ambientais, faz-se necessário o estudo de alternativas ao revestimento utilizado.

2.2. Texturização

A Texturização por descargas elétricas (EDT) é uma versão da usinagem por descargas elétricas onde os eletrodos são posicionados ortogonalmente à superfície da peça, que fica imersa em um meio dielétrico. Descargas elétricas são induzidas entre o eletrodo (anodo) e a peça (catodo), provocando modificações em sua superfície. A combinação da corrente, tensão e frequência de oscilação definem a condição final da superfície texturizada (SIMÃO et. Al., 1994).

A texturização por EDT independe da dureza da superfície do material, apresenta elevada taxa de transferência de rugosidade e a textura resultante é bem homogênea e repetitiva. Alterando parâmetros como corrente, tensão ou o tipo de material do eletrodo é possível obter a combinação desejada da rugosidade e densidade de picos (CORTÊS 2009). Para o processo de laminação, a perda de rugosidade do cilindro laminador texturizado por EDT é relativamente baixa (SIMÃO et al., 1994).

Os parâmetros de rugosidade bidimensionais, normatizados pela norma ISSO 4287 (1997), são amplamente utilizados na indústria para quantificar topografias. Porém, para a análise de superfícies texturizadas, estes parâmetros não possuem uma representatividade adequada. Neste caso, faz-se o uso de parâmetros tridimensionais para descrever uma superfície. Apesar de ainda não constarem em norma, estes parâmetros são bem conhecidos da literatura (DONG et al., 1992).

No presente trabalho, selecionou-se um parâmetro de amplitude (S_q) um parâmetro híbrido (S_{dq}) e dois parâmetros funcionais (S_{pk} e S_{bi}).

O parâmetro de amplitude S_q representa a rugosidade superficial quadrática média e é o valor RMS das alturas em relação ao plano médio da superfície, calculado por meio da Equação dois (DONG, et al, 1992).

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N Z_{jk}^2} \quad (2)$$

O parâmetro híbrido S_{dq} , calculado pela equação três, representa a inclinação média das irregularidades, quanto menor o valor deste parâmetro, melhor será a refletividade da luz da superfície.

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{j=2}^N \sum_{i=2}^M \left(\frac{z(x_i, y_j) - z(x_{i-1}, y_{j-1})}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{z(x_i, y_j) - z(x_{i-1}, y_{j-1})}{\Delta y} \right)^2} \quad (3)$$

O parâmetro funcional S_{pk} corresponde à altura dos picos da superfície e é uma extrapolação do parâmetro bidimensional R_{pk} . O parâmetro R_{pk} é extraído da curva de Abbott-Firestone e está associado à região que se desgasta nos primeiros contatos relativos entre as superfícies em contato.

O parâmetro funcional S_{bi} representa a capacidade de suporte mecânico da superfície e descreve a superfície em função da variação da raiz quadrática média da superfície, conforme mostrado pela Equação quatro (DONG, et al, 1992).

$$S_{bi} = \frac{S_q}{\eta_{0,05}} = \frac{1}{h_{0,05}} \quad (4)$$

Onde $h_{0,05}$ representa uma altura que revela o truncamento de 5% da área total e $\eta_{0,05}$ é a altura correspondente a 5% da área total (DONG et al., 1992).

Quanto maior o valor do parâmetro S_{bi} indica que maior será a capacidade de suporte mecânico da superfície. Durante o processo tribológico a transição da superfície desgastada para a superfície com desgaste geralmente ocorre à elevação do parâmetro.

2.3. Cromo duro

O cromo duro é obtido por eletrodeposição a partir de uma solução contendo ácido crômico e um ânion catalizador. A dureza deste revestimento pode atingir valores entre 950 e 1100 Kgf/mm² utilizando soluções livres de fluoreto, nas quais se acrescenta íons sulfetos (SO₄²⁻) e uma espécie orgânica como catalizadores (NEWBY, 1994).

A indústria laminadora utiliza este processo, pois ele permite endurecer a superfície do cilindro e preservar os parâmetros topográficos obtidos na texturização. O tempo total gasto depende do diâmetro do cilindro e pode variar de 9 a 17 minutos (NEWBY, 1994). Apesar de eficiente, a produção do cromo duro utiliza substâncias tóxicas e cancerígenas, que estão sendo restringidas por normas internacionais e assim inviabilizando seu uso.

Para verificar se a nitretação a plasma é um processo adequado para substituir o cromo duro em cilindros de laminação é necessário simular em laboratório as condições de desgaste encontradas em campo. Porém, às dimensões e a geometria de um cilindro de laminação dificultam a análise e reprodução da superfície deste componente.

Para o presente trabalho foi fundamental a contribuição de estudos posteriores, como o realizado por LEITE et al. (2011) que validou o uso de réplicas metalográficas para analisar a superfície de um cilindro de laminação. Esta técnica consiste na aplicação de um polímero na superfície a ser replicada de modo que a cura deste material ocorra sobre esta superfície. Após a secagem, o polímero é removido e posteriormente analisado.

Em função do grande número de materiais de réplicas disponíveis no mercado, os autores avaliaram o tipo de material que melhor reproduz os parâmetros topográficos da superfície analisada. Eles investigaram um novo material de replicação, da marca Zhermack, modelo Colorbite D. Para validar este material, foi utilizado como referência um padrão de rugosidade média (R_a) de $3,0\text{ }\mu\text{m}$ e um espaçamento médio entre picos (R_{Sm}) de $101\text{ }\mu\text{m}$. Os resultados mostraram que a diferença na escala vertical (parâmetro R_a) é de 5% e na escala horizontal (parâmetro R_{Sm}) é inferior a 1% (Figura 2.2). Deste modo, o estudo mostrou que o novo material apresenta um comportamento muito bom de replicação.

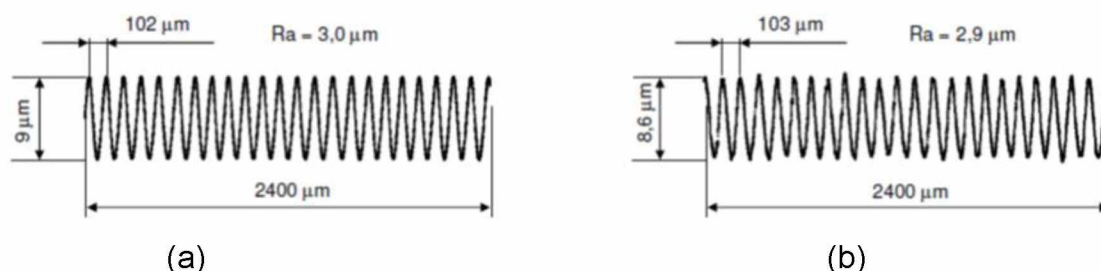


Figura 2.2 - Medidas dos perfis de rugosidade do padrão (a) e da réplica do padrão LEITE et al. (2011).

GONÇALVES JR (2016) buscou reproduzir os mecanismos de desgaste e os parâmetros topográficos de cilindros de laminação no fim da vida útil. O autor optou pelo uso de um ensaio com deslizamento alternado, promovendo a inversão do coeficiente de atrito que ocorre durante a laminação.

Utilizando réplicas metalográficas validadas por LEITE et al. (2011), GONÇALVES JR (2016) avaliou a superfície de cilindros texturizados e de cilindros retificados com o posterior revestimento de cromo duro. A Figura 2.3 ilustra a análise qualitativa das réplicas antes e após o uso, nota-se o desgaste atuou no sentido de suavizar a topografia do cilindro de laminação.

O estudo concluiu que, para simular o desgaste em cilindros de laminação, os testes deveriam ser realizados com a configuração de deslizamento alternado, com frequência de dois Hz, amplitude de deslizamento de 10 mm, contracorpo cilíndrico com nove mm de diâmetro e nove mm de comprimento durante 1e 5 h.

GONÇALVES JR (2016) também mostrou que tanto as modificações superficiais quanto o recobrimento de cromo duro não alteraram significativamente o coeficiente de atrito do sistema tribológico utilizado. Em contrapartida, o autor obteve resultados que mostram uma redução na taxa de desgaste da amostra após a aplicação do revestimento (figura 2.4). A amostra “SM” foi produzida sem modificações e sem revestimento, o prefixo “T” indica que a amostra sofreu texturização aleatória e o prefixo “C” indica que a amostra foi revestida com cromo duro.

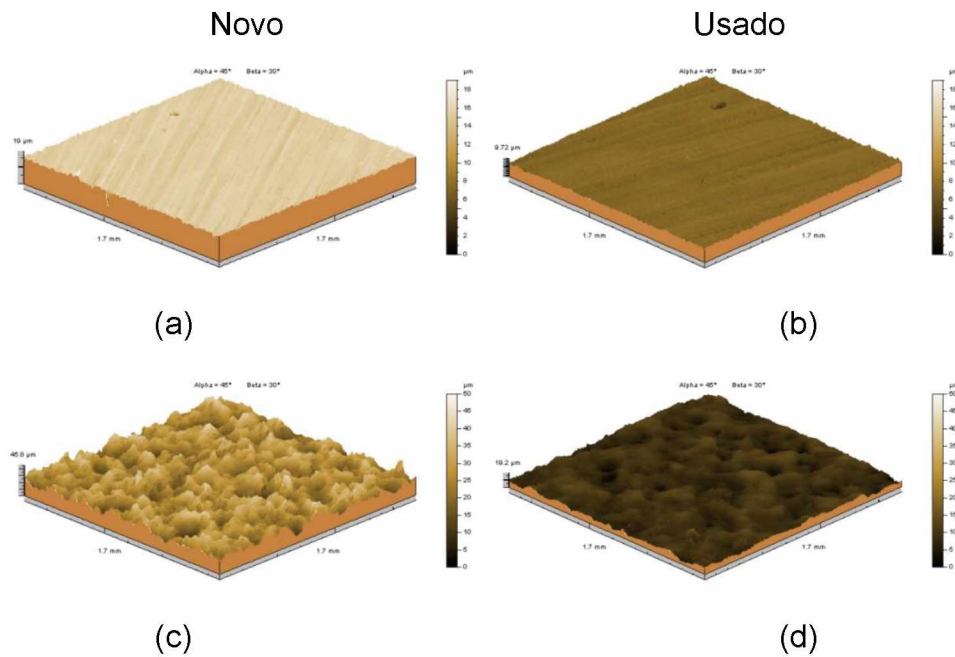


Figura 2.3 - Mapas topográficos típicos de cilindros laminadores antes e após o uso: (a) e (b) cilindro retificado; (c) e (d) texturizado por EDT e cromado.

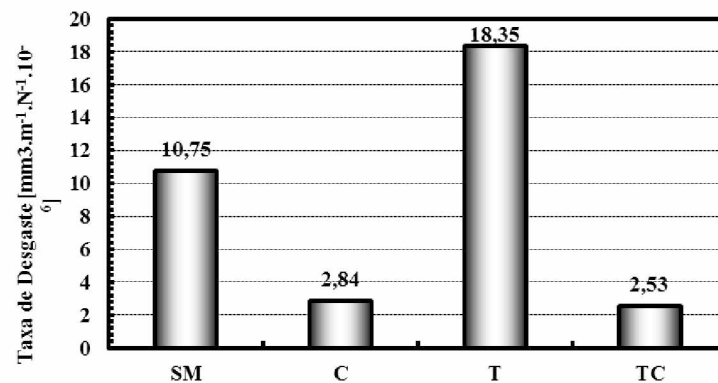


Figura 2.4 - Taxa de desgaste do coeficiente de atrito em função das diferentes modificações superficiais (DE MELLO et al., 2013).

2.4. Nitretação

O uso de plasma para a nitretação é uma técnica de endurecimento superficial que permite endurecer superficialmente componentes metálicos sem geração de fumaça ou lixo tóxico, sem riscos de explosão, com pouca sujeira, barulho ou aquecimento excessivo, com menor tempo de tratamento, menor consumo de energia, menor consumo de gás.

Segundo CHAPMAN (1980) o plasma frio é um gás parcialmente ionizado, ou seja, possui o mesmo número cargas positivas e negativas, e quantidade diferente de átomos ou moléculas neutras não ionizadas.

XU (1985) patenteou um processo que emprega plasma de baixa temperatura e que pode ser usado para depositar elementos tais como níquel, cromo, molibdênio, cobre, etc. A deposição ocorre com a aplicação de duas descargas elétricas, uma entre o anodo e o substrato a ser depositado (catodo) e outra entre este componente e o eletrodo fonte de material a ser depositado.

BINDER (2006) aprimorou o processo descrito anteriormente utilizando descargas luminescentes anormais. Isto possibilitou o envolvimento uniforme pelo plasma em todo o cátodo e, assim, um tratamento homogêneo de materiais.

O processo estudado por BINDER (2006) permite realizar a nitretação por plasma e modificar as propriedades químicas, mecânicas e tribológicas da superfície e da sub superfície de um material. Nos aços, a adição de elementos de liga com maior afinidade com o nitrogênio influencia a formação da camada nitretada e suas propriedades.

MALISKA; KLEIN e DE SOUZA (1995) nitretaram amostras com tempos de nitretação de 1, 2, 4, 8 e 16 horas, os resultados mostraram o comprimento da camada nitretada aumenta no início do processo e depois se estabiliza. Este fenômeno ocorre devido à elevada concentração inicial de átomos de ferro que é reduzida com o andamento do processo levando ao equilíbrio entre a concentração de átomos de ferro e nitretos. Ainda, observou-se que após 4 horas não houve diferença significativa na espessura da camada nitretada.

(PODGORNIK; VIŽINTIN; LESKOVŠEK, 1998) verificaram que após a nitretação a rugosidade média (R_a) e a máxima distância de vale a pico (R_{max}) aumentaram em comparação com a superfície original. Os autores ainda verificaram a influencia do recobrimento no desgaste por deslizamento. A nitretação influiu no coeficiente de atrito do sistema, que variou entre 0,25 e 0,3 em função das diferentes características do revestimento.

Os autores observaram que o desgaste inicial é muito baixo e em um tempo relativamente curto aumenta bastante. Observou-se ainda, que o desgaste aumentou com a elevação da carga normal e que regime de desgaste dividiu-se em médio no início do teste e em severo no final.

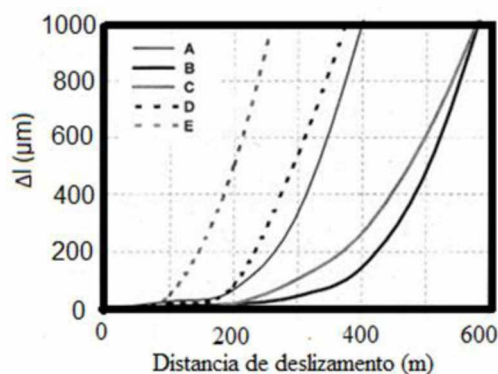


Figura 2.5 – Relação entre o comprimento dos pinos desgastados e a distancia de deslizamento (PODGORNIK; VIŽINTIN; LESKOVŠEK, 1998).

Durante o deslizamento, a ruptura dos picos mais frágeis da superfície da amostra origina debris abrasivos que permanecem na região do contato elevando o desgaste (PODGORNIK; VIŽINTIN; LESKOVŠEK, 1998).

Os autores observaram que o mecanismo de desgaste predominante é o desgaste adesivo e que a mudança da carga não causou uma mudança neste mecanismo, apenas provocou uma mudança na intensidade de desgaste. A confirmação da ocorrência deste mecanismo também se deu pelo aparecimento de resíduos de desgaste formados durante os testes.

3. METODOLOGIA

Este trabalho de conclusão de curso foi realizado no Laboratório de Tribologia e Materiais, do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, com o objetivo de avaliar a viabilidade da nitretação a plasma em substituir o revestimento de cromo duro usado em cilindros de laminação a frio.

Inicialmente foi necessário determinar uma metodologia que permitisse reproduzir em laboratório os mecanismos de desgaste que ocorrem em cilindros de laminação, esta condição foi determinada e validada pela literatura (DE MELLO, 2013). Por este motivo, além da análise da nitretação, fez-se necessário a realização de testes com amostras cromadas, para verificar se a condição obtida pela literatura fora reproduzida durante os ensaios realizados no presente trabalho.

3.1. Produção das amostras

Para produção das amostras, a empresa Gerdau, fabricante de cilindros de laminação, disponibilizou um fragmento de cilindro de aço VC 10. Este fragmento foi cortado obtendo amostras de 35 x 35 x 5 mm, as duas faces de maior área foram retificada, texturizadas, revestidas e utilizadas nos ensaios tribológicos. Após o corte do cilindro, constatou-se que a amostra apresentava valores de dureza abaixo dos exigidos durante o processo de laminação. A dureza Vickers medida utilizando um durômetro universal marca Wolpert com carga de 20 Kg.

Com esta constatação, utilizou-se uma sequência de tratamentos térmicos recomendados pelo fabricante, com o resfriamento ao ar calmo. Porém, devido a grande diferença entre as dimensões dos cilindros e das amostras, estas apresentaram trincas após o tratamento térmico. Assim, utilizou-se um aquecimento a 950°C por duas horas e resfriamento em caixa de areia que permitiu obter valores de dureza dentro da faixa esperada e em amostras isentas de trincas.

Após o tratamento térmico, as amostras foram retificadas a fim de garantir o paralelismo entre as faces maiores e prepará-las para receberem os tratamentos superficiais estudados. Utilizou-se uma retífica da marca Melo modelo P36, rebolo com rotação de 3000 rpm e precisão de 0,02 mm em 600mm.

Os revestimentos foram feitos em amostras sem texturização e com texturização, ao final obteve-se cinco amostras para cada grupo avaliado: revestidas com cromo duro (Cr), nitretadas (N), texturizadas com posterior revestimento de cromo duro (EDT Cr), e texturizadas com posterior nitretação (EDT N). Após cada etapa de modificação superficial, a topografia das amostras foi medida via interferometria a laser.

GONÇALVES JR, 2016, avaliou os parâmetros utilizados em um equipamento de texturização por descargas elétricas que reproduzissem a superfície de um cilindro de laminação texturizado por EDT. Com estes parâmetros, a texturização foi feita pela empresa Fernando Gomes Cardoso –

ME localizada na cidade de Uberlândia em um equipamento modelo Engemaq 440 MC utilizando eletrodo de cobre eletrolítico e fluido dielétrico ArcleanEletron à base de hidrocarbonetos.

O revestimento de cromo duro foi realizado pela empresa Cromofix Cromo Duro Ltda, localizada na cidade de Caxias do Sul. A deposição do revestimento nas amostras foi feita em banho sem aditivos, em uma temperatura entre 55 e 60 °C e corrente entre 20 e 25 A/dm².

A nitretação a plasma foi realizada no Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina em um reator em escala industrial, desenvolvido por BINDER (2006). O processo de nitretação consiste em degasagem, limpeza em anodo, limpeza em catodo e nitretação. A degasagem tem o objetivo de remover os gases adsorvidos no interior da câmara, a limpeza do anodo busca eliminar impurezas orgânicas e, para a remoção de óxidos das peças, utiliza-se a limpeza em cátodo. A etapa de nitretação com a finalidade de se obter uma camada de compostos rica em nitretos tipo ϵ (Fe₂-3N) e γ' (Fe₄N) ocorre a uma temperatura de 520°C, mistura gasosa de 90% de N₂ – 9% de H₂ – 1% de CH₄, pressão de 3 torr e tempo de patamar de 1,5h(GIACOMELLI, 2015).

Após a deposição dos revestimentos, cortou-se as amostras para análise das suas seções transversais. Para preservar a camada da modificação superficial coloca-se uma folha de cobre na superfície a ser cortada com equipamento de corte (MinitomStruers), a rotação do disco foi de 250 rpm e carga de 300g. A espessura da camada de revestimento foi medida através de imagens geradas por um microscópio óptico Olympus BX51N e analisado via software Olympus StreamMicro-image. Para avaliar a micro dureza das amostras nitretadas utilizou-se um microdurômetro Shimadzu com carga de 100g e penetrador Vickers.

3.2. Caracterização topográfica

A caracterização da topografia das amostras antes e após os revestimentos foi realizada com a técnica de interferometria a laser. Esta técnica consiste na emissão de um laser cujo ponto focal incidente sobre a amostra.

Quando o equipamento percorre a superfície da amostra, a distância entre a lente do equipamento e a peça é alterada, com isso, o plano focal deixa de coincidir com a superfície. Deste modo, atuadores piezoelétricos promovem o deslocamento vertical da lente até que o ponto focal volte a coincidir sobre a superfície da amostra, o deslocamento da lente corresponde à variação da altura da topografia.

A interferometria a laser foi realizada nas duas faces das cinco amostras de cada condição estudada, foram feitas três medições da topografia antes e após a aplicação dos revestimentos. Este critério também foi aplicado para as amostras texturizadas após uma hora e cinco horas de ensaio.

As interferometrias foram feitas em uma área de 3 x 3 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.

O presente trabalho utilizou parâmetros topográficos tridimensionais S_q , S_{dq} , S_{pk} , S_{bi} para quantificar a topografia das superfícies, escolhidos por já terem sido usados na literatura (DE MELLO; GONÇALVES JR; COSTA, 2013). Os parâmetros tridimensionais são extrapolações dos parâmetros bidimensionais definidos pela norma ISO 4287 (1997) e são definidos em comparação ao plano médio da superfície.

3.3. Ensaios de Desgaste

Os equipamentos e a metodologia adotados nesta etapa do trabalho foram utilizados e validados por DE MELLO; GONÇALVES JR e COSTA (2013), que buscaram reproduzir em laboratório o desgaste ocorrido em cilindros de laminação a frio.

Os testes de deslizamento foram feitos em um tribômetro universal da marca Plint and Partners modelo TE 67. Usou-se a configuração de deslizamento alternado, que promove a inversão do sentido da força de atrito, para simular o desgaste ocorrido durante o uso de um cilindro de laminação a

frio. A frequência do movimento foi de 2 Hz, amplitude de deslizamento de 10 mm, durante 1e 5 horas, conforme sugerido pela literatura GONÇALVES JR (2016).

Os testes de deslizamento foram feitos em um local com temperatura e umidade controladas. Cilindros de rolamentos, confeccionados de aço AISI 52100, foram utilizados como contracorpos. Os cilindros utilizados possuíam comprimento e diâmetro de 9 mm e foram alinhados de forma a produzir um contato em linha.

Para cada grupo de amostras realizaram-se 3 repetições de cada condição ensaiada. Antes de iniciarem-se os testes, os corpos e contracorpos foram limpos com acetona em ultrassom por 10 minutos e após a limpeza verificou-se a massa tanto do corpo quanto do contracorpo utilizando uma balança Sartorius Micro modelo MC 210 P com resolução de 10-5g.

A Figura 3.1(a) ilustra um modelo esquemático de um sensor LVDT incorporado ao tribômetro Plint&Partners do LTM por DOS SANTOS; COSTA; DE MELLO, 2015. O LVDT permitiu a medição da posição do corpo em relação ao contra corpo simultaneamente às demais variáveis do teste. Esta modificação permitiu gerar uma imagem triboscópica, Figura 3.1 (b), que representa de modo tridimensional a variação dos parâmetros físicos em relação ao tempo e a posição durante o ensaio de desgaste. Uma rotina de programação no software MATLAB® realiza a confecção das imagens triboscópicas.

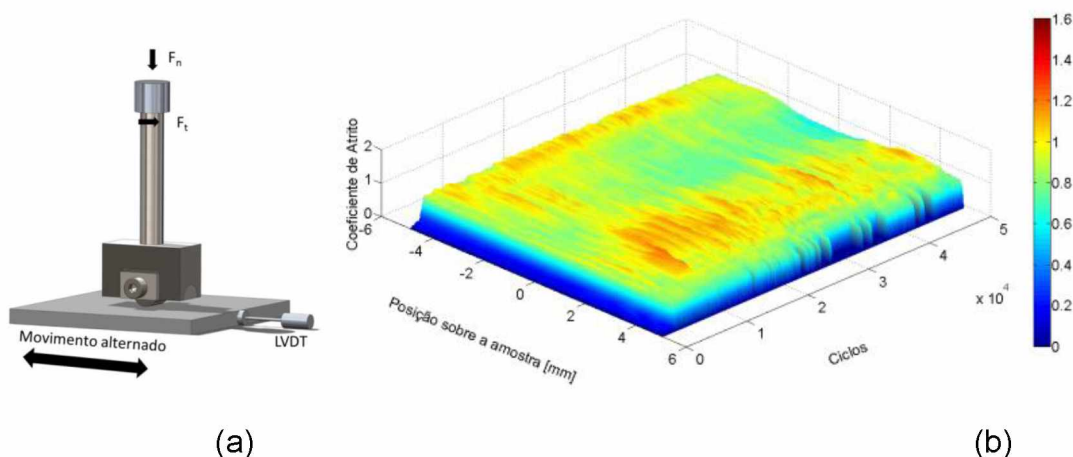


Figura 3.5 – (a) Modelo esquemático do teste. (b) Exemplo de uma imagem triboscópica 3D.

Após os testes os debris foram coletados utilizando lâminas de vidro e fita dupla face. Para avaliação da perda de massa do par tribológico, a amostra e o contracorpo foram limpos por submersão em acetona com ultrassom por 10 minutos. O cálculo da taxa de desgaste foi baseado na diferença entre a massa dos componentes antes e após o ensaio. A deionização do corpo e contracorpo foram realizadas para minimizar os efeitos de magnetização sobre a balança eletrônica. 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. Os micromecanismos de desgaste nas amostras e nos contracorpos foram avaliados via microscopia ótica (Olympus BX51N e analisado via software Olympus StreamMicro-image), microscopia eletrônica de varredura e EDS (marca Hitachi modelo TM 3000).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão avaliadas as similaridades e diferenças entre o cromo duro e a nitretação a plasma com a finalidade de verificar se este revestimento é capaz de substituir o cromo duro aplicado em cilindros de laminação. Serão apresentados as caracterizações dos revestimentos utilizados no estudo e os resultados dos testes tribológicos com estes revestimentos.

4.1. Cromo duro

A secção transversal de uma amostra revestida com cromo duro é ilustrada na Figura 4.1, a espessura média foi de 5µm. 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 (CHIU et al., 2002; BOLELLI et al., 2006; EL-AMOUSH et al., 2011; DE MELLO; GONÇALVES JR; COSTA, 2013).



Figura 4.1 – Revestimento de cromo duro.

Os parâmetros topográficos antes e após o revestimento são apresentados na Figura 4.2. É possível observar que as amostras retificadas e posteriormente revestidas com cromo duro sofreram uma ligeira elevação no parâmetro S_{pk} (Figura 4.2 (a)). Já em amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro é possível notar que não houve diferença significativa nos valores dos parâmetros após o revestimento de cromo duro (Figura 4.2 (b)). Análise estatística via ANOVA (análise de variância) foi utilizada para verificar a significância das diferenças entre as médias, utilizando-se 95% de confiabilidade. Resultados da literatura (SIMÃO et al., 1994) também mostram que o revestimento de cromo duro não provoca alterações significativas na topografia superficial de cilindros de laminação.

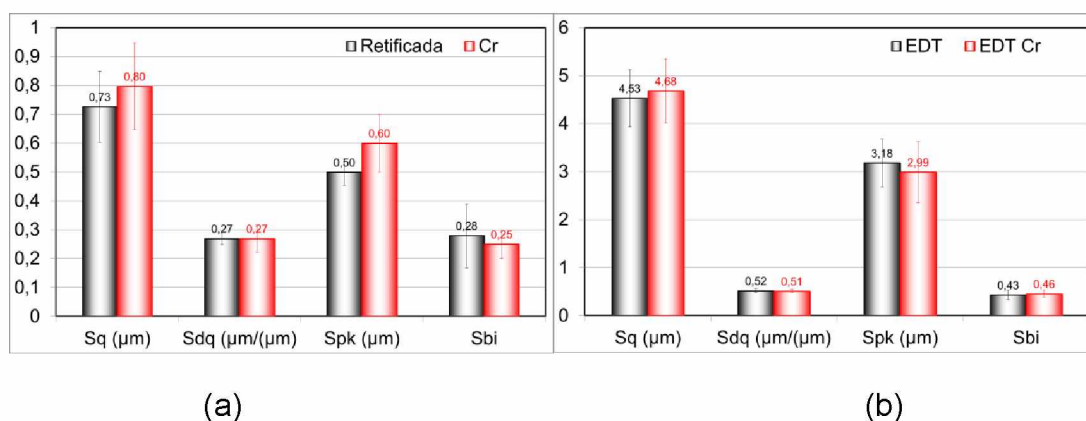
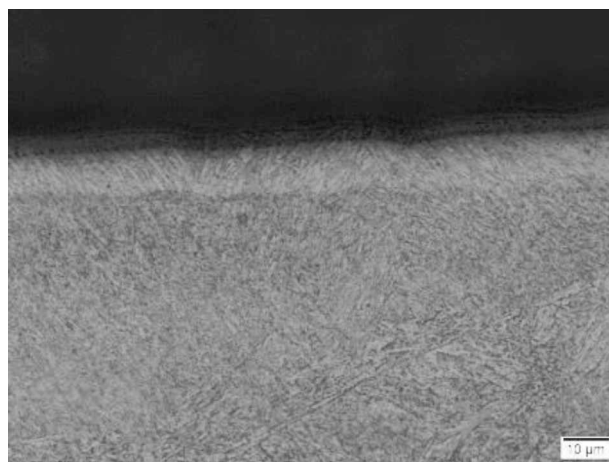


Figura 4.2 – Variação dos parâmetros topográficos após o revestimento de cromo duro (a) amostras sem texturização (b) amostras texturizadas.

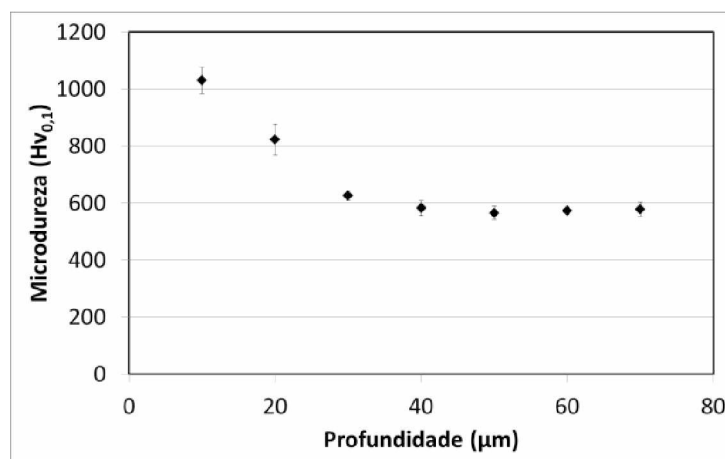
4.2. Nitretação a plasma

Após a nitretação das amostras, a sua dureza superficial, avaliada por ensaios de microdureza Vickers, foi de $937 \pm 60 \text{ Kgf/mm}^2$.

A Figura 4.3 (a) mostra uma imagem via microscopia óptica de uma seção transversal de uma amostra que foi nitretada a plasma e atacada com Nital 2%, onde é possível observar que a camada branca apresentou espessura de aproximadamente $10 \mu\text{m}$. A Figura 4.3 (b) mostra o perfil de microdureza da amostra onde é possível observar que a zona de difusão foi de aproximadamente $30 \mu\text{m}$.



(a)



(b)

Figura 4.3 – (a) Seção transversal de uma amostra nitretada e atacada com Nital 2% (b) perfil de microdureza de amostra nitretada.

A Figura 4.4 mostra o difratograma de Raios X da amostra nitretada. É possível observar os picos referentes aos compostos Fe_4N (γ') e Fe_{2-3}N (ϵ), além de picos relativos à fase martensita, proveniente do tratamento térmico realizado em etapa anterior.

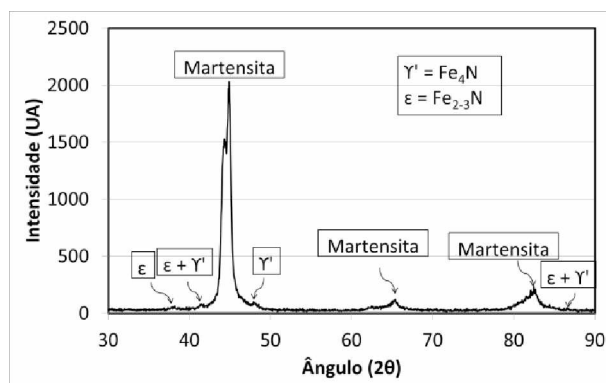


Figura 4.4 – Difratograma de raios-X de uma amostra nitretada a plasma.

A variação da topografia das amostras em função do processo de nitretação a plasma é mostrado na Figura 4.5, onde o processo de nitretação a plasma não afeta significativamente os parâmetros topográficos 3D para amostras sem texturização e texturizadas.

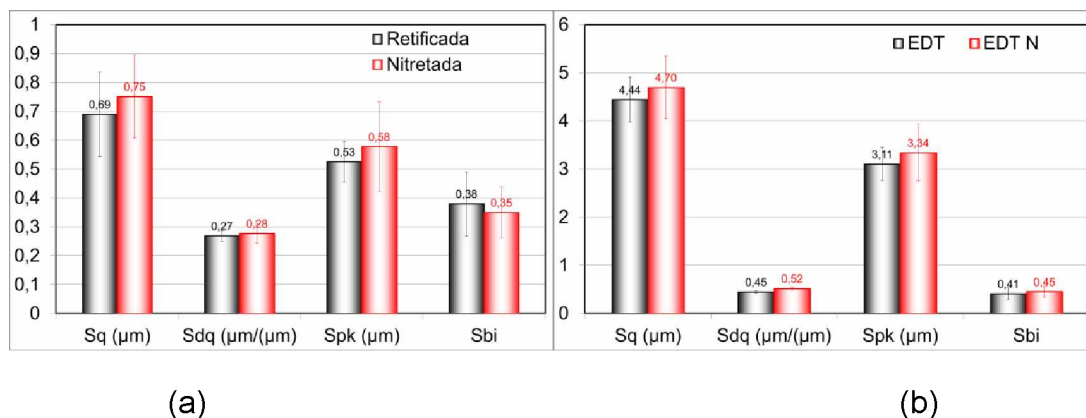


Figura 4.5 – Variação dos parâmetros topográficos 3D para amostras nitretadas (a) sem texturização (b) texturizadas.

A síntese da dureza e espessura dos revestimentos estudados no presente trabalho é mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dureza e espessura dos revestimentos / modificações superficiais.

	Dureza (Kgf/mm ²)	Espessura (μm)
VC 10 com tratamento térmico	611	
Cromo Duro	823	5
Nitretação	937	10 (30)

4.3. Ensaios de deslizamento

GONÇALVES JR (2016) buscou identificar os parâmetros tribológicos que permitem reproduzir o desgaste ocorrido em cilindros de laminação revestidos com cromo duro. Os autores utilizaram um teste com deslizamento alternado para reproduzir a inversão do coeficiente de atrito que ocorre durante a laminação. Com base nos mecanismos de desgaste encontrados e com base na topografia das amostras após os ensaios, os autores determinaram que o uso de um contracorpo cilíndrico com carga normal de 100N e tempo de deslizamento de 5 h permite obter condições próximas as encontradas em campo.

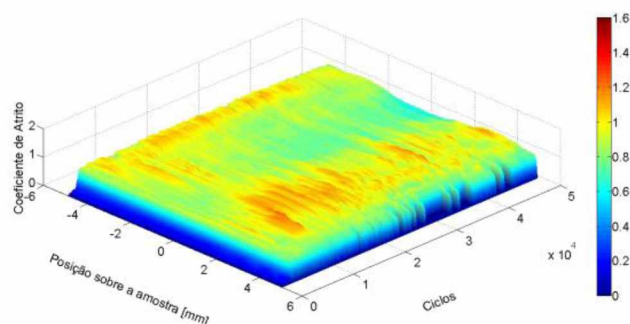
Os ensaios de deslizamento deste trabalho utilizou a metodologia, levantada pela literatura, que permite reproduzir as condições de desgaste de cilindros de laminação. Serão apresentados os resultados relativos às amostras com revestimento de cromo duro e nitretada. Em seguida, serão apresentados os resultados relativos às amostras previamente texturizadas por descargas elétricas e revestidas com cromo duro e amostras texturizadas por descargas elétricas e nitretadas. Para cada condição, serão apresentados resultados de coeficientes de atrito, de desgaste das amostras e dos contracorpos, análises dos debris coletados após os ensaios, análises por MEV e EDX das trilhas de desgaste nos corpos e contracorpos para identificação dos mecanismos de desgaste e análises de variação de topografia de superfícies, tanto para ensaios de 1 h quanto para ensaios de 5h. Desta forma, foi possível comparar o comportamento tribológico da nitretação a plasma com o desempenho de cilindros de laminação que recebem o revestimento convencional de cromo duro.

Os mapas triboscópicos ilustrados neste capítulo representam o comportamento do coeficiente de atrito ao longo do teste. Estes gráficos também permitem avaliar a variação deste parâmetro não somente em função do tempo de ensaio, mas também em função da posição do contracorpo sobre a amostra. Os mapas representados neste capítulo foram os que tiveram um comportamento intermediário para as diferentes repetições de cada teste.

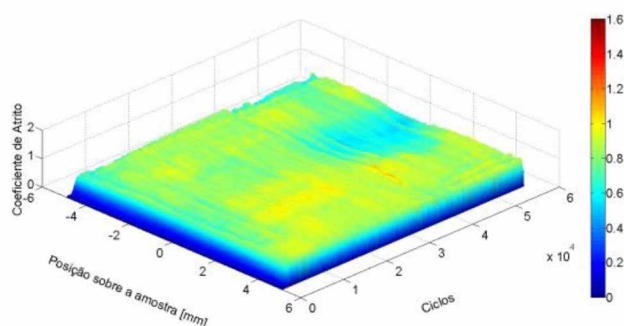
A evolução do coeficiente de atrito das amostras com revestimento de cromo duro e nitretadas é ilustrada na figura 4.6. Observa-se que, para ambos os revestimentos, o coeficiente de atrito apresenta uma tendência de aumento nas bordas da marca de desgaste. Esse comportamento já havia sido

identificado em outros trabalhos e parece estar associado a um acúmulo de debris nas regiões próximas às extremidades das trilhas de desgaste (DE MELLO et al., 2014). Avaliando o comportamento do coeficiente de atrito com o tempo (Número de ciclos) os revestimentos também apresentaram comportamento similar.

A Figura 4.7 ilustra a evolução do coeficiente de atrito das amostras previamente texturizadas. Para a amostra texturizada com posterior revestimento de cromo duro houve uma tendência da elevação do coeficiente de atrito nas bordas da marca de desgaste, além disso, nota-se uma redução deste parâmetro com o aumento do número de ciclos. Amostras texturizadas com posterior nitretação apresentaram um transiente inicial no coeficiente de atrito e após o mesmo se estabilizou em função do número de ciclos. Observou-se também uma pequena elevação do valor do coeficiente nas bordas da marca de desgaste.

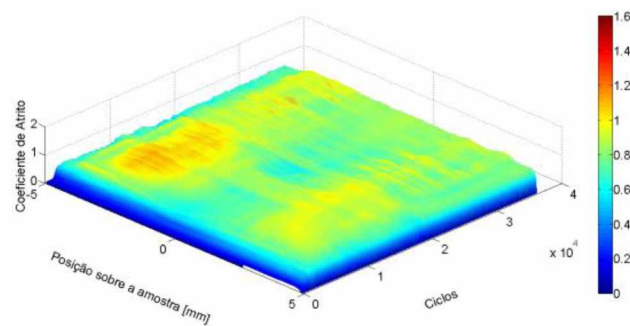


(a)

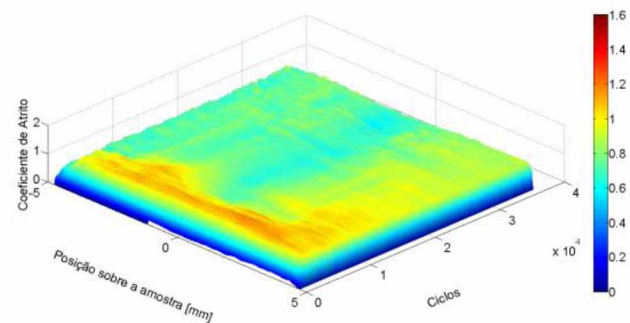


(B)

Figura 4.6 – Triboscopia típicas de amostras sem texturização ensaiadas por 5 h: (a) cromo duro (b) nitretadas.



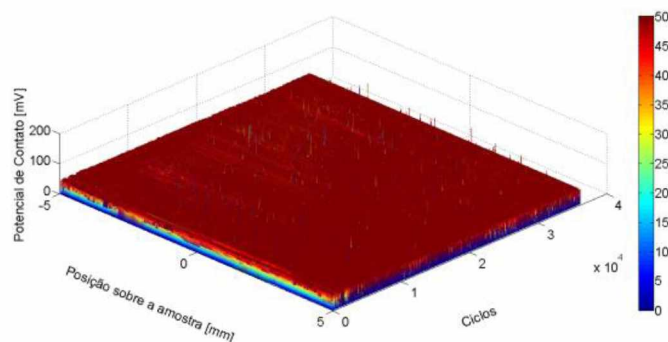
(a)



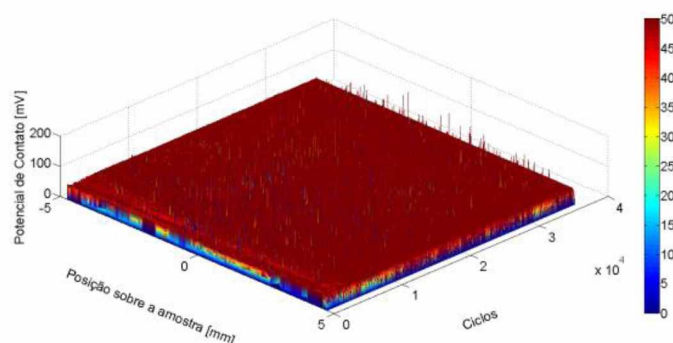
(b)

Figura 4.7 – Triboscopia típicas de amostras texturizadas ensaiadas por 5 h (a) EDT + cromo duro (b) EDT + nitretação.

Os mapas triboscópicos da Figura 4.8 ilustram da evolução do potencial de contato para as amostras previamente texturizadas, os dados ilustrados são dos mesmos testes apresentados na figura 4.7. Antes de iniciar os ensaios notou-se que para ambos os revestimentos analisados o potencial de contato iniciava em zero, indicando que não existe material isolante entre o corpo e o contracorpo. Nota-se na Figura 4.8 (a) que para amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro aparentemente ocorreu a formação de uma tribocamada isolante durante todo o ensaio, similar ao ocorrido em amostras texturizadas com posterior nitretação Figura 4.8 (b).



(a)

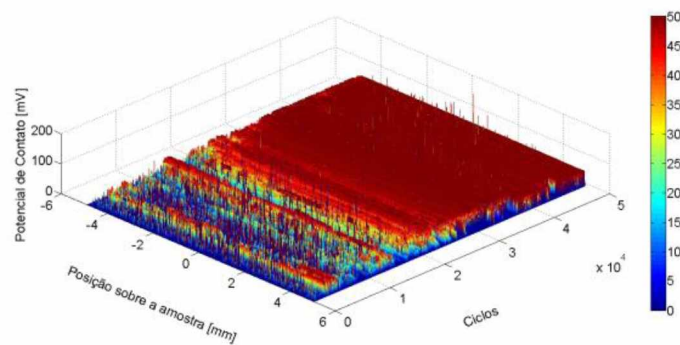


(b)

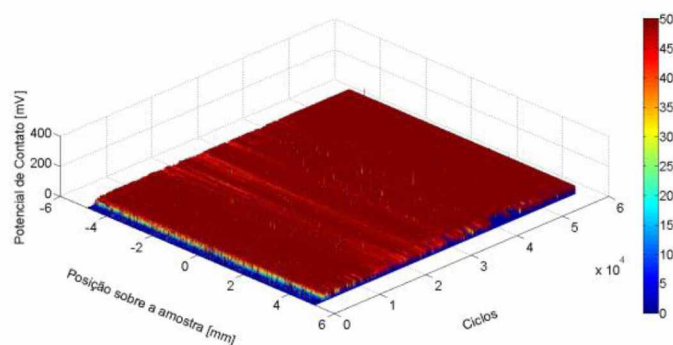
Figura 4.8 – Evolução típica do potencial de contato para amostras texturizadas ensaiadas por 5 h: (a) EDT + Cr; (b) EDT + nitretação.

Os mapas triboscópicos da Figura 4.9 ilustram a evolução do potencial de contato para as amostras sem texturização prévia, os dados ilustrados são dos mesmos testes apresentados na figura 4.6. Em nenhum dos mapas foi observada uma variação do potencial de contato próximo às bordas das trilhas de desgaste, como havia sido observado para o coeficiente de atrito. A amostra com cromo duro (Figura 4.9 (a)), apresentou uma transição significativa no potencial de contato após 20000 ciclos, sugerindo que a redução observada no coeficiente de atrito esteja realmente associada à formação de uma tribocamada isolante de baixo atrito relativamente estável.

A amostra nitretada a plasma mostrou um potencial de contato elevado, ou seja, a presença de alguma camada isolante em quase toda a extensão do teste, mas pode-se ver uma pequena tendência de aumento para maiores números de ciclos.



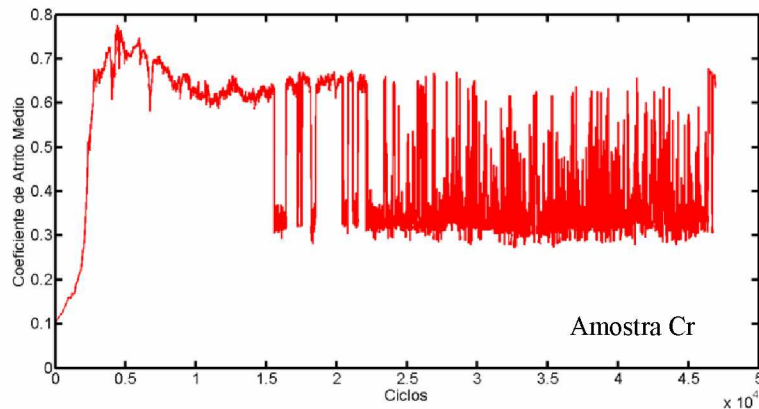
(a)



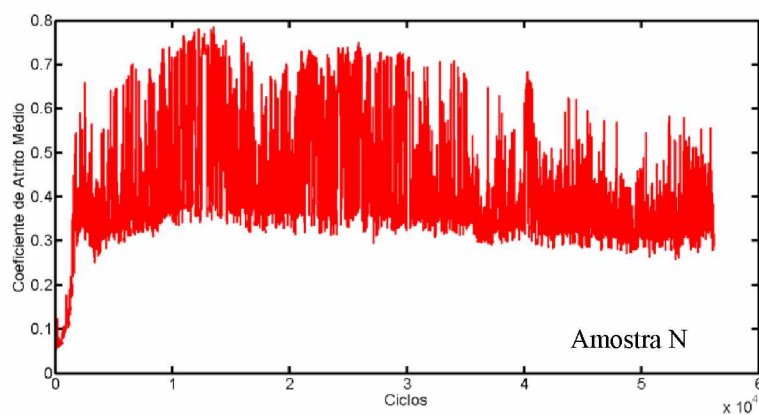
(b)

Figura 4.9 – Evolução típica do potencial de contato para amostras sem texturização ensaiadas por 5 h: (a) cromo duro (b) nitretadas.

A Figura 4.10 ilustra o comportamento do coeficiente de atrito em função do número de ciclos, nota-se que amostras com cromo duro apresentaram uma ampla variação do coeficiente de atrito após 10.000 ciclos de ensaio, neste intervalo, nota-se que o atrito possui valores predominantemente mais baixos com algumas elevações bruscas. Este comportamento já havia sido identificado na literatura e possivelmente está associado ao colapso do revestimento, que com sua ruptura produz debris na área de contato (CHIU et al., 2002). As amostras nitretadas também apresentaram uma tendência de grande variabilidade do coeficiente de atrito após uma aparente estabilização inicial (Figura 4.10 (b)). Porém não há uma predominância de valores mais baixos ou mais elevados conforme observado na condição anterior, sugerindo uma competição mais acirrada entre formação e degradação das tribocamadas protetoras.



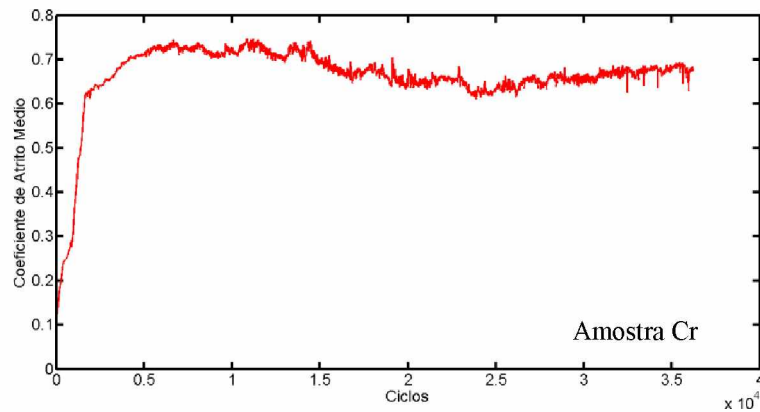
(a)



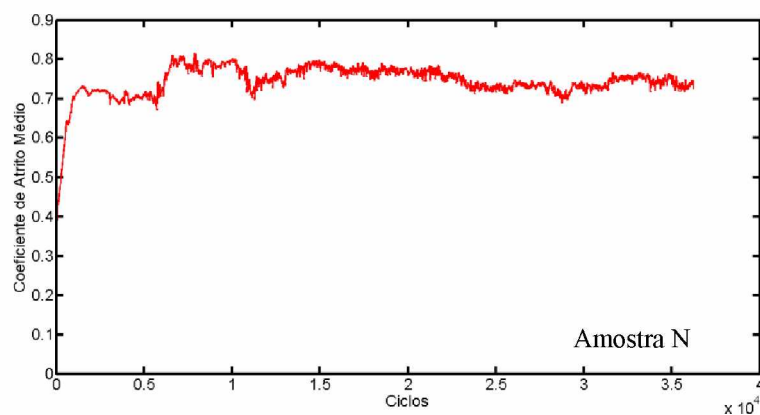
(b)

Figura 4.10 – Evolução típica do coeficiente de atrito para amostras sem texturização ensaiadas durante 5h: (a) amostras cromadas; (b) amostras nitretadas.

A evolução do coeficiente de atrito para as amostras previamente texturizadas, é mostrada na Figura 4.11. Nos ensaios com amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro, verificou-se que pode ocorrer uma variação no coeficiente de atrito, de forma que o coeficiente de atrito oscila entre valores altos (0,7) e baixos (0,3), novamente sugerindo competição entre formação e degradação de uma tribocamada de baixo atrito. Porém, quando comparados com as amostras cromadas sem texturização prévia, os períodos de oscilação foram bem mais curtos. Para as amostras previamente texturizadas e nitretadas houve uma tendência para estabilização do atrito em valores mais altos (0,6-0,8). Além disso, para os ensaios mais longos de 5 h, não houve uma grande flutuação do atrito.



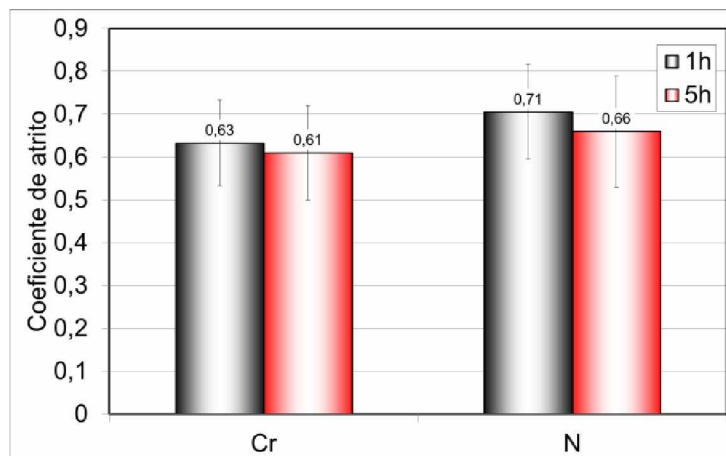
(a)



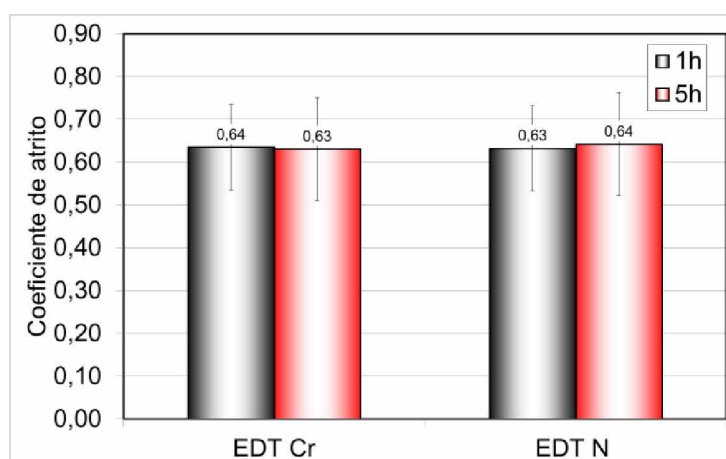
(b)

Figura 4.11 – Evolução típica do coeficiente de atrito para amostras texturizadas: (a) Ensaios de 1 h; (b) Ensaios de 5 h.

O valor do coeficiente de atrito médio obtido nos ensaios tribológicos é ilustrado na Figura 4.12, no cálculo foram considerados apenas os valores obtidos a partir de 4000 ciclos (para que o transiente inicial fosse desconsiderado). Não houve diferença estatisticamente significativa entre as amostras com cromadas e as amostras nitretadas. Nota-se que o aumento do tempo de ensaio de 1 para 5 h também não alterou significativamente o coeficiente de atrito médio. A texturização prévia das amostras também não influenciou de forma significativa o coeficiente de atrito médio, nem para 1 h de ensaio nem para 5 h.



(a)



(b)

Figura 4.12 – Coeficiente de atrito médio para amostras: (a) sem texturização ensaiada por 1 h e 5 h (b) texturizadas ensaiadas por 1 h e 5 h.

Além de proteger o componente ao qual foi aplicado, é importante que o revestimento utilizado não seja agressivo aos demais componentes envolvidos em um sistema tribológico. Por este motivo, além de avaliar o desgaste das amostras, é necessário mensurar o desgaste no contracorpo. No presente estudo, o desgaste destes dois componentes foi avaliado utilizando a perda de massa média das diferentes repetições para cada condição. A Figura 4.13 ilustra as taxas de desgastes médias das amostras, para amostras com revestimento de cromo duro o aumento do tempo de ensaio reduziu a taxa de desgaste das amostras. Para essa condição superficial, o coeficiente de atrito havia diminuído e o potencial de contato havia aumentado com o aumento do tempo de ensaio, sugerindo que existe a formação de uma tribocamada de baixo atrito, a qual está principalmente protegendo a amostra contra desgaste. A nitretação reduziu significativamente a taxa de desgaste do corpo para ensaios de 1 h, mas com o

aumento do tempo de ensaio para 5 h, este parâmetro foi semelhante às amostras cromadas.

O processo de texturização por descargas elétricas reduziu significativamente a taxa de desgaste das amostras em ambas às modificações superficiais. A taxa de desgaste sofreu uma redução com o aumento do tempo de ensaio, indicando que as superfícies inicialmente rugosas sofrem um desgaste intenso, mas que o alisamento promovido pelo processo de desgaste aparentemente resulta em alguma proteção das amostras contra posterior desgaste.

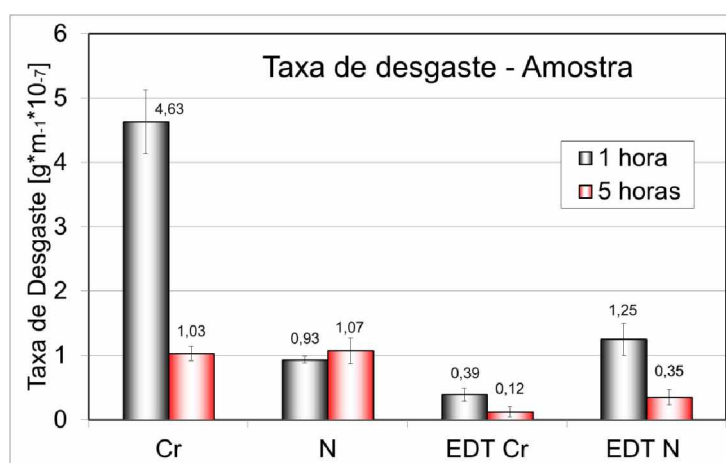


Figura 4.13- Taxa de desgaste das amostras.

A seguir, apresenta-se o desgaste sofrido pelos contracorpos (Figura 4.14). Inicialmente, nota-se que a texturização aumentou a taxa de desgaste do contracorpo para os dois revestimentos analisados. Não houve uma variação significativa da taxa de desgaste do contracorpo quando o tempo de ensaio aumentou de 1 para 5 h. Porém, houve uma pequena tendência de aumento da taxa de desgaste com o tempo para as amostras cromadas e para as amostras texturizadas com posterior nitretação.

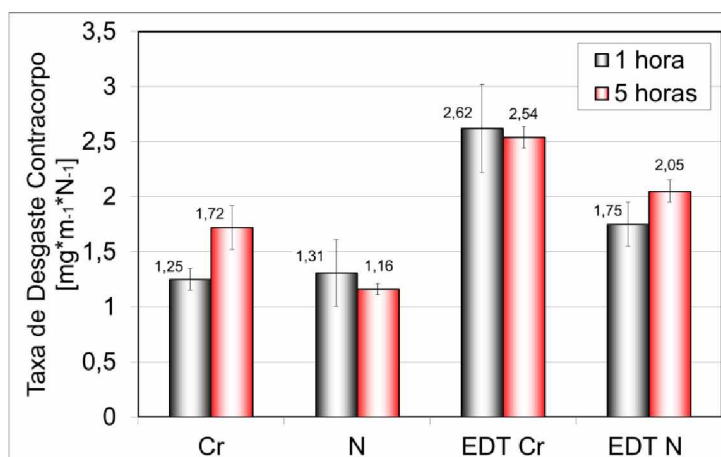
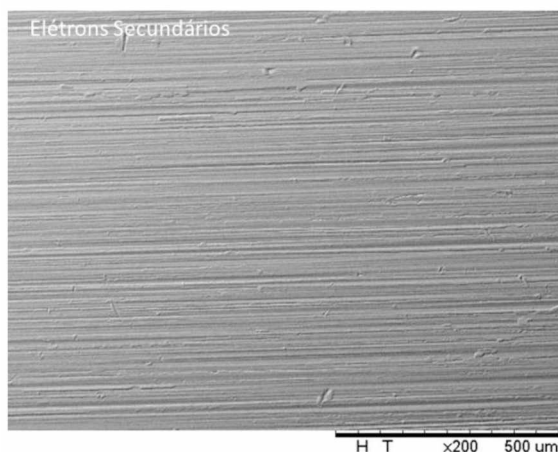


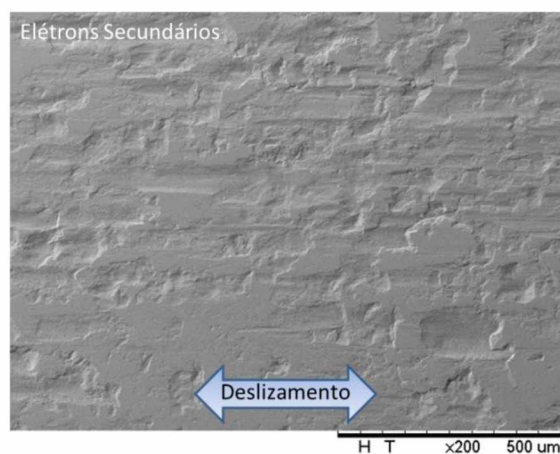
Figura 4.14 – Taxa de desgaste do contracorpo para diferentes modificações superficiais e tempos de ensaio de deslizamento.

A seguir serão apresentadas e analisadas as imagens da região onde o desgaste ocorreu nas amostras. Com o uso de um microscópio eletrônico foi possível identificar os efeitos do ensaio sobre a topografia das amostras e também avaliar a presença e característica da tribocamada formada.

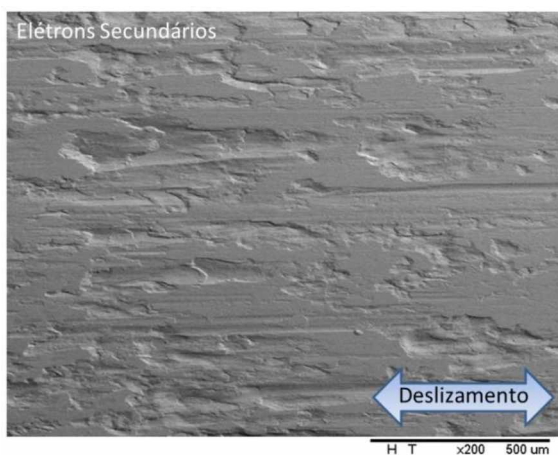
A Figura 4.15 (a) ilustra a topografia original das amostras sem texturização revestidas com cromo duro. Nota-se a presença de ranhuras provenientes do processo de retificação feito anteriormente ao processo de revestimento de cromo duro. Após 1 h de ensaio (Figura 4.15 (b)) é possível identificar a presença de regiões lisas e regiões rugosas, sendo que as regiões mais lisas são aparentemente mais altas. A figura 4.15 (c) mostra a superfície de uma amostra revestida com cromo duro ensaiado por 5 h. É possível observar que com aumento do tempo de ensaio houve uma predominância das áreas alisadas.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.15 – MEV de uma trilha típica formada em uma amostra revestida com cromo duro (a) antes do deslizamento (b) após 1 h de deslizamento (c) após 5 h de deslizamento.

Assim como na figura 4.15, as figuras 4.16 (a) e (c) foram obtidas via elétrons secundários, esta técnica permite diferenciar regiões profundas das regiões protuberantes da superfície. As figuras 4.16 (b) e (d) mostram a imagens via elétrons retroespalhados, uma técnica que permite diferenciar a composição química das regiões da amostra. Aliando este recurso à espectroscopia de raios X (EDX) é possível verificar a presença da camada original, se o desgaste atingiu o substrato da amostra e como se comporta a tribocamada formada. Na figura 4.16 É possível observar que as regiões desgastadas apresentam elementos leves tanto nas regiões mais rugosas quanto nas regiões mais lisas.

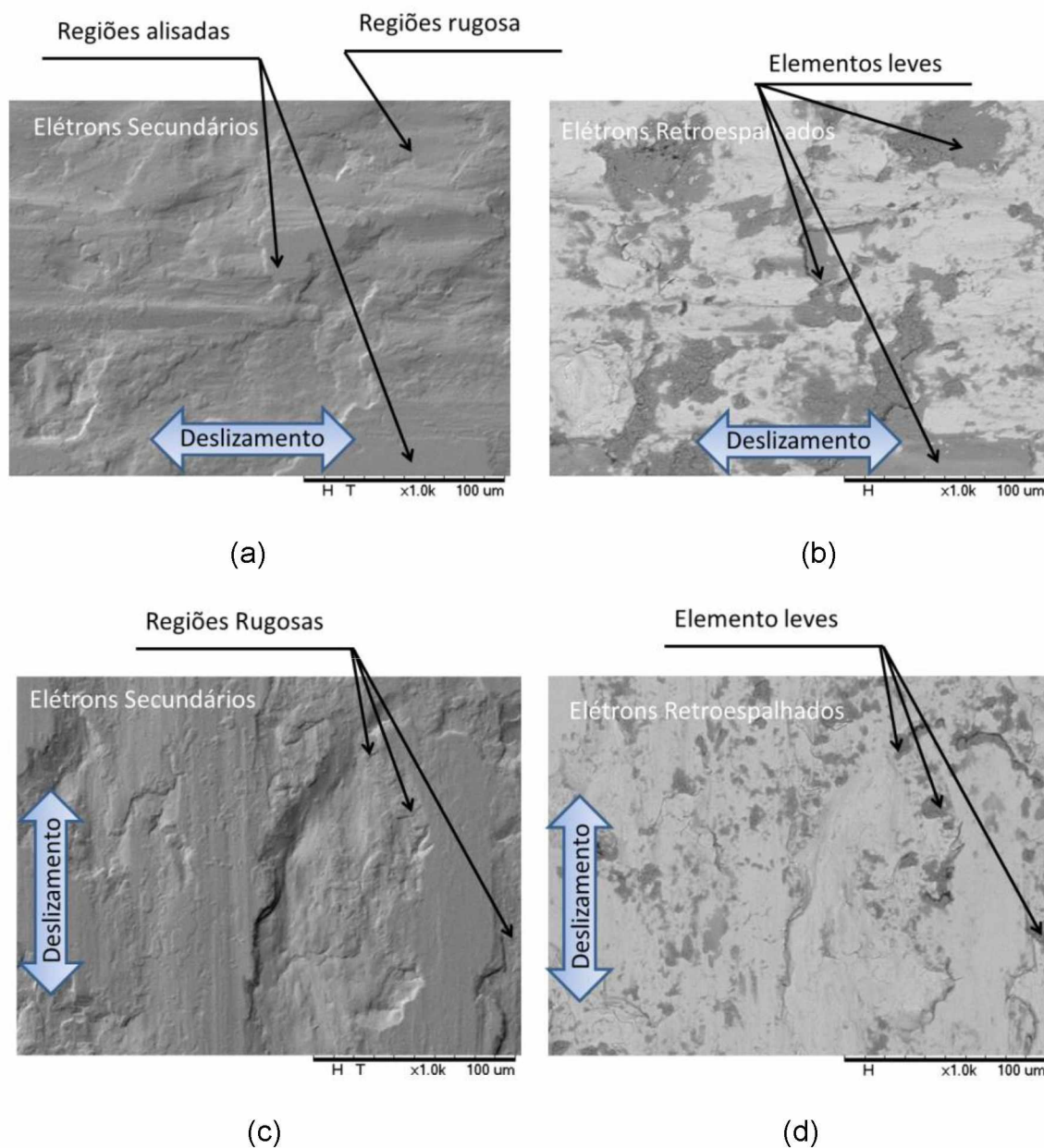
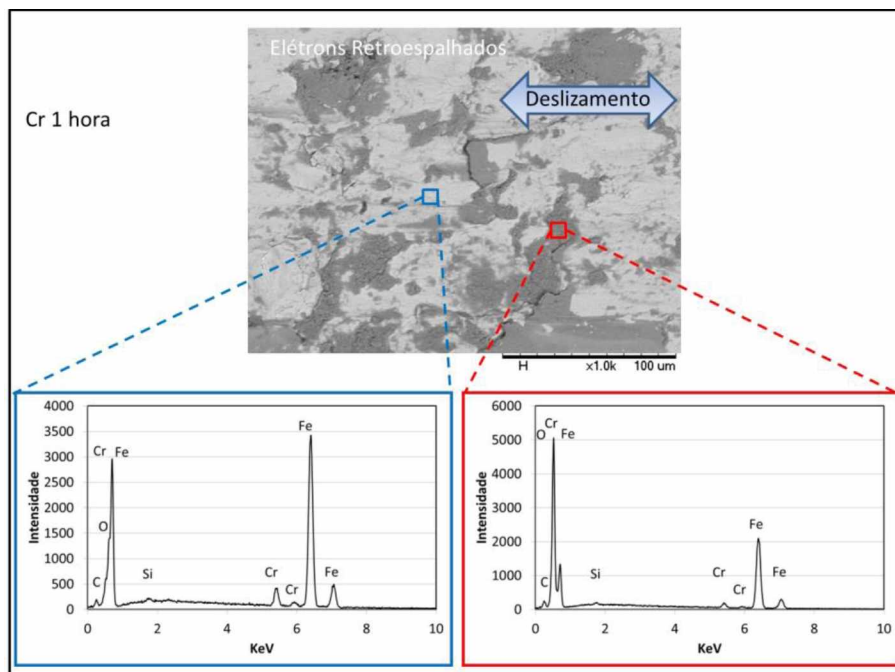


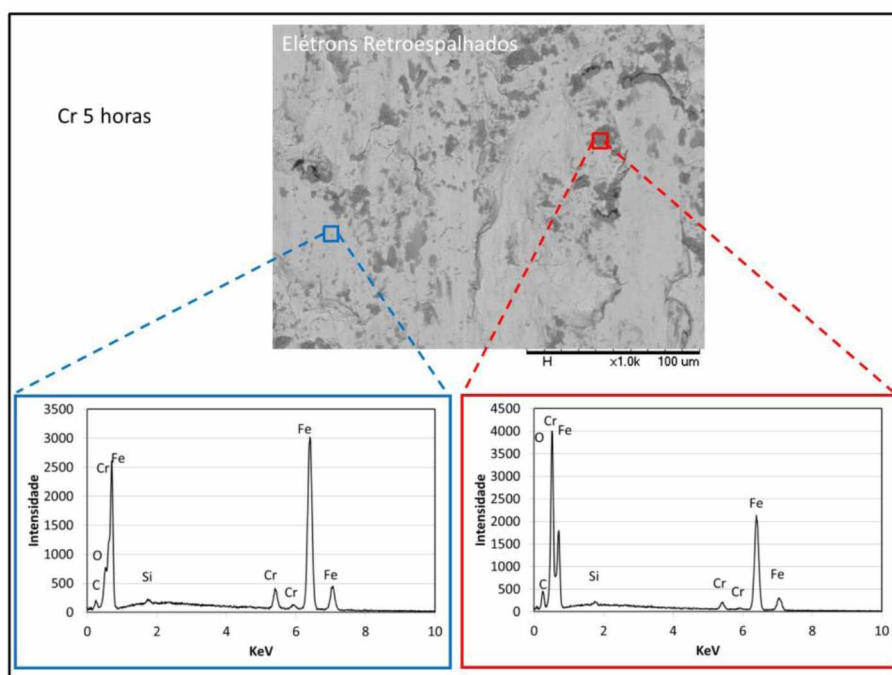
Figura 4.16 – MEV de trilhas típicas produzidas em uma amostra recoberta com cromo duro (a) 1 h, elétrons secundários e (b) 1 h, elétrons retroespalhados (c) 5h, elétrons secundários e (d) 5h, elétrons retroespalhados.

A Figura 4.17 ilustra a análise da composição química da amostra via EDX, nota-se que a região clara é rica em ferro e possui quantidade de cromo semelhante à encontrada no substrato de aço VC 10. As regiões escuras são compostas de ferro e oxigênio, com quantidade de cromo semelhante às das regiões claras. Assim, a análise desta imagem sugere que grande parte do revestimento foi removido durante o ensaio de deslizamento. A análise de EDX sugere que há uma tribocamada rica em elementos leves nas regiões altas e alisadas. As partes rugosas aparentemente mais baixas e também ricas em elementos leves são originadas após a remoção da tribocamada, estas regiões são formadas por um complexo processo de deterioração da camada de cromo duro envolvendo trincamento, cisalhamento e lascamento, conforme também observado em outros trabalhos (CHIU et al., 2002; MILAN et al., 2005).

A remoção de material na região do contato entre o corpo e o contracorpo gera particulados altamente encruados e oxidados. Estes particulados, denominados debris, podem afetar o comportamento do coeficiente de atrito e podem atuar como abrasivos na região de contato. A Figura 4.18 representa a análise de particulados colhidos após o teste de desgaste, nota-se que os debris mais fragmentados ocorrem em testes com maior duração. A análise de EDX indica que tanto para 1 h quanto para 5 h os debris são compostos por Ferro, Cromo e Oxigênio. Além disso, observa-se que eles apresentam uma geometria em forma de flocos. É razoável supor que o desgaste envolva contínuo arrancamento, cominuição e aglutinação de debris, os quais participam da formação de uma camada triboquímica, e que o aumento da espessura dessa camada triboquímica eventualmente leve à formação dos flocos observados.



(a)



(b)

Figura 4.17 – Imagem via elétrons retroespalhados e análise de EDX de uma amostra revestida com cromo duro após deslizamento por: (a) 1 h; (b) 5 h.

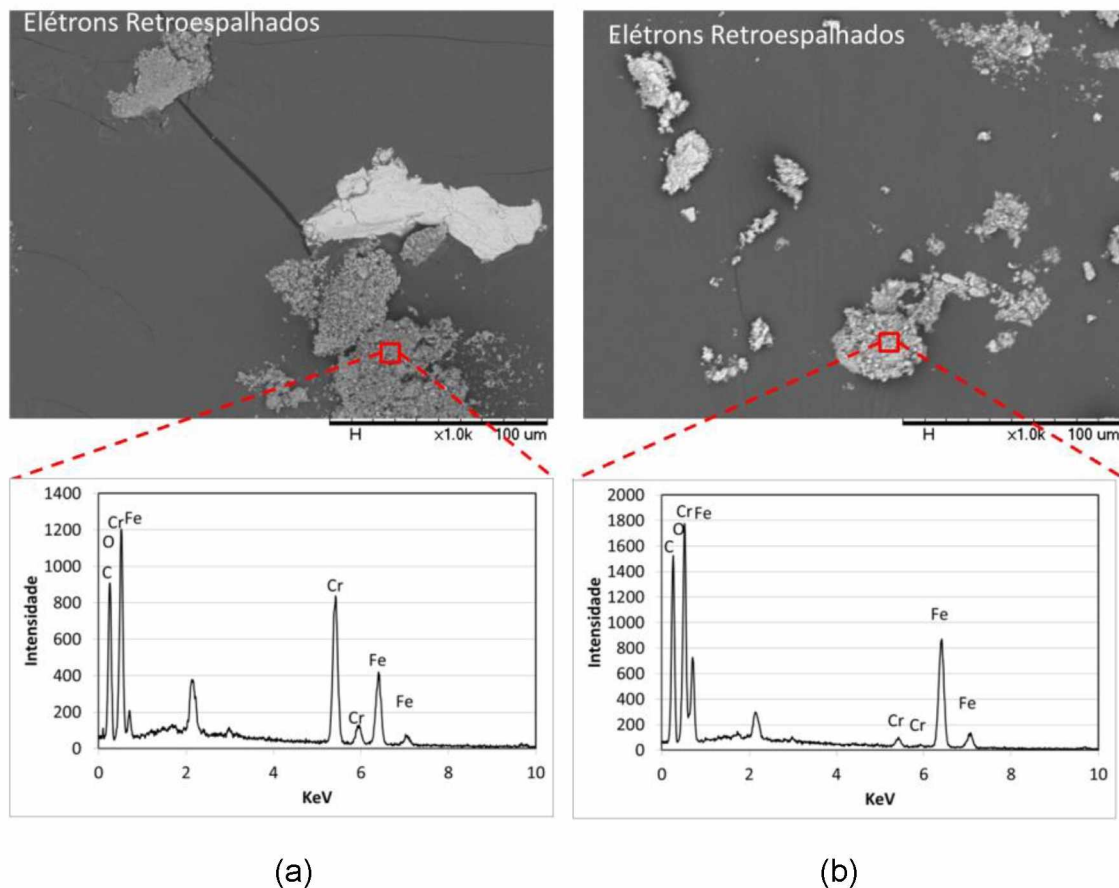


Figura 4.18 - Imagens via elétrons retroespalhados e análise de EDX de debris coletados após ensaio com amostras revestidas com cromo duro: (a) 1 h; (b) 5 h.

A análise do contracorpo revelou que o deslizamento alternado provocou um acúmulo de material nas bordas da marca de desgaste. Ao observar as imagens via elétrons retroespalhados, Figura 4.19, tanto para 1 h quanto para 5 h, é possível observar que o material aderido é composto por elementos leves. A análise via EDX revelou que a tribocamada formada é composta por ferro e oxigênio.

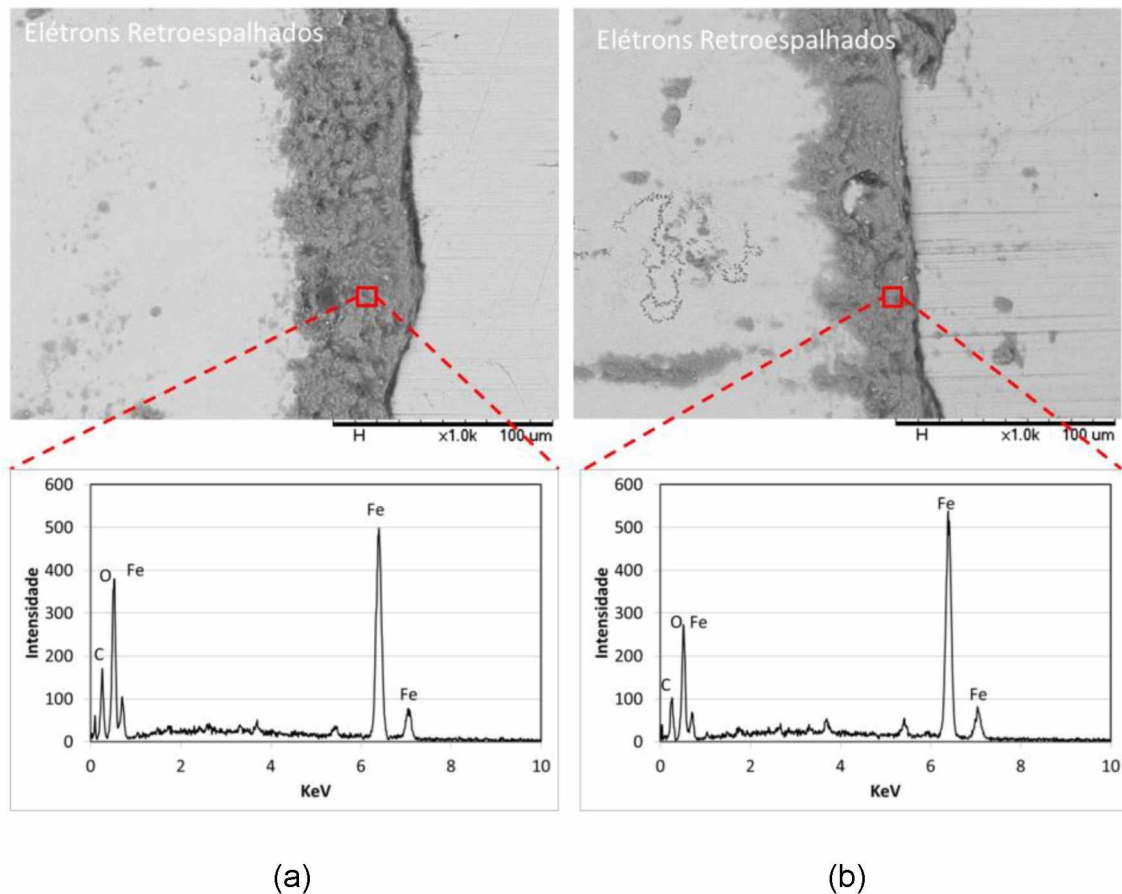


Figura 4.19 – MEV de contracorpo ensaiado contra amostras revestidas com cromo duro por: (a) 1 h; (b) 5 h.

Após 1h de ensaio, as amostras nitretadas apresentaram resquícios da topografia original (Figura 4.20). As ranhuras presentes antes do ensaio estão associadas à retificação, após o desgaste, estas marcas continuam presentes em regiões aparentemente mais baixas, enquanto as regiões mais altas apresentam um aspecto alisado conforme observado nos ensaios com cromo duro. Além disso, observa-se algumas descontinuidades, de aspecto rugoso, nas regiões altas, sugerindo o lascamento destas regiões.

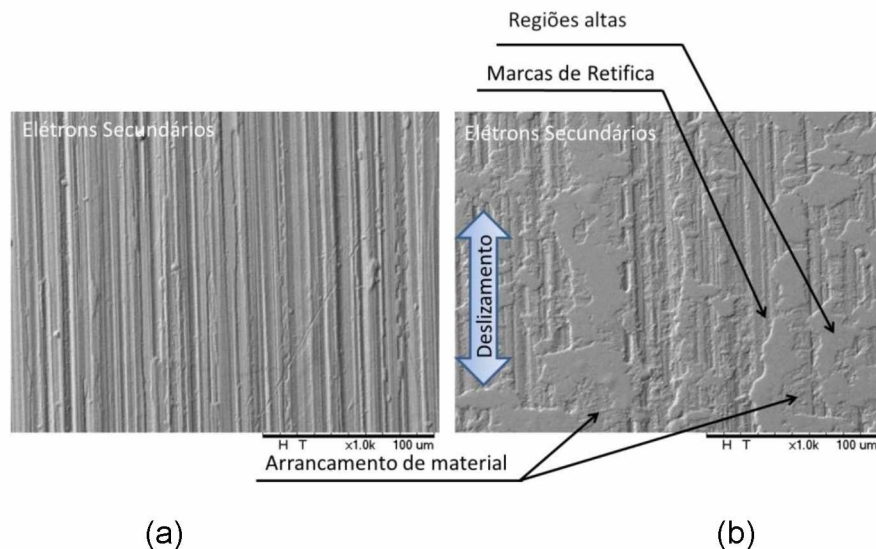


Figura 4.20 – Imagens de MEV típicas para amostras nitretadas: (a) sem desgaste e (b) após 1 h de deslizamento.

Analisando o desgaste após 1h de ensaio via elétrons retroespalhados, Figura 4.21 (b), nota-se que as regiões mais altas correspondem a regiões mais escuras, com composição química diferente da original. Com o aumento do tempo de ensaio, as ranhuras características da topografia original foram removidas. A Figura 4.21 (c) mostra a topografia de uma amostra nitretada após 5 h de ensaio, onde é possível observar que a topografia é lisa com a formação de algumas regiões mais altas, denominadas ilhas de terceiro corpo. Analisando esta região via elétrons retroespalhados (Figura 4.21 (d)) nota-se que as ilhas de terceiro corpo são constituídas de elementos leves. O espectro por EDX mostrado na Figura 4.22 mostra que as regiões escuras são ricas em ferro e oxigênio.

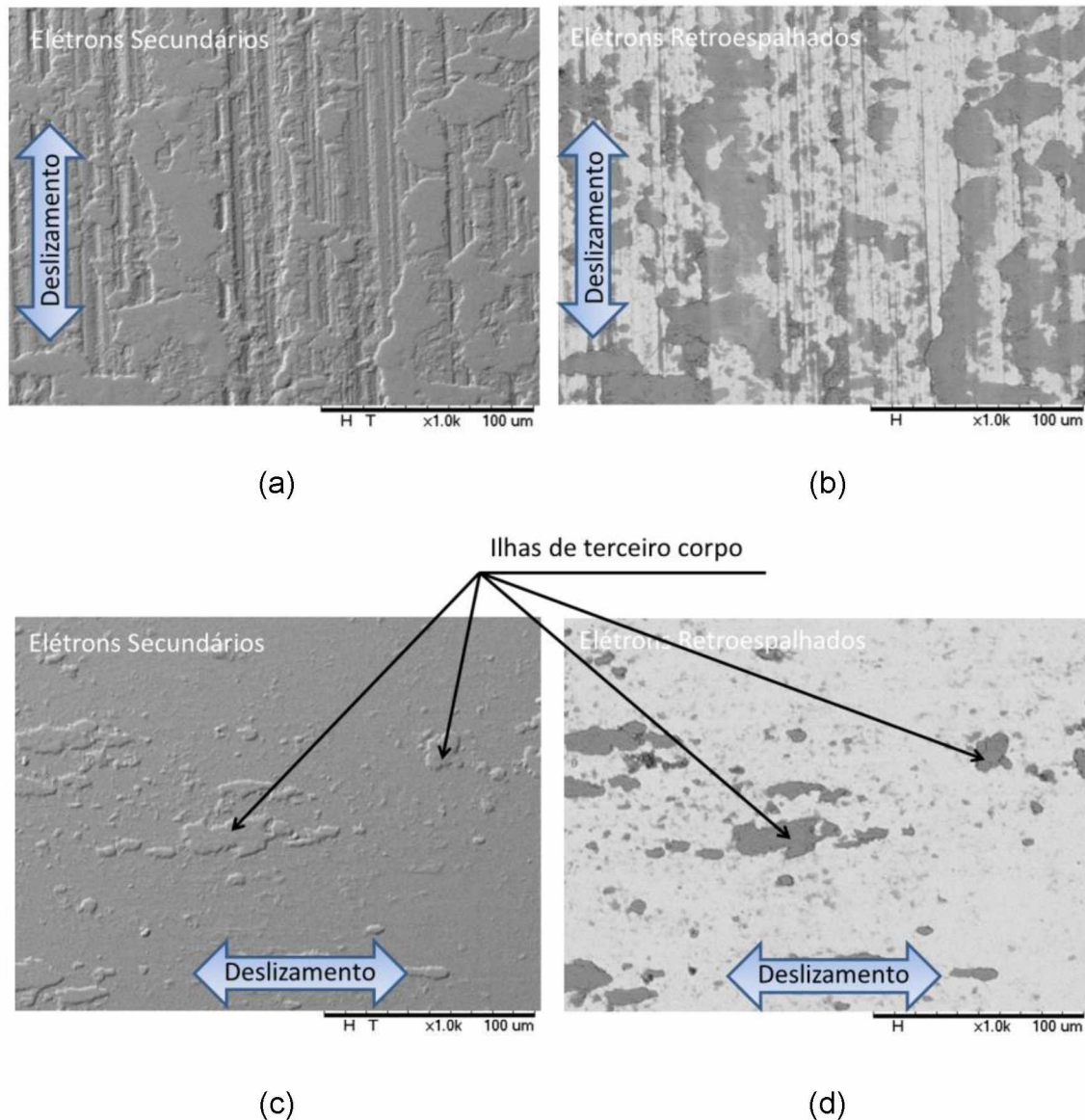


Figura 4.21 – Imagens de MEV típicas para amostras nitretadas ensaiadas por: (a) 1 h, elétrons secundários; (b) 1 h, elétrons retroespalhados; (c) 5 h, elétrons secundários e (d) 5 h, elétrons retroespalhados.

Foi apresentado que o tamanho dos debris nas amostras de cromo duro reduziu com o aumento do tempo de ensaio, sugerindo a diminuição destas partículas. No entanto, conforme via análise via elétrons retroespalhados (Figura 4.23), para as amostras nitretadas o tamanho e o aspecto das partículas não sofreram alterações significativas com o aumento do tempo de ensaio. Nas 2 situações as partículas estão oxidadas, porém no caso de ensaios de 5 h é provável que o processo de aglutinação dos debris seja mais intenso formando um grande número de debris maiores.

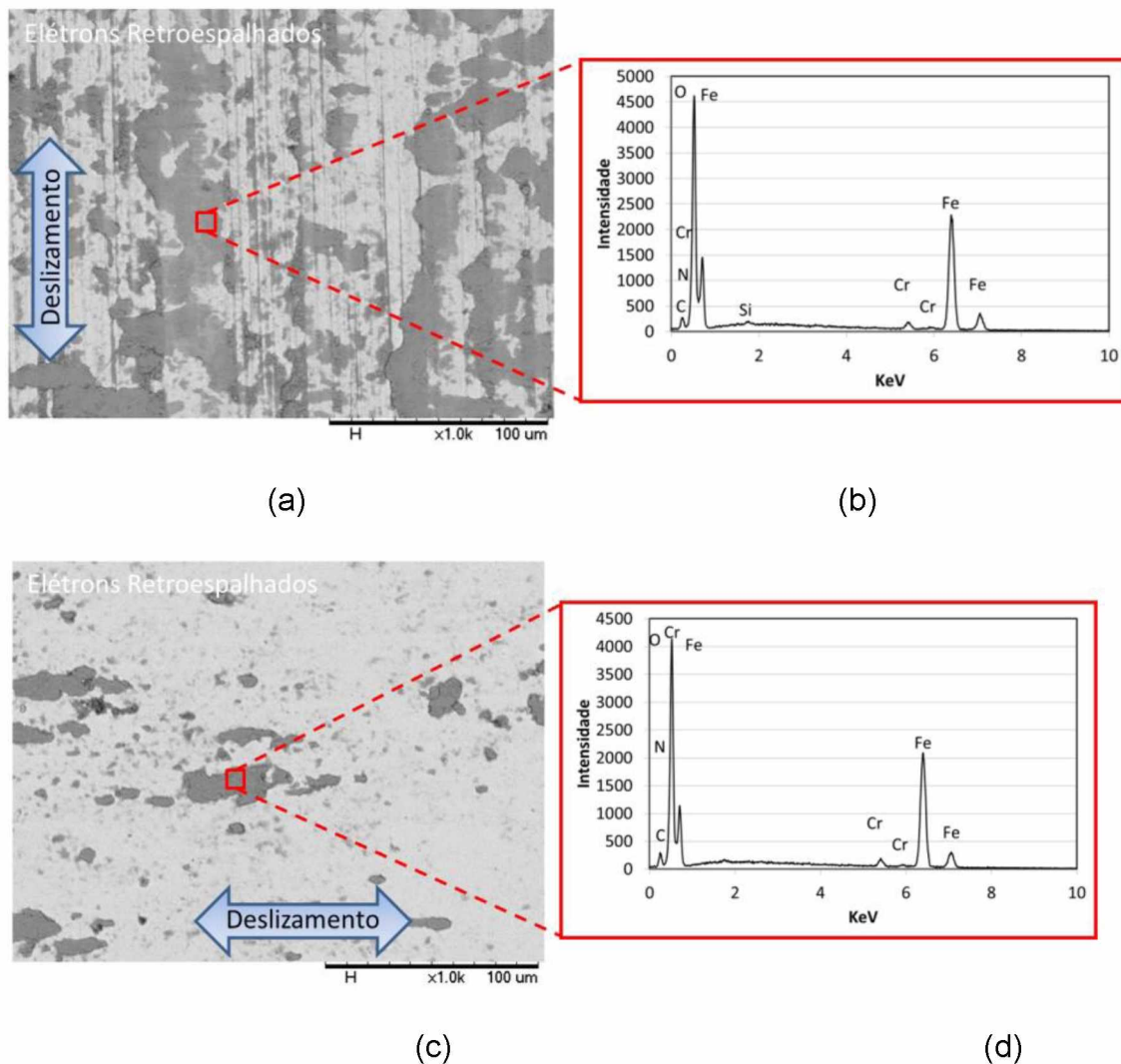


Figura 4.22 – Espectros da região escura típica de amostra nitretada ensaiada por: (a) 1 h; (b) 5 h.

Nos ensaios de 1 h e 5 h com amostras nitretadas, observou-se a presença um pequeno acúmulo de material nas bordas da marca de desgaste do contracorpo (Figura 4.24). Com o auxílio da imagem obtida via elétrons retroespalhados e dos resultados de EDX, Figura 4.25, percebe-se que o material aderido nas bordas do contracorpo é rico em elementos leves e constituído de ferro e oxigênio.

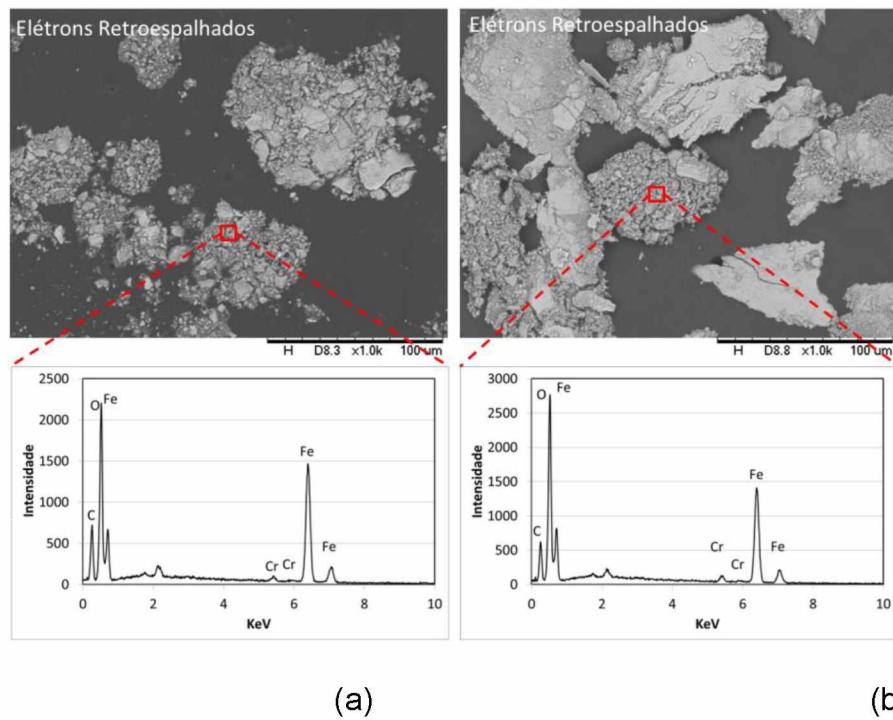


Figura 4.23 – Imagens via elétrons retroespalhados e espectros EDX de debris coletados após ensaios das amostras nitretadas por (a) 1 h e (b) 5 h.

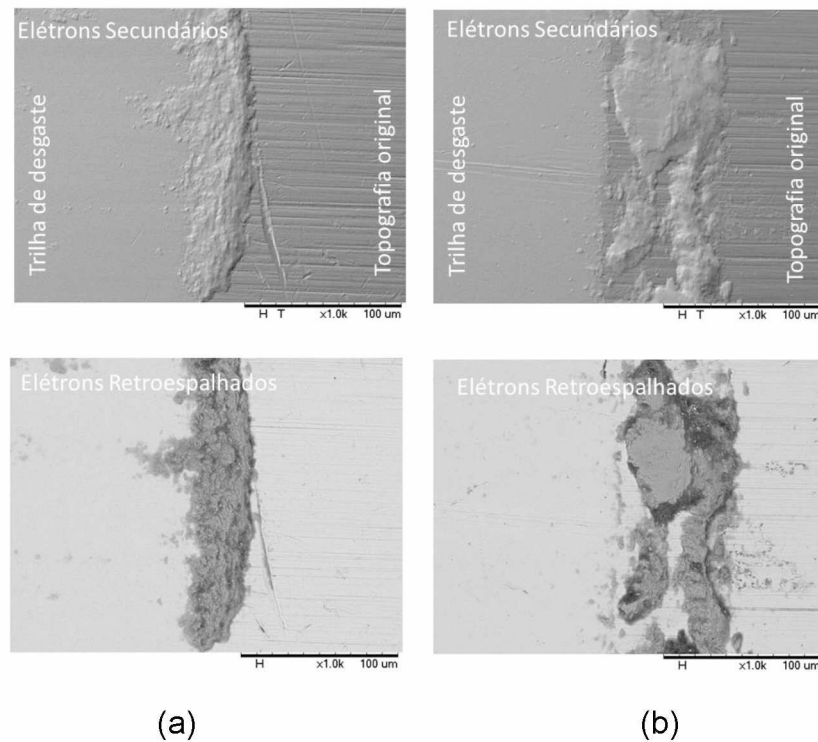


Figura 4.24 – Imagens via elétrons secundários e retroespalhados do contracorpo ensaiado contra amostras nitretadas por (a) 1 h e (b) 5 h.

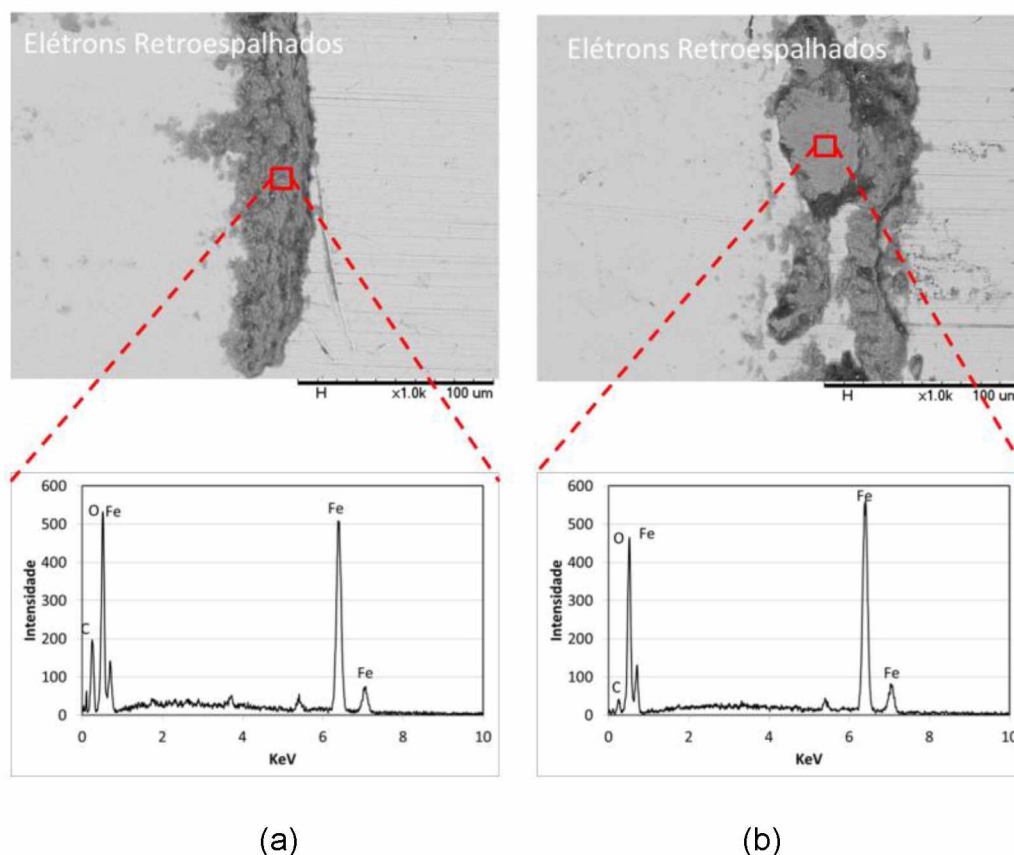


Figura 4.25 – Imagens via elétrons retroespalhados e espectros EDX do contracorpo ensaiado contra amostras nitretadas por (a) 1 h e (b) 5 h.

A Figura 4.26 mostra imagens via elétrons secundários de amostras texturizadas com posterior recobrimento de cromo duro antes do deslizamento e após 1 h de testes. As regiões mais profundas da Figura 4.26 (b) possivelmente não sofreram contato durante o ensaio, sugerindo que o desgaste não provocou alteração total da topografia da amostra. Ao comparar esta condição com o desgaste da amostra sem texturização ensaiada por uma hora, conclui-se que o processo de EDT permitiu uma maior conservação da superfície original.

A análise via elétrons secundários (Figura 4.27 (a)) e retroespalhados (Figura 4.27 (b)) de amostras texturizadas confirma a hipótese de existirem regiões sem desgaste onde é possível observar regiões com as trincas características do revestimento de cromo duro nas regiões mais profundas da topografia. Além das regiões sem desgaste, podemos notar regiões mais altas e alisadas e regiões mais rugosas, estas regiões estão associadas a um complexo mecanismo de alisamento da superfície (regiões mais elevadas), formação de uma tribocamada rica em elementos leves nestas regiões e degradação desta tribocamada, caracterizada pelo arancamento de material, fragmentação do mesmo em partículas menores e deposição destas partículas nos vales da amostra. As figuras 4.27 (c) e (d) indicam que, mesmo com o aumento no tempo de ensaio, o revestimento de cromo duro permaneceu até o final do teste.

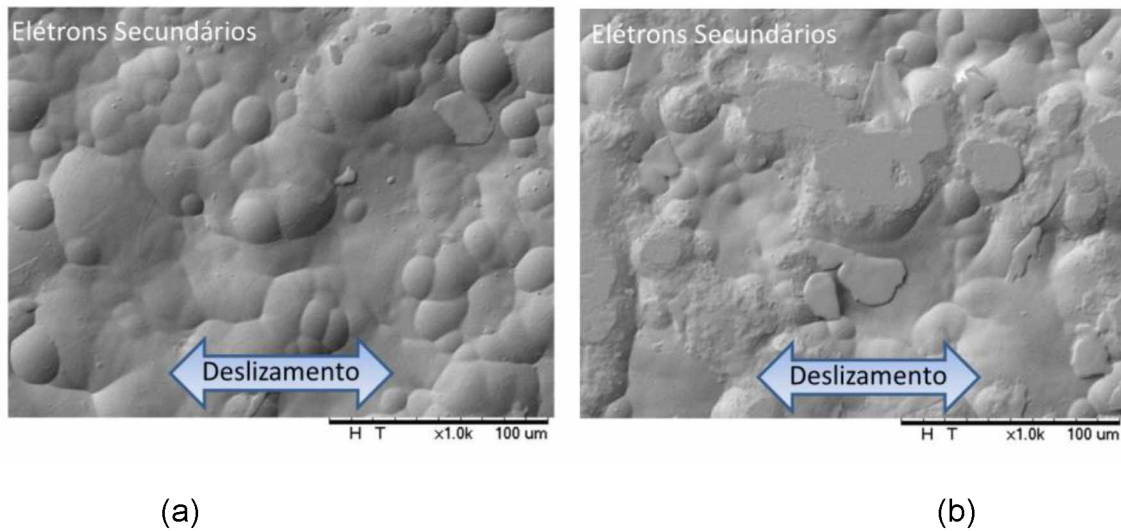


Figura 4.26 – Imagens via microscopia eletrônica de varredura de amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro (a) antes do deslizamento (b) ensaiadas por 1 h.

Análise via EDX da região escura da Figura 4.27 (b) e (d) revelou que a tribocamada é formada por Ferro, Oxigênio e Cromo, conforme Figura 4.28 (a) e (b). Ao comparar com amostras somente com revestimento de cromo duro, é razoável propor que a texturização prévia favoreça a formação de uma tribocamada mais estável e resistente, a qual reduz o desgaste das amostras. É possível ainda notar na figura pequenas regiões muito escuras, identificadas por EDX como muito ricas em cromo.

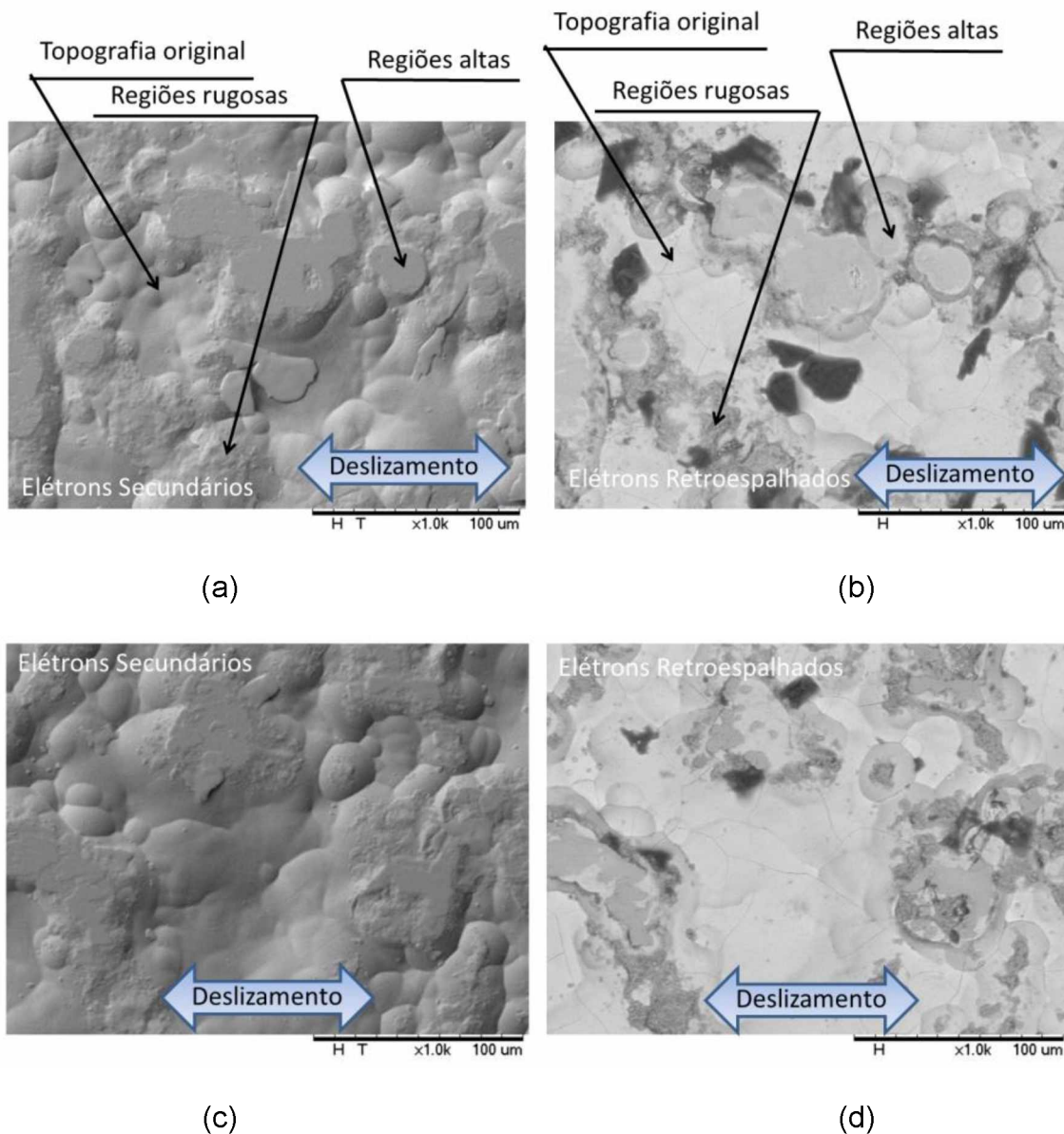
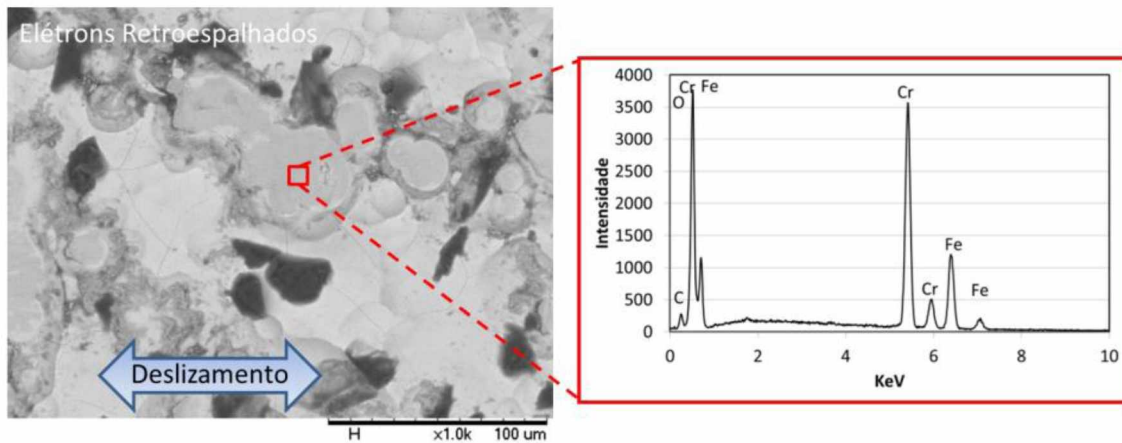
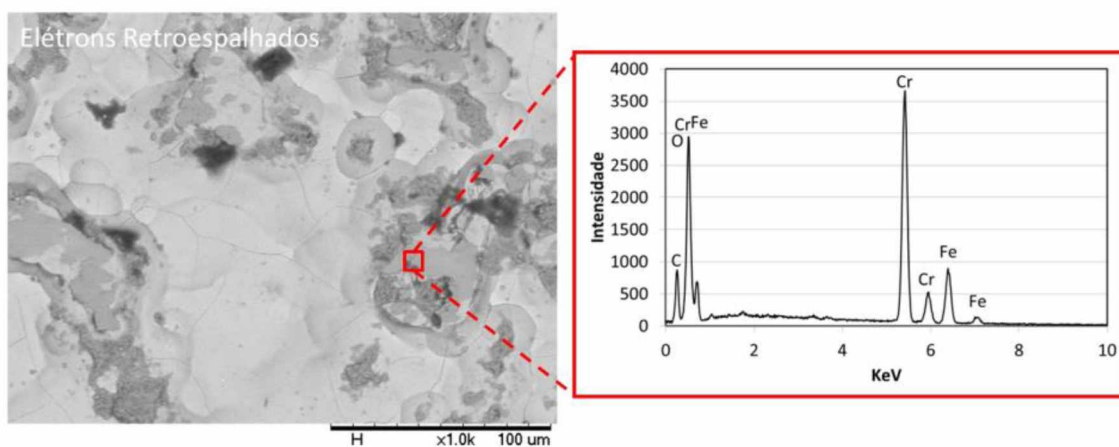


Figura 4.27 – Imagens via microscopia eletrônica de varredura de amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro (a) após 1 h de deslizamento via elétrons secundários (b) após 1 h de deslizamento via elétrons retroespalhados (c) após 5 h de deslizamento via elétrons secundários (d) após 5 h de deslizamento via elétrons retroespalhados.



(a)



(b)

Figura 4.28 – Análise via EDX de regiões aparentemente oxidadas em amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro (a) ensaiada por 1 h (b) ensaiada por 5 h.

Os debris recolhidos após os ensaios de amostras texturizadas com posterior recobrimento de cromo duro (Figura 4.29) se apresentaram fragmentados. A análise de EDX mostrou que para os ensaios de 1 h os debris são formados por ferro, cromo e oxigênio. Já para ensaios de 5 h os debris são constituídos por ferro e oxigênio.

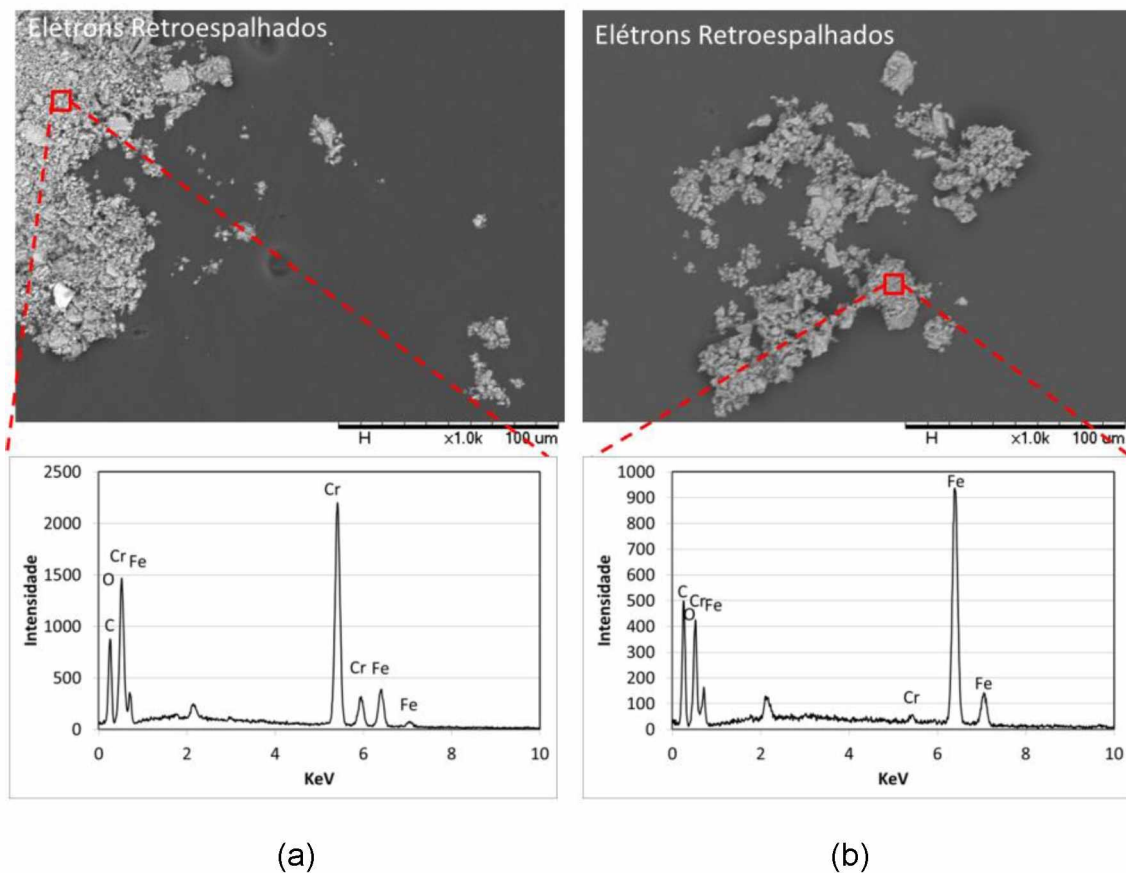


Figura 4.29 – MEV de debris coletados após ensaios de amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro via elétrons retroespalhados e análise de EDX: (a) 1h e (b) 5 h.

O aspecto das trilhas formadas no contracorpo é ilustrado na Figura 4.30, a análise por EDX (Figura 4.31) mostrou que as regiões escuras encontradas nas bordas da marca de desgaste do contracorpo são ricas em ferro e oxigênio, ou seja, não houve transferência de cromo para o contracorpo.

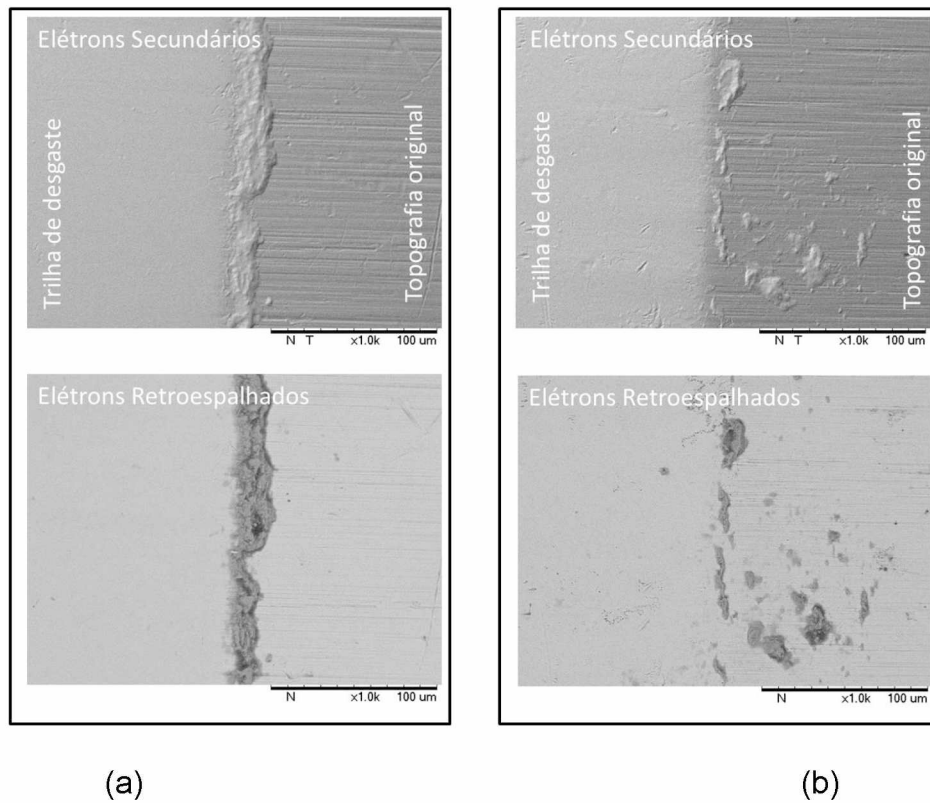


Figura 4.30 – Imagens via elétrons secundários, retroespalhados e espectros EDX do contracorpo ensaiado contra amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro por: (a) 1 h e (b) 5 h.

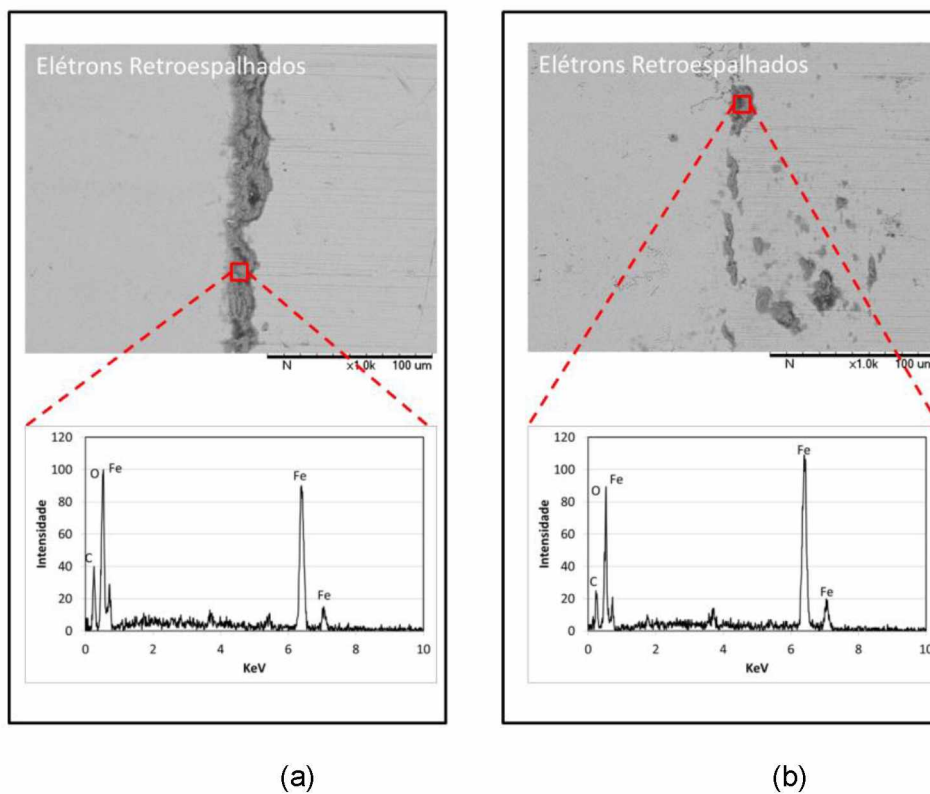


Figura 4.31 – Análise de EDX realizado em contracorpo ensaiado com amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro ensaiadas por (a) 1 h (b) 5 h.

O desgaste das amostras texturizadas com posterior nitretação por 1h é ilustrado na Figura 4.32, nota-se que mesmo após 5h de ensaio ainda há regiões que não foram desgastadas. O aumento do tempo de ensaio para 5 h (Figuras 4.32 (c) e (d)) simplesmente aumentou a porcentagem das regiões desgastadas, mas a aparência das tribocamadas ficou semelhante. Percebe-se a presença de uma tribocamada rica em elementos leves e com um aspecto mais liso, nas regiões mais elevadas, e um com aspecto mais rugoso, em regiões mais profundas. Nota-se semelhanças entre o alisamento ocorrido no desgaste da camada nitretada com comportamento do desgaste das amostras cromadas. Além disso, para ambas as condições, formou-se uma tribocamada rica em elementos leves nas regiões alisadas e nas regiões rugosas, indicando o alisamento dos picos mais proeminentes da amostra e formação de uma tribocamada nesta região, posteriormente ocorrendo o arrancamento e fracionamento desta tribocamada.

Os debris coletados após os ensaios não apresentaram diferenças significativas com o aumento do tempo de ensaio de 1h para 5h (Figura 4.33), assim como nas amostras cromadas, a análise de EDX indicou que os particulados são compostos por ferro e oxigênio. As trilhas formadas nos contracorpos (Figura 4.34) mostraram aspecto semelhante ao observado para as amostras texturizadas e revestidas com cromo duro, além disso, o desgaste da camada nitretada também não provocou transferência de elementos de liga para o contracorpo.

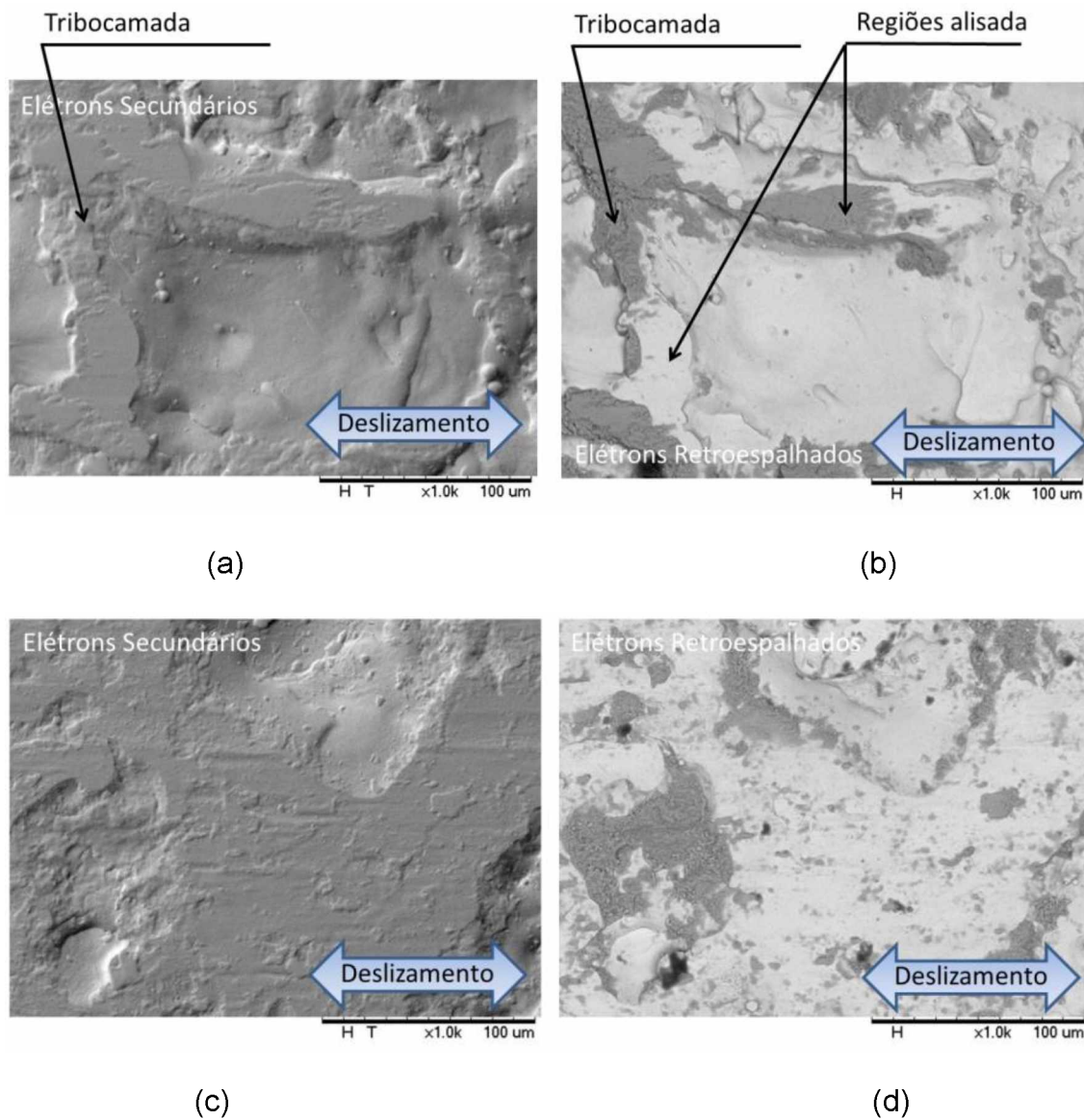


Figura 4.32 – MEV de amostras texturizadas com posterior nitretação após deslizamento por: (a) 1 h, elétrons secundários; (b) 1 h, elétrons retroespalhados; (c) 5 h, elétrons secundários; (d) 5 h, elétrons retroespalhados.

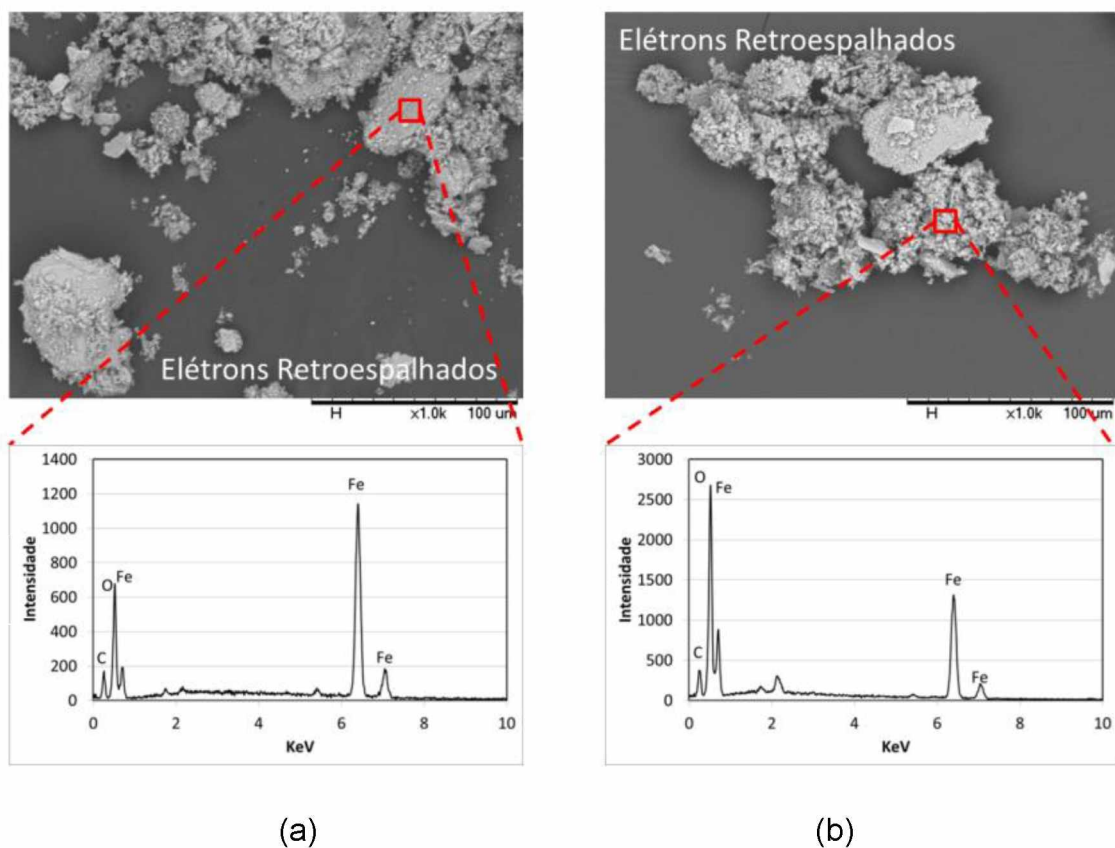


Figura 4.33– Imagens de debris de amostras texturizadas com posterior nitretação via elétrons retroespalhados e análise de EDX ensaiados por (a) 1h e (b) 5 h.

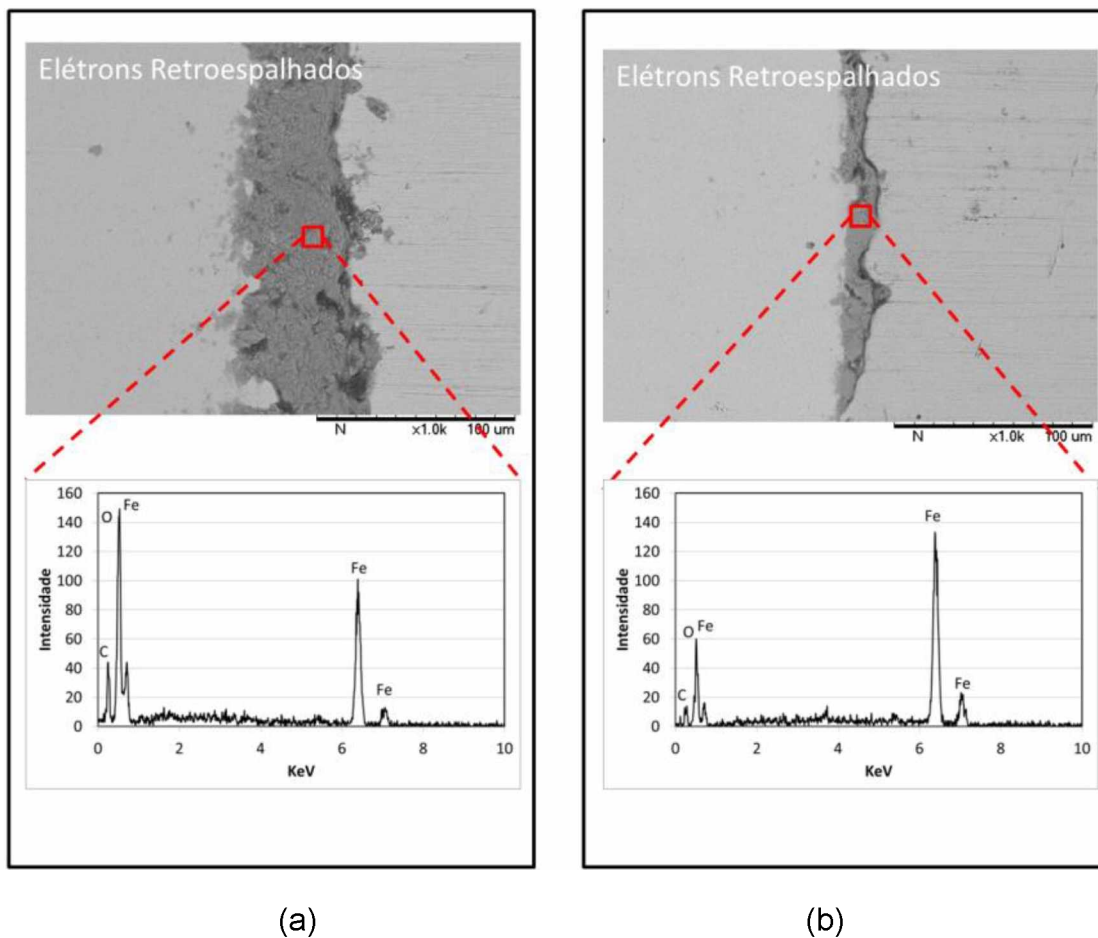


Figura 4.34 – Imagens via elétrons retroespalhados e análise de EDX da tribocamada em contracorpo ensaiado contra amostras texturizadas com nitretação ensaiadas por: (a) 1 h e (b) 5 h.

Uma importante função dos revestimentos é aumentar o tempo de vida da textura presente no cilindro, dessa forma, foi mensurado a topografia das amostras texturizadas antes e após os ensaios. Uma vez que os parâmetros do ensaio tribológico foram selecionados de modo a reproduzir o desgaste em cilindros de laminação no fim de uso, espera-se que o desempenho da nitretação na topografia das amostras após o teste seja reproduzido em campo.

A Figura 4.35 mostra a variação do parâmetro topográfico S_q em função do tempo de ensaio, nota-se que após 1 h de ensaio houve pequena elevação da rugosidade quadrática média, mas que esta variação não foi estatisticamente significativa. Com o aumento do tempo de ensaio para 5 h, o valor de S_q da amostra texturizada e nitretada sofreu uma redução significativa.

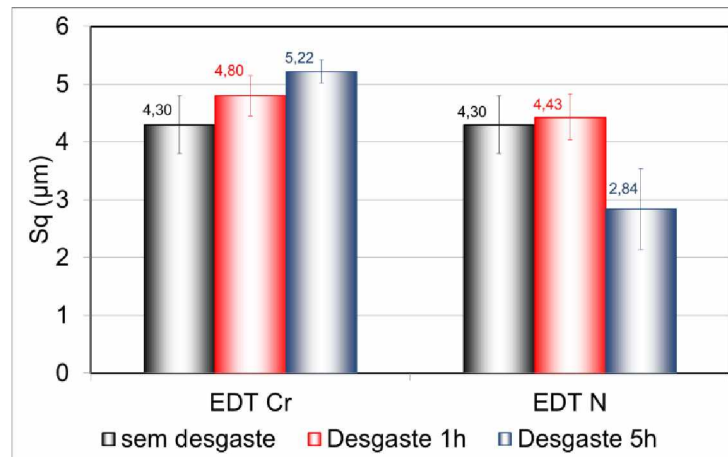


Figura 4.35 – Variação do parâmetro topográfico Sq em função do tempo de ensaio

O parâmetro S_{dq} é mostrado na Figura 4.36, para as amostras com revestimento de cromo duro este parâmetro sofreu uma pequena redução após 1 h de ensaio. Porém, ao elevar-se o tempo de ensaio para 5 h o valor de S_{dq} aumentou significativamente, ficando comparável ao da amostra antes dos ensaios. As amostras nitretadas sofreram uma redução da inclinação média das irregularidades e, ao elevar o tempo de ensaio para 5 h, a redução do parâmetro se tornou mais significativa.

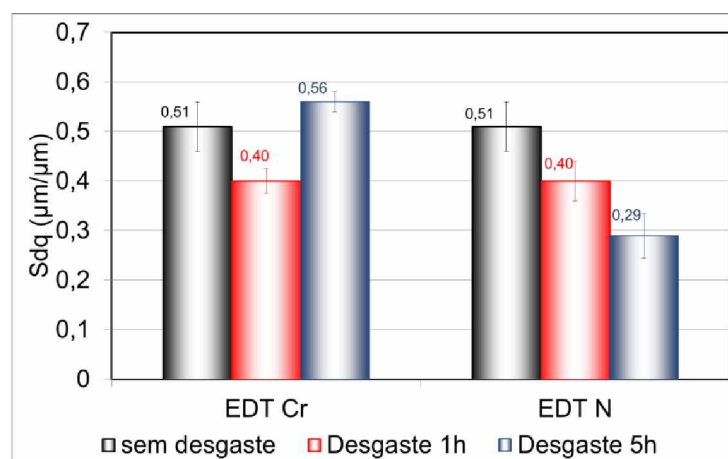


Figura 4.36 – Variação do parâmetro topográfico Sdq em função do tempo de ensaio

Ao verificar o comportamento do parâmetro S_{pk} antes e após os ensaios de 1 h e 5 h notou-se que para as duas condições o ensaio de deslizamento reduziu o seu valor (Figura 4.37). Observou-se ainda que o valor final do parâmetro para as diferentes modificações após 1 h e 5 h de deslizamento não sofreu diferença significativa.

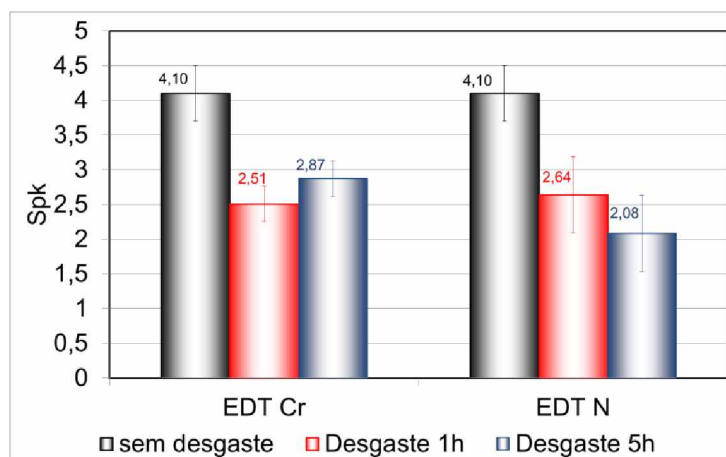


Figura 4.37 – Variação do parâmetro topográfico S_{pk} em função do tempo de ensaio

A análise do parâmetro S_{bi} (Figura 4.38) mostrou uma tendência de redução da capacidade de suporte mecânico com o aumento do tempo de deslizamento, as amostras cromadas apresentaram valores ligeiramente menores.

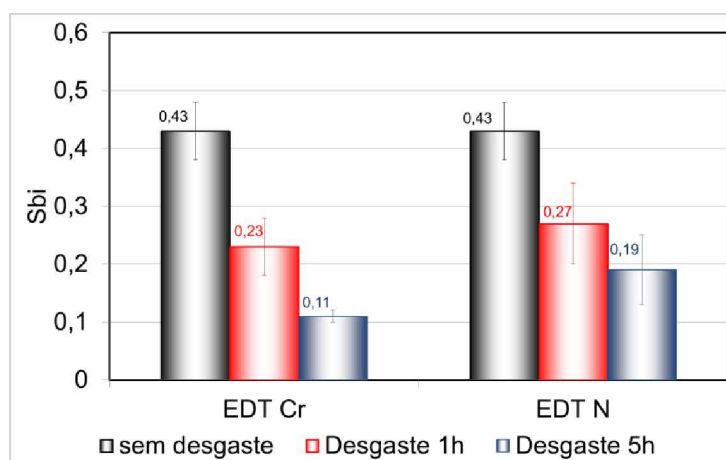


Figura 4.38 – Variação do parâmetro topográfico S_{bi} em função do tipo de modificação superficial e do tempo de ensaio

Em função desta análise, considera-se que, apesar de promissora, a nitretação a plasma não seja capaz de substituir o cromo duro na indústria de laminação a frio.

5. CONCLUSÃO:

O presente trabalho buscou avaliar a viabilidade da nitretação a plasma como método para substituir o cancerígeno revestimento de cromo duro. A metodologia proposta pela literatura permitiu avaliar os mecanismos de desgaste em um cilindro de laminação a frio.

De uma forma geral, o comportamento tribológico das amostras nitretadas foi semelhante ao apresentado pelo cromo duro, tanto para amostras sem texturização, as quais representam cilindros de laminação retificados, quanto para amostras texturizadas, as quais representam cilindros texturizados por EDT.

O coeficiente de atrito para as amostras nitretadas foi similar às amostras revestidas com cromo duro. A texturização da superfície provocou a estabilização deste parâmetro em ambos os revestimentos.

Para as amostras sem texturização, após uma hora de ensaio a taxa de desgaste foi consideravelmente menor para as amostras nitretadas. No entanto, após 5h o desgaste das duas condições se igualou. No entanto, o desempenho da nitretação em amostras texturizadas foi ligeiramente inferior ao cromo duro. A texturização reduziu consideravelmente a taxa de desgaste das amostras.

Tanto nos ensaios com a amostra nitretada, quanto para a amostra revestida com cromo duro, os mecanismos de desgaste sugerem um alisamento da superfície, seguido pela formação de uma tribocamada rica em elementos leves. Em ambos os casos, ocorreu um complexo mecanismo de alisamento da superfície, formação, remoção e fragmentação da tribocamada.

A nitretação não permitiu conservar os parâmetros topográficos S_q e S_{dq} após o desgaste. Porém, os parâmetros S_{pk} e S_{bi} apresentaram comportamento similar à amostra cromada.

Deste modo, o presente trabalho de conclusão de curso avalia ser promissor o uso da nitretação em cilindros de laminação a frio. Devido aos elevados custos e riscos associados à substituição do cromo duro, sugere-se o uso de um projeto piloto na implementação da nitretação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BINDER, C. **Avaliação Do Desempenho De Componentes De Ferro Sinterizado Nitretados Por Plasma Em Reator De Escala Industrial**, 2006. 94 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis.
- BOLELLI, G.; CANNILLO, V.; LUSVARGHI, L.; RICCÒ, S. Mechanical and tribological properties of electrolytic hard chrome and HVOF-sprayed coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 200, n. 9, p. 2995-3009, 2006. ISSN 0257-8972.
- CHAPMAN, B. N. **Glow discharge processes**. John Wiley & Sons, 1980. p.
- 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 and Coatings Technology**, v. 154, n. 2–3, p. 282-288, 2002. ISSN 0257-8972.
- CORTÊS, P. E. F. **Desenvolvimento De Acabamento Rolled-On Em Aço Inoxidável**. 2009. 108 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- COSTA, H.; HUTCHINGS, I. Some innovative surface texturing techniques for tribological purposes. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 229, n. 4, p. 429-448, April 1, 2015 2015.
- COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M. Some innovative surface texturing techniques for tribological purposes. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 229, n. 4, p. 429-448, April 2015.
- 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.
- DE MELLO, J. D. B.; OLIVEIRA JR, M. M.; BINDER, C.; KLEIN, A. N. **Solid Lubrication in Fluid Film Lubrication**. ASIATRIB -2014. Agra, India 2014.
- DONG, W. P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. Comprehensive study of parameters for characterising three- dimensional surface topography: III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties. **Wear**, v. 178, n. 1–2, p. 29-43, 1994. ISSN 0043-1648.
- EL-AMOUS, A. S.; 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**, v. 13, n. 3, p. 529-533, 2011. ISSN 1293-2558.
- 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.

GONÇALVES JR, J. L. **Avaliação Tribológica De Novas Modificações Superficiais Para Cilindros De Laminação A Frio**, 2016, Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

GONÇALVES JR, J. L.; DE MELLO, J. D. B. Influência Da Cromagem E Texturização No Comportamento Tribológico De Aços Para A Fabricação De Cilindros De Laminação A Frio. **67º congresso anual da ABM**. Rio de Janeiro 2012.

ISO 4287. **Surface Texture: Profile Method – Terms, Definitions and Surface Texture Parameters**. Geometrical Product Specifications (GPS) International Standard ISO 4287 1997.

LEITE, M. V.; SANTOS, M. M. D.; MELLO, J. D. B. D.; LIMA, A. G. D.; RAMOS, G. P.; MACHADO, J. R.; SANTOS, N. L. D.; ROSÁRIO, C. S. D.; OLIVEIRA, A. F. D.; RAMPINELLI, M. E. G.; ROCHA, S. D. S.; FERREIRA, R. L. D. O.; LESSA, R. A. G. Mecanismos de Desgaste de Cilindros de Trabalho dos Laminadores Tandem de Tiras a Frio do Brasil. In: **Abm, 48º Seminário De Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos**, 2011. Santos - Sp.

MALISKA, A. M.; KLEIN, A. N.; DE SOUZA, A. R. Microstructural characterization of plasma nitriding surface of sintered steels containing Si. **Surface and Coatings Technology**, v. 70, n. 2–3, p. 175-179, 1995. ISSN 0257-8972.

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

NEWBY, K. R. In: REIDENBACH, F. (Ed.). **Asm Handbook: Surface Engineering** ASM International, v.5, 1994. p.684-721. ISBN 0-87170-384-X.

PODGORNIK, B.; VIŽINTIN, J.; LESKOVŠEK, V. Tribological properties of plasma and pulse plasma nitrided AISI 4140 steel. **Surface and Coatings Technology**, v. 108–109, n. 0, p. 454-460, 1998. ISSN 0257-8972.

SIMAO, J.; ASPINWALL, D. K. Hard chromium plating of EDT mill work rolls. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 93, p. 281-287, Aug 30 1999. ISSN 0924-0136.

SIMÃO, J.; ASPINWALL, D. K.; WISE, M. L. H.; EL-MENSHAWY, M. F. Mill roll texturing using EDT. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 45, n. 1–4, p. 207-214, 1994. ISSN 0924-0136.

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.

XU, Z. METHOD AND APPARATUS FOR INTRODUCING NORMALLY SOLID MATERIALS INTO SUBSTRATE SURFACES. 4520268 1985.

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. 920-929, 2007. ISSN 0043-1648.