

JOSÉ LÚCIO GONÇALVES JÚNIOR

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE NOVAS
MODIFICAÇÕES SUPERFICIAIS PARA CILINDROS
DE LAMINAÇÃO A FRIO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2016

JOSÉ LÚCIO GONÇALVES JÚNIOR

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE NOVAS MODIFICAÇÕES
SUPERFICIAIS PARA CILINDROS DE LAMINAÇÃO A FRIO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientadora: Prof^a. Dr^a Henara Lillian Costa Murray

Co-Orientador: Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello

Uberlândia – MG

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

G635a Gonçalves Júnior, José Lúcio, 1981-
2016 Avaliação tribológica de novas modificações superficiais para
cilindros de laminação a frio / José Lúcio Gonçalves Júnior. - 2016.
129 f. : il.

Orientadora: HenaraLillian Costa Murray.
Coorientador: José Daniel Biasoli de Mello.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Tribologia - Teses. 3. Laminação
(Metalurgia) - Teses. I. Murray, HenaraLillian Costa. II. Mello, José
Daniel Biasoli de. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

JOSÉ LÚCIO GONÇALVES JÚNIOR

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE NOVAS MODIFICAÇÕES
SUPERFICIAIS PARA CILINDROS DE LAMINAÇÃO A FRIO**

Banca Examinadora

Prof^a. PhD. Henara Lillian Costa Murray– UFU – Orientadora

Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello – UFU – Co-Orientador.

Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva – UTFPR

Prof. Dr. Júlio César Giubilei Milan– UDESC

Prof. Dr. Marcelo Braga dos Santos – FEMEC

Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva – FEMEC

Uberlândia, 24 de Junho de 2016

À minha família e meus
orientadores

Agradecimentos

A Deus.

À Professora Henara Lillian Costa Murray por sua orientação, conselhos e paciência nesta longa empreitada deste trabalho, proporcionando-me uma grande e importante experiência de vida e uma nova visão no campo da engenharia.

Ao professor José Daniel Biasoli de Mello pela co-orientação, ajuda e diversas colaborações que vieram enriquecer este trabalho.

Aos meus pais pelo amor, confiança e apoio, principalmente na fase final do trabalho, quando de outra forma teria sido muito mais difícil sua conclusão.

À minha esposa Amanda Coelho Melazo Gonçalves e sua família por sua ajuda e compreensão nos momentos difíceis.

À minha avó Leoniça Nogueira Gonçalves pelo apoio incondicional.

Aos amigos do LabMat, em Florianópolis, que contribuíram de forma significativa para a realização da Nitretação.

Aos amigos que fiz no Laboratório de Tribologia e Materiais.

Aos membros do quadro permanente do Laboratório de Tribologia e Materiais, em especial à Ângela que me auxiliaram em diversas tarefas para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

GONÇALVES JR, J. L. AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE NOVAS MODIFICAÇÕES SUPERFICIAIS PARA CILINDROS DE LAMINAÇÃO A FRIO. 129f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

Resumo

O presente trabalho analisou o comportamento tribológico de revestimentos/modificações superficiais tradicionalmente utilizadas em cilindros para laminação a frio e de novos revestimentos/modificações superficiais com potencialidade de substituírem o cancerígeno cromo duro. Iniciou-se o processo com a identificação de mecanismos de desgaste que ocorrem em cilindros de laminação reais. Em função do elevado custo e dimensões de cilindros de laminação, foram produzidas réplicas obtidas em vários cilindros de laminação em diferentes empresas nacionais antes e após a laminação de uma campanha considerada normal. Realizaram-se pré-testes de deslizamento utilizando contracorpos esféricos e cilíndricos com o objetivo de reproduzir os mecanismos de desgaste encontrados nas réplicas. Os pré-testes indicaram como metodologia adequada ensaios de desgaste em modo alternado de deslizamento, com configuração de cilindro sobre um plano utilizando-se carga de 100 N e tempos de ensaio de 1 h e 5 h. Amostras foram produzidas a partir de um fragmento de cilindro de laminação real. Estas amostras passaram por tratamento térmico, retificação de ambas as faces e modificações superficiais de texturização superficial por descargas elétricas (EDT). Para os dois tipos de topografia superficial (retificadas e EDT), foram analisadas amostras sem revestimento posterior, com revestimento de cromo duro, com revestimento de NiP e nitretadas a plasma. Os resultados mostraram que o revestimento de NiP reduziu o coeficiente de atrito médio ao longo dos ensaios, ao passo que valores mais altos foram encontrados para as amostras nitretadas. De uma forma geral, a texturização prévia das amostras elevou a taxa de desgaste do contracorpo quando comparada com as amostras retificadas, para a maioria dos revestimentos/modificações investigados. Uma exceção foram as amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP, as quais apresentaram as menores taxas de desgaste do contracorpo. A adição do revestimento de NiP promoveu a formação de uma tribocamada no corpo e no contracorpo constituída de Níquel, Fósforo e Oxigênio, a qual aparentemente foi responsável pelas reduções de coeficiente de atrito e de taxa de desgaste verificadas. A elevação do tempo de ensaio de 1 h para 5 h reduziu a taxa de desgaste das amostras, aparentemente em função de uma maior estabilidade das tribocamadas formadas para maiores tempos de ensaio, com exceção das amostras nitretadas. Considerando-se as amostras previamente texturizadas, o revestimento de NiP foi o que melhor manteve a topografia das amostras após os ensaios de deslizamento.

Palavras Chave: Tribologia. Laminação a frio. Texturização superficial. EDT. Cromo Duro. NiP. Nitretação a plasma. .

GONÇALVES JR, J. L. TRIBOLOGICAL EVALUATION OF NEW SURFACE MODIFICATIONS FOR COLD ROLLING MILL ROLLS. 129f. Doctorate Thesis. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

Abstract

The present work analyzed the tribological behavior of coatings/surface modifications traditionally used in cold rolling mill rolls and new coatings/surface modifications with potential to replace the carcinogenic hard chrome. The study started with identification of wear mechanisms occurring in real cold rolling mill rolls. Due the high cost and dimensions of the rolls, the replication technique was used. Replicas were obtained from 4 different rolling mill Brazilian companies before and after a normal rolling campaign. Initial sliding tests were conducted using spherical and cylindrical counter bodies in order to verify which tribological conditions allowed to reproduce the wear mechanisms found in the replicas. These tests indicated the use of reciprocating sliding tests with cylindrical counter bodies (line contact), normal load of 100 N, and test times of 1 h and 5 h. Different surface modifications were carried out on samples produced from a fragment of a rolling mill roll. The specimens were heat treated and ground on both sides. After, some specimens were surface textured by electrical discharge texturing (EDT). For both groups (ground and EDT), subsequent treatments of chromium plating, electroless NiP coating and plasma nitriding were carried out. The results of the reciprocating tests showed that specimens with electroless NiP coating presented the lowest friction coefficients, while plasma nitrided specimens showed the highest. In general, previous surface texturing before the coating/surface modification increased the wear of the counter bodies. One exception was for EDT with subsequent electroless NiP coating, which presented the lowest counter bodies wear rate. The samples with electroless NiP coating promoted a tribolayer consisting of Nickel, Phosphorus and Oxygen on both the specimens and the counter bodies, which was apparently responsible for the reduction of friction coefficient and wear rate. The increase of the test time reduced the wear rate of the samples, apparently due the stability of the tribolayers formed, except for the nitrided samples. For the textured specimens, NiP coating showed the best performance in maintaining the surface topography of the specimens after the sliding tests.

Keywords: Tribology. Cold Mill. Texturing. Hard Chrome. NiP. Plasma Nitriding.

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução.....	1
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. – Laminação.....	5
2.2. – Texturização aplicada a laminação a frio.....	6
2.3 – Cromo duro.....	9
2.4 – Níquel Químico.....	15
2.5 – Nitretação a plasma.....	22
Capítulo 3 – Metodologia.....	33
3.1 – Caracterização das réplicas.....	34
3.2 – Materiais.....	36
3.3 – Texturização por descargas elétricas.....	38
3.4 – Revestimento de cromo duro.....	39
3.5 – Revestimento de Níquel químico.....	39
3.6 - Nitretação a plasma.....	40
3.7 – Pré-testes de deslizamento.....	41
3.8 – Ensaios de desgaste.....	44
Capítulo 4 – Resultados e Discussão.....	45
4.1 – Avaliação de réplicas.....	45
4.2 – Caracterização das amostras.....	50
4.3 – Texturização por descargas elétricas.....	50
4.4 – Cromo duro.....	52
4.5 – Níquel Químico.....	53
4.6 – Nitretação a plasma.....	54
4.7 – Pré-ensaios de deslizamento.....	56
4.8 – Ensaios de deslizamento.....	65
Capítulo 5 – Conclusão.....	124
Capítulo 6 – Trabalhos Futuros.....	125
Capítulo 7 – Referências Bibliográficas.....	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Velocidades e Força de atrito durante a laminação.....	6
Figura 2.2 – Esquema do processo de texturização por descargas elétricas.....	9
Figura 2.3– Variação dos parâmetros de rugosidade (a) R_a e (b) P_c em função do tipo de texturização. – Com revestimento de cromo \diamond – Sem revestimento de cromo \blacklozenge	11
Figura 2.4 – Ensaio tipo bloco-sobre anel de comparando cilindros revestidos e não revestidos: (a) Configuração do tribômetro; (b e c) coeficiente de atrito em função do número de rotações para pressões de contato de 3,3 MPa e 11 MPa; (d) taxa de desgaste.....	12
Figura 2.5 – Variação do coeficiente de atrito em função da espessura do revestimento de cromo duro.....	13
Figura 2.6 – Variação do coeficiente de atrito em função de diferentes modificações superficiais: sem modificação superficial (SM), com revestimento de cromo duro (C), texturizadas por jateamento de gralha de aço (T) e texturizadas com posterior revestimento de cromo duro (TC).....	14
Figura 2.7 – Desgaste do contracorpo para diferentes modificações superficiais (a) Sem modificação superficial (b) revestida com cromo duro (c) texturizada (d) Texturizada com posterior revestimento de cromo duro.....	14
Figura 2.8– Taxa de desgaste em função das diferentes modificações superficiais (SM) Sem modificação superficial (C) revestida com cromo duro (T) texturizada (TC) Texturizada com posterior revestimento de cromo duro.....	15
Figura 2.9– Efeito do teor de fósforo sobre a dureza do NiP sem tratamento térmico.....	16
Figura 2.10– Efeito do tratamento térmico sobre a microdureza do NiP.....	17

Figura 2.11– Comparação dos valores de R_a do revestimento e do substrato em função da espessura do revestimento.....	18
Figura 2.12– Microscopia ótica da seção transversal de amostra recoberta com NiP e $R_a = 2,46 \mu\text{m}$	18
Figura 2.13 – Tribômetro com a configuração de cilindro de contato transversal.....	19
Figura 2.14– Variação do coeficiente de atrito em função das modificações superficiais.....	20
Figura 2.15– Taxa de desgaste em função do tipo de modificação superficial.....	20
Figura 2.16– Microscopia eletrônica de varredura na trilha de desgaste de amostras revestidas com NiP.....	21
Figura 2.17– Microscopia eletrônica de varredura na trilha de desgaste de amostras revestidas com NiP com posterior tratamento térmico.....	21
Figura 2.18– Reator de nitretação a plasma em nível industrial.....	23
Figura 2.19– Esquema do processo de nitretação.....	24
Figura 2.20 – Crescimento da camada nitretadas.....	25
Figura 2.21– Variação da microdureza de amostras nitretadas em função do tipo de nitretação e da profundidade.....	27
Figura 2.22– Variação dos valores de microdureza em função do tipo de nitretação.....	27
Figura 2.23 – Variação da rugosidade em função do tipo de nitretação.....	28
Figura 2.24 – Microscopia eletrônica de varredura em amostras (a) antes da nitretação (b) nitretadas a plasma (c) nitretadas a plasma pulsado.....	29

Figura 2.25 –(a)Configuração do ensaio pino disco (b) variação do coeficiente de atrito em função dos parâmetros de nitretação.....	30
Figura 2.26– Relação entre o comprimento dos pinos desgastados e a distância de deslizamento.....	30
Figura 2.27– Desgaste dos pinos em função da carga normal após 100 m de deslizamento.....	31
Figura 2.28 – Microscopia eletrônica de varredura na marca de desgaste de amostras nitretadas (a) disco (b) pino.....	32
Figura 3.1 – Representação gráfica do parâmetro S_{pk}	36
Figura 3.2 – Sequência de preparação das amostras antes da realização das modificações superficiais.....	36
Figura 3.3 – Nomenclatura das amostras após as modificações superficiais.....	37
Figura 3.4 – Perfis de temperatura utilizados no processo de nitretação.....	40
Figura 3.5 – (a) Modelo esquemático do teste. (b) Exemplo de uma imagem triboscópica 3D.....	42
Figura 3.6 – Esquema do porta cilindros projetado.....	43
Figura 4.1 – Exemplos típicos de imagens via MEV de réplicas de cilindros laminadores antes e após o uso: (a) e (b) cilindro retificado (c) e (d) texturizado por EDT e cromado.....	46
Figura 4.2 – Mapas topográficos típicos de cilindros laminadores antes e após o uso: (a) e (b) cilindro retificado; (c) e (d) texturizado por EDT e cromado.....	47
Figura 4.3 – Valores do parâmetro S_q nas réplicas de diferentes cilindros de laminação reais antes e após uma campanha normal de laminação.....	47

Figura 4.4 – Valores do parâmetro S_{dq} nas réplicas de diferentes cilindros de laminação reais antes e após uma campanha normal de laminação.....	48
Figura 4.5 – Valores do parâmetro S_{pk} nas réplicas de diferentes cilindros de laminação reais antes e após uma campanha normal de laminação.....	48
Figura 4.6 – Valores do parâmetro S_{bi} nas réplicas de diferentes cilindros de laminação reais antes e após uma campanha normal de laminação.....	49
Figura 4.7 – Comparação dos parâmetros topográficos.....	51
Figura 4.8 – Variação dos parâmetros topográficos 3D para amostras retificadas e texturizadas.....	51
Figura 4.9–Revestimento de cromo duro.....	52
Figura 4.10 – Variação dos parâmetros topográficos após o revestimento de cromo duro (a) amostras sem texturização (b) amostras texturizadas.....	53
Figura 4.11 – Revestimento de NiP (a) cilindro retificado e (b) cilindro texturizado por EDT.....	53
Figura 4.12 – Variação dos parâmetros topográficos 3D em função da deposição do revestimento de NiP (a) para amostras sem texturização (b) para amostras texturizadas.....	54
Figura 4.13 – (a) Seção transversal de uma amostra nitretada e atacada com Nital 2% (b) perfil de microdureza de amostra nitretada.....	55
Figura 4.14 – Difratoograma de raio X de uma amostra nitretada a plasma.....	55
Figura 4.15 – Variação dos parâmetros topográficos 3D para amostras nitretadas (a) sem texturização (b) texturizadas.....	56

Figura 4.16 – Mapas topográficos 3D de amostras (a) sem ensaio (b) amostras ensaiadas com contracorpo esférico, tempo de deslizamento de 1 h e carga normal de 29N (c) amostras ensaiadas com contracorpo esférico, tempo de deslizamento de 1 h e carga normal de 50N.....57

Figura 4.17 – Mapa topográfico 3D de amostras texturizadas com posterior recobrimento de cromo duro (a) sem desgaste (b) ensaiadas por 30 minutos com contracorpo cilíndrico e carga normal de 100 N (c) ensaiadas por 3 h com contracorpo cilíndrico e carga normal de 100 N (d) ensaiadas por 5 h com contracorpo cilíndrico e carga normal de 100 N.....58

Figura 4.18 – Variação dos parâmetros topográficos encontrados nas réplicas de um cilindro texturizado e cromado antes e após a laminação de uma campanha considerada normal.....59

Figura 4.19 – Variação dos parâmetros topográficos das réplicas e de amostras ensaiadas com contracorpo esférico, tempo de deslizamento de 1 h em função da carga normal aplicada.....60

Figura 4.20 – Variação dos parâmetros topográficos das réplicas e de amostras ensaiadas com contracorpo cilíndrico, carga normal de 100N em função do tempo de deslizamento.....60

Figura 4.21 – Imagens via MEV (elétrons secundários) de amostras ensaiadas com (a) contracorpo esférico e carga normal de 29N e tempo de deslizamento de 1 h (b) contracorpo cilíndrico carga normal de 100N e tempo de deslizamento de 30 minutos (c) contracorpo cilíndrico carga normal de 100N e tempo de deslizamento de 3 h (d) contracorpo cilíndrico carga normal de 100N e tempo de deslizamento de 5 h.....62

Figura 4.22 – Imagens via MEV (elétrons retroespalhados) de amostras ensaiadas com (a) contracorpo esférico e carga normal de 29N e tempo de deslizamento de 1 h (b) contracorpo cilíndrico carga normal de 100N e tempo de deslizamento de 5 h.....63

Figura 4.23 – Imagens via MEV (elétrons retroespalhados) de amostras ensaiadas com contracorpo esférico e carga normal de 29N e tempo de deslizamento de 1 h e análise via EDX.....63

Figura 4.24 – Imagens via MEV (elétrons retroespalhados) de amostras ensaiadas com contracorpo cilíndrico, carga normal de 100N e tempo de deslizamento de 5 h e análise via EDX.....64

Figura 4.25– Mapas topográficos 3D de: (a) Réplicas de cilindro texturizado com posterior recobrimento de cromo duro após a laminação; (b) amostras ensaiadas com contracorpo esférico, tempo de deslizamento de 1 h e carga normal de 29N; (c) amostras ensaiadas com contracorpo esférico, tempo de deslizamento de 1 h e carga normal de 50N; (d) amostras ensaiadas por 30 min com contracorpo cilíndrico e carga normal de 100 N; (e) amostras ensaiadas por 3 h com contracorpo cilíndrico e carga normal de 100 N (f) amostras ensaiadas por 5 h com contracorpo cilíndrico e carga normal de 100 N.....65

Figura 4.26 – Triboscopia típicas de amostras sem texturização ensaiadas por 5 h: (a) sem modificação; (b) cromo duro (c); NiP; (d) nitretadas.....67

Figura 4.27 – Triboscopia típicas de amostras texturizadas ensaiadas por 5 h (a) EDT (b) EDT + cromo duro (c) EDT +NiP (d) EDT + nitretação.....69

Figura 4.28 – Evolução típica do potencial de contato para amostras texturizadas ensaiadas por 5 h: (a) EDT; (b) EDT + Cr; (c) EDT + NiP; (d) EDT + nitretação.....71

Figura 4.29 – Evolução típica do potencial de contato para amostras sem texturização ensaiadas por 5 h: (a) sem modificação; (b) cromo duro; (c) NiP (d) nitretadas.....72

Figura 4.30 – Evolução típica do coeficiente de atrito para amostras sem texturização: (a) ensaiadas por 1 h; (b) ensaiadas por 5 h.....74

Figura 4.31 – Evolução típica do coeficiente de atrito para amostras texturizadas: (a) EDT, 1 h; (b) EDT, 5 h; (c) EDT + cromo duro, 1 h; (d) EDT + cromo duro, 5 h; (e) EDT + NiP, 1 h; (f) EDT + NiP, 5 h; (g) EDT + nitretação, 1 h; (h) EDT + nitretação, 5 h.....75

Figura 4.32 – Coeficiente de atrito médio para amostras: (a) sem texturização ensaiadas por 1 h (b) sem texturização ensaiadas por 5 h (c) texturizadas ensaiadas por 1 h (d) texturizadas ensaiadas por 5 h.....77

Figura 4.33 – Índice de plasticidade para amostras sem texturização antes e após os ensaios de deslizamento.....	78
Figura 4.34 – Índice de plasticidade para amostras texturizadas antes e após os ensaios de deslizamento.....	79
Figura 4.35- Taxa de desgaste das amostras.....	80
Figura 4.36 – Taxa de desgaste do contracorpo para diferentes modificações superficiais e tempos de ensaio de deslizamento.....	81
Figura 4.37 – Imagens por MEV típicas de uma amostra sem modificação superficial: (a) sem ensaio de desgaste e (b) ensaiada por 1 h.....	82
Figura 4.38 – Imagens por MEV típicas de uma amostra sem modificação superficial ensaiada por 1 h (a) imagem via elétrons secundários (b) imagem via elétrons retroespalhados.....	83
Figura 4.39 – Análise de EDX típica de amostra sem modificação superficial ensaiada por 1 h.....	83
Figura 4.40 – MEV de amostras sem modificação superficial ensaiadas por 5 h (a) via elétrons secundários (b) via elétrons retroespalhados.....	84
Figura 4.41 – Imagens via elétrons retroespalhados e análise de EDX de debris recolhidos após ensaio com amostras sem modificação superficial (a) 1 h (b) 5 h.....	85
Figura 4.42 – MEV de contracorpo típico ensaiado com amostras sem modificação superficial (a) ensaiado por 1 h(b) ensaiado por 5 h.....	86
Figura 4.43 – Análise via EDX de contracorpo típico ensaiado contra amostras sem modificação (a) ensaiado por 1 h (b) ensaiado por 5 h.....	87
Figura 4.44 – 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 1 h de deslizamento.....	88

Figura 4.45 – 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.....	89
Figura 4.46 – Imagem via elétrons retroespalhados e análise de EDX de uma amostra revestida com cromo duro após deslizamento por: (a) 1 h; (b) 5 h.....	91
Figura 4.47 - Imagens via elétrons retroespalhados e análise de EDX de debriscoletados após ensaio com amostras revestidas com cromo duro: (a) 1 h; (b) 5 h.....	92
Figura 4.48 – MEV de contracorpo ensaiado contra amostras revestidas com cromo duro por: (a) 1 h; (b) 5 h.....	93
Figura 4.49 – Imagens de MEV típicas para amostras revestidas com NiP: (a) antes do teste de deslizamento; (b) após 1 h de deslizamento.....	93
Figura 4.50 – Imagens por MEV de uma amostra recoberta com NiP típica após 1 h deslizamento: (a) elétrons secundários e (b) elétrons retroespalhados.....	94
Figura 4.51 – Imagem via elétrons retroespalhados e análise de EDX de uma amostra revestida com NiP após deslizamento por 1 h.....	95
Figura 4.52 – Imagens via elétrons retroespalhados de debris coletados após ensaios das amostras revestidas com NiP.....	96
Figura 4.53 – MEV de contracorpo típico ensaiado contra amostras revestidas com NiP.....	96
Figura 4.54 – Análise de EDX de contracorpo ensaiado contra amostras revestidas com NiP...	97
Figura 4.55 – Imagens de MEV típicas para amostras nitretadas: (a) sem desgaste e (b) após 1 h de deslizamento.....	97
Figura 4.56 – 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.....	98

Figura 4.57 – Espectros da região escura típica de amostra nitretada ensaiada por: (a) 1 h; (b) 5 h.....	99
Figura 4.58 – Imagens via elétrons retroespalhados e espectros EDX de debris coletados após ensaios das amostras nitretadas por (a) 1 h e (b) 5 h.....	100
Figura 4.59 – Imagens via elétrons secundários e retroespalhados do contracorpo ensaiado contra amostras nitretadas por (a) 1 h e (b) 5 h.....	100
Figura 4.60 – Imagens via elétrons retroespalhados e espectros EDX do contracorpo ensaiado contra amostras nitretadas por (a) 1 h e (b) 5 h.....	101
Figura 4.61 – Imagens via microscopia eletrônica de varredura de amostras texturizadas (a) sem desgaste (b) após 1 h de deslizamento.....	102
Figura 4.62 – Imagens via microscopia eletrônica de varredura de amostra texturizada (a) ensaiada por 1 h via elétrons secundários (b) ensaiada por 1 h via elétrons retroespalhados (c) ensaiada por 5 h via elétrons secundários (d) ensaiada por 5 h via elétrons retroespalhados.....	103
Figura 4.63 – Imagens via elétrons retroespalhados de debris coletados após ensaios de amostras texturizadas por: (a) 1 h; (b) 5 h.....	104
Figura 4.64 – Imagens via elétrons secundário de contracorpo ensaiado contra amostras texturizadas por: (a) 1 h; (b) 5 h.....	104
Figura 4.65 – Imagens via microscopia eletrônica de varredura de amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro (a) antes do deslizamento (b) ensaiadas por 1 h.....	105

Figura 4.66 – 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.....106

Figura 4.67 – 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.....107

Figura 4.68 – 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.....108

Figura 4.69 – 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.....109

Figura 4.70 – Análise de EDX realizado em contracorpo ensaiado com amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro ensaiadas por (a) 1 h (b) 5 h.....110

Figura 4.71 – MEV de amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP: (a) antes do deslizamento; (b) ensaiadas por 1 h.....111

Figura 4.72 – MEV de amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP ensaiadas por: (a) 1 h, elétrons secundários; (b) 1 h, elétrons retroespalhados; (c) 5 h, elétrons secundários; (d) 5 h, elétrons retroespalhados.....111

Figura 4.73 – Análise via EDX da região oxidada em amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP ensaiadas por: (a) 1 h (b) 5 h.....112

Figura 4.74 – MEV de debris coletados após ensaios de amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP via elétrons retroespalhados e análise de EDX: (a) 1h e (b) 5 h.....113

Figura 4.75 – MEV típico de contracorpo ensaiado contra amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP por: (a) 1 h e (b) 5 h.....	113
Figura 4.76 – MEV de contracorpo ensaiado contra amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP ensaiados por: (a) 1 h e (b) 5 h.....	114
Figura 4.77 – Análise de EDX da tribocamada em contracorpo ensaiado com amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP ensaiadas por (a) 1 h e (b) 5 h.....	115
Figura 4.78 – 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.....	116
Figura 4.79 – Imagens de debris de amostras texturizadas com posterior nitretação via elétrons retroespalhados e análise de EDX ensaiados por (a) 1 h e (b) 5 h.....	117
Figura 4.80 – 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.....	118
Figura 4.81 – Variação do parâmetro topográfico S_q em função do tipo de modificação superficial e do tempo de ensaio.....	119
Figura 4.82 – Variação do parâmetro topográfico S_{dq} em função do tipo de modificação superficial e do tempo de ensaio.....	120
Figura 4.83 – Variação do parâmetro topográfico S_{pk} em função do tipo de modificação superficial e do tempo de ensaio.....	120
Figura 4.84 – Variação do parâmetro topográfico S_{bi} em função do tipo de modificação superficial e do tempo de ensaio.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resultados de dureza do cromo duro encontrados na literatura.....	10
Tabela 2.2 – Parâmetros das modificações superficiais utilizados no aço AISI 4140.....	26
Tabela 3.1 – Diferentes modificações superficiais presentes em cada cadeira (J = Jateamento; C = Revestimento de cromo duro; EDT = Texturização por descargas elétricas; R = Retificado)...	34
Tabela 3.2 – Parâmetros dos testes de EDT.....	39
Tabela 3.3 – Tensão máxima de Hertz em função das cargas normais e geometrias dos contracorpos.....	43
Tabela 4.1 – Porcentagem em peso dos elementos químicos (nominal e medida) presentes no material.....	50
Tabela 4.2 – Dureza e espessura dos revestimentos / modificações superficiais.....	56

LISTA DE SÍMBOLOS E ACRÔNIMOS

E_0 : espessura da chapa antes de atravessar os cilindros.

E_f : espessura da chapa depois de atravessar os cilindros.

l : largura da chapa.

b : largura da chapa após atravessar o cilindro

MEV: microscópio eletrônico de varredura

V_e : velocidade da chapa antes de atravessar os cilindros.

V_f : velocidade da chapa depois de atravessar os cilindros.

R_q : parâmetro de rugosidade bi-dimensional relativo à rugosidade aritmética média

P_c : parâmetro de rugosidade bi-dimensional relativo ao numero de picos

R_{max} : parâmetro de rugosidade bi-dimensional relativo a altura máxima do perfil

S_q : parâmetro de rugosidade tri-dimensional relativo rugosidade superficial quadrática média.

S_{dq} : parâmetro de rugosidade tri-dimensional relativo à inclinação média das irregularidades

S_{pk} : parâmetro de rugosidade tri-dimensional relativo à altura dos picos mais proeminentes da superfície

S_{bj} : parâmetro de rugosidade tri-dimensional relativo à capacidade de suporte mecânico da superfície

J: Jateamento

C: Revestimento de cromo duro

EDT: Texturização por descargas elétricas

R: Retificado

$h_{0,05}$: altura que revela o truncamento de 5% da área total

$\eta_{0,05}$: altura correspondente a 5% da área total.

CAPÍTULO I

Introdução

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, topografia superficial, espessura de chapa no atendimento a consumidores cada vez mais exigentes (indústria automobilística, linha branca, dentre outros) (MENDES, 2007).

A laminação consiste em um processo de conformação mecânica no qual o material metálico é deformado plasticamente quando o mesmo passa através de cilindros. Esse processo permite a fabricação de diversos tipos de semimanufaturados tais como: trilhos, placas, fios, tiras e perfis de diversas formas (DIETER, 1988).

O processo de laminação opera com níveis elevados de carga e temperatura, causando solicitações severas nos cilindros de laminação e, conseqüentemente, levando ao desgaste.

Em função da exigência dos consumidores de produtos laminados a frio, é comum aos produtores a necessidade de produzir o material laminado com uma textura superficial pré-definida, sendo que esta textura é transmitida à chapa pelos cilindros de acabamento (ELKOCA, 2008).

A textura superficial usada em laminação a frio consiste de modificações superficiais feitas na topografia do cilindro de trabalho, geralmente levando a acabamentos de dimensões micrométricas. Estas modificações podem ser feitas de forma a produzir um padrão de textura superficial com caráter aleatório utilizando, por exemplo, a técnica de jateamento de areia ou texturização por descargas elétricas (PAWELSKI et al., 1994; SIMÃO ;ASPINWALL, 1999). Uma outra possibilidade é a produção de padrões de textura superficial determinísticos, de forma que a topografia seja constituída de arranjos regulares de protuberâncias ou depressões nas superfícies. Várias técnicas podem ser utilizadas na texturização superficial determinística.

(COSTA, H. ;HUTCHINGS, I., 2015), sendo que a mais utilizada e conhecida é a texturização superficial a laser(HILGENBERG ;STEINHOFF, 2015).

Um dos objetivos de se texturizar o cilindro de laminação é obter o produto laminado com uma textura pré-definida que garanta uma refletividade uniforme da chapa após o processo de pintura. Nesse caso, durante o processo de conformação, os picos e vales formados pela superfície texturizada do cilindro produzem uma textura na chapa que exibe uma refletividade uniforme após a pintura (CHIU et al., 2002).

Tribologicamente, a texturização superficial pode apresentar várias vantagens. Uma delas é a possibilidade de acumular debris no interior das depressões (geralmente na forma de “bolsos”) que constituem a textura, evitando que estas partículas permaneçam na região de contato e reduzindo o desgaste abrasivo das superfícies (BECKER ;LUDEMA, 1999; ZUM GAHR; MATHIEU;BRYLKA, 2007).Além disso, a presença dos bolsos podem servir de reservatório de lubrificante no caso de contato com alta deformação plástica (STEINHOFF; RASP;PAWELSKI, 1996).O lubrificante utilizado no processo de laminação pode ainda formar um fino filme entre o cilindro e a chapa laminada propiciando um regime de lubrificação chamado de plasto hidrodinâmico, onde o filme de lubrificante entre as superfícies existe porem é incapaz de promover a separação total entre o cilindro e a chapa. Com a utilização do cilindro texturizado cria-se um campo de tensões que resulta na penetração de lubrificante no interior dos bolsos das texturas e com a evolução da deformação do produto laminado ocorre um aumento das áreas efetivas de contato expulsando o lubrificante do interior dos bolsos (BECH; BAY;ERIKSEN, 1998).

É possível encontrar na literatura estudos que mostram que a textura superficial não possui resistência mecânica suficiente para suportar sistemas com elevadas cargas. As áreas mais altas da topografia suportam uma maior proporção da carga aplicada do que as áreas mais baixas do relevo elevando a possibilidade de desgaste nestas áreas. O estado permanente é alcançado quando a carga aplicada é uniformemente distribuída, que significa a remoção da textura (FLETCHER et al., 2000). No caso da laminação a frio, durante as primeiras etapas da laminação, alguns picos se fraturam facilmente se tornando debris(SIMAO ;ASPINWALL, 1999). Para evitar esta fácil remoção da textura superficial, normalmente utiliza-se a técnica de deposição de cromo duro.

Cromo duro é um revestimento eletrodepositado muito utilizado pela indústria laminadora para obter altos níveis de dureza, manter a topografia original do cilindro, resistência ao desgaste e corrosão e baixo coeficiente de atrito (BODGER; MCGRANN;SOMERVILLE, 1997).

Com a elevação da dureza superficial em cilindros retificados é possível aumentar a capacidade de tonelagem (quantidade de material laminado pelo cilindro) além de revelar defeitos provenientes da retificação. Em laminação de acabamento a frio, a elevação da dureza superficial do cilindro permite que os picos permaneçam por mais tempo, elevando a quantidade de material laminado antes da troca (SIMAO ;ASPINWALL, 1999).

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 (SILVA et al., 2008).

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 (OSHA) estabeleceu limites de exposição para o cromo hexavalente em qualquer ambiente a níveis máximos de $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ (BARAL ;ENGELKEN, 2002). 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 1 de julho de 2003.

Em função das limitações ambientais do revestimento de cromo duro, o presente estudo objetiva estudar revestimentos que elevem a dureza superficial do cilindro e possuam características tribológicas que permitam sua utilização pela indústria laminadora como substituto ao cancerígeno cromo duro.

O estudo iniciou-se com a caracterização topográfica de réplicas retiradas de cilindros laminadores antes e após a laminação de uma campanha considerada normal para caracterizar o mecanismo de desgaste encontrado na indústria laminadora. Com a caracterização realizaram-se testes de deslizamento alternado utilizando contracorpos esféricos e cilíndricos com a variação da carga normal e tempo de deslizamento para encontrar a configuração que melhor reproduzisse os mecanismos de desgaste encontrados em cilindros de laminação a frio reais.

Sabe-se que na indústria laminadora nem todos os cilindros são texturizados. Por isso após a determinação da metodologia de ensaio, avaliou-se o comportamento tribológico utilizando-se essa metodologia em amostras de aço VC 10 divididas em dois grandes grupos (a) sem texturização (retificadas) e (b) texturizadas. Além do cromo duro, utilizado com referência neste trabalho, testou-se amostras que foram revestidas com níquel químico e nitretadas a

plasma, tanto previamente retificadas quanto texturizadas. Tais revestimentos foram selecionados após a realização de uma revisão bibliográfica sobre o processo de laminação a frio e o revestimento de cromo duro, mostrados no Capítulo II deste trabalho.

CAPÍTULO II

Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma breve revisão sobre o processo de laminação, mostrando os princípios do processo, além de trazer uma síntese das aplicações das modificações superficiais de texturização e cromeação em laminação a frio.

2.1. – Laminação

Na produção de tiras a frio, a qualidade dos laminados (rugosidade, dimensões, propriedades mecânicas) está diretamente relacionada ao desempenho dos cilindros do trem acabador, o qual consiste de cadeiras de laminadores responsáveis pela diminuição da espessura e pelo acabamento das tiras (MENDES, 2007).

Em relação ao movimento da chapa laminada e dos cilindros, a velocidade da peça laminada varia entre a entrada e a saída dos cilindros (DIETER, 1988). Uma chapa antes de entrar no conjunto de cilindros possui uma espessura E_0 (Figura 2.1). O processo de deformação diminui a espessura da chapa para E_f na saída dos cilindros. Pode-se considerar que o processo de deformação da espessura da chapa cause somente um alongamento da chapa sem alterar as dimensões da largura da chapa. Neste caso, a variação de volume de material que atravessa os cilindros é nula e a quantidade de material que entra nos cilindros é a mesma que sai dos cilindros num mesmo intervalo de tempo.

Assim, pode-se escrever:

$$E_0 l V_e = E_f b V_f \quad (2.1)$$

Sendo que l representa a largura inicial da chapa, V_e é a velocidade da chapa antes de atravessar os cilindros, b representa a largura da chapa após atravessar o cilindro e V_f representa a velocidade da chapa depois de atravessar os cilindros.

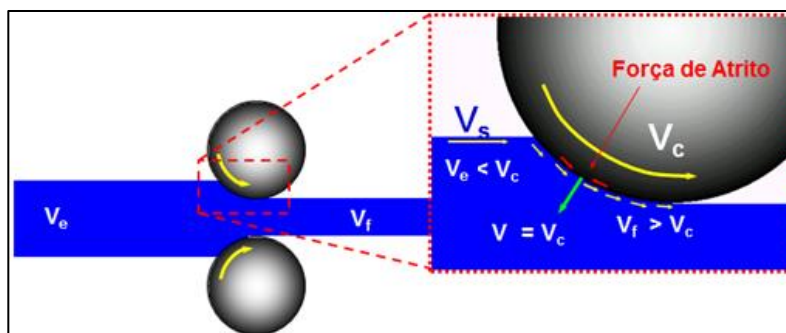


Figura 2.1 – Velocidades e Força de atrito durante a laminação.

Devido à variação nula de volume que atravessa os cilindros, a velocidade de saída da chapa deve ser maior que a de entrada. Portanto, a velocidade de entrada da chapa deve aumentar continuamente até a velocidade de saída. Nota-se que a velocidade da chapa antes da entrada nos cilindros é menor do que a velocidade periférica dos cilindros. Portanto, com o aumento da velocidade da chapa laminada, a mesma se iguala à velocidade do cilindro no ponto de contato entre chapa e cilindro, chamado ponto neutro, cuja velocidade relativa entre a chapa e o cilindro é nula. Após o ponto neutro, a velocidade da chapa laminada é superior à velocidade periférica do cilindro e a velocidade relativa volta a aumentar, só que no sentido de se afastar do ponto neutro, gerando assim a mudança de sentido da velocidade relativa a partir do ponto neutro(MENDES, 2007).

Em consequência do movimento relativo entre chapa e cilindro, as forças de atrito também mudam de sentido no ponto neutro. Entre a entrada e o ponto neutro, a velocidade do cilindro é mais lenta e a força de atrito atua no sentido de empurrar a chapa. Após o ponto neutro, a velocidade da chapa é maior e o sentido da força de atrito é contrário ao da saída da chapa.

2.2 – Texturização aplicada à laminação a frio

As superfícies texturizadas desempenham um importante papel na fabricação de carrocerias de automóveis. Durante o processo de conformação, vales formados pela superfície texturizada do cilindro, além de serem um bom reservatório para óleo lubrificante, ajudam a produzir uma refletividade uniforme após a pintura (UTSCH ;VINKE, 2005). KASPER (1965), por exemplo, descreve em seu trabalho que a influência da rugosidade da superfície do metal base diminui com aumento da espessura da camada de tinta aplicada em partes automotivas. Afirma também que o brilho aparente da superfície dos painéis automotivos pintados melhora

com o aumento da quantidade de picos na superfície e sugere faixa ideal de rugosidade média, representado pelo parâmetro R_a , de 0,5 a 2,4 μm . O parâmetro de rugosidade R_a é definido pela norma (ISO 4287, 1997) como sendo a média aritmética das alturas de um perfil.

Além de proporcionar uma otimização estética do produto laminado, LO e HORNG (1999) mostraram que texturização afeta o comportamento tribológico durante o processo de laminação da chapa, onde a presença de bolsos servem de reservatório de lubrificante como fonte secundária de lubrificante no contato.

Assim, cada aplicação exige uma diferente condição de rugosidade superficial. Para atingir os melhores resultados é então necessário dominar processo de transferência de rugosidade do cilindro para a tira, necessários à confecção do produto solicitado. Neste contexto são apresentados alguns estudos de transferência de rugosidade durante a laminação.

O trabalho de XIE; JIANG e YUEN (2011) afirma que além da proporção de redução da chapa, da velocidade de laminação e da espessura da chapa, a rugosidade inicial da chapa também interfere no fluxo do material durante a laminação. Geralmente, a rugosidade da tira laminada diminui com o aumento da redução. Além disso, cilindros de trabalho mais rugosos criam tiras mais rugosas. A maior dificuldade de se chegar a uma clara conclusão sobre os eventos que ocorrem durante a laminação é a falta de visualização das interações tribológicas entre a superfície e o cilindro.

BUSCH et al. (1987) estudaram a transferência de rugosidade durante a laminação de aço baixo carbono micro ligado e aço baixo carbono utilizando cilindros texturizados de duas diferentes maneiras: retificado por rebolo grosso e texturizados por jateamento de granalha. Durante o estudo, concluíram que a transferência da rugosidade equivale a um mecanismo de indentação e que materiais mais duros (chapa), para a mesma carga e velocidade de laminação apresentaram menor taxa de transferência da rugosidade do cilindro para a tira. Outra constatação foi que para manter a mesma taxa de transferência de rugosidade, utilizando cilindros de maior diâmetro, é necessário aumentar a carga de laminação. Além disto, a transferência de rugosidade depende da carga de laminação e da tensão vertical na “mordida do cilindro”. Logo, pequeno diâmetro de cilindro para uma mesma carga de laminação implica em menor comprimento de contato e tensão vertical na mordida muito maior.

Já que a textura superficial da chapa é obtida durante a laminação, o produto final apresenta a mesma textura superficial em ambos os lados da tira, caso os dois cilindros do par forem texturizados. Utilizando cilindros com rugosidades diferentes, pode-se transferir uma textura superficial diferenciada para a tira. Por exemplo, texturas com vales ou microcavidades podem ser impressas na tira para reter o lubrificante, diminuindo consequentemente o atrito

entre a peça e a ferramenta durante a estampagem, possibilitando assim uma estampagem mais profunda (CORTÊS, 2009).

Existem na atualidade inúmeras técnicas de texturização superficial (COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M., 2015). A seguir, mostram-se as técnicas mais utilizadas nas indústrias que trabalham com laminação a frio.

Cada técnica de texturização tem suas particularidades, apresentando diferentes resultados: distribuições de cavidades ou vales, faixas de rugosidade, densidades de picos, homogeneidade da tira e reprodutibilidade (SIMÃO et al., 1994; DEUTSCHER, 1995; SUN et al., 2006).

Na texturização por jato de granalha, esferas de granalha são atiradas por uma roda centrifugadora contra a superfície do cilindro de laminação. O impacto destas esferas inflige uma deformação local, provocando aparecimento de micro cavidades. Controlando a força, o diâmetro e a quantidade das esferas atiradas, pode-se conseguir a rugosidade final objetivada (DEUTSCHER, 1995).

Resultados obtidos por SUN et al. (2006) mostraram que para o método de texturização por jato de granalha ocorre uma grande variação da rugosidade, com esparsa e desigual distribuição da textura, a qual resulta em transferência da rugosidade menor que 70%.

Um dos métodos de texturização por feixe de laser utilizado na indústria laminadora consiste em um feixe de laser focado na superfície do cilindro, o qual passa por uma roda dentada que interrompe sua passagem intermitentemente. Em cada ponto iluminado ocorre a ablação localizada da superfície do material formando micro cavidades. A velocidade da roda dentada e o diâmetro do feixe a laser é que definem a rugosidade final da superfície do cilindro (SUN et al., 2006).

Os resultados da texturização por feixe de laser mostram que a transferência da rugosidade é em torno de 50% e que só é possível transferir 25% da altura dos picos formados, pois o mesmo fica achatado na extremidade superior (DEUTSCHER, 1995).

A vantagem deste processo é sua elevada homogeneidade superficial. Fazendo programações em um sistema micro processado é possível obter qualquer padrão de textura, inclusive desenhos. Novos sistemas de laser conseguem alterar formatos e dimensões das crateras formadas melhorando a taxa de transferência da rugosidade do cilindro. Porém, o custo do equipamento e o elevado tempo para texturização prejudicam o desempenho do processo (DEUTSCHER, 1995).

O método de texturização por descargas elétricas utiliza eletrodos posicionados longitudinalmente à superfície do cilindro, que fica imerso em um meio dielétrico. Descargas elétricas são induzidas entre o eletrodo (anodo) e o cilindro (catodo), provocando

eletroerosãoem sua superfície. A combinação da corrente, tensão e frequência de oscilação definem a condição final do cilindro texturizado(SIMÃO et al., 1994). A Figura 2.2mostra de forma esquemática o processo de texturização por descargas elétricas.

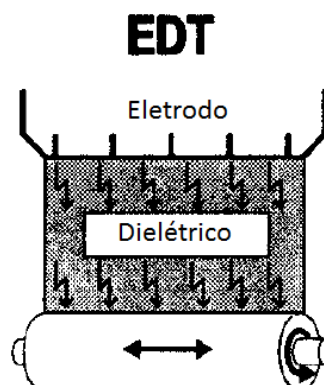


Figura 2.2 – Esquema do processo de texturização por descargas elétricas – adaptado de (PAWELSKI et al., 1994)

Verifica-se que a taxa de transferência de rugosidade é alta, em torno de 80% e a textura é bem homogênea e repetitiva. Além disso, após laminação de 1750 toneladas de material, ocorreu somente uma perda de rugosidade do cilindro em torno de 18% (SIMÃO et al., 1994).

O sistema apresenta maior homogeneidade quando aplicado em grandes áreas e boa repetibilidade se comparado com processo de texturização por jato de granalha. É possível alterar parâmetros de processamento como corrente/tensão dos eletrodos, ou até mesmo alterar o tipo de material do eletrodo para se obter a combinação rugosidade e densidade de picos desejados (CORTÊS, 2009). Entretanto este método produz somente texturas aleatórias enquanto que com o método a laser é possível prever a topografia final do cilindro.

2.3 – Cromo duro

O cromo duro é obtido por eletrodeposição a partir de uma solução contendo ácido crômico e um ânion catalisador(NEWBY, 1994).

Comercialmente existem três tipos de soluções para a deposição do cromo duro: convencional, catalisadores mistos e soluções livres de fluoretos.

Em todas as três diferentes soluções utiliza-se o trióxido de cromo (CrO_3) como fonte de cromo e os íons sulfetos (SO_4^{-2}) como catalisador. Para a solução com catalisadores mistos

utilizam-se como catalisador secundário íons de flúor e em soluções livres de fluoretos acrescenta-se uma espécie orgânica (NEWBY, 1994).

Antes da deposição do cromo duro é necessária a remoção de sujeira e filmes passivos. Para isto usa-se um procedimento de limpeza química. O ataque químico do metal antes da deposição assegura a adesão do revestimento (NEWBY, 1994).

O de deposição de cromo duro é composto por dois tanques de limpeza e um tanque de eletrodeposição. Inicialmente a limpeza é feita utilizando-se detergente alcalino para remoção de óleos e graxas. Em seguida, realiza-se a limpeza química para posterior deposição de cromo utilizando solução comercial. O tempo total gasto para o processo varia em função do diâmetro do cilindro, normalmente variando entre 9 e 17 minutos.

Em geral, a dureza do cromo duro varia entre 850 e 1100 kgf/cm² (NEWBY, 1994). A Tabela 2.1 detalha valores para o cromo duro de alguns estudos da literatura. Usualmente na indústria laminadora é utilizado um banho livre de fluoretos obtendo dureza entre 1100 e 1200 Kgf/mm².

Tabela 2.1 – Resultados de dureza do cromo duro encontrados na literatura.

Tipo de Solução	Dureza (Kgf/mm ²)	Fonte
Solução Convencional	600 – 1100	CHIU et al. (2002)
Solução Convencional	840 - 995	BOLELLI et al. (2006)
Solução Convencional	800 – 1200	EL-AMOUSH et al. (2011)
Livre de Fluoretos	1093 – 1150	DE MELLO; GONÇALVES JR e COSTA (2013)

Além de endurecer a superfície do cilindro, o revestimento de cromo duro deve preservar os parâmetros topográficos obtidos na texturização.

Para efeito comparativo, os autores SIMAO e ASPINWALL (1999) produziram 11 diferentes padrões de textura superficial com a técnica de texturização por descargas elétricas e posteriormente recobriram com cromo duro. Nomearam as diferentes texturas de A a K e realizaram medições dos parâmetros de topografia R_a e P_c após a texturização e após o recobrimento de cromo. O parâmetro P_c é definido pela ISO 4287 (1997) e representa o número médio de picos pelo comprimento de amostragem. Os dados para os parâmetros de rugosidade R_a e P_c com e sem recobrimento com cromo são mostrados na Figura 2.3 (a) e (b) respectivamente.

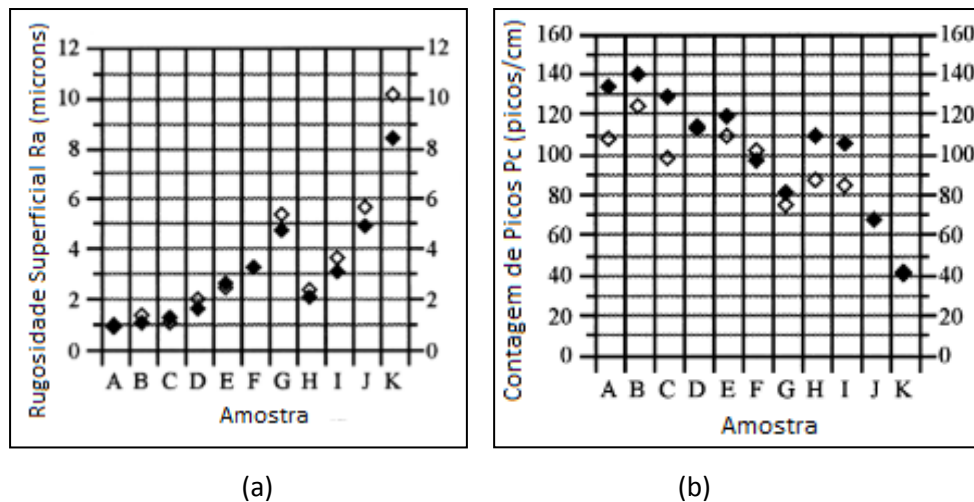


Figura 2.3– Variação dos parâmetros de rugosidade (a) R_a e (b) P_c em função do tipo de texturização. – Com revestimento de cromo \diamond – Sem revestimento de cromo \blacklozenge (SIMAO ;ASPINWALL, 1999).

Os resultados mostraram que a maioria das amostras com revestimentos de cromo duro apresentam valores um pouco maiores de rugosidade média da superfície, além de uma contagem de picos ligeiramente menor. A provável razão para esse fato deve-se ao detalhe de alguns picos e vales menores serem recobertos e “ocultados” pelo revestimento de cromo. Com as superfícies mais grosseiras, os picos e vales são maiores e mais amplos, o suficiente para acomodar a fina camada de cromo, conseguindo assim manter aproximadamente os mesmos valores de P_c , enquanto ocorre um pequeno aumento da rugosidade superficial R_a .

Alguns trabalhos mostram que a adição do revestimento de cromo duro em amostras de aço ferramenta AISI H13 não altera o coeficiente de atrito. Por exemplo, a Figura 2.4 compara os coeficientes de atrito de amostras revestidas e não revestidas utilizando ensaios tipo bloco sobre cilindro. Porém, as amostras revestidas com cromo duro sofreram uma flutuação do coeficiente de atrito, que foi apontada como início do ponto de colapso do revestimento, que com sua ruptura produz debris na área de contato. Além disso, o estudo mostra que o aumento da pressão de contato de 3,3 MPa para 11 MPa reduziu o coeficiente de atrito tanto para amostras revestidas com cromo duro quanto para amostras sem revestimento. Para pressões de contato de 3,3 a 7,2 MPa a taxa de desgaste para amostras revestidas foi de aproximadamente 0,28 mg/MPa, enquanto que para amostras sem revestimentos a taxa de desgaste foi de aproximadamente 6,15 mg/MPa (CHIU et al., 2002).

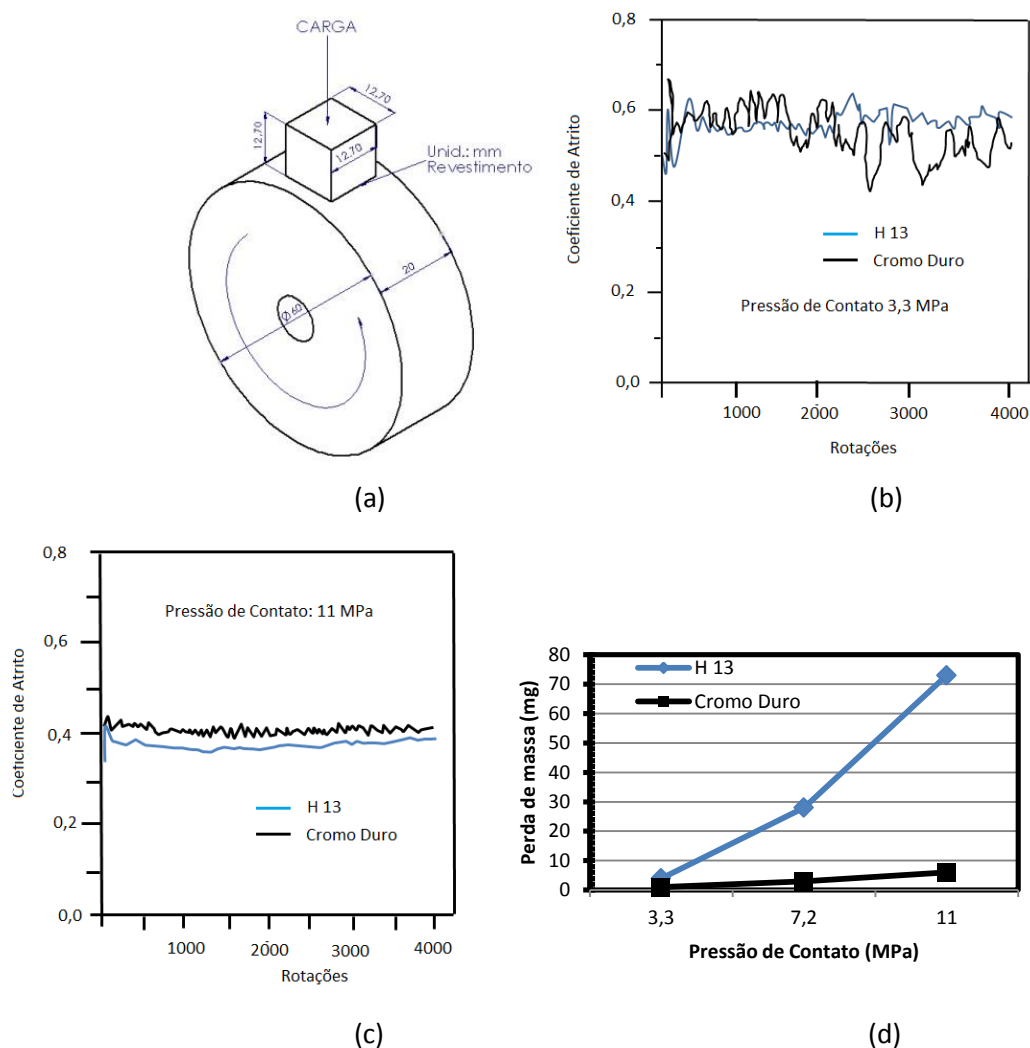


Figura 2.4 – Ensaio tipo bloco-sobre anel comparando cilindros revestidos e não revestidos: (a) Configuração do tribômetro; (b e c) coeficiente de atrito em função do número de rotações para pressões de contato de 3,3 MPa e 11 MPa; (d) taxa de desgaste; adaptado de (CHIU et al., 2002).

EL-AMOUSH et al. (2011) utilizaram um tribômetro pino sobre disco para avaliar o comportamento tribológico de revestimentos de cromo duro. Utilizou-se velocidade de deslizamento de 11 cm/s, carga de normal de 5 N, esferas de aço 1010 de 6 mm de diâmetro como contracorpos, diâmetro da pista de deslizamento de 5 mm e distância de deslizamento de 40, 80, 120 e 160 m. O revestimento de cromo duro reduziu o coeficiente de atrito em aproximadamente 9 vezes. Apesar de relatarem a redução do coeficiente de atrito, os autores não explicaram o motivo desta redução, apenas afirmaram que o revestimento age como lubrificante. Foram realizados testes para espessuras do revestimento de cromo de 0, 8, 13 e 18 μm . É possível observar na Figura 2.5 que entre cada espessura do revestimento o

comportamento do coeficiente de atrito foi adotado como linear pelos autores, o que pode levar a uma ligeira confusão na interpretação dos resultados.

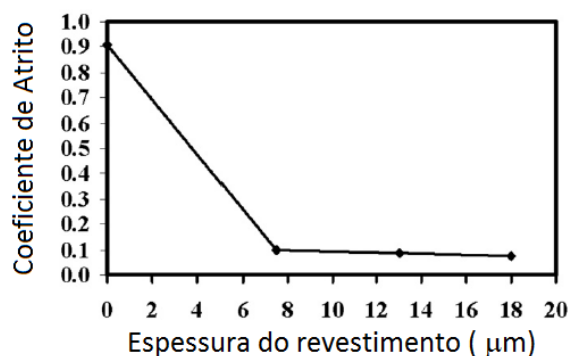


Figura 2.5 – Variação do coeficiente de atrito em função da espessura do revestimento de cromo duro (EL-AMOUSH et al., 2011).

DE MELLO; GONÇALVES JR e COSTA (2013) ensaiaram amostras de aço VC9 (utilizado pela indústria laminadora) em um tribômetro configurado para ensaios de deslizamento alternado com frequência de 2 Hz, pista de deslizamento de 10 mm, utilizando como contracorpo esferas de aço AISI 52100 e carga normal de 1 N por 1 h. Os ensaios foram conduzidos em amostras sem modificação superficial (SM), com revestimento de cromo duro (C), texturizadas por jateamento de granalha de aço (T) e texturizadas com posterior revestimento de cromo duro (TC). A vantagem do ensaio de deslizamento alternado utilizado é promover a inversão do sentido da força, assim como ocorre na operação de laminação. Para o sistema tribológico utilizado, não houve alteração significativa do coeficiente de atrito em função das diferentes modificações superficiais (Figura 2.6), de acordo com o também observado por (CHIU et al., 2002)

Apesar de não provocar diferenças significativas no coeficiente de atrito, o revestimento de cromo duro promoveu uma redução significativa no desgaste do contracorpo de AISI 52100, conforme pode ser observado qualitativamente na Figura 2.7 e quantitativamente na Figura 2.8 (DE MELLO; GONÇALVES JR; COSTA, 2013).

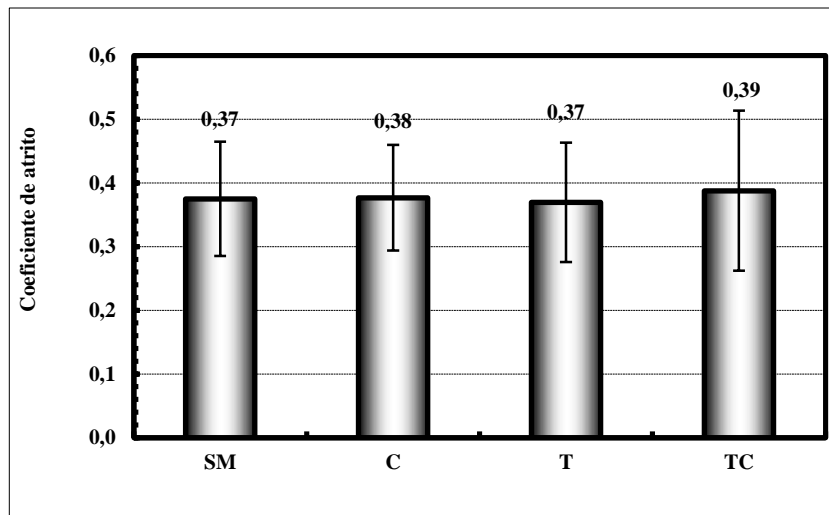


Figura 2.6– Variação do coeficiente de atrito em função de diferentes modificações superficiais: sem modificação superficial (SM), com revestimento de cromo duro (C), texturizadas por jateamento de granalha de aço (T) e texturizadas com posterior revestimento de cromo duro (TC)(DE MELLO; GONÇALVES JR; COSTA, 2013).

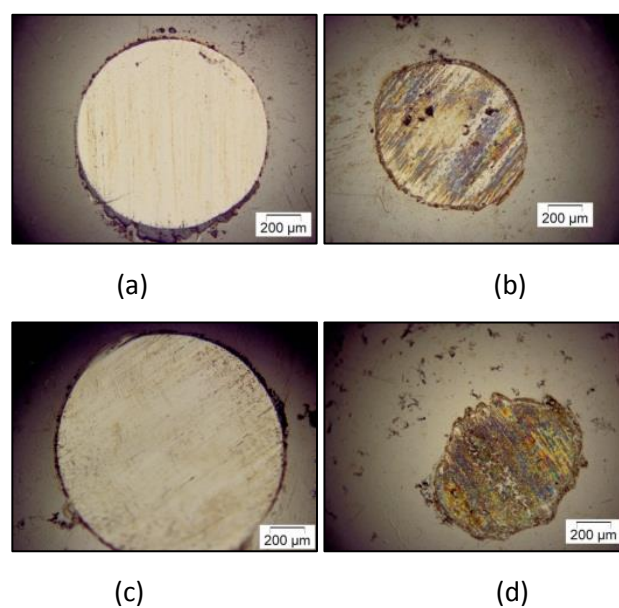


Figura 2.7 – Desgaste do contracorpo para diferentes modificações superficiais (a) Sem modificação superficial (b) revestida com cromo duro (c) texturizada (d) Texturizada com posterior revestimento de cromo duro (DE MELLO; GONÇALVES JR; COSTA, 2013).

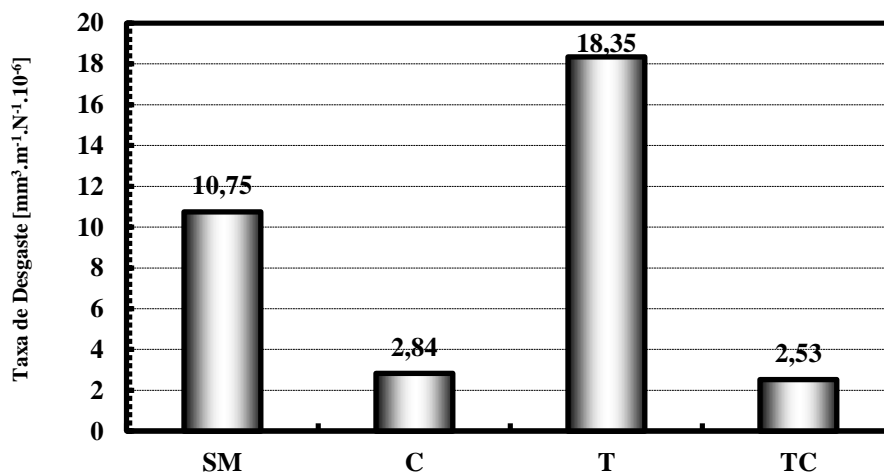


Figura 2.8– Taxa de desgaste em função das diferentes modificações superficiais (SM) Sem modificação superficial (C) revestida com cromo duro (T) texturizada (TC) Texturizada com posterior revestimento de cromo duro (DE MELLO; GONÇALVES JR; COSTA, 2013).

A adição do revestimento promoveu a formação de uma tribocamada no contracorpo constituída de cromo e oxigênio, enquanto em corpos sem o recobrimento de cromo duro ocorreu a formação de uma tribocamada constituída de ferro e oxigênio nas amostras, reduzindo o desgaste do contracorpo (Figura 2.7)(DE MELLO; GONÇALVES JR; COSTA, 2013). Além de proteger o contracorpo, a deposição de cromo duro mostrou-se eficaz para reduzir a taxa de desgaste do corpo.

2.4 – Níquel Químico

Ao submeter íons de níquel, contidos em uma solução de hipofosfito de níquel, a temperaturas próximas a 100°C, ocorre a redução do mesmo ao níquel metálico. Esta reação é autocatalítica e o níquel metálico contem átomos de fósforo (GUTZEIT ;MAPP, 1957).

O NiP é largamente utilizado devido à sua boa resistência à corrosão e ao desgaste, encontrando grande aplicação nas indústrias aeronáutica, automobilística, alimentícia, petrolífera, eletrônica e microeletrônica, principalmente por depositar-se sobre condutores e não condutores, produzindo camadas uniformes e com baixa porosidade (BAUDRAND, 1983).

O NiP é obtido pela redução de íons complexos de níquel tendo o hipofosfito de sódio como agente redutor, sem aplicação de corrente elétrica externa e havendo incorporação de fósforo. A deposição é inicialmente catalisada pela superfície do substrato, tornando-se posteriormente autocatalítica. Os banhos são geralmente ácidos com pH entre 4,5 e 5,0 e

operam entre 85°C e 90°C. No entanto, existem formulações de banhos alcalinos. A eficiência do agente redutor, hipofosfito de sódio, varia entre 20% e 40% e é função da razão entre a área das peças a serem revestidas e o volume do banho (MALLORY, 1979).

Na Figura 2.9 pode-se ver que a dureza é maior para o NiP com teores de fósforo inferiores a 5%. Para teores entre 5% P e 11% P a dureza diminui com o aumento do teor de fósforo (DUNCAN, 1981).

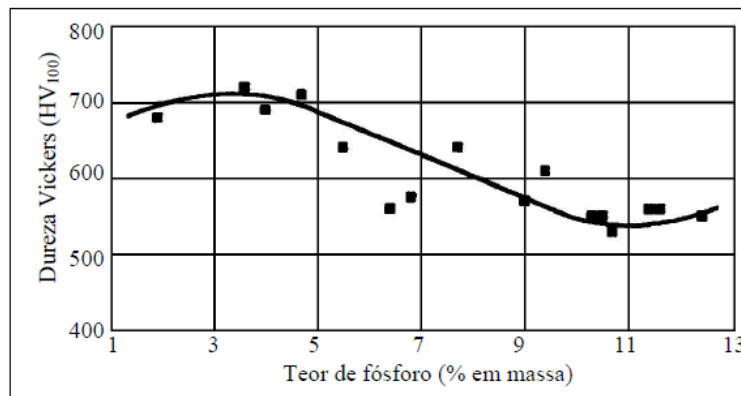


Figura 2.9– Efeito do teor de fósforo sobre a dureza do NiP sem tratamento térmico (DUNCAN, 1981).

Frequentemente, realiza-se tratamento térmico para melhorar a dureza do NiP, porém a dureza pode aumentar ou diminuir dependendo do teor de fósforo do revestimento, da temperatura e do tempo de tratamento. A Figura 2.10 mostra a microdureza Vickers (HV₁₀₀) do NiP, com teor de fósforo entre 10% e 11% e espessura entre 22 µm e 25 µm, em função da temperatura de tratamento por 1 h. Observa-se, a partir da Figura, que a realização do tratamento térmico a 200°C pouco contribui para aumentar a dureza do NiP. Acima de 200°C, a dureza aumenta rapidamente com o aumento da temperatura, chegando à dureza máxima quando tratado por volta de 400°C. Em temperaturas superiores a 400°C a dureza diminui com o aumento da temperatura de tratamento. Segundo BALARAJU e SESHADRI (1999), o aumento da dureza é devido à precipitação de Ni₃P e a redução da dureza é devido à conglomerção de Ni₃P.

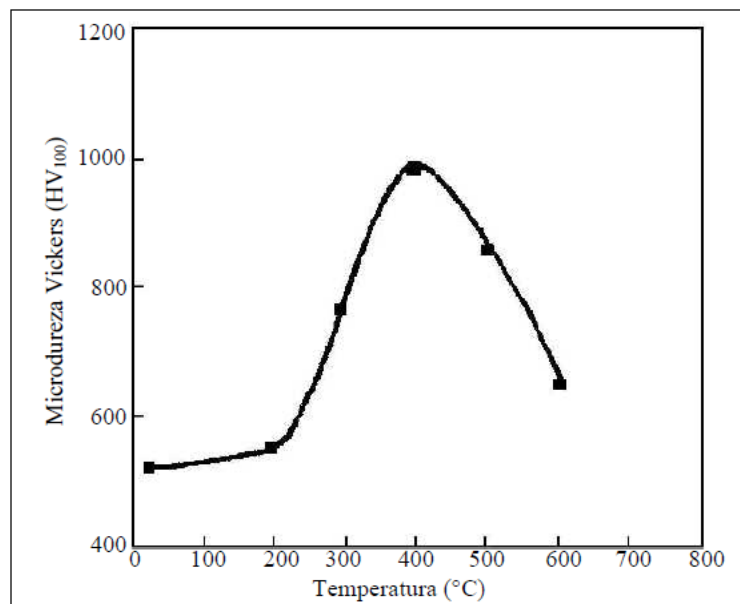


Figura 2.10 – Efeito do tratamento térmico sobre a microdureza do NiP(BALARAJU ;SESHADRI, 1999).

Em geral, a realização do tratamento térmico para aumentar a dureza reduz a ductilidade do NiP e vice-versa. Em muitas aplicações aconselha-se realizar um tratamento térmico abaixo de 300°C ou acima de 600°C e assim conciliar dureza e ductilidade. Tratamentos por volta de 200°C conferem ao NiP bom grau de ductilidade embora qualquer grande deformação ou tensão externa possa produzir trincas (PARKER, 1981).

TAHERI; OGUOCHA e YANNACOPOULOS (2001) avaliaram a topografia de amostras de aço ABNT 1018 revestidas com NiP, contendo teores de fósforo de 4,5; 7,5 e 11,3% e espessuras de 10, 20 40 e 60 μm . Após a deposição do revestimento as amostras foram submetidas a um tratamento térmico a 400°C por 1h. O substrato de aço 1018 foi preparado com rugosidade média (R_a) variando entre 0,05 e 2,49 μm . Os resultados mostraram que para valores de R_a do substrato inferiores a 0,3 o revestimento eleva a rugosidade média da superfície, ao passo que para valores entre 0,3 e 0,65 μm o revestimento reduz a rugosidade(TAHERI; OGUOCHA;YANNACOPOULOS, 2001).

Ao estudar o parâmetro topográfico R_a em função do efeito da espessura do revestimento notou-se que não houve diferença significativa (Figura 2.11). Nota-se nos resultados que o revestimento não altera a superfície e sim acompanha a topografia do substrato (TAHERI; OGUOCHA;YANNACOPOULOS, 2001).

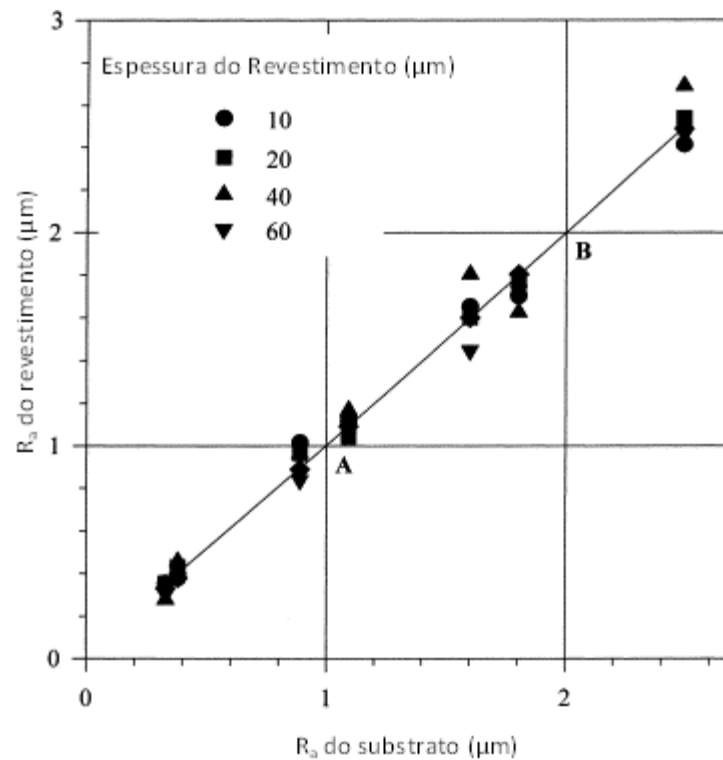


Figura 2.11– Comparação dos valores de R_a do revestimento e do substrato em função da espessura do revestimento (TAHERI; OGUOCHA;YANNACOPOULOS, 2001).

O efeito anterior é mais evidente na microscopia ótica mostrada na Figura 2.12, que mostra que o revestimento acompanha a ondulação da superfície (TAHERI; OGUOCHA;YANNACOPOULOS, 2001).

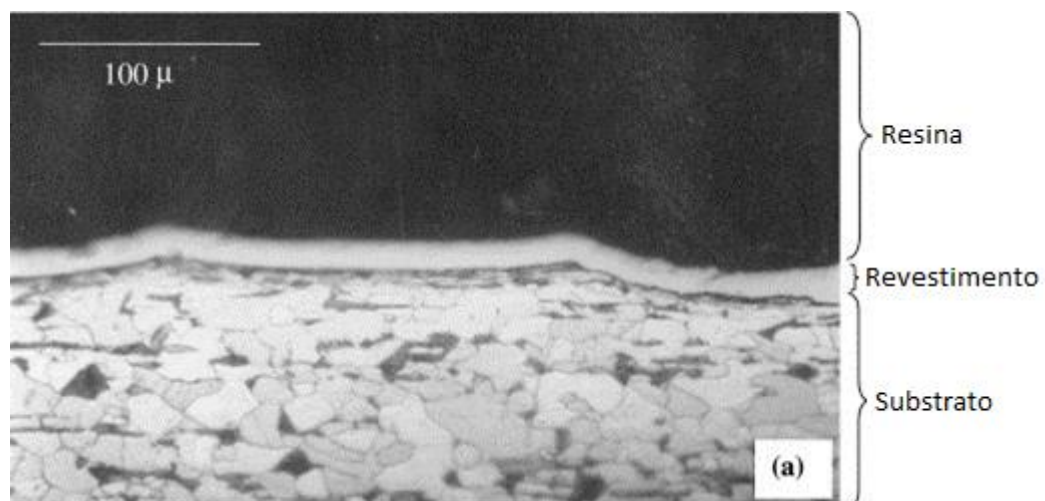


Figura 2.12– Microscopia ótica da seção transversal de amostra recoberta com NiP e $R_a = 2,46 \mu\text{m}$ (TAHERI; OGUOCHA;YANNACOPOULOS, 2001).

Atrito e desgaste foram estudados utilizando um tribômetro com a configuração de cilindro de contato transversal (Figura 2.13). Como contracorpo utilizou-se aço AISI 52100 (~750 HV, localizado na posição 5 da Figura), o substrato utilizado para o revestimento foi de aço AISI M2 temperado e revenido (~880HV), diâmetro de 60 mm, 159 rpm, velocidade de deslizamento de 0,5 m/s, carga normal de 2 a 35 N e duração de teste de 4 min a 30 h correspondendo a uma distância de deslizamento de 120 a 54.000 m. No trabalho foi avaliado o comportamento tribológico de amostras com o revestimento de NiP (577 Kgf/mm²), amostras com o revestimento com posterior tratamento térmico (974 Kgf/mm²) (NiP HT) e amostras apenas sem revestimento. A deposição do revestimento de NiP foi realizada por uma empresa espanhola utilizando soluções comerciais (RAMALHO ;MIRANDA, 2005).

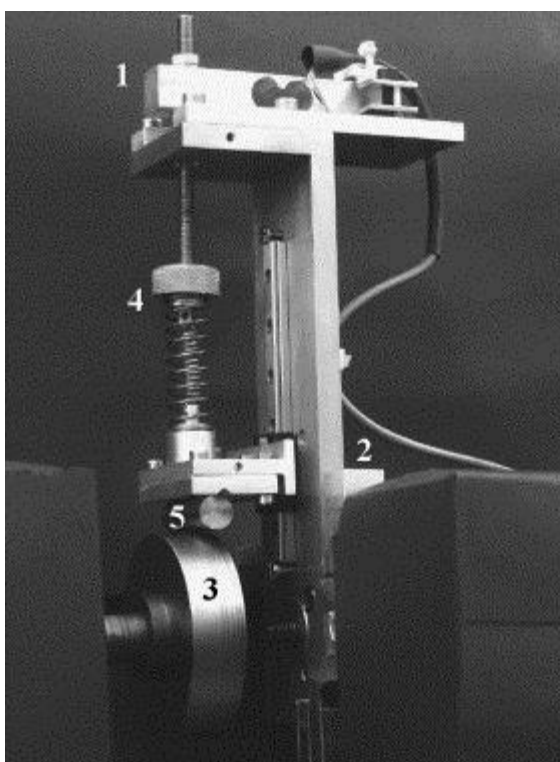


Figura 2.13 – Tribômetro com a configuração de cilindro de contato transversal (RAMALHO ;MIRANDA, 2005).

Notou-se no trabalho de RAMALHO e MIRANDA (2005) que não foi informado o teor de fósforo na solução bem como o tipo de tratamento térmico realizado após a deposição do revestimento. Os testes de microdureza revelaram que o tratamento térmico elevou a dureza das amostras. A elevação da dureza do revestimento após o tratamento térmico esta relacionada à formação de uma fina e dispersa fase dura de NiP e Ni₃P (RAMALHO ;MIRANDA, 2005). Durante os testes avaliou-se o coeficiente de atrito, Figura 2.14, e os resultados

mostraram que o revestimento de NiP elevou o coeficiente de atrito e o tratamento térmico após o revestimento não revelou alteração nos valores (RAMALHO ;MIRANDA, 2005).

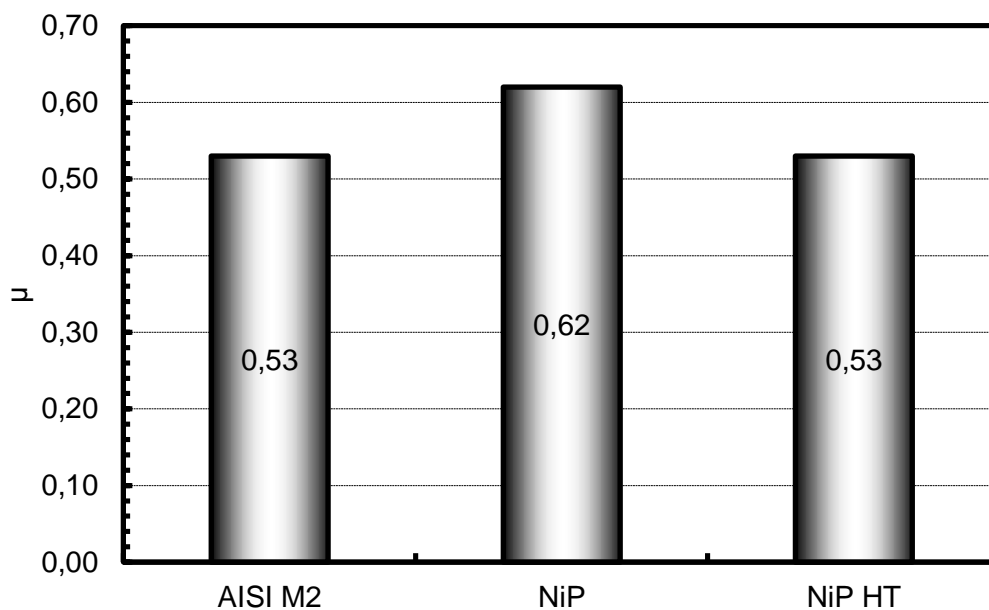


Figura 2.14– Variação do coeficiente de atrito em função das modificações superficiais (RAMALHO ;MIRANDA, 2005).

Os resultados referentes à taxa de desgaste mostraram que o tratamento térmico elevou a resistência ao desgaste das amostras (Figura 2.15).

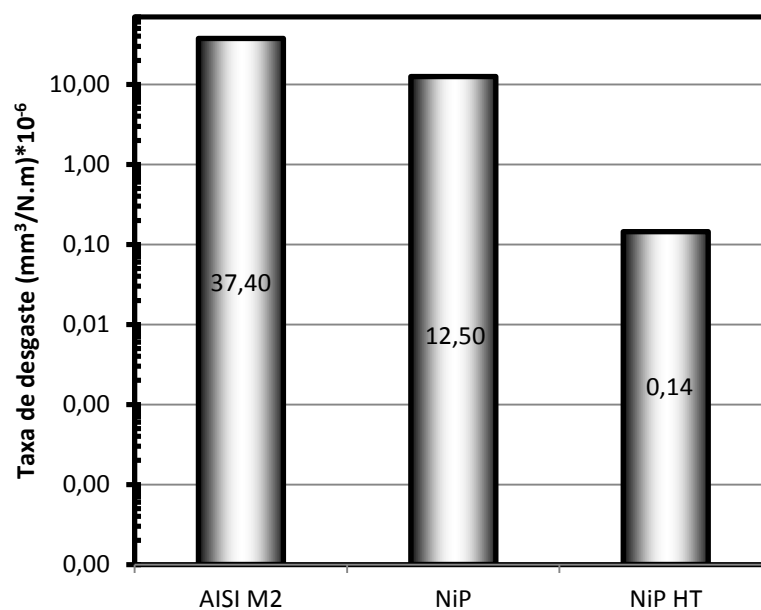


Figura 2.15– Taxa de desgaste em função do tipo de modificação superficial.

A análise da marca de desgaste, Figura 2.16, revelou que para amostras sem tratamento térmico ocorreu um deslocamentodo revestimento nas bordas da trilha, revelando uma fraca adesão do revestimento (RAMALHO ;MIRANDA, 2005).

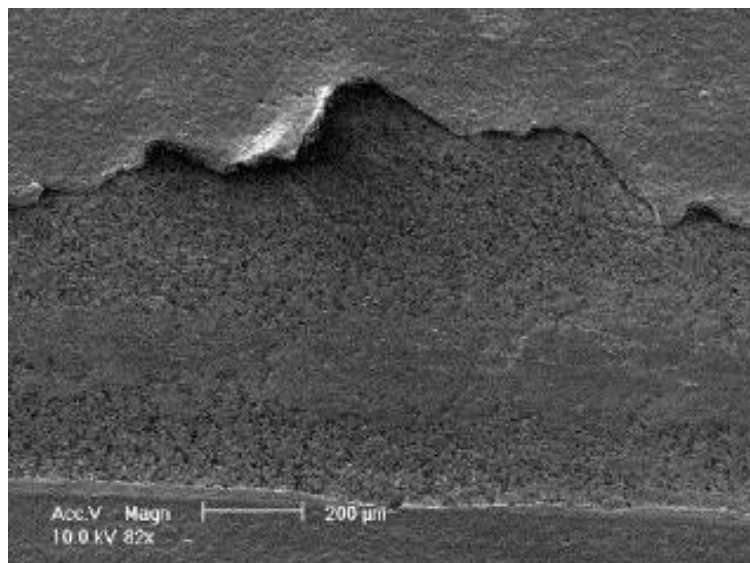


Figura 2.16– Microscopia eletrônica de varredura na trilha de desgaste de amostras revestidas com NiP(RAMALHO ;MIRANDA, 2005).

Já em amostras com revestimento de NiP com posterior tratamento térmico (Figura 2.17) a análise da trilha revelou que o tratamento térmico, além de elevar a dureza superficial do revestimento, também proporciona um aumento na adesividade do mesmo, melhorando o comportamento ao desgaste (RAMALHO ;MIRANDA, 2005).

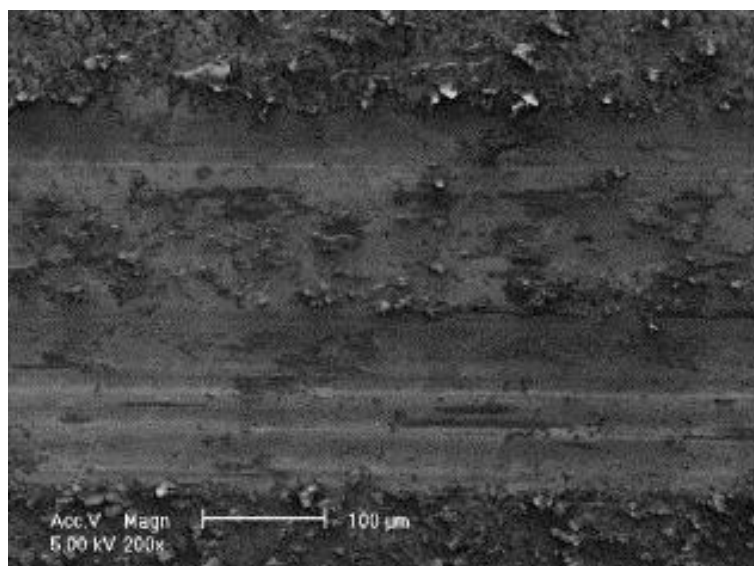


Figura 2.17– Microscopia eletrônica de varredura na trilha de desgaste de amostras revestidas com NiP com posterior tratamento térmico (RAMALHO ;MIRANDA, 2005).

2.5 – Nitretação a plasma

Segundo CHAPMAN (1980), o plasma frio é um gás parcialmente ionizado, ou seja, possui o mesmo número de cargas positivas e negativas, e quantidade diferente de átomos ou moléculas neutras não ionizadas. Estes plasmas possuem um grau de ionização em torno de 10^{-4} a 10^{-5} , isto é, 1 íon para cerca de 10 a 100 mil átomos ou moléculas neutras. Com a utilização do plasma a baixa temperatura é possível reduzir custos relativos a equipamentos possibilitando o uso em escala industrial.

As pesquisas envolvendo a tecnologia de plasma, com ênfase na nitretação, apresentam especial destaque no desenvolvimento e aprimoramento das propriedades dos materiais empregados em componentes mecânicos.

O uso de plasma para a nitretação é uma técnica de endurecimento superficial muito difundida na Europa e EUA e utilizada por grandes companhias como a Rolls-royce, Pilkington, Volkswagen, Peugeot, Citroën e Renault, através de seus fornecedores (BINDER, 2006). Ela 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 e menor consumo de gás.

BINDER (2006) validou um equipamento, mostrado na Figura 2.18, que tem como principais características, aquecimento auxiliar resistivo dividido em três zonas controladas independentemente, o volume útil para tratamento de 800 mm de diâmetro por 1500 mm de altura, temperatura máxima de trabalho de 650°C, total controle dos parâmetros do processo (taxa de aquecimento, tipo e porcentagem de gases, energia de plasma, potencial de plasma no suporte de tratamento e pressão de trabalho).

O processo validado por BINDER (2006) tem como vantagem a utilização de uma descarga luminescente anormal, onde a corrente é elevada proporcionalmente à tensão e tem como principal característica o envolvimento uniforme pelo plasma em todo o cátodo, possibilitando com isto um tratamento homogêneo de materiais. Já o processo com descarga luminescente normal inviabiliza processamento de vários materiais devido à não uniformidade do plasma.

A descarga luminescente anormal é uma forma de plasma frio, ou pouco ionizado, e permite a aplicação de energia sobre a superfície de materiais promovendo o seu aquecimento sob baixa pressão e atmosfera controlada. Nas pressões típicas de trabalho, íons fortemente acelerados neste campo dão origem a um fluxo contínuo de partículas, neutras e ionizadas, que bombardeiam o cátodo com alta energia promovendo aquecimento e reações no mesmo. Destes impactos, entre outros fenômenos, resultam elétrons ejetados que, por sua carga negativa, são repelidos pelo campo elétrico e acelerados ao encontro de átomos ou moléculas

neutras do gás, produzindo novos fenômenos de ionização que auxiliam na manutenção da descarga. Além disso, são também responsáveis pelos fenômenos de excitação/relaxação que conferem luminescência ao plasma (JONES et al., 1975).



Figura 2.18– Reator de nitretação a plasma em nível industrial (BINDER, 2006).

O processo de nitretação por plasma tem por objetivo modificar as propriedades químicas, mecânicas e tribológicas da superfície e da sub superfície da peça através da formação de uma camada de nitretos. Durante o processo, a peça é submetida a uma descarga elétrica, numa mistura de gases contendo nitrogênio, a baixa pressão, de modo que o cátodo da descarga seja a própria peça a ser tratada. Com a descarga, elétrons são acelerados formando uma série de espécies químicas, principalmente íons de nitrogênio. Estes íons são acelerados na direção do material devido à aplicação de um campo elétrico negativo nas peças

a serem tratadas, e possuem energia suficiente para produzir a ativação e a nitretação da superfície da peça.

O processo de nitretação a plasma é mostrado na representação esquemática proposta por ECHEVERRIGARAY; BAUMVOL e FIGUEROA (2006) na Figura 2.19.

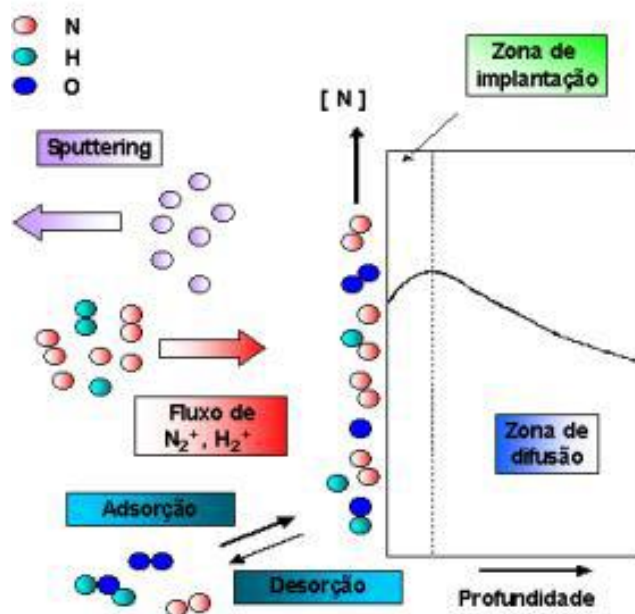


Figura 2.19 – Esquema do processo de nitretação (ECHEVERRIGARAY; BAUMVOL;FIGUEROA, 2006).

Os elementos de liga presentes nos aços contribuem consideravelmente na modificação das propriedades obtidas após o tratamento de nitretação. Os elementos que apresentam maior influência na formação da camada nitretada são aqueles com maior afinidade química com o nitrogênio, tais como Al, Ti, Cr, Mo, Si, Mn e V.

Quando ocorre a nitretação a plasma de aço pode ocorrer a formação da fase γ' , da fase ϵ , a mistura das duas ou nenhuma.

A fase γ' (Cúbica de Face Centrada) está presente numa pequena faixa estequiométrica do diagrama de equilíbrio Fe-N, situando-se entre 5,7 e 6,11% em peso de nitrogênio a 450°C, e com estabilidade térmica até 680°C.

A fase ϵ (Hexagonal Compacta) pode apresentar nitrogênio em uma faixa ampla, dissolvendo no máximo cerca de 11,10%, em peso, para temperaturas inferiores a 500°C. O menor limite de solubilidade de nitrogênio nesta fase foi encontrado a 700°C, sendo inferior ao encontrado na fase γ' (**Metals handbook**, 1973).

Ambas as fases apresentam fraca adesão uma em relação à outra, e ainda possuem diferentes coeficientes de expansão térmica. Deste modo, camadas que são invariavelmente

espessas ou que são submetidas a variações de temperatura em serviço estão sujeitas a falhas, sendo indesejável a presença simultânea das fases (DIETER, 1988).

MALISKA; KLEIN e DE SOUZA (1995) nitretaram amostras de Fe-1,5%Si. A nitretação ocorreu a 540°C, 399,97 Pa, 440-470V, mistura de gás de 25% H₂ e 75% de N₂ e tempos de nitretação de 1, 2, 4, 8 e 16 h e os resultados mostraram que a profundidade da zona de difusão aumenta com o tempo, a camada nitretada aumenta no início do processo e depois se estabiliza. Este fenômeno ocorre devido à elevada concentração de átomos de ferro no início do processo, ocasionando a imediata formação de elevada quantidade de nitretos. Com o andamento do processo ocorre o equilíbrio entre a concentração de átomos de ferro e nitretos, reduzindo a velocidade de formação da camada (Figura 2.20).

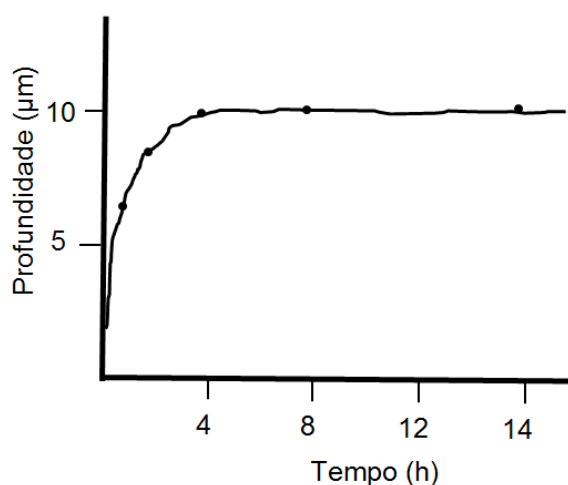


Figura 2.20 – Crescimento da camada nitretada(MALISKA; KLEIN;DE SOUZA, 1995).

Nota-se que para os parâmetros utilizados no estudo dos autores MALISKA; KLEIN e DE SOUZA (1995) não existe diferença significativa na espessura da camada nitretada para os tempos de nitretação de 4 e 14 h.

PODGORNIK; VIŽINTIN e LESKOVŠEK (1998) nitretaram a plasma amostras de aço AISI 4140 utilizando plasma convencional e plasma pulsado. Antes da nitretação o substrato foi temperado e revenido. A Tabela 2.2 mostra os parâmetros utilizados pelos autores. Nota-se na tabela que a elevação da concentração de nitrogênio de 0,6 para 25% na câmara de nitretação altera a profundidade da camada nitretada de 0,3 para 0,5 mm.

Apresenta-se no estudo que além de aumentar a profundidade da camada nitretada a concentração de nitrogênio também eleva a dureza superficial conforme pode ser observado na Figura 2.21 (PODGORNIK; VIŽINTIN;LESKOVŠEK, 1998).

Tabela 2.2 – Parâmetros das modificações superficiais utilizados no aço AISI 4140 (PODGORNIK; VIŽINTIN;LESKOVŠEK, 1998).

	Tratamento	Atmosfera	Temp. (°C)	Pressão (KPa)	Tempo (h)	Prof. (mm)
A	Tempera	Óleo	870/650	-	2/3	
B	Nitretação a plasma pulsado	99,4% H ₂ - 0,6% N ₂	540	0,254	17	0,3
C		75% H ₂ - 25% N ₂	540	0,289	28	0,5
D	Nitretação a plasma	99,4% H ₂ - 0,6% N ₂	540	0,254	17	0,3
E		75% H ₂ - 25% N ₂	540	0,289	28	0,5

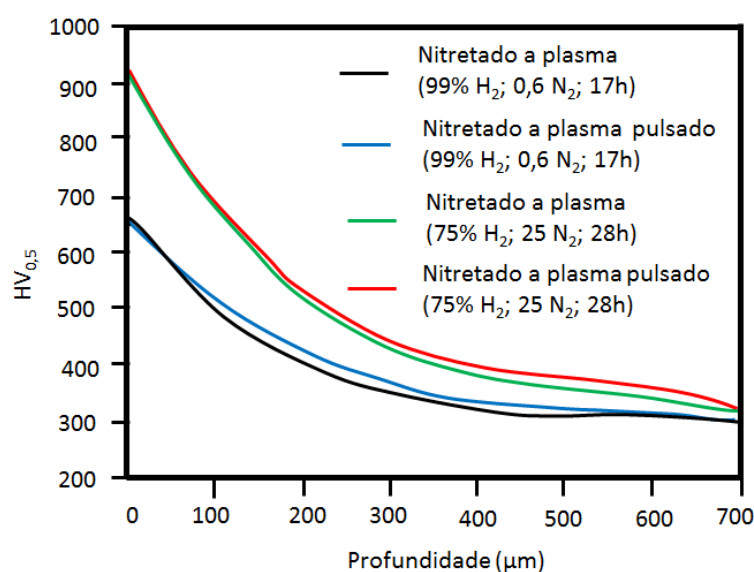


Figura 2.21– Variação da microdureza de amostras nitretadas em função do tipo de nitretação e da profundidade adaptado de (PODGORNIK; VIŽINTIN;LESKOVŠEK, 1998).

Os valores de microdureza superficial revelaram que a elevação do tempo de nitretação elevam a dureza superficial das amostras. No caso do plasma pulsado a elevação foi de 705 HV_{0,5} para 970 HV_{0,5}. Com relação às amostras nitretadas o aumento foi de 705 HV_{0,5} para 935 HV_{0,5}. Porém a utilização do plasma pulsado mostrou maior dispersão nos valores de microdureza(PODGORNIK; VIŽINTIN;LESKOVŠEK, 1998). A Figura 2.22 mostra os resultados de dureza em função do tipo de nitretação utilizado.

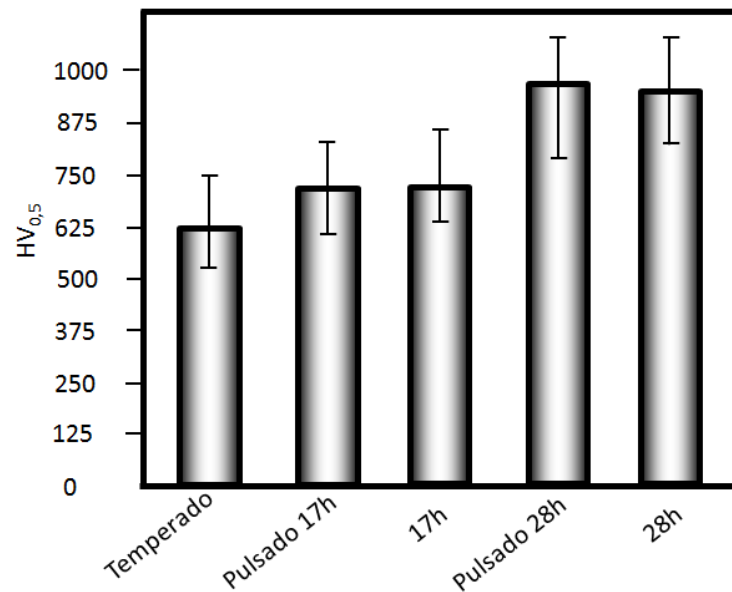


Figura 2.22– Variação dos valores de microdureza em função do tipo de nitretação adaptado de (PODGORNIK; VIŽINTIN;LESKOVŠEK, 1998).

Em relação às variações topográficas causadas pela nitretação, foi usado um perfilômetro para medir a topografia superficial após a nitretação a plasma e nitretação a plasma pulsada(PODGORNIK; VIŽINTIN;LESKOVŠEK, 1998). Após a nitretação ambos os parâmetros, a rugosidade média (R_a) e a máxima distancia de vale a pico (R_{max}), aumentaram em comparação com a superfície original. O grau de aumento da rugosidade superficial variou em função das condições de nitretação. A rugosidade média da superfície original foi de aproximadamente $0,35 \mu\text{m}$, a qual foi alterada para aproximadamente $0,65 \mu\text{m}$ após a nitretação com 94% H_2 – 0,6% N_2 por 17 h. Aumentando o tempo de nitretação, ocorreu um aumento da rugosidade média para $1,3 \mu\text{m}$. Em comparação com a nitretação a plasma, o plasma pulsado causa aproximadamente o mesmo aumento na rugosidade média, conforme ilustrado na Figura 2.23. A diferença na rugosidade média superficial após nitretação a plasma e nitretação a plasma pulsado foi menor que 1%.

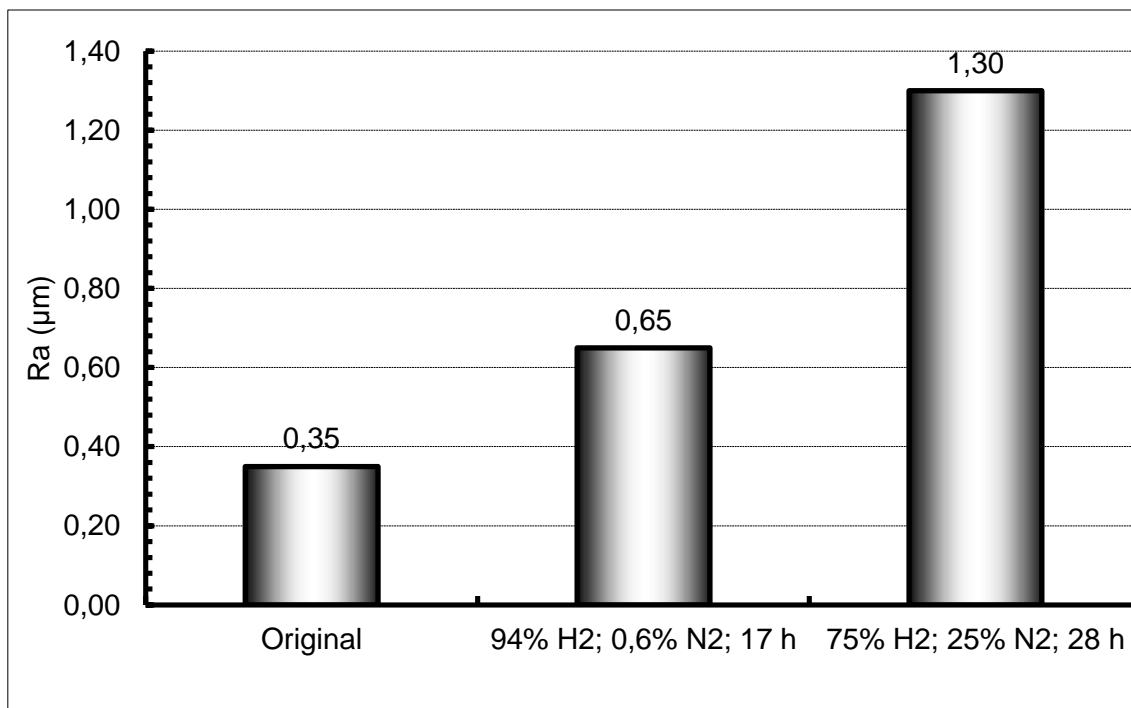
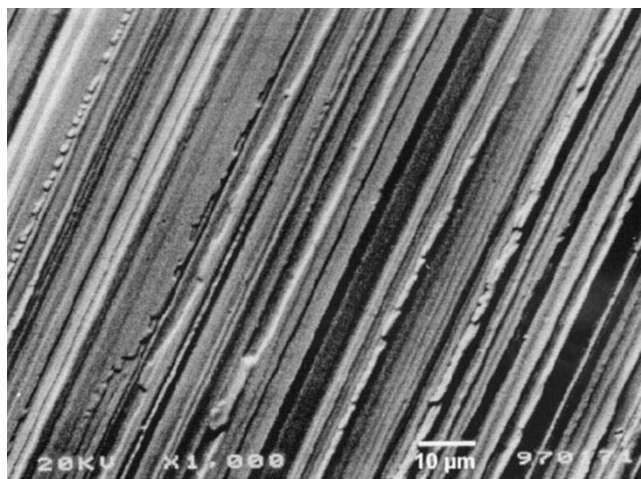


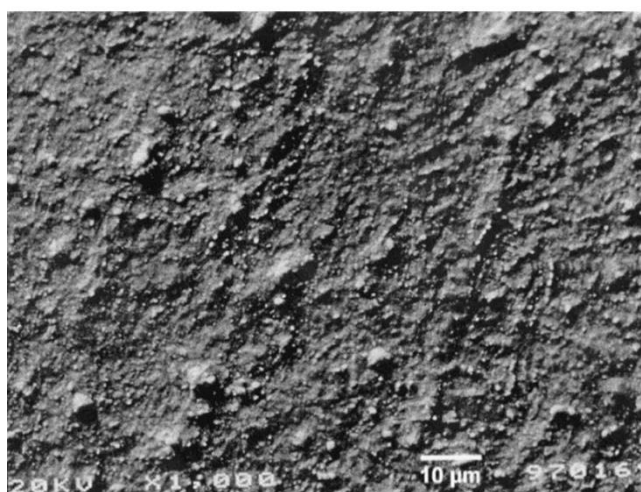
Figura 2.23 – Variação da rugosidade em função do tipo de nitretação (PODGORNIK; VIŽINTIN; LESKOVŠEK, 1998).

A Figura 2.24 mostra a imagem obtida via microscopia eletrônica de varredura de amostra temperada, nitretada a plasma e nitretada a plasma pulsado sob mesmas condições de nitretação. Observa-se que nas amostras nitretadas ocorreu a formação de pequenas asperidades acompanhadas de algumas maiores. Ao comparar amostras nitretadas a plasma e a plasma pulsado nota-se que o plasma pulsado reduz o número de asperidades, mas aumenta o tamanho das mesmas. Em função disso, os valores da rugosidade média de amostras nitretadas a plasma pulsado possuem maior dispersão.

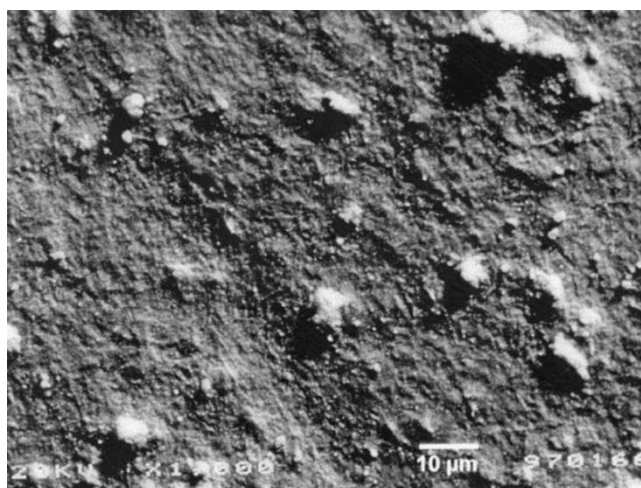
O comportamento tribológico das amostras nitretadas foi estudado por PODGORNIK; VIŽINTIN e LESKOVŠEK (1998), que realizaram testes de deslizamento (pino sobre disco) conforme configuração mostrada na Figura 2.25(a). Os pinos (corpo) sofreram as modificações superficiais citadas anteriormente e o contracorpo utilizado foi fabricado a partir de Aço AISI O2 (~700HV). Não foram utilizados lubrificantes, o substrato foi de aço AISI 4140, a velocidade de deslizamento foi de 1 m/s sob cargas normais de 60, 80 e 100 N durante 30s a 30 minutos, dependendo do tipo de ensaio. Após um período de instabilidade inicial, o coeficiente de atrito variou entre 0,25 e 0,3 em função das diferentes formas de nitretação, mostrado na Figura 2.25 (b) (PODGORNIK; VIŽINTIN; LESKOVŠEK, 1998).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.24 – Microscopia eletrônica de varredura em amostras (a) antes da nitretação (b) nitretadas a plasma (c) nitretadas a plasma pulsado (PODGORNIK; VIŽINTIN; LESKOVŠEK, 1998).

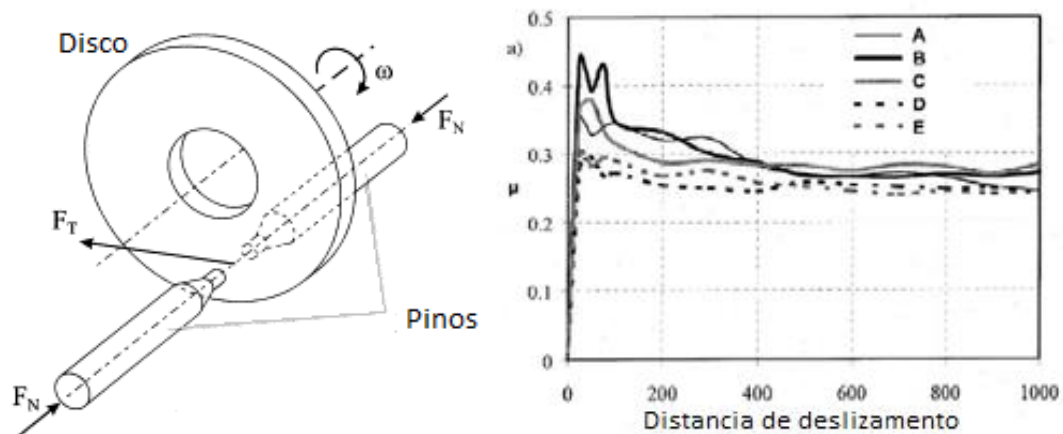


Figura 2.25 –(a)Configuração do ensaio pino disco (b) variação do coeficiente de atrito em função dos parâmetro de nitretação adaptada dePODGORNIK; VIŽINTIN e LESKOVŠEK (1998).

O desgaste foi mensurado pela alteração do comprimento do par de pinos. A Figura 2.26mostra a relação entre o comprimento dos pinos desgastados e a distância de deslizamento para as diferentes modificações superficiais sob velocidade de deslizamento de 1 m/s e carga normal de 80 N. Pode ser observado um desgaste inicial muito baixo, mas uma transição abrupta após tempos relativamente curtos. A curva foi dividida em regime de desgaste médio no início do teste e regime de desgaste severo no final do teste(PODGORNIK; VIŽINTIN;LESKOVŠEK, 1998).

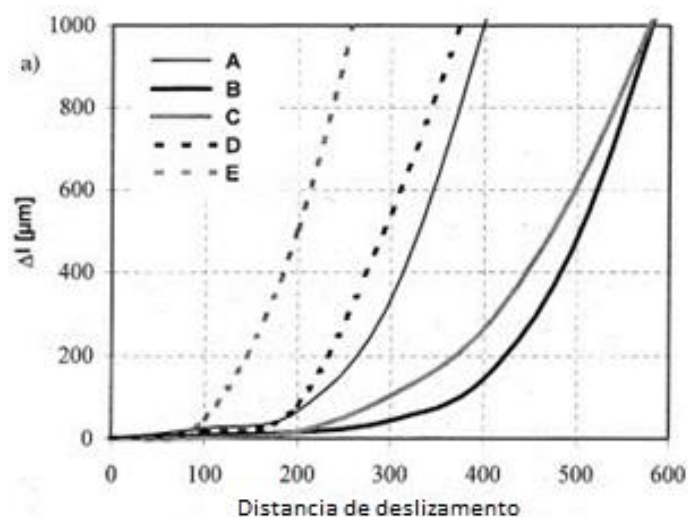


Figura 2.26– Relação entre o comprimento dos pinos desgastados e a distância de deslizamento(PODGORNIK; VIŽINTIN;LESKOVŠEK, 1998)..

A Figura 2.27mostra o desgaste sofrido pelos pinos em função da carga normal após 100 m de deslizamento, onde o desgaste aumentou com a elevação da carga normal para todas as modificações superficiais(PODGORNIK; VIŽINTIN;LESKOVŠEK, 1998).

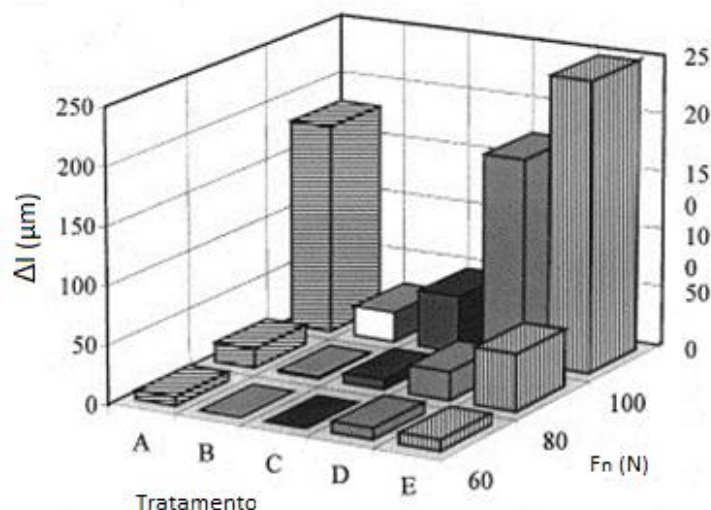


Figura 2.27– Desgaste dos pinos em função da carga normal após 100 m de deslizamento(PODGORNIK; VIŽINTIN;LESKOVŠEK, 1998).

Para amostras nitretadas a plasma e nitretadas a plasma pulsado com atmosfera pobre em nitrogênio ocorreu uma redução do desgaste em comparação com amostras temperadas. Ao se comparar amostras nitretadas a plasma e nitretadas a plasma pulsado nota-se que o plasma pulsado possui melhor resistência ao desgaste. Porém, a elevação da espessura da camada nitretada provoca um comportamento anômalo gerando uma camada de compostos no contato elevando o desgaste dos pinos.

Segundo KARAMIŞ (1991)sob deslizamento a seco com amostras nitretadas o aumento da espessura da camada nitretada eleva o desgaste devido à formação de uma estrutura porosa e frágil na camada.

A ruptura dos picos mais frágeis dá origem a debris abrasivos que permanecem na região do contato elevando o desgaste (PODGORNIK; VIŽINTIN;LESKOVŠEK, 1998).

Figura 2.28 mostra a topografia característica de um pino nitretado a plasma (99,4% H₂ - 0,6% N₂ por 17 h), bem como o disco (contracorpo), depois de um ensaio de deslizamento a uma velocidade de 1 m/s, carga de 100 N e deslizando a uma distância de 300 m. Nota-se que o mecanismo de desgaste predominante é o desgaste adesivo, que foi encontrado em todas as amostras com superfície nitretada. Dentro da região observada, a mudança da carga não causou uma mudança no mecanismo de desgaste, mas apenas provocou uma mudança na intensidade de desgaste. No entanto, a presença de uma camada de compostos (aumento da espessura) provocou o aparecimento de um componente de desgaste por abrasão, que está de acordo com a tese de que a camada de compostos quebra durante os testes de deslizamento e

forma partículas abrasivas. O mecanismo de desgaste predominante, a adesão, também foi confirmado pelo aparecimento de resíduos de desgaste formados durante os testes (PODGORNIK; VIŽINTIN; LESKOVŠEK, 1998).

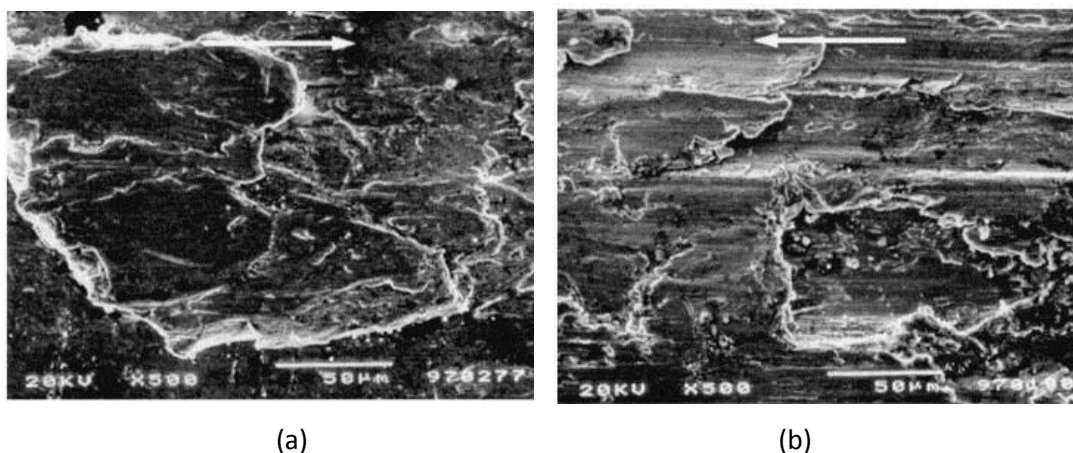


Figura 2.28 – Microscopia eletrônica de varredura na marca de desgaste de amostras nitretadas (a) disco (b) pino (PODGORNIK; VIŽINTIN; LESKOVŠEK, 1998).

Em resumo, essa revisão mostrou que o revestimento de níquel químico apresentou dureza inferior ao revestimento de cromo duro. Porém, ao realizar tratamento térmico em revestimentos de NiPé possível obter valores próximos aos do revestimento de cromo duro. Além disto, os estudos encontrados mostraram que o revestimento de NiP não altera significativamente a topografia superficial do substrato tem potencial de elevar a resistência ao desgaste. Porém, nos trabalhos revisados, o revestimento de NiP apresentou maiores valores de coeficiente de atrito que o cromo duro. Já o processo de nitretação a plasma, apesar de alterar significativamente a topografia superficial, possui dureza e propriedades tribológicas aparentemente desejáveis no processo de laminação a frio. Dessa forma, o revestimento de NiP e a nitretação a plasma foram selecionados no presente trabalho como possíveis candidatos para a substituição do cromo duro na indústria de laminação.

CAPÍTULO III

Procedimentos Experimentais

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Tribologia e Materiais, do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como objetivo de estudar possíveis substitutos para o revestimento de cromo duro usado em cilindros de laminação a frio. Para que fosse possível o levantamento de uma metodologia experimental adequada de caracterização tribológica de cilindros de laminação, identificou-se inicialmente a necessidade da determinação dos mecanismos de desgaste que ocorrem em cilindros de laminação reais. Porém, em função das grandes dimensões e do elevado custo de cilindros de laminação, não foi possível a coleta de amostras reais, tornando-se necessário o uso da técnica de replicação. O uso de réplicas permitiu a análise indireta das superfícies desgastadas dos cilindros via interferometria a laser e microscopia eletrônica de varredura.

Com a determinação dos principais mecanismos de desgaste atuantes na aplicação pretendida, realizaram-se pré-testes de desgaste em amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro usando contracorpo esférico e cilíndrico, para tentar reproduzir superfícies desgastadas similares às superfícies das réplicas.

Após a determinação dos parâmetros tribológicos a serem utilizados nos ensaios, realizaram-se testes em amostras com diferentes revestimentos/modificações superficiais que fossem possíveis candidatos à substituição do cromo duro em cilindros de laminação: NiP e nitretação a plasma. Como referência, também foram realizados testes em amostras com revestimento de cromo duro, além de amostras sem modificação, que pudessem representar um cilindro somente retificado. Como estes revestimentos muitas vezes são aplicados em cilindros previamente texturizados, todos os revestimentos/modificações foram aplicados tanto em amostras retificadas quanto em amostras texturizadas.

A seguir são mostrados os detalhes de cada processo etapa do trabalho.

3.1 – Caracterização das réplicas

As réplicas foram enviadas do centro de pesquisa de cilindros de laminação a frio da empresa Gerdau. O material utilizado foi o ZhermackColorbite D, o qual havia sido previamente validado por LEITE et al. (2011).

As réplicas foram obtidas a partir de cilindros de trabalho de quatro diferentes laminadores do país. Os laminadores 1 e 2 possuem tandem de 5 cadeiras e os laminadores 3 e 4 possuem tandem de 4 cadeiras.

A Tabela 3.1 resume as diferentes modificações superficiais presentes em cada cilindro.

Tabela 3.1 – Diferentes modificações superficiais presentes em cada cadeira (J = Jateamento; C = Revestimento de cromo duro; EDT = Texturização por descargas elétricas; R = Retificado).

	Laminador 1	Laminador 2	Laminador 3	Laminador 4
	Modificações Superficiais			
Cadeira 1	J e C	R e C	R	R e C
Cadeira 2	R e C	R e C	R	R e C
Cadeira 3	R e C	R e C	R	R e C
Cadeira 4	R e C	R	J	EDT e C
Cadeira 5	EDT e C	EDT		

A caracterização topográfica das réplicas foi realizada via interferometria a laser 3D utilizando-se um equipamento marca UBM, modelo MESSTECHNIK MICROFOCUS4.

Para iniciar as medições via interferometria 3D, primeiramente foram selecionados os parâmetros de medição (área de medição, densidade de pontos na direção x, densidade de pontos da direção y, taxa de medição e modo de medição). Usou-se uma densidade de pontos de 1000 x 100 pontos nas direções de movimentação do sensor (x) e perpendicular (y), respectivamente. A taxa de medição foi de 300 pts./s e o modo de medição foi contínuo.

Para a avaliação dos mecanismos de desgaste ocorridos no cilindro de laminação, bem como para a avaliação das modificações superficiais, as medições foram realizadas em áreas de 5 x 5 mm.

Após a realização das medições, foram realizadas análises das imagens utilizando o *software* Digital Surf MountainsMap Universal®, versão 3.0.

Vale ressaltar que os materiais de réplicas invertem a topografia original do cilindro, de forma que obtém-se uma imagem negativa da topografia superficial real do cilindro. Após a caracterização topográfica das réplicas via interferometria a laser, foi utilizada uma função do

software que promove o espelhamento em relação ao eixo z, de forma a obter-se uma imagem que correspondesse à superfície real do cilindro.

Para a quantificação da topografia das superfícies, o presente trabalho utilizou parâmetros topográficos tridimensionais. Os parâmetros tridimensionais, são bem conhecidos da literatura e definidos pela Comissão da Comunidade Europeia (STOUT et al., 1993; STOUT, 2000). Os parâmetros tridimensionais são extrapolações dos parâmetros bidimensionais definidos pela norma ISO 4287 (1997). Enquanto os parâmetros bidimensionais são quantificações do perfil de rugosidade, os parâmetros tridimensionais são definidos em comparação ao plano médio da superfície e calculado através do nivelamento usando o método dos mínimos quadrados aplicado à superfície de medida.

Os parâmetros de rugosidade analisados para a caracterização das réplicas foram escolhidos por já terem sido usados na literatura e foram S_q , S_{dq} , S_{pk} , S_{bi} (DE MELLO; GONÇALVES JR; COSTA, 2013).

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 3.1 (DONG; SULLIVAN; STOUT, 1994).

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N Z_{jk}^2} \quad (3.1)$$

Onde:

M = numero de pontos na direção x

N = numero de pontos na direção y

Z = altura relativa ao ponto de coordenadas (k,i)

O parâmetro híbrido S_{dq} , que representa a inclinação média das irregularidades, é uma extensão do parâmetro 2D, chamado de inclinação quadrática média .

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{j=2}^N \sum_{i=2}^M \left(\frac{z(x_i, y_j) - z(x_{i-1}, y_{j-1})}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{z(x_i, y_j) - z(x_{i-1}, y_{j-1})}{\Delta y} \right)^2} \quad (3.2)$$

Onde:

M = numero de pontos na direção x

N = numero de pontos na direção y

$Z(x_i, y_j)$ = altura relativa ao ponto de coordenadas (x_i, y_j)

O parâmetro funcional S_{pk} é uma extrapolação do parâmetro $2DR_{pk}$. 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, conforme ilustrado na Figura 3.1 (TAYLOR HOBSON, 2000).

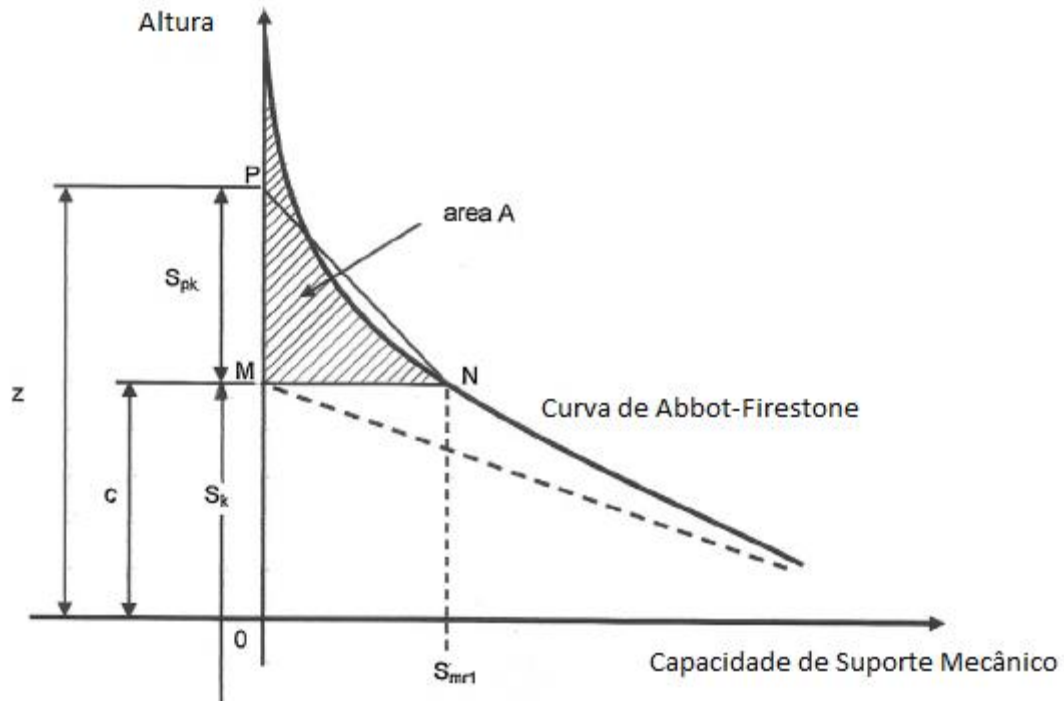


Figura 3.1 – Representação gráfica do parâmetro S_{pk} . (FRANCO ;SINATORA, 2015)

O parâmetro funcional S_{bi} representa a capacidade de suporte mecânico da superfície e é calculado conforme mostrado pela Equação 3.3(DONG; SULLIVAN;STOUT, 1994).

$$S_{bi} = \frac{S_q}{\eta_{0,05}} = \frac{1}{h_{0,05}} \quad (3.3)$$

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.

3.2 – Materiais

A Figura 3.2 mostra a sequência de preparação das amostras antes das modificações superficiais.



Figura 3.2 – Sequência de preparação das amostras antes da realização das modificações superficiais.

As amostras foram obtidas através de um fragmento de cilindro. Este fragmento foi cortado utilizando uma serra de fita horizontal da marca FRANHO obtendo-se amostras de 35 x

35 x 5mm. O material do cilindro consiste em um aço VC 10, utilizado pela empresa Gerdau para fabricação de cilindros de laminação a frio. Para verificar a composição química do material usou-se Espectrometria de Emissão Ótica (ThermoARL-4460).

Após o corte das amostras, sua dureza Vickers foi medida utilizando-se um durômetro universal marca Wolpert com carga de 20 Kgf. Constatou-se que apesar de o material estar homogêneo (não ocorrer grande variação dos valores de dureza em diferentes regiões das amostras), os valores encontravam-se abaixo dos valores exigidos durante o processo de laminação.

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

Após o tratamento térmico, realizou-se uma retificação das amostras, utilizando-se uma retífica marca Melo, modelo P36, rebolo com rotação de 3000 rpm e precisão de 0,02 mm em 600mm. Esta etapa teve como objetivo garantir o paralelismo das amostras e prepará-las para receberem os tratamentos superficiais a serem utilizados neste trabalho.

As amostras passaram por diferentes tratamentos superficiais e/ou revestimentos: texturização por descargas elétricas (EDT), revestimento de cromo duro, revestimento de NiP e nitretação a plasma. As etapas de revestimentos e nitretação foram feitas em amostras sem texturização e com texturização. Ao final dos procedimentos de modificações superficiais foram obtidos os diferentes grupos de amostras: sem modificação superficial (SM), revestidas com cromo duro (Cr), revestidas com NiP (NiP), nitretadas (N), texturizadas (EDT), texturizadas com posterior revestimento de cromo duro (EDT Cr), texturizadas com posterior revestimento de NiP (EDT NiP) e texturizadas com posterior nitretação (EDT N).

A Figura 3.3 mostra a síntese das etapas de modificações superficiais realizadas nas amostras.

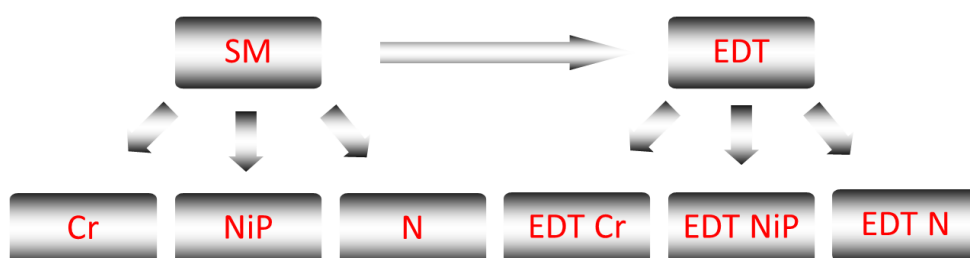


Figura 3.3 – Nomenclatura das amostras após as modificações superficiais.

Após cada etapa de modificação superficial, a topografia das amostras foi medida via interferometria a laser.

Os detalhes de execução das modificações superficiais são descritos nos itens 3.3 a 3.6.

3.3 – Texturização por descargas elétricas

A texturização por descargas elétricas (EDT) 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. Este método tem como objetivo reproduzir a textura superficial tradicionalmente utilizada pela indústria laminadora.

O regime de trabalho na máquina de eletroerosão para texturização foi o de acabamento, regime este que provoca pouco desgaste do eletrodo ferramenta. A tensão para ionização foi mantida constante, de acordo com os parâmetros estabelecidos pelo manual do fabricante da máquina. No caso da máquina utilizada no experimento, a corrente de descarga consumida no processo depende do parâmetro TS (regulado na máquina), sendo que seu valor equivale a 3 vezes TS .

O parâmetro de usinagem T_{on} se refere ao tempo total de duração do pulso e o parâmetro DT é dado em porcentagem relacionada com o tempo T_{on} e com o tempo de pausa (T_{off}), sendo dado por:

$$DT = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Onde T_{on} é o tempo de pulso e T_{off} é o tempo de pausa.

A ferramenta de texturização foi obtida a partir de um cilindro de cobre eletrolítico inicialmente com 50,8 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento. Este material foi usinado de modo a obter-se em uma de suas bases um quadrado de 20 x 20 mm

Diferentes parâmetros de acabamento foram utilizados nos testes de texturização por EDT, com o objetivo de verificar quais melhor reproduziriam a superfície texturizada de um cilindro de laminação antes do uso. Estes são mostrados na Tabela 3.2.

A avaliação da alteração da topografia em função dos parâmetros de usinagem foi feita utilizando os parâmetros tridimensionais S_q , S_{dq} , S_{pk} e S_{bi} já definidos no item 3.1. Além destes parâmetros, encontrou-se na literatura um trabalho onde o autor usa o parâmetro Contagem de Picos (P_c) como referência para avaliar a topografia de superfícies texturizadas por EDT, (SIMÃO et al., 1994; SIMÃO ;ASPINWALL, 1999; ELKOCA, 2008), que representa a

contagem de picos que estão acima da linha média de referência (TAYLOR HOBSON, 2000). Desta forma, este parâmetro também foi adicionado nas análises aqui realizadas.

Tabela 3.2 – Parâmetros dos testes de EDT

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
T_{on}	20	20	20	10
TS	3	3	6	4
DT	16	40	57	20

3.4 – Revestimento de cromo duro

Para a etapa de revestimento de cromo duro, as amostras foram enviadas para a 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.

Após a deposição do revestimento de cromo duro, bem como dos demais revestimentos/modificações superficiais descritos nos itens 3.5 e 3.6, cortou-se as amostras para análise das suas seções transversais. Para preservar a camada da modificação superficial colocou-se entre as amostras e as garras do equipamento de corte (MinitomStruers) uma folha de cobre e realizou-se o corte com rotação do disco de 250 rpm e carga de 300g. A microdureza das modificações foi avaliada utilizando um microdurômetro Shimadzu com carga de 100g e penetrador Vickers. 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.

3.5 – Revestimento de Níquel Químico

A camada de Níquel Químico, depositada pela empresa Coatingtec Revestimentos Técnicos de Metais LTDA-ME, localizada em São Bernardo do Campo, foi feita utilizando-se baixo fósforo, temperatura média de 85°C, banho com PH médio de 4,5 e velocidade de deposição de 15 a 20 µm/h com posterior tratamento térmico, o qual consiste em manter as amostras em um forno a 290° C por 10 h.

3.6 – Nitretação a plasma

A etapa de nitretação a plasma foi realizado no LabMat da Universidade Federal de Santa Catarina em um reator em escala industrial, desenvolvido por BINDER (2006).

As etapas do processo de nitretação consistem em degasagem, limpeza em anodo, limpeza em catodo e nitretação. A etapa de degasagem, com duração de 1 h, é necessária para remoção dos gases adsorvidos no interior da câmara. Durante a etapa de limpeza do anodo (30 minutos), inverte-se o potencial das peças, o que permite que os elétrons atinjam a superfície das mesmas, provocando a quebra de ligações e eliminando impurezas orgânicas. Para a remoção de óxidos das peças, coloca-se o material com potencial negativo em uma atmosfera de hidrogênio, etapa esta denominada de limpeza em cátodo, com duração de 1 h. A etapa de nitretação com a finalidade de se obter uma camada de compostos rica em nitretos tipo ϵ (Fe_{2-3}N) e γ' (Fe_4N) ocorre a uma temperatura de 520°C , mistura gasosa de 90% de N_2 – 9% de H_2 – 1% de CH_4 , pressão de 3 torr e tempo de patamar de 1,5h (GIACOMELLI, 2015). A Figura 3.4 mostra os perfis de temperatura utilizados no processo de nitretação.

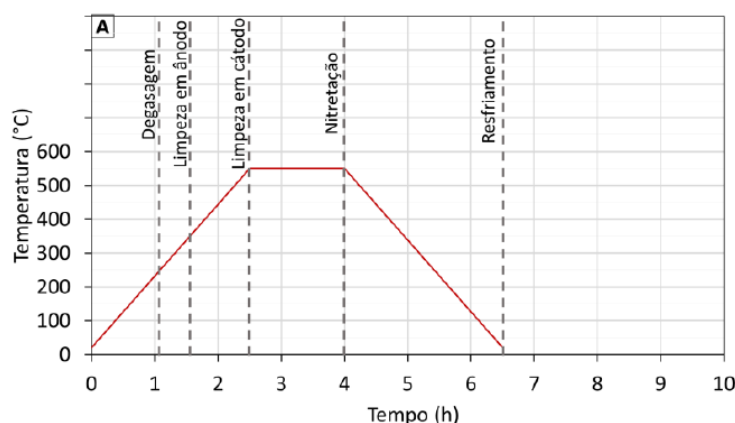


Figura 3.4 – Perfis de temperatura utilizados no processo de nitretação (GIACOMELLI, 2015).

A presença de nitretos na superfície das amostras foi verificada por difração de raios X convencional, Bragg-Brentano ou θ - 2θ , com potência de 40 kV e 30 mA. Os parâmetros de leitura utilizados foram tamanho do passo angular de $0,05^\circ$ e tempo de passo igual a 1 s, conforme procedimento descrito por BINDER (2006). Os picos foram identificados utilizando o software X'Pert High Score Plus com a base de dados JCPDS - PCPDFWIN - Versão PDF 22004.

3.7 – Pré-testes de deslizamento

Os pré-testes de deslizamento foram feitos para determinar qual a combinação entre geometria do contracorpo, tempo de ensaio e carga normal que melhor reproduziria os mecanismos de desgaste encontrados nas réplicas dos cilindros de laminação a frio. Usou-se como ponto de partida o mesmo tipo de ensaio usado por DE MELLO; GONÇALVES JR e COSTA (2013) utilizando-se contracorpo esférico e, para reduzir a pressão de contato entre o corpo e o contracorpo, alterou-se em seguida a geometria do contracorpo para o formato cilíndrico.

Os testes de deslizamento foram feitos em um tribômetro universal da marca PlintandPartners modelo TE 67. O equipamento encontra-se em um local com temperatura e umidade controladas. Usou-se a configuração de deslizamento alternado para simular o desgaste ocorrido no cilindro de laminação a frio. Esta configuração foi escolhida por promover a inversão do sentido da força de atrito. Sabe-se que em um processo de laminação, durante o contato do produto com o cilindro, também ocorre a inversão do sentido da força de atrito (DE MELLO; GONÇALVES JR; COSTA, 2013).

No tribômetro Plint&Partners do LTM, para a realização de ensaios alternados, foi incorporado um sensor LVDT, para a medição da posição do corpo em relação ao contra corpo em cada ciclo do movimento alternado durante o ensaio. A Figura 3.5(a) mostra o modelo esquemático do teste. A aquisição de dados foi feita por uma placa de aquisição ligada a um microcomputador com o software LabVIEW®, onde foi feito um programa para tratamento dos dados adquiridos. A análise dos dados foi feita utilizando-se de uma técnica denominada triboscopia, que consiste fundamentalmente na produção de imagens numéricas de sinais adquiridos durante o ensaio. Ou seja, uma imagem triboscópica é, na verdade, uma representação tridimensional da 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 (DOS SANTOS; COSTA; DE MELLO, 2015).

Na Figura 3.5(b) um dos eixos mostra a posição sobre a amostra, ou seja, sobre a trilha de desgaste em cada ciclo do movimento alternado, onde cada ciclo é representado por duas linhas na imagem triboscópica, uma representando a ida e a outra a volta. A próxima linha representa a ida do próximo ciclo e assim sucessivamente, formando a imagem triboscópica. Outro eixo mostra o número de ciclos, e, por fim, o último eixo, na posição vertical, mostra o coeficiente de atrito em função dos dois primeiros. Observando-se a escala de cores, percebe-se que para as cores frias (tons de azul e verde) o coeficiente de atrito apresenta valores mais baixos. Já para as cores mais quentes (tons de amarelo e vermelho) o coeficiente de atrito apresenta valores mais altos.

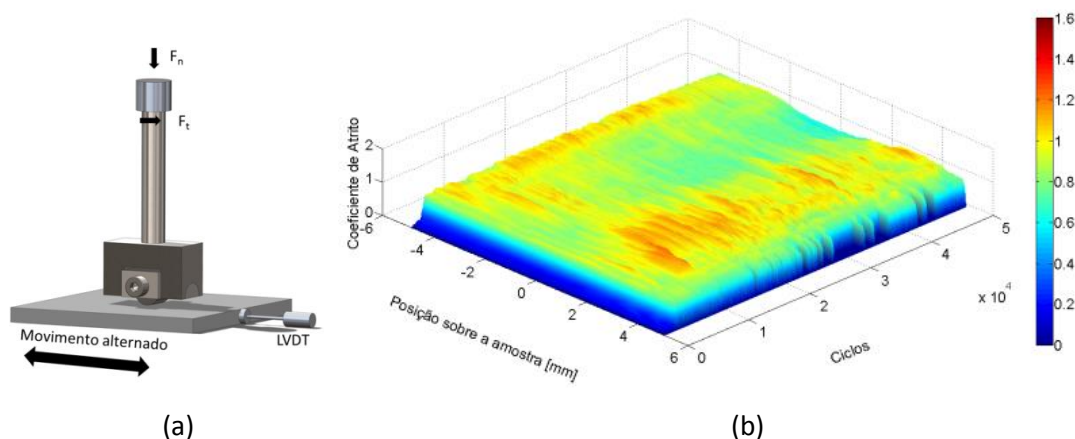


Figura 3.5 – (a) Modelo esquemático do teste. (b) Exemplo de uma imagem triboscópica 3D.

Por meio do uso desta técnica, podem-se localizar variações instantâneas, simultaneamente no tempo e na posição, de quaisquer parâmetros triboscópicos monitorados durante um ensaio tribológico. Deste modo, as imagens produzidas pela triboscopia contêm, simultaneamente, os detalhes inerentes às peculiaridades locais, sem perder de vista a evolução global do fenômeno tribológico (BELIN, 1993; BELIN; LOPEZ; MARTIN, 1994; BOZZI ;DE MELLO, 2006; DOS SANTOS; COSTA; DE MELLO, 2015).

Testes iniciais utilizaram contracorpo esférico com diâmetro de 10 mm confeccionados em aço AISI 52100, comprimento de deslizamento de 10 mm, frequência de movimento de 2 Hz, tempo de deslizamento de 1 h e cargas normais de 29 e 50 N.

Posteriormente, com o objetivo de reduzir a pressão de contato entre o corpo e o contracorpo, alterou-se a geometria do contracorpo para um cilindro orientado utilizando-se uma configuração em linha. Para a realização desta alteração foi necessário a confecção de um porta cilindros adequado para o teste e o equipamento.

Um dos pré-requisitos para o porta cilindros era que ele permitisse o auto alinhamento do cilindro quando da aplicação da carga normal, garantindo assim que a pressão de contato fosse uniforme ao longo da linha de contato. Este objetivo foi atingido satisfatoriamente utilizando-se um semi cilindro em cada extremidade do porta cilindros. A Figura 3.6 mostra o esquema utilizado para a confecção do mesmo.

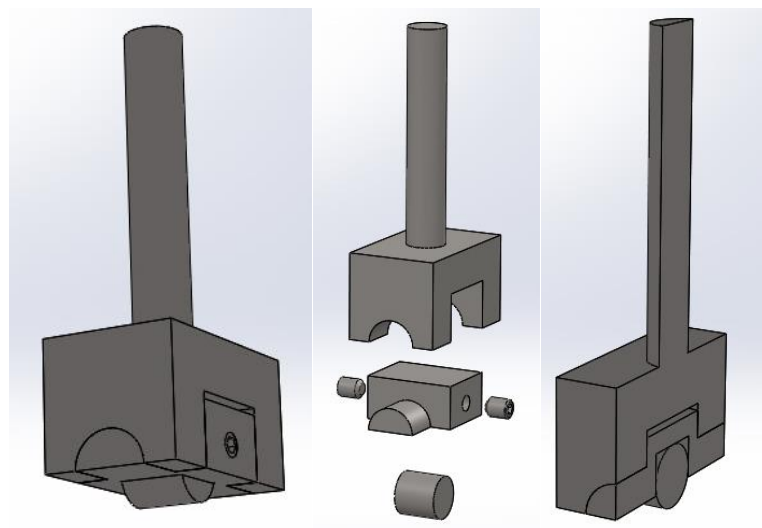


Figura 3.6 – Esquema do porta cilindros projetado.

Ao utilizar-se um cilindro (contato de linha) no lugar da esfera (contato pontual) reduz-se o valor da pressão de contato, podendo aumentar-se o valor da carga normal. Para ensaios utilizando-se cilindros de 9 mm de diâmetro e 9 mm de comprimento como contracorpo, foi usada uma carga normal de 100 N, uma frequência de 2 Hz, uma amplitude de deslizamento de 10 mm e tempos de ensaio de 30 minutos, 3 h e 5 h. A Tabela 3.3 mostra a variação da tensão máxima de Hertz em função da geometria do contracorpo e da carga normal aplicada. É possível observar que ao utilizar-se carga normal de 100 N e contracorpo cilíndrico obtém-se a menor pressão de contato. A carga de 100 N foi a carga máxima que o equipamento suporta sem riscos de danificar a célula de carga que faz a medição da força tangencial do tribômetro.

Tabela 3.3 – Tensão máxima de Hertz em função das cargas normais e geometrias dos contracorpos.

	Esférico			Cilindrico
Carga Normal (N)	29	50	100	100
Pressão de Contato (GPa)	0,6	0,7	2,8	0,17

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.

3.8 – Ensaio de desgaste

Após a realização dos pré testes, foi definido que os testes para análise das modificações superficiais deveriam ser realizados com a configuração de deslizamento alternado, com frequência de 2 Hz, amplitude de deslizamento de 10 mm, contracorpo cilíndrico com 9 mm de diâmetro e 9 mm de comprimento durante 1e 5 h. Tal decisão baseou-se nos resultados dos pré-testes, a serem descritos na seção 4.7.

Antes de iniciar cada ensaio foi verificado a condutividade elétrica do corpo e do contracorpo através do parâmetro potencial de contato.

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^{-5} g.

Após os testes coletaram-se amostras dos debris utilizando-se lâminas de microscópio e fita dupla face. Para avaliação da perda de massa dopar tribológico, realizou-se sua limpeza utilizando acetona em ultrassom por 10 minutos, fez-se a deionização do corpo e contracorpo para minimizar os efeitos de magnetização sobre a balança eletrônica e verificou sua massa para permitir o cálculo da taxa de desgaste.

A variação da topografia das amostras promovida pelos testes de deslizamento foi verificada utilizando-se medições por interferometria a laser em uma área de tamanho suficiente para cobrir toda a área desgastada.

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).

CAPÍTULO IV

Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados da avaliação de réplicas obtidas em cilindros de laminação a frio antes e após a laminação de uma campanha considerada normal, a caracterização dos revestimentos e modificações superficiais utilizadas no estudo, resultados de pré-testes realizados para definição de uma metodologia de desgaste que fosse capaz de reproduzir o desgaste observado nas réplicas e os resultados dos testes tribológicos com os diferentes revestimentos e modificações superficiais propostos.

4.1 – Avaliação de Réplicas

O trabalho iniciou-se com a avaliação de réplicas via MEV e interferometria a laser. A análise qualitativa via MEV mostrou que durante a laminação de uma campanha considerada normal os cilindros sofrem uma suavização topográfica independentemente do tipo de tratamento superficial feito antes da laminação. A Figura 4.1 exemplifica imagens dos cilindros antes (imagens à esquerda) e após (imagens à direita) da campanha de laminação. Deve-se salientar que como essas são imagens de réplicas, elas correspondem ao inverso das imagens reais das superfícies dos cilindros. É possível observar nas Figuras 4.1 (a) e (b) que, para um cilindro retificado, o uso do cilindro promoveu a remoção das marcas de usinagem originais. No caso de cilindros texturizados, ocorreu uma suavização da topografia. Mecanismos que podem estar envolvidos nesta suavização são a remoção dos picos mais proeminentes das topografias originais e/ou a formação, deformação e remoção de tribocamadas.

A Figura 4.2 apresenta exemplos típicos de mapas topográficos 3D da topografia superficial das réplicas antes (imagens da esquerda) e após (imagens da direita) uso dos cilindros. Nestas imagens, foi feita uma inversão matemática ao longo do eixo z, de forma que estas imagens não são mais invertidas, mas representam as imagens reais presentes nas superfícies dos cilindros. Elas confirmam a ideia de suavização da topografia em função do uso do cilindro que havia sido inicialmente sugerida pelas imagens de MEV. Nota-se na Figura 4.2

(b) que as marcas provenientes da ferramenta de retificação estão menos aparentes que na Figura 4.2 (a). Já com a comparação entre as Figuras 4.2 (c) e (d), mostra-se um considerável alisamento da superfície texturizada com o uso do cilindro. É razoável supor que ocorreu remoção dos picos mais proeminentes, provavelmente acompanhada da possível formação de uma tribocamada com aspecto razoavelmente liso.

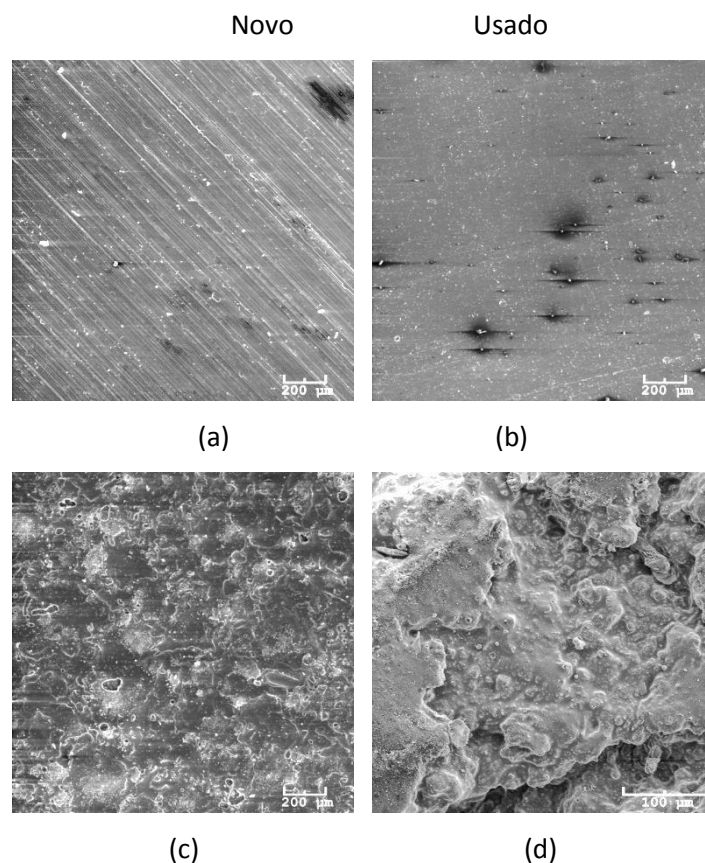


Figura 4.1 – Exemplos típicos de imagens via MEV de réplicas de cilindros laminadores antes e após o uso: (a) e (b) cilindro retificado (c) e (d) texturizado por EDT e cromado.

A análise qualitativa das réplicas sugere que a topografia foi suavizada após o processo de laminação. Para quantificar essas diferenças, foram escolhidos os parâmetros S_q , S_{dq} , S_{pk} e S_{bi} , conforme proposto por DE MELLO; GONÇALVES JR e COSTA (2013).

A Figura 4.3, que mostra os resultados do parâmetro S_q , evidencia que 15 dos 18 cilindros estudados apresentaram redução da rugosidade quadrática média devido ao processo de laminação. Os cilindros que apresentaram ligeira elevação do parâmetro S_q foram as cadeiras 2 e 4 do laminador 1, que foram retificados e cromados. Já as cadeiras 2 e 3 do laminador 3, que foram somente retificadas, não sofreram variação significativa do parâmetro S_q .

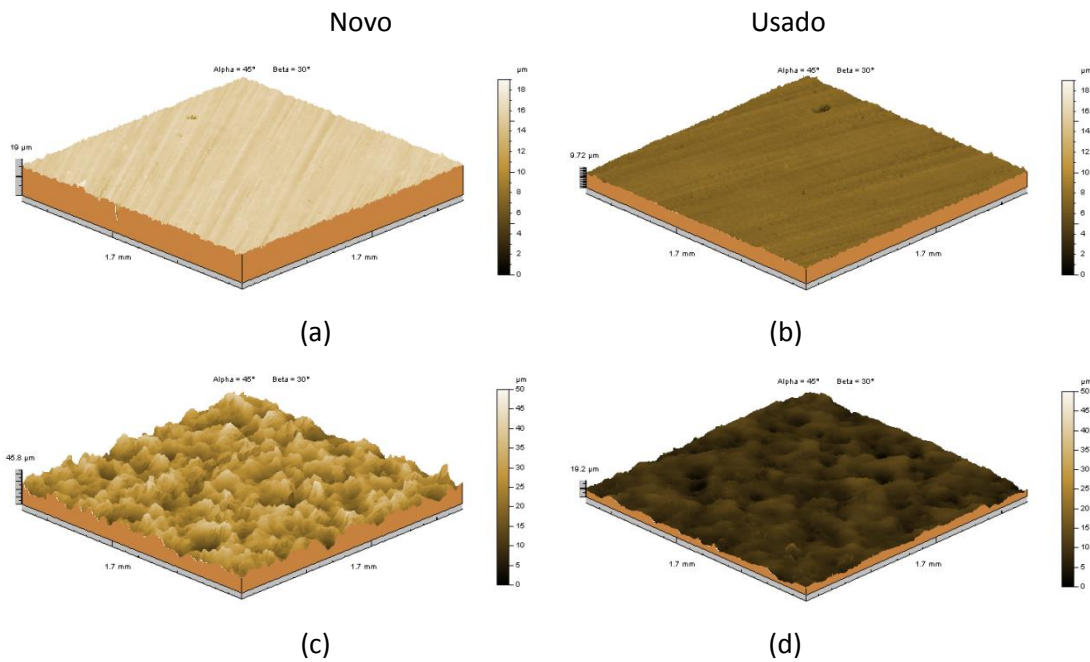


Figura 4.2 – Mapas topográficos típicos de cilindros laminadores antes e após o uso: (a) e (b) cilindro retificado; (c) e (d) texturizado por EDT e cromado.

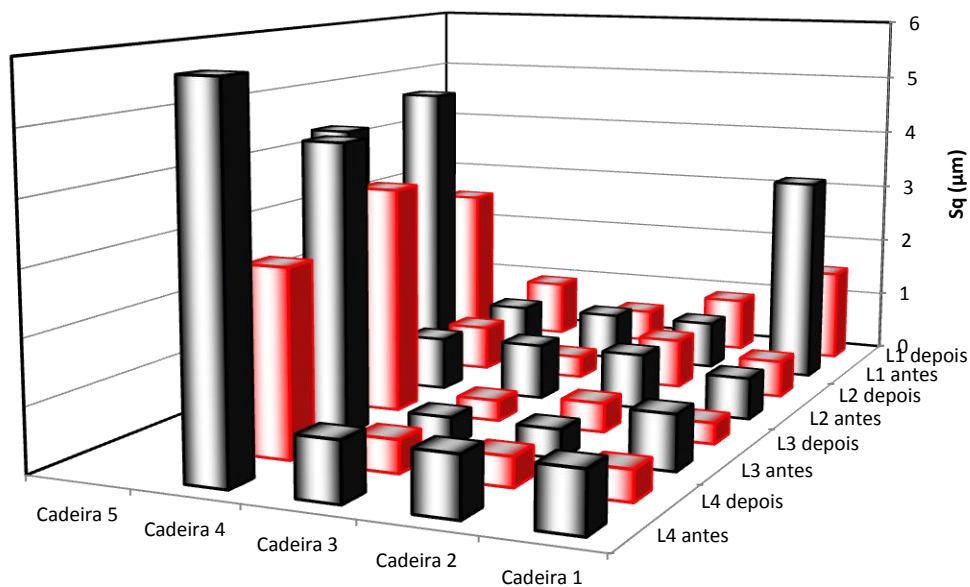


Figura 4.3 – Valores do parâmetro S_q nas réplicas de diferentes cilindros de laminação reais antes e após uma campanha normal de laminação.

Já a Figura 4.4 revela que 16 dos 18 cilindros apresentaram redução da inclinação média das irregularidades após o processo de laminação, representada pelo parâmetro S_{dq} . O cilindro da cadeira 2 do laminador 1 (retificado e cromado) e da cadeira 1 do laminador 2 (retificado) não apresentaram alterações maiores do que $0,1 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ para o parâmetro S_{dq} .

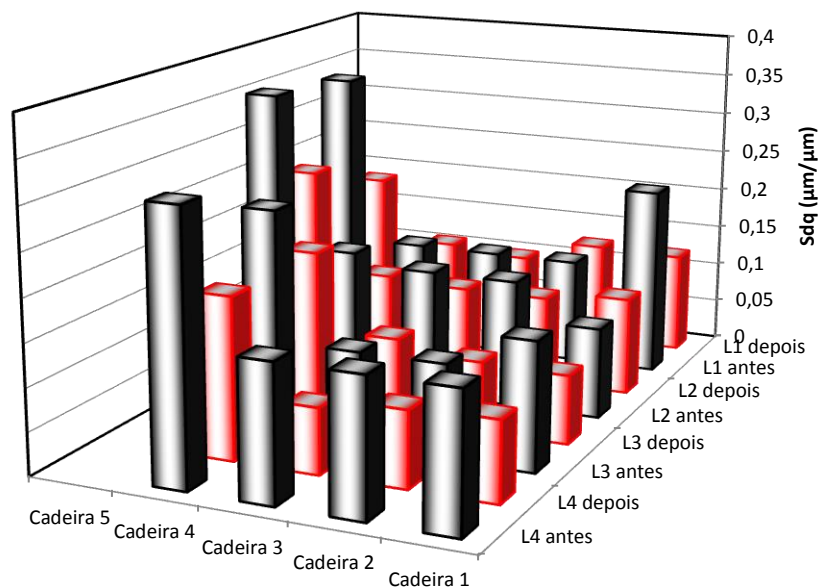


Figura 4.4 – Valores do parâmetro S_{dq} nas réplicas de diferentes cilindros de laminação reais antes e após uma campanha normal de laminação.

O parâmetro S_{pk} , que representa a região da curva de Abbott-Firestone associada aos picos mais proeminentes, também foi reduzido em função da laminação, conforme se observa na Figura 4.5, com exceção da cadeira 4 do laminador 1. Esta redução no parâmetro é esperada após o processo de laminação, em função dos esforços necessários para a conformação do material.

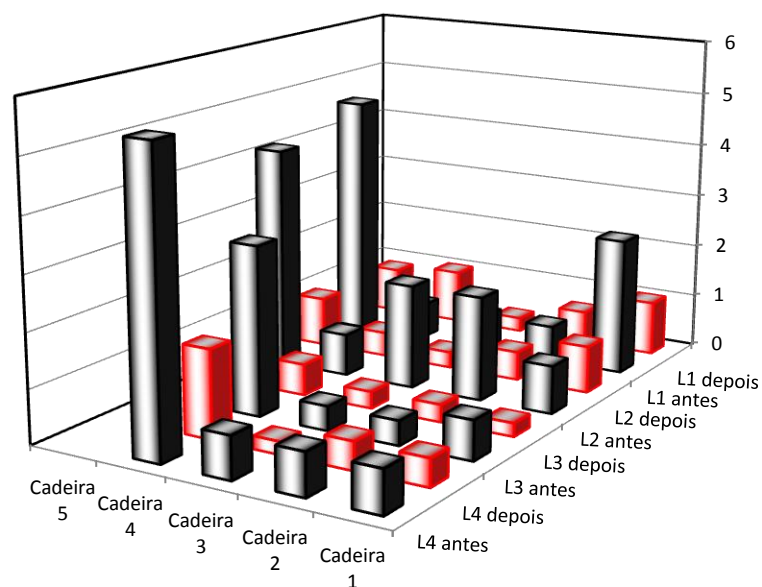


Figura 4.5 – Valores do parâmetro S_{pk} nas réplicas de diferentes cilindros de laminação reais antes e após uma campanha normal de laminação.

Com relação ao parâmetro S_{bi} (Figura 4.6), que representa a capacidade de suporte mecânico da superfície, não foi possível encontrar uma correlação clara associada ao processo de laminação. Seis dos cilindros avaliados apresentaram aumento de S_{bi} com a laminação, enquanto os demais apresentaram redução. Porém, este resultado não foi surpreendente, uma vez que apesar de S_{bi} expressar a capacidade de apoio, ele é um parâmetro bastante complexo. Comportamento semelhante foi encontrado em (DE MELLO; GONÇALVES JR; COSTA, 2013).

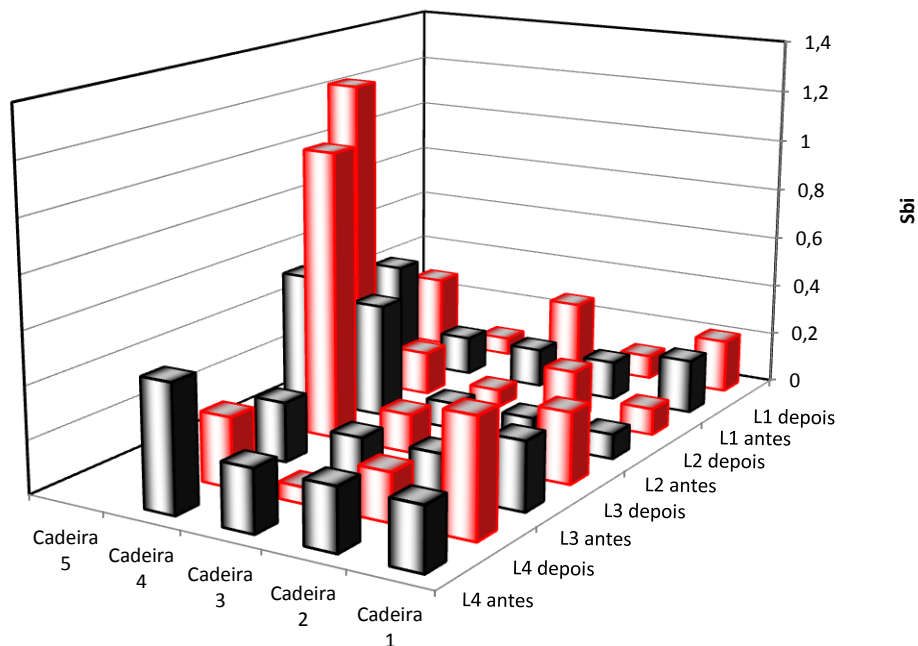


Figura 4.6 – Valores do parâmetro S_{bi} nas réplicas de diferentes cilindros de laminação reais antes e após uma campanha normal de laminação.

Resumindo, o desgaste natural do cilindro durante o processo de laminação resulta em uma suavização da sua topografia superficial. Esta redução pode estar associada, por exemplo, ao desgaste, inclusive por quebra, dos picos mais proeminentes, ao preenchimento dos vales pelos debris de desgaste e às reações triboquímicas ocorridas durante o processo de laminação.

Após a caracterização das réplicas, iniciou-se a produção das amostras e as etapas de modificação superficial e deposição de revestimentos a serem caracterizados e posteriormente utilizados nos ensaios de desgaste.

4.2 – Caracterização das amostras

As composições químicas nominal e medidas do material das amostras utilizadas nos testes são mostradas na Tabela 4.1. Os valores indicados como medidos foram valores encontrados via Espectrometria de Emissão Ótica. Os resultados mostraram que a composição química do material está dentro da faixa prevista para o material VC 10 produzido pela empresa Gerdau usado em fabricação de cilindros de laminação a frio.

Tabela 4.1 – Porcentagem em peso dos elementos químicos (nominal e medida) presentes no material.

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	P	S
Min	0,76	0,1	0,5	4,3		0,11				
Max	1,05	0,45	0,8	4,7	0,35	0,39	0,15	0,1	0,025	0,025
Medido	0,86	0,27	0,6	4,5	0,13	0,22	0,0007	0,0705	0,012	0,009

Os resultados de dureza Vickers mostraram que o material antes do tratamento térmico possuía valores de $HV = 305 \pm 12 \text{ Kg/mm}^2$. Após o tratamento térmico com resfriamento ao ar calmo, que é o tratamento térmico convencionalmente usado em cilindros de laminação, as amostras apresentaram trincamento. Este trincamento foi associado às pequenas dimensões das amostras, que devem resultar em condições de resfriamento diferentes e mais severas do que aquelas que ocorrem em um cilindro de laminação.

Com o resfriamento em caixa de areia o material apresentou dureza de $HV = 611 \pm 30 \text{ Kg/mm}^2$, sem a presença de trincas. Este valor é compatível com valores de dureza encontrados em cilindros de laminação reais (LEITE et al., 2011; OULD et al., 2013).

4.3 – Texturização por descargas elétricas

Os resultados de texturização por descargas elétricas são mostrados na Figura 4.7. Esta figura compara os valores dos parâmetros S_q , S_{dq} , S_{pk} , S_{bi} e P_c desejáveis, obtidos através das réplicas dos cilindros reais antes do uso e os parâmetros obtidos após a texturização utilizando as diferentes condições de usinagem mostradas na Tabela 3.3. Nota-se que a utilização das condições de usinagem do Teste 1 resulta em valores dos parâmetros S_q , S_{dq} , S_{bi} e P_c mais próximos aos medidos nas réplicas. A única exceção foi o parâmetro S_{pk} , que se mostrou ligeiramente inferior. Portanto, as texturizações das amostras a serem utilizadas nos ensaios

de deslizamento alternado foram feitas utilizando os parâmetros do teste 1, pois foi a condição com maior número de parâmetros próximos ao encontrado nas réplicas.

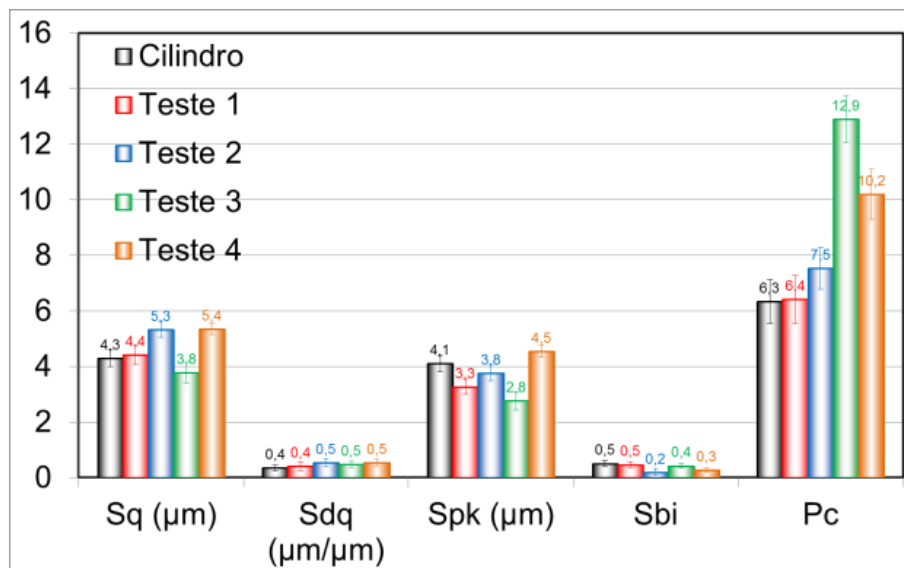


Figura 4.7 – Comparação dos parâmetros topográficos.

A Figura 4.8 mostra a variação dos parâmetros topográficos 3D para amostras que eram retificadas e passaram pelo processo de texturização por descargas elétricas. Nota-se que o processo de texturização ocasionou uma elevação na rugosidade quadrática média da superfície, na inclinação média das irregularidades e na altura dos picos mais proeminentes. A capacidade de suporte mecânico também sofreu uma elevação (redução de S_{bi}), porém em menor escala.

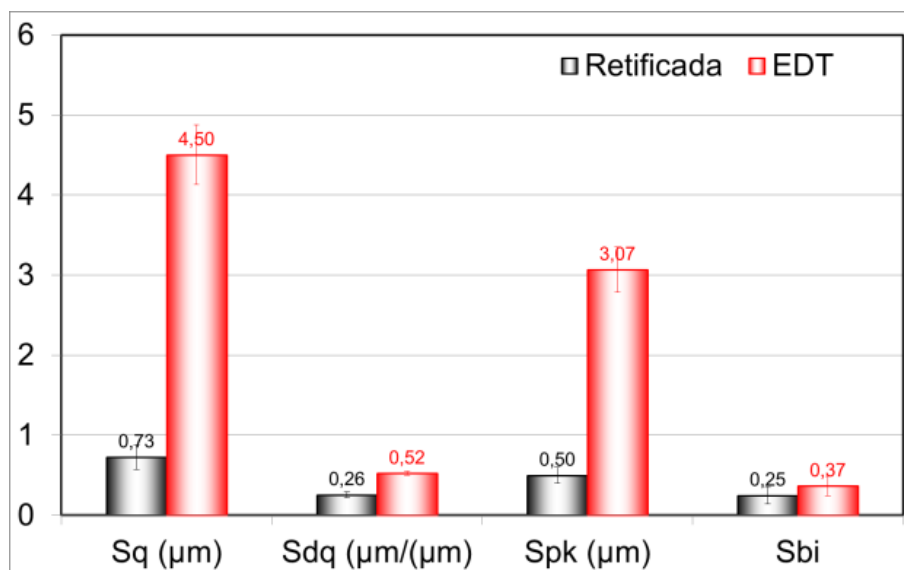


Figura 4.8 – Variação dos parâmetros topográficos 3D para amostras retificadas e texturizadas.

4.4 – Cromo duro

A espessura do revestimento de cromo duro foi de $5\mu\text{m}$, conforme mostrado na Figura 4.9. O valor da dureza do revestimento foi de $Hv_{(0,1)} = 823 \pm 39 \text{ Kg/mm}^2$, 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 4.9—Revestimento de cromo duro

O cromo duro utilizado pela indústria laminadora tem o objetivo de endurecer a superfície do cilindro, mas deve preservar os parâmetros topográficos obtidos na texturização (SIMÃO et al., 1994).

A comparação da alteração do revestimento de cromo duro na topografia das amostras é mostrado na Figura 4.10. A Figura 4.10 (a) mostra a variação dos parâmetros para amostras previamente retificadas, enquanto a Figura 4.10 (b) mostra a variação dos parâmetros para amostras previamente texturizadas. É possível observar que as amostras retificadas e posteriormente revestidas com cromo duro sofreram uma ligeira elevação no parâmetro S_{pk} . 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. 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.

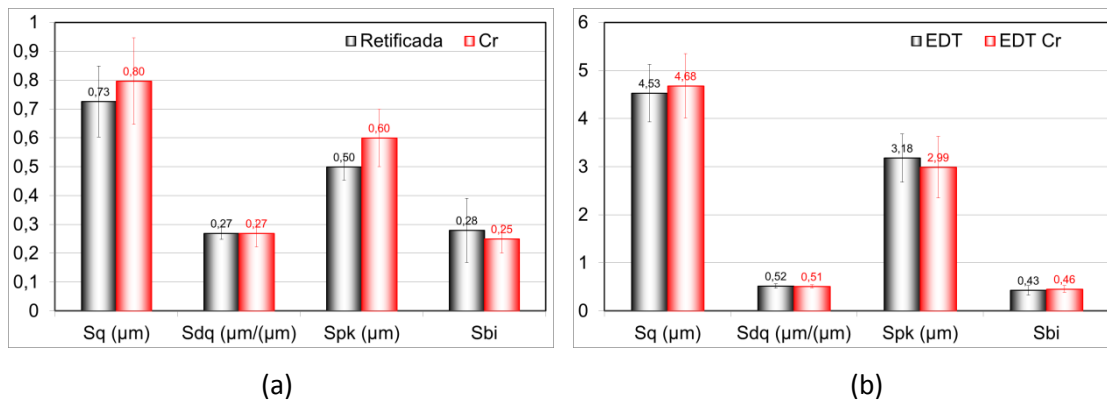


Figura 4.10 – Variação dos parâmetros topográficos após o revestimento de cromo duro (a) amostras sem texturização (b) amostras texturizadas.

4.5 – Níquel químico

A camada de revestimento de 13 μm (Figura 4.11) acompanhou a topografia superficial do substrato tanto na amostra retificada (Figura 4.11(a)) quanto na amostra texturizada (Figura 4.11(b)).

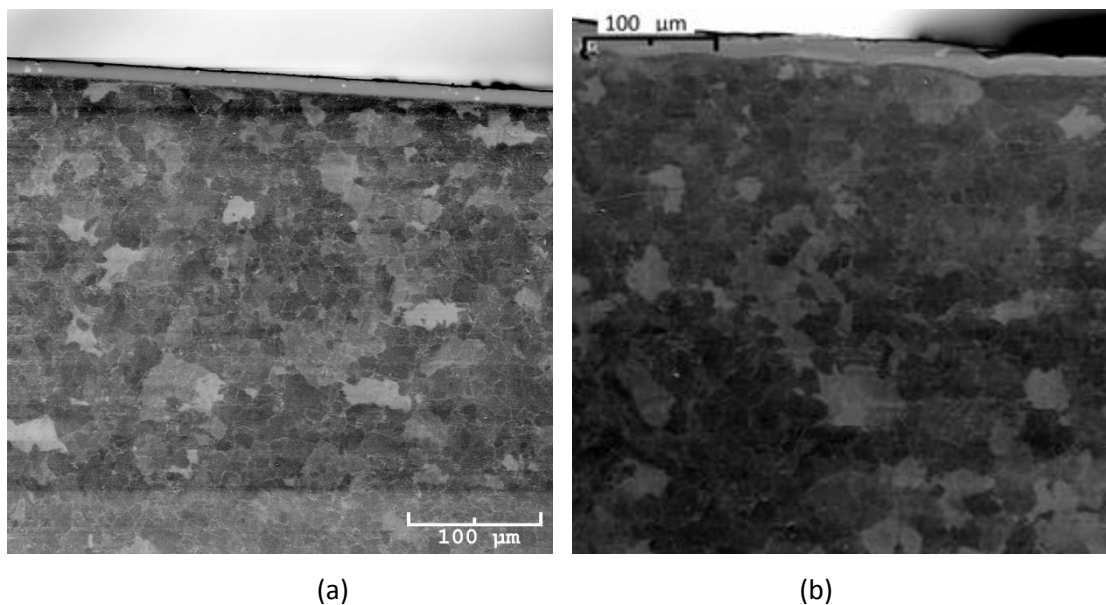


Figura 4.11 – Revestimento de NiP (a) cilindro retificado e (b) cilindro texturizado por EDT.

Os resultados de microdureza Vickers na região revestida apresentaram valores de $HV_{0,1} = 827 \pm 87 \text{ Kg/mm}^2$. Estes valores estão próximos aos valores de dureza do cromo duro utilizado

em cilindros de laminação(SIMÃO ;ASPINWALL, 1999; CHIU et al., 2002; BOLELLI et al., 2006; EL-AMOUSH et al., 2011; DE MELLO; GONÇALVES JR;COSTA, 2013).

A variação da topografia em função da deposição do revestimento está mostrada na Figura 4.12. É possível observar na Figura 4.12 (a) que o revestimento de NiP não altera significativamente os parâmetros no caso de amostras sem texturização. Porém, no caso de amostras texturizadas (Figura 4.12 (b)), o revestimento reduz o valor dos picos mais proeminentes (S_{pk}) e mantém os valores dos outros parâmetros estudados sem alteração significativa, comprovado estatisticamente por análise de variância com 95% de confiabilidade.

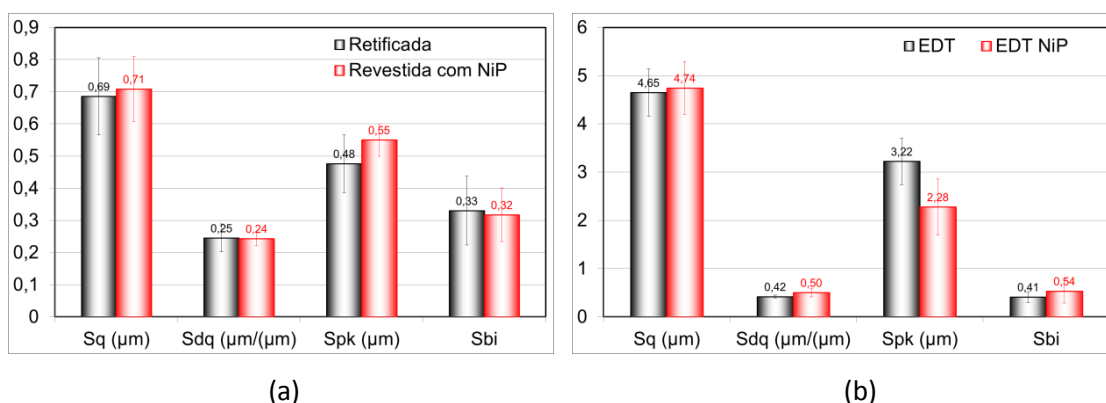
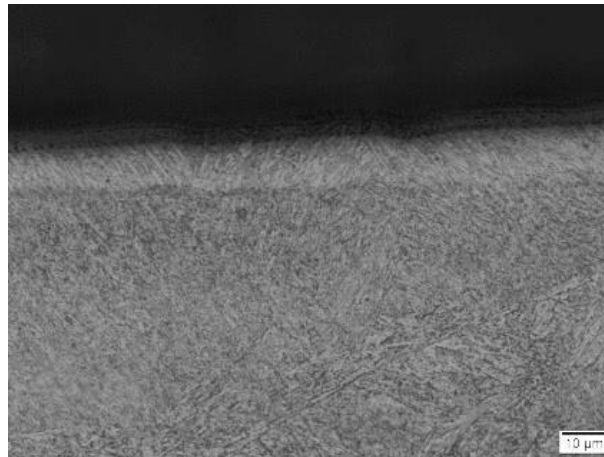


Figura 4.12 – Variação dos parâmetros topográficos 3D em função da deposição do revestimento de NiP (a) para amostras sem texturização (b) para amostras texturizadas.

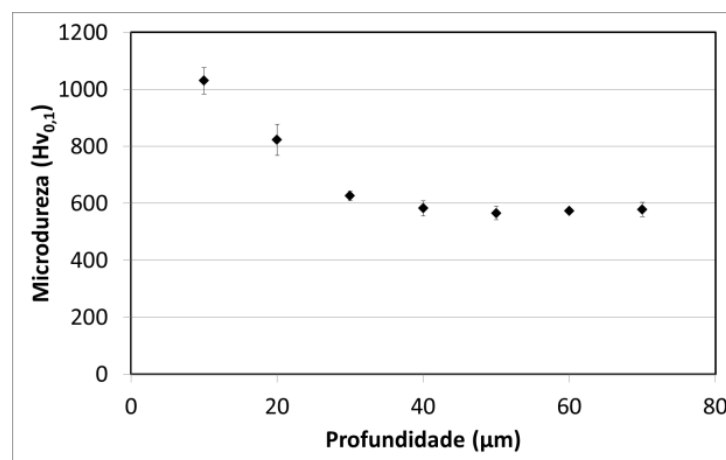
4.6 – Nitretação a plasma

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

A Figura 4.13 (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 4.13 (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 4.13 – (a) Seção transversal de uma amostra nitretada e atacada com Nital 2% (b) perfil de microdureza de amostra nitretada.

A Figura 4.14 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.

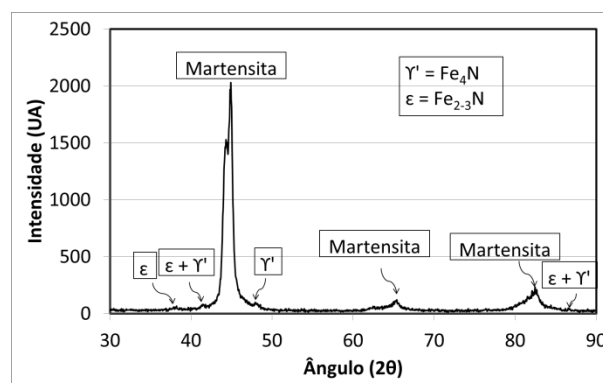


Figura 4.14 – Difratograma de raio X de uma amostra nitretada a plasma.

A variação da topografia das amostras em função do processo de nitretação a plasma é mostrado na Figura 4.15, onde o processo de nitretação a plasma não afeta significativamente os parâmetros topográficos 3D para amostras sem texturização e texturizadas.

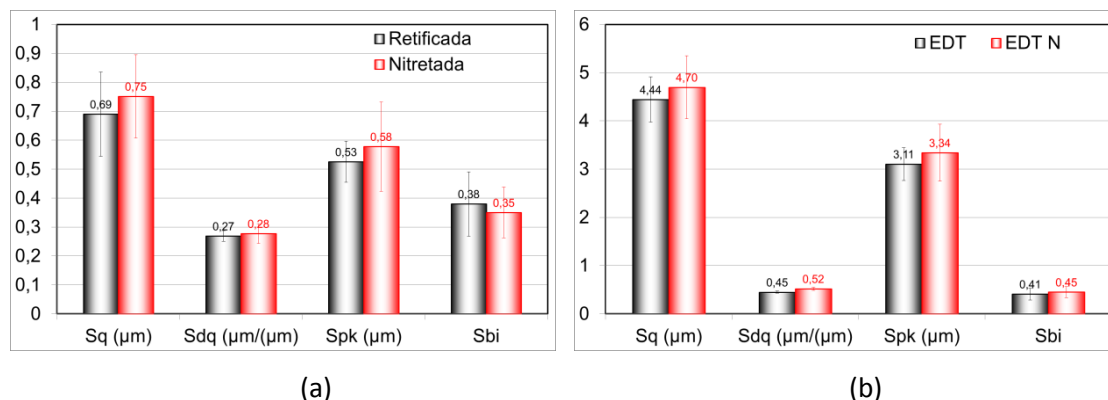


Figura 4.15 – Variação dos parâmetros topográficos 3D para amostras nitretadas (a) sem texturização (b) texturizadas.

A síntese da dureza e espessura dos revestimentos estudados no presente trabalho é mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dureza e espessura dos revestimentos / modificações superficiais.

	Dureza (Kgf/mm ²)	Espessura (μm)
VC 10 com tratamento térmico	611	
CromoDuro	823	5
NiP	827	13
Nitretação	937	10 (30)

4.7 – Pré-ensaios de deslizamento

Após a produção das amostras e a caracterização dos revestimentos e modificações superficiais, iniciou-se o processo de definição de uma metodologia de ensaio que fosse capaz de reproduzir o desgaste identificado nas réplicas dos cilindros.

Como padrão adotou-se uma réplica topográfica de um cilindro que foi texturizado e com posterior revestimento de cromo duro. Os resultados da avaliação topográfica destas réplicas foram mostrados e discutidos no item 4.1. Estes resultados mostraram que o uso do cilindro de laminação promove uma suavização da sua topografia de superfície. Postulou-se que tal suavização possa estar associada à remoção dos picos mais proeminentes, acompanhada da

possível formação de uma tribocamada com aspecto razoavelmente liso e que sua deformação e espalhamento provavelmente preenche parte dos vales mais profundos.

Objetivando reproduzir qualitativamente o desgaste ocorrido no cilindro durante uma campanha de laminação, inicialmente realizaram-se testes de desgaste utilizando contracorpo esférico, deslizamento alternado, com 1 h de duração e carga normal de 29 N e 50 N. A Figura 4.16 mostra os mapas topográficos 3D das superfícies das amostras antes e depois dos ensaios. É possível observar que o ensaio com carga normal de 50 N (Figura 4.16 (c)) provocou a remoção ou recobrimento total da textura superficial original, enquanto que o uso de carga normal de 29 N (Figura 4.16 (b)) provocou uma suavização da topografia menor do que a encontrada para uma carga de 50 N.

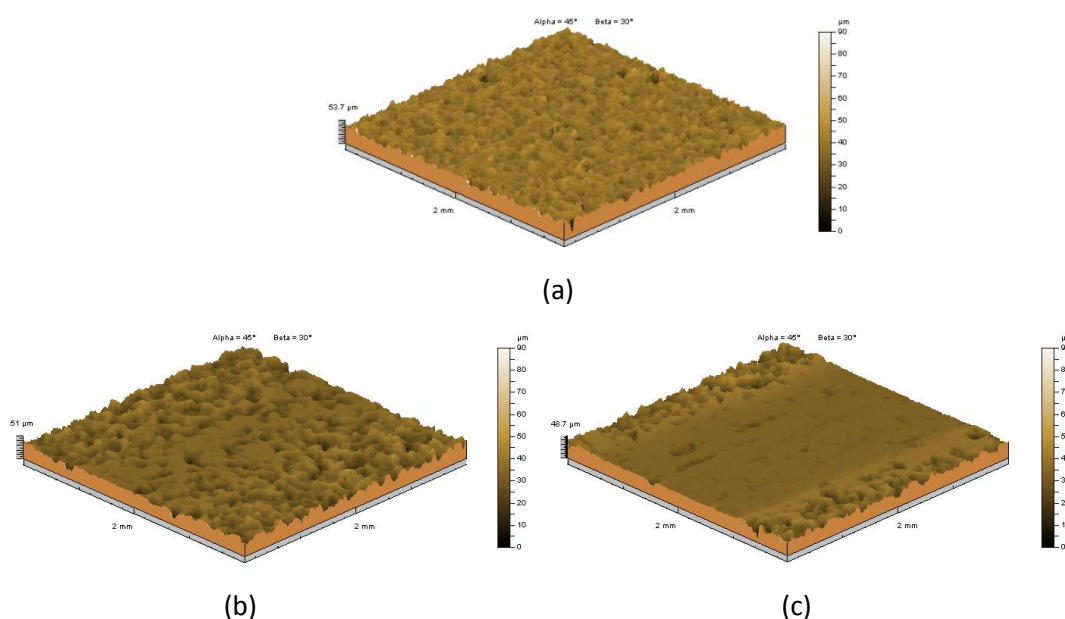


Figura 4.16 – Mapas topográficos 3D de amostras (a) sem ensaio (b) amostras ensaiadas com contracorpo esférico, tempo de deslizamento de 1 h e carga normal de 29N (c) amostras ensaiadas com contracorpo esférico, tempo de deslizamento de 1 h e carga normal de 50N.

Para reduzir-se a pressão de contato e também aumentar-se o tamanho da área ensaiada, realizaram-se em seguida testes com contracorpo cilíndrico.

Realizaram-se testes com contracorpos cilíndricos e carga normal de 100 N com tempo de deslizamento de 30 minutos, 3 h e 5 h, de forma a avaliar-se a evolução da topografia superficial e do desgaste com o tempo de ensaio. A Figura 4.17(a) mostra o mapa topográfico típico da condição inicial da topografia antes dos testes e as Figuras 4.17 (b), (c) e (d) mostram as topografias das amostras após 30 minutos, 3 h e 5 h de ensaio, respectivamente. É possível observar que o teste de deslizamento aparentemente suavizou a superfície da amostra e que o aumento do tempo de ensaio aparentemente aumenta essa suavização, conforme havia sido observado na Figura 4.16 para contra corpos esféricos.

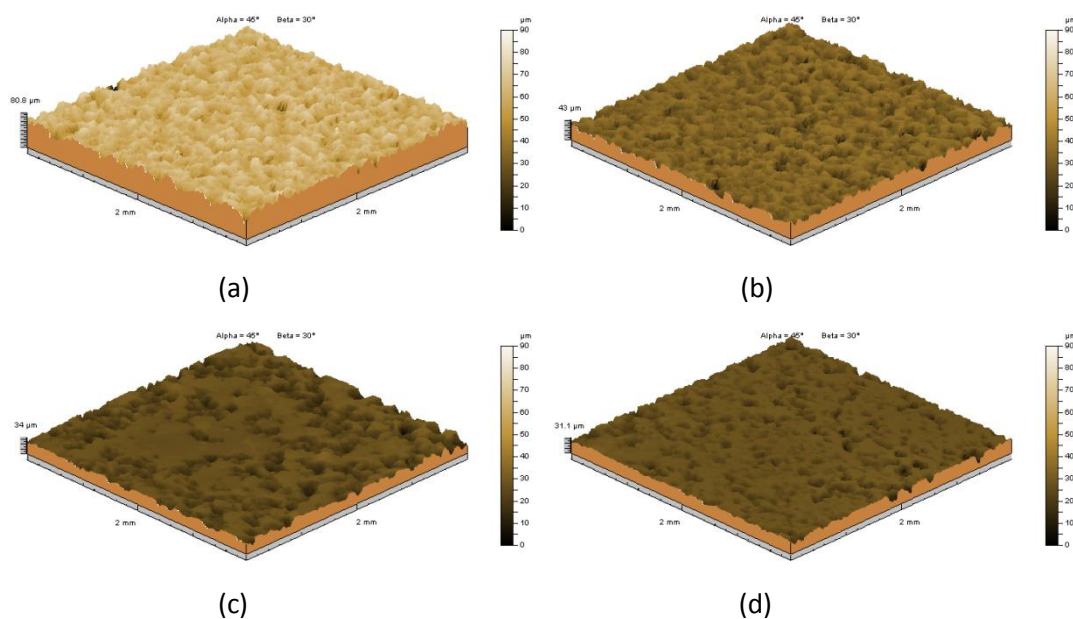


Figura 4.17 – Mapa topográfico 3D de amostras texturizadas com posterior recobrimento de cromo duro (a) sem desgaste (b) ensaiadas por 30 minutos com contracorpo cilíndrico e carga normal de 100 N (c) ensaiadas por 3 h com contracorpo cilíndrico e carga normal de 100 N (d) ensaiadas por 5 h com contracorpo cilíndrico e carga normal de 100 N.

Após a análise qualitativa da variação da topografia superficial das amostras durante os ensaios de desgaste, fez-se a quantificação da topografia utilizando os parâmetros S_q , S_{dq} , S_{pk} e S_{bi} . A Figura 4.18 resume os resultados da avaliação quantitativa das réplicas antes e após a laminação de uma campanha considerada normal com o uso de cilindros texturizados com posterior recobrimento de cromo duro. É possível observar a tendência de que o processo de laminação reduza os valores dos parâmetros de rugosidade avaliados.

A variação dos parâmetros topográficos com o desgaste promovido pelos ensaios realizados com contracorpo esférico é mostrada na Figura 4.19. Para efeitos de comparação, também são mostrados como exemplos os parâmetros topográficos de dois cilindros de laminação reais antes e após o uso, obtidos pelas réplicas. Os parâmetros S_q , S_{dq} , S_{pk} possuem tendência a serem reduzidos após os testes de deslizamento, mostrando uma tendência semelhante à observada nas réplicas, mas os valores numéricos obtidos após os ensaios foram bem inferiores aos medidos nos cilindros pelas réplicas. Já o parâmetro S_{bi} sofreu uma elevação após o ensaio de deslizamento. A redução da carga normal de 49 para 29 N promoveu uma elevação nos parâmetros topográficos após os ensaios de deslizamento. Ao ensaiar as amostras utilizando carga normal de 100 N é possível observar que os parâmetros S_q , S_{dq} e S_{pk} foram menores do que os valores encontrados nas réplicas após a laminação de

uma campanha considerada normal, já a capacidade de suporte mecânico apresentou valores superiores aos encontrados nas réplicas. Nota-se que ao ensaiar a amostras com carga normal de 49N, o parâmetro S_q foi inferior ao obtido na réplica enquanto que ao ensaiar com 29 N a redução do parâmetro não foi suficiente para se aproximar do valor obtido em cilindros de laminação real. No caso do parâmetro S_{dq} o ensaio utilizando carga normal de 49 N se aproximou dos valores obtidos nas réplicas, enquanto que o ensaio com 29N não provocou alteração suficiente na topografia para se aproximar dos valores obtidos nas réplicas. Os valores do parâmetro S_{pk} tanto para 49N quanto para 29 N apresentaram valores semelhantes aos encontrados nas réplicas. O parâmetro S_{bi} apresentou valores similares ao das réplicas usando carga de 49 N e ao reduzir a carga normal para 29N a amostra apresentou valores maiores do que aos encontrados nas réplicas. A análise estatística foi feito por ANOVA usando 95% de confiabilidade.

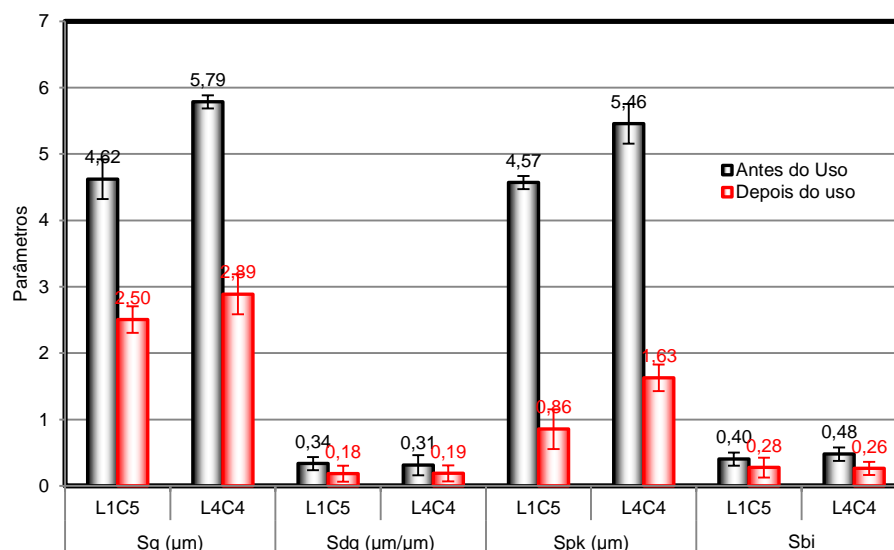


Figura 4.18 – Variação dos parâmetros topográficos encontrados nas réplicas de um cilindro texturizado e cromado antes e após a laminação de uma campanha considerada normal.

Analogamente ao uso de contracorpo esférico, o uso de contracorpo cilíndrico e carga normal de 100N também resultou em tendência a reduzir os parâmetros de rugosidade após os ensaios de deslizamento, com exceção do parâmetro S_{bi} , conforme mostrado na Figura 4.20. Novamente, valores para dois cilindros de laminação reais são também apresentados. Avaliando-se a evolução dos parâmetros topográficos com o tempo de ensaio, é possível observar que a elevação no tempo de ensaio de 0,5 h para 3 e 5 h não provoca alteração significativa nos parâmetro de rugosidade na maioria dos casos. Duas exceções são o parâmetro S_{pk} , que reduziu significativamente entre 3 e 5 h de ensaio e o parâmetro S_{bi} , que

novamente não apresentou uma tendência clara. As variações foram comprovadas por análise de variância com 95% de confiabilidade.

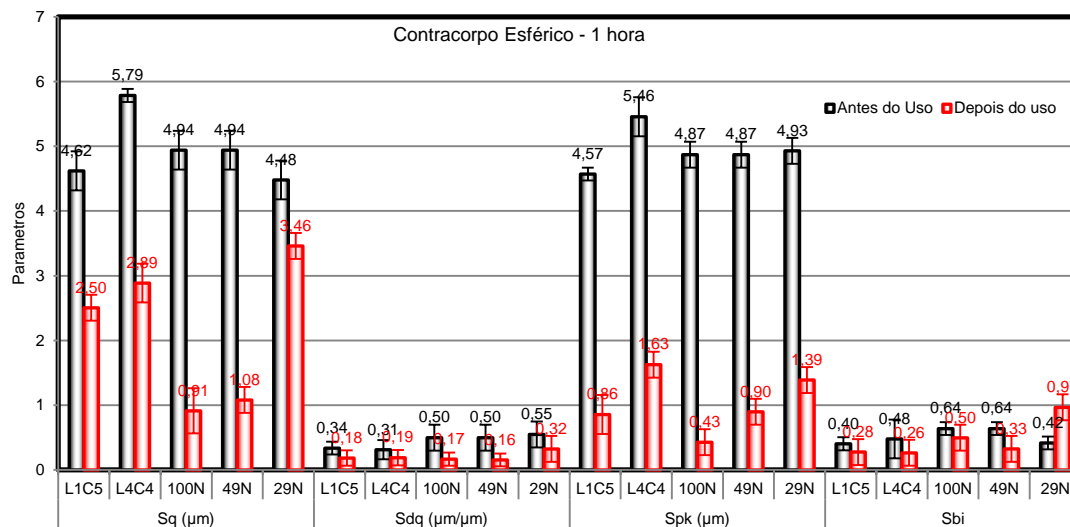


Figura 4.19 – Variação dos parâmetros topográficos das réplicas e de amostras ensaiadas com contracorpo esférico, tempo de deslizamento de 1 h em função da carga normal aplicada.

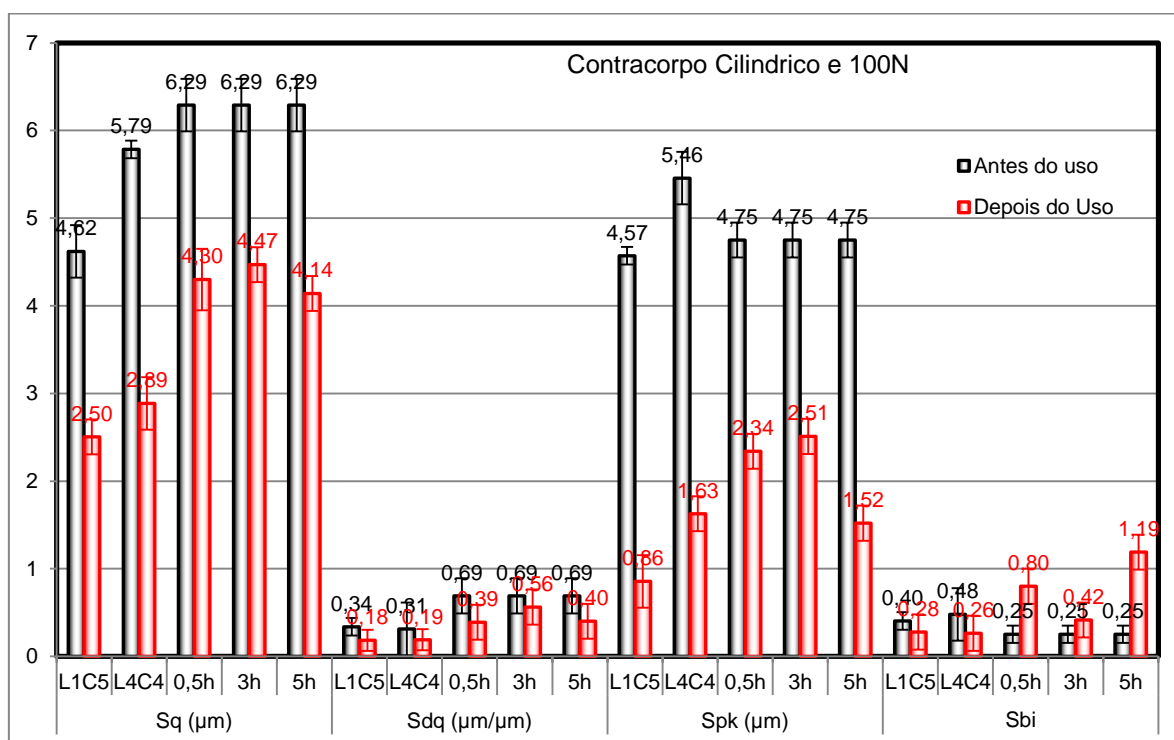


Figura 4.20 – Variação dos parâmetros topográficos das réplicas e de amostras ensaiadas com contracorpo cilíndrico, carga normal de 100N em função do tempo de deslizamento.

Após a avaliação qualitativa e quantitativa da topografia das superfícies, fez-se o estudo das amostras desgastadas via microscopia eletrônica de varredura. As imagens das trilhas de desgaste via elétrons secundários (Figura 4.21) mostram tanto para amostras ensaiadas com contracorpo esférico e carga normal de 29 N (menor pressão de Hertz utilizada para contracorpo esférico, Figura 4.21 (a)) quanto cilíndrico durante 30 minutos (b), 3 h (c) e 5 h (d) de deslizamento com carga normal de 100N, um aparente alisamento da superfície, o qual torna-se mais intenso com a elevação do tempo de ensaio utilizando contracorpo cilíndrico.

Para uma melhor análise das tribocamadas formadas nas superfícies desgastadas utilizando contracorpos esféricos e cilíndricos, imagens via elétrons secundários e retroespalhados são exemplificadas na Figura 4.22. Amostras ensaiadas com contracorpo esférico e carga normal de 29 N são mostradas nas Figuras 4.22 (a) e (c), enquanto as Figuras 4.22 (b) e (d) mostram imagens de amostras ensaiadas com contracorpo cilíndrico por 5 h. Para o contracorpo cilíndrico, regiões alisadas ricas em elementos mais leves podem ser observadas, sugerindo a presença de uma tribocamada, provavelmente rica em Oxigênio. Observa-se ainda regiões rugosas que são parcialmente claras, mas grande parte dessas regiões são escuras, sugerindo uma provável competição entre formação e arrancamento dessas tribocamadas.

Para investigar em maiores detalhes as tribocamadas usou-se a técnica de EDX, conforme mostrado nas Figuras 4.23 (contracorpo esférico) e 4.24 (contracorpo cilíndrico). Os resultados mostraram que tanto para contracorpos esféricos quanto para cilíndricos ocorreu a formação de uma tribocamada rica em ferro e oxigênio.

A comparação topográfica dos ensaios realizados e da réplica do cilindro de laminação é mostrada na Figura 4.25. É possível observar que a região desgastada (destacada na Figura 4.23 (b)) no caso do uso de contracorpo esférico, carga de 29N e tempo de deslizamento de 1 h foi muito pequena para permitir a comparação com as réplicas. Ao elevar a carga normal e manter o contracorpo esférico observou-se que a pressão de contato foi suficiente para remover todo o revestimento e a textura da pista de deslizamento (Figura 4.25(c)). Já as Figuras 4.25 (d), (e) e (f) mostram regiões da marca de desgaste de superfícies ensaiadas com cilindros, 100 N de carga normal para tempos de ensaio de 30 min, 3 h e 5 h respectivamente. O desgaste promovido suavizou a topografia das amostras sem arrancar completamente o revestimento e permitiu uma ampla área de desgaste para análise. Com 30 minutos de ensaio foi observado que houve pouca alteração topográfica, enquanto que com 5 h houve uma suavização da topográfica similar ao encontrado na réplica, que significa o momento que o cilindro deverá ser trocado.

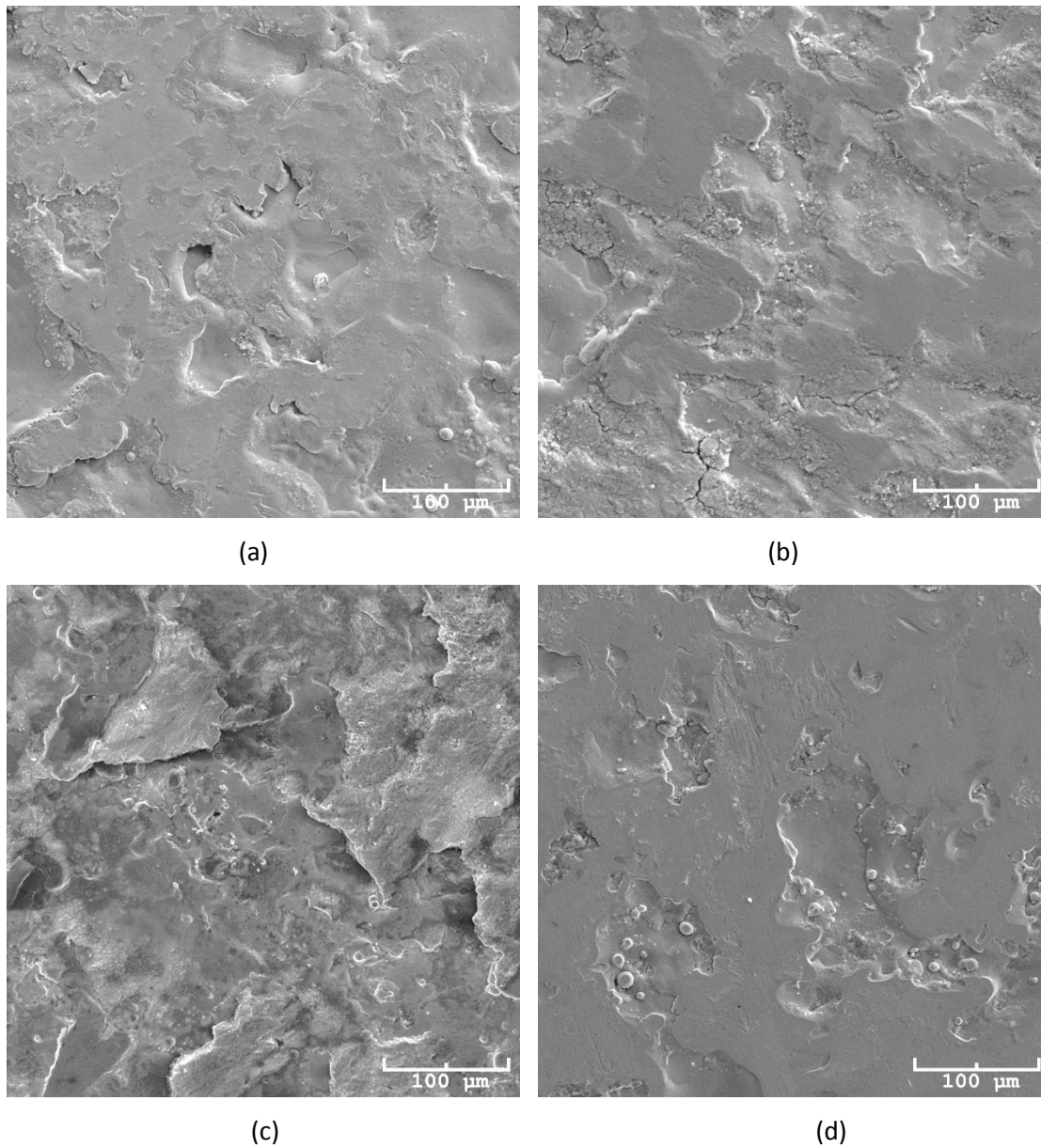


Figura 4.21 – Imagens via MEV (elétrons secundários) de amostras ensaiadas com (a) contracorpo esférico e carga normal de 29N e tempo de deslizamento de 1 h (b) contracorpo cilíndrico carga normal de 100N e tempo de deslizamento de 30 minutos (c) contracorpo cilíndrico carga normal de 100N e tempo de deslizamento de 3 h (d) contracorpo cilíndrico carga normal de 100N e tempo de deslizamento de 5 h.

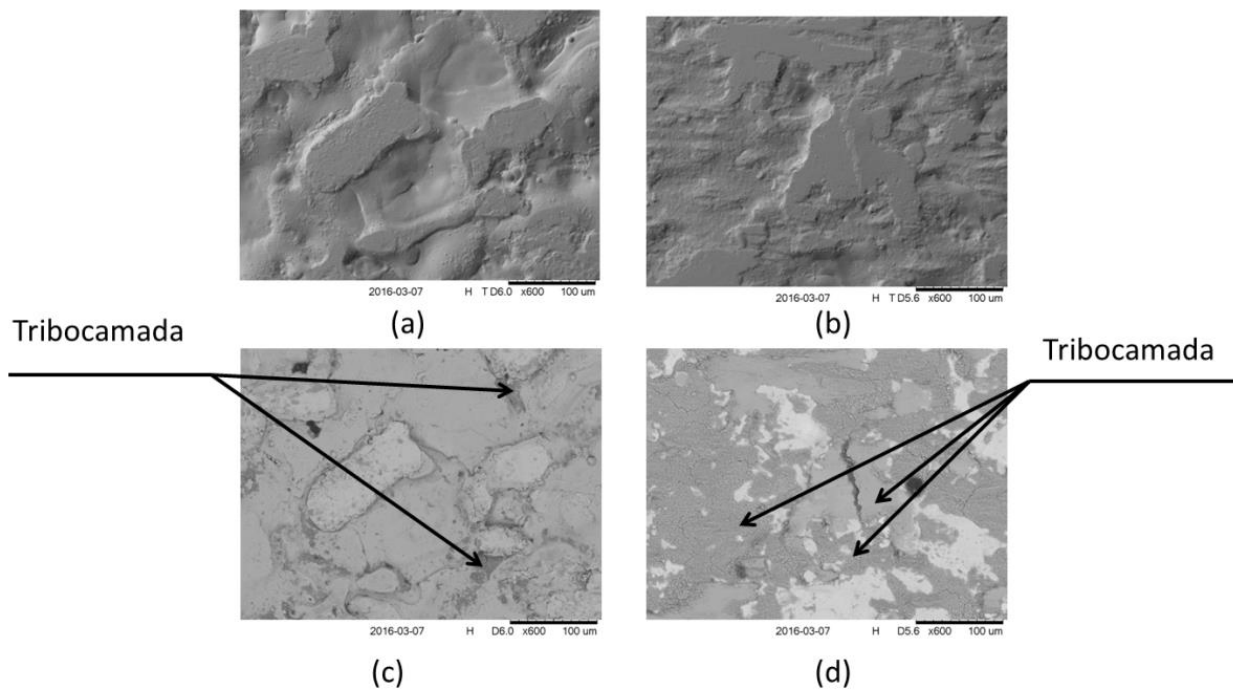


Figura 4.22 – Imagens via MEV (elétrons retroespalhados) de amostras ensaiadas com (a) contracorpo esférico e carga normal de 29N e tempo de deslizamento de 1 h (b) contracorpo cilíndrico carga normal de 100N e tempo de deslizamento de 5 h.

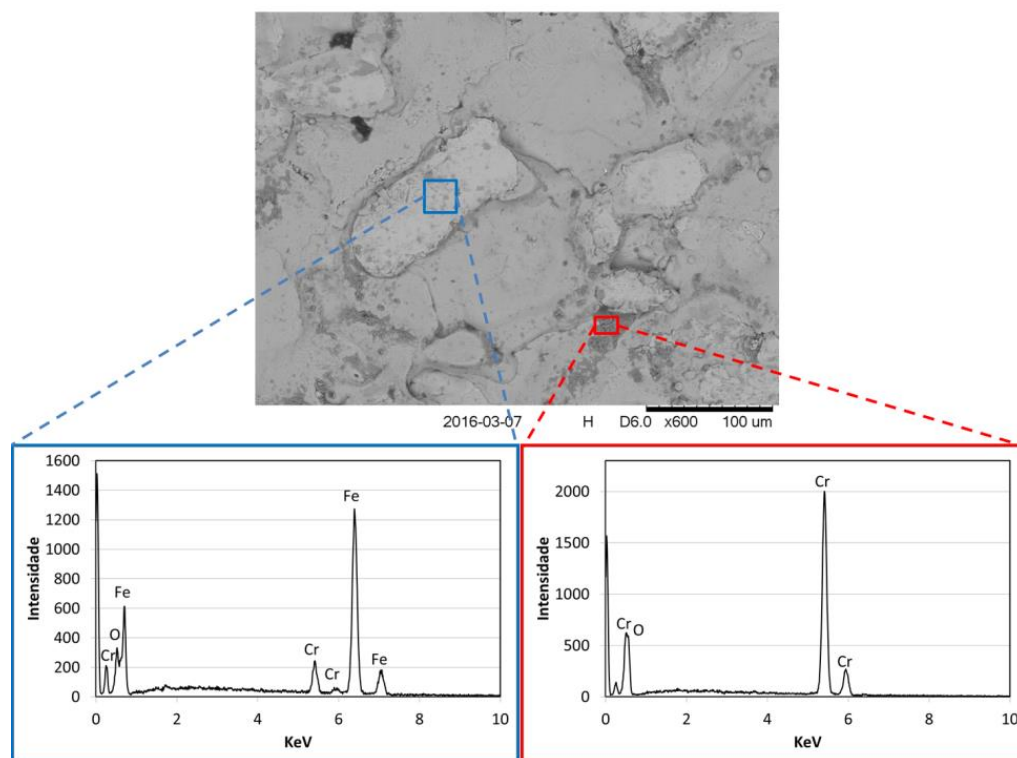


Figura 4.23 – Imagens via MEV (elétrons retroespalhados) de amostras ensaiadas com contracorpo esférico e carga normal de 29N e tempo de deslizamento de 1 h e análise via EDX.

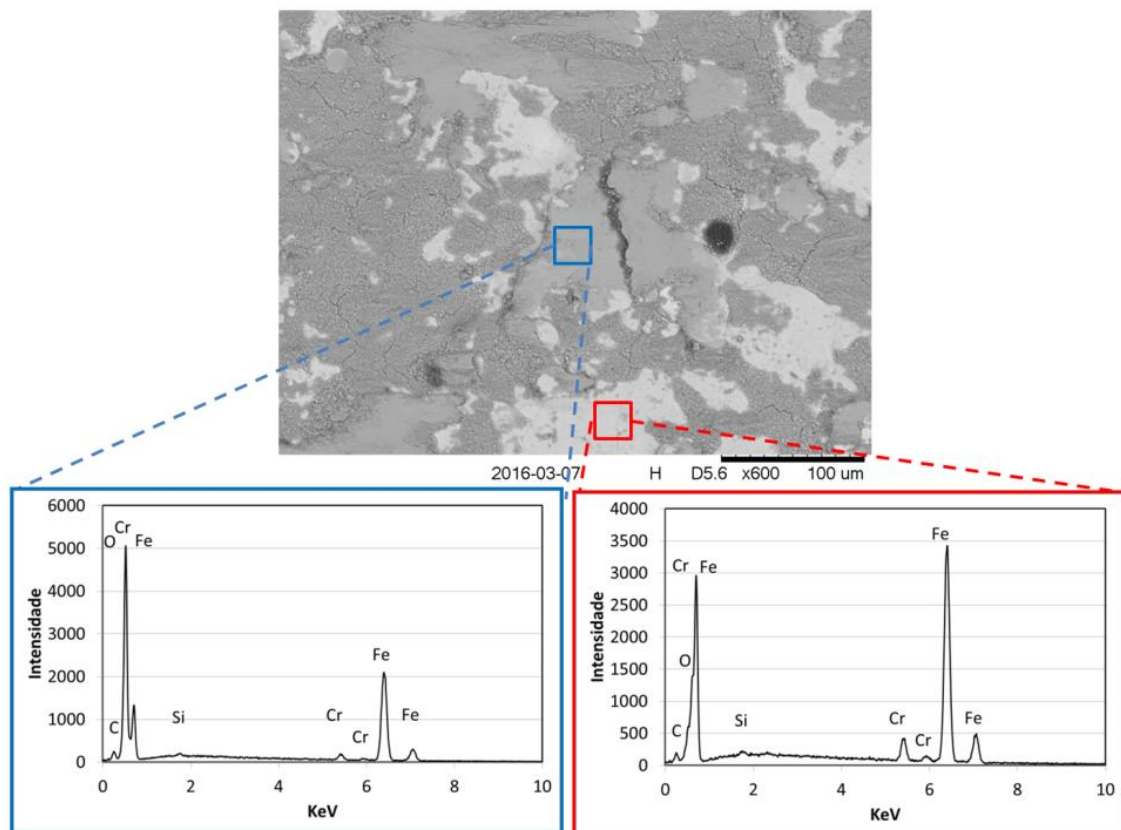


Figura 4.24 – Imagens via MEV (elétrons retroespalhados) de amostras ensaiadas com contracorpo cilíndrico, carga normal de 100N e tempo de deslizamento de 5 h e análise via EDX.

Os resultados permitiram concluir que o uso de contracorpo cilíndrico permite a análise da trilha de desgaste em diferentes estágios do teste. **Por isso usou-se nos testes de desgaste contracorpo cilíndrico, carga normal de 100N e tempo de deslizamento de 1 e 5 h para permitir a análise em uma etapa intermediária em que o cilindro sofreu algum desgaste e em uma etapa final, onde o cilindro já se encontra provavelmente próximo ao seu tempo de troca.**

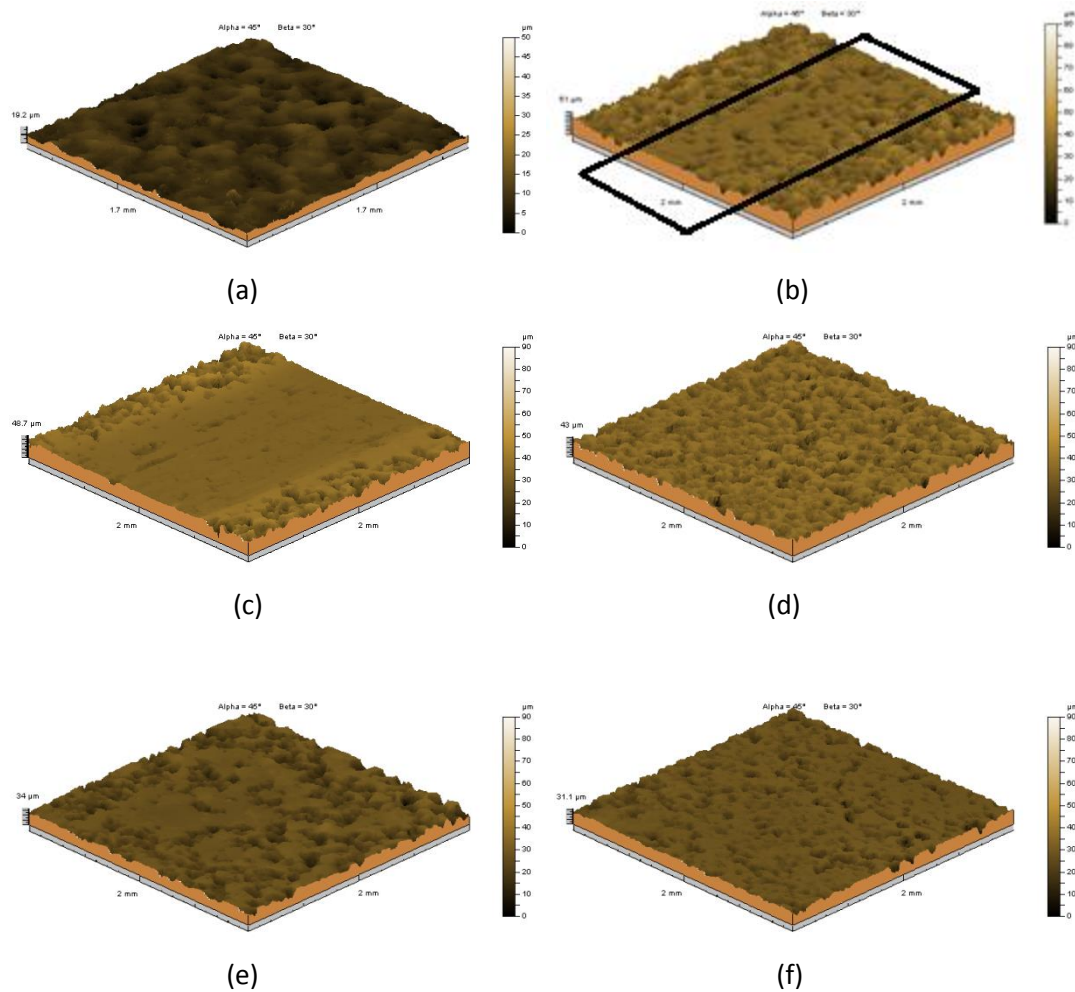


Figura 4.25– Mapas topográficos 3D de: (a) Réplicas de cilindro texturizado com posterior recobrimento de cromo duro após a laminação; (b) amostras ensaiadas com contracorpo esférico, tempo de deslizamento de 1 h e carga normal de 29N; (c) amostras ensaiadas com contracorpo esférico, tempo de deslizamento de 1 h e carga normal de 50N; (d) amostras ensaiadas por 30 min com contracorpo cilíndrico e carga normal de 100 N; (e) amostras ensaiadas por 3 h com contracorpo cilíndrico e carga normal de 100 N (f) amostras ensaiadas por 5 h com contracorpo cilíndrico e carga normal de 100 N.

4.8 – Ensaios de deslizamento

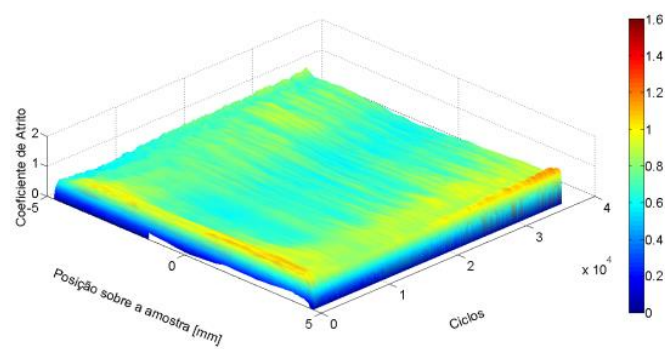
Utilizando-se a metodologia levantada pelos pré-testes, foram realizados ensaios de deslizamento para os diferentes grupos de amostras investigadas neste trabalho. Inicialmente, serão apresentados os resultados relativos às amostras sem texturização prévia (sem modificação, com revestimento de cromo duro, com revestimento de níquel químico e nitretada). Em seguida, serão apresentados os resultados relativos às amostras previamente texturizadas por descargas elétricas (somente texturizada, texturizada + cromo duro,

texturizada + níquel químico e texturizada + nitretação a plasma). Para cada grupo de amostras, serão apresentados resultados de coeficientes de atrito, de desgaste das amostras e dos contrakorpos, análises dos debris coletados após os ensaios, análises por MEV e EDX das trilhas de desgaste nos corpos e contrakorpos 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 das novas rotas de modificação superficial propostas para cilindros de laminação a frio (nitretação a plasma e revestimento de níquel químico) com o de superfícies sem modificação (cilindros somente retificados) e o de cilindros que recebem o revestimento convencional de cromo duro.

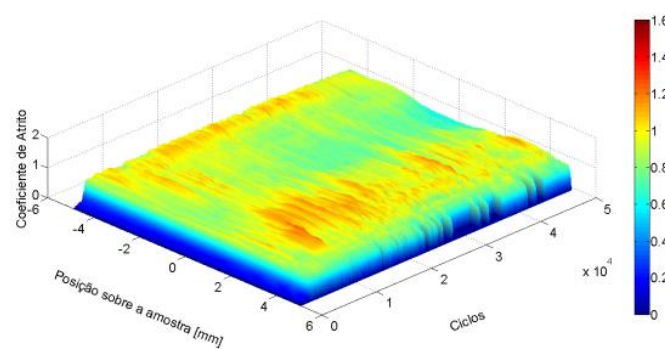
Exemplos de mapas triboscópicos obtidos para o coeficiente de atrito são mostrados na Figura 4.26 nas diferentes condições testadas, para ter-se uma ideia da sua variação, não somente com o tempo de ensaio, mas também com a posição do contracopo sobre a amostra. Para evitar a apresentação de uma quantidade excessiva de resultados, o que pode dificultar sua análise, são apresentados somente os mapas triboscópicos para os ensaios de 5 h, uma vez que em princípio eles já englobam os fenômenos que acontecem para tempos de ensaio de até 1 h.

A Figura 4.26 mostra a evolução do coeficiente de atrito em função do número de ciclos e também da posição sobre a amostra para as amostras sem texturização prévia. Para cada condição superficial estudada, o mapa triboscópico escolhido para ser mostrado nesta figura foi o que tivesse apresentado um comportamento da evolução do atrito intermediário para as diferentes repetições de cada teste. A Figura 4.26 (a) mostra a evolução para amostras sem modificação superficial, (b) com revestimento de cromo duro (c) com revestimento de NiP e (d) nitretadas. Observa-se que o coeficiente de atrito apresenta uma tendência de aumento nas bordas da marca de desgaste para todas as condições superficiais. 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).

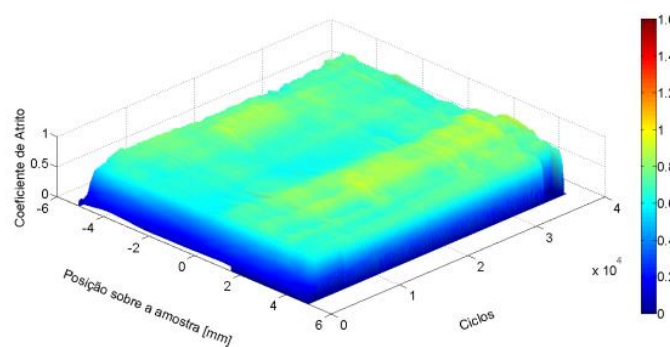
Para a amostra sem modificação, após um pequeno transiente inicial, não se observou uma variação significativa do coeficiente de atrito com o número de ciclos. Para a amostra de cromo duro, observou-se uma tendência de redução do coeficiente de atrito com o número de ciclos de ensaio, em particular após 20000 ciclos. Para a amostra de NiP, após um transiente inicial, o coeficiente de atrito não mostrou variações significativas com o número de ciclos, além de apresentar menores valores de coeficientes de atrito que os demais. As amostras nitretadas também apresentaram uma tendência de redução de coeficiente de atrito com o aumento do número de ciclos, como observado para as amostras cromadas.



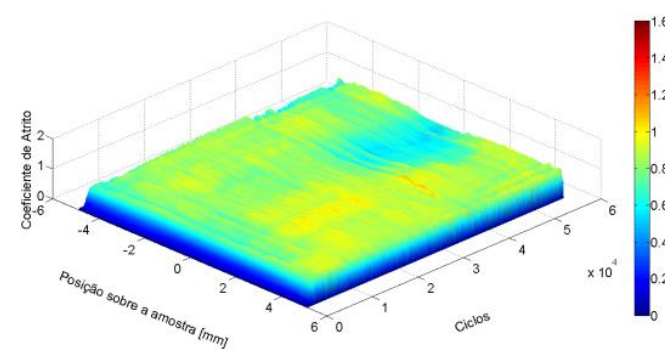
(a)



(b)



(c)

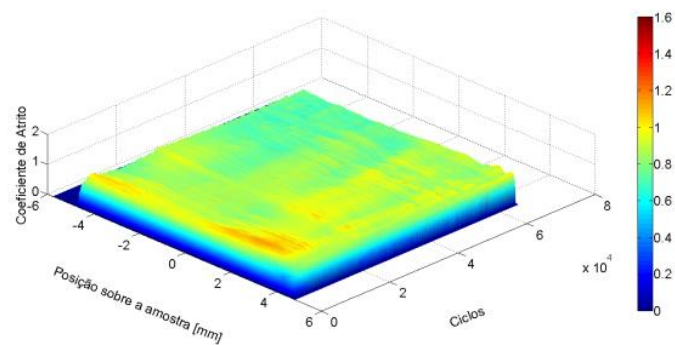


(d)

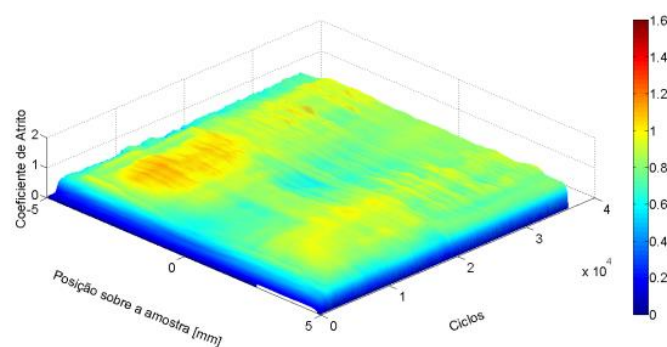
Figura 4.26 – Triboscopia típicas de amostras sem texturização ensaiadas por 5 h: (a) sem modificação; (b) cromo duro (c); NiP; (d) nitretadas.

Os mapas triboscópicos para as amostras previamente texturizadas são mostrados na Figura 4.27. Para as amostras EDT (somente texturizadas) houve um transiente inicial, após o qual não foi observada variação significativa do coeficiente de atrito com o número de ciclos. Para a amostra texturizada com posterior revestimento de cromo duro houve uma tendência de elevação do coeficiente de atrito nas bordas da marca de desgaste, conforme observado para amostras sem texturização. Além disso, houve uma tendência de redução do coeficiente de atrito com o aumento do número de ciclos. Amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP também apresentaram uma elevação do valor do coeficiente nas extremidades da marca de desgaste. Sua evolução temporal mostrou uma transição inicial seguido por um curto período de estabilização do atrito em valores muito baixos ($\sim 0,2$). Em seguida, ocorre uma elevação suave e contínua do coeficiente de atrito, mas o valor final atingido é inferior ao observado para as demais condições superficiais. 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.

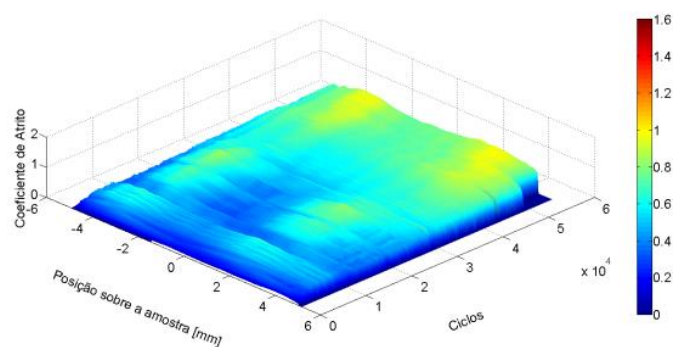
A Figura 4.28 exemplifica mapas triboscópicos da evolução típica do potencial de contato para as amostras previamente texturizadas. Antes de iniciar os ensaios notou-se que para todos os revestimento/modificações o potencial de contato iniciava em zero, indicando que não existe material isolante entre o corpo e o contracorpo. Nota-se na Figura 4.28 (a) que para amostras somente texturizadas ocorre uma transição inicial que corresponde ao transiente no coeficiente de atrito mostrado na Figura 4.27 (a), seguido por uma região de elevado potencial de contato, onde provavelmente tem-se a presença de uma tribocamada isolante. Nota-se ainda que houve uma leve redução do potencial de contato nas bordas da marca de desgaste, nas regiões onde o coeficiente de atrito havia sido mais elevado. No caso de 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. Porém, não houve variação significativa do potencial de contato nas bordas da marca de desgaste.



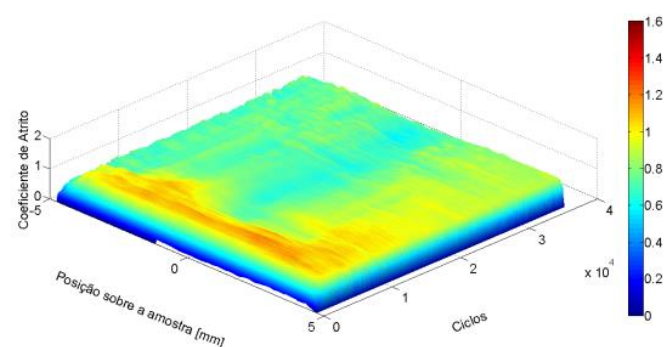
(a)



(b)



(c)



(d)

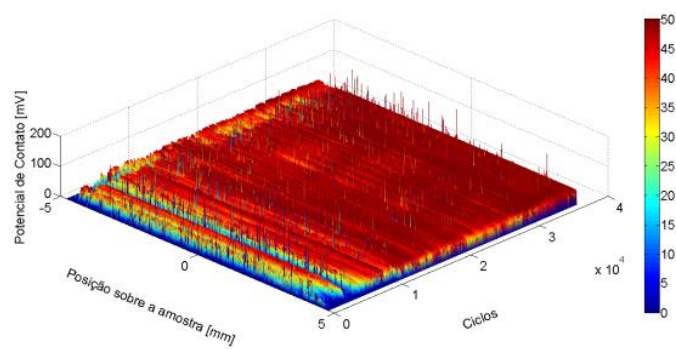
Figura 4.27 – Triboscopia típicas de amostras texturizadas ensaiadas por 5 h (a) EDT (b) EDT + cromo duro (c) EDT +NiP (d) EDT + nitretação.

A Figura 4.29 apresenta os mapas triboscópicos do potencial de contato para ensaios de 5 h em amostras sem texturização prévia correspondentes às repetições que haviam sido selecionadas para os mapas de coeficiente de atrito mostrados na Figura 4.26. 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 sem modificação (a) apresentou um potencial de contato próximo de zero, o que corresponde a uma situação de contato metálico entre as duas superfícies, ou seja, à não presença de, por exemplo, uma tribocamada isolante entre as duas superfícies. A partir de aproximadamente 4000 ciclos, começaram a aparecer pequenas oscilações para valores maiores, mas de forma pouco significativa. Isto corrobora a evolução do coeficiente de atrito com o tempo (Figura 4.26(b)) que havia identificado uma região transiente inicial e depois uma tendência de estabilização, sugerindo que continuamente uma tribocamada era formada, mas que ela era retirada com a mesma taxa.

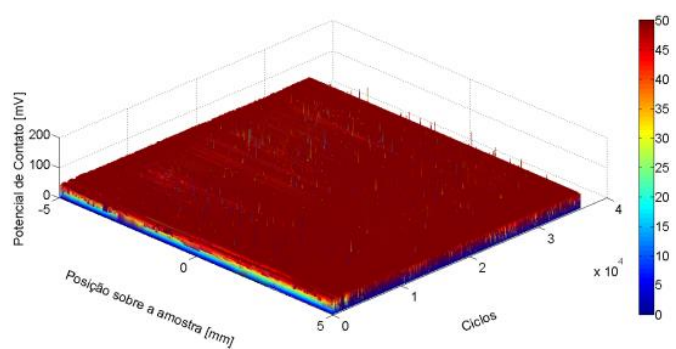
Para as amostras com cromo duro (Figura 4.29 (b)), ocorreu uma transição significativa no potencial de contato após 20000 ciclos, sugerindo que a redução observada no coeficiente de atrito esteja realmente associada à formação de uma tribocamada isolante de baixo atrito relativamente estável.

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

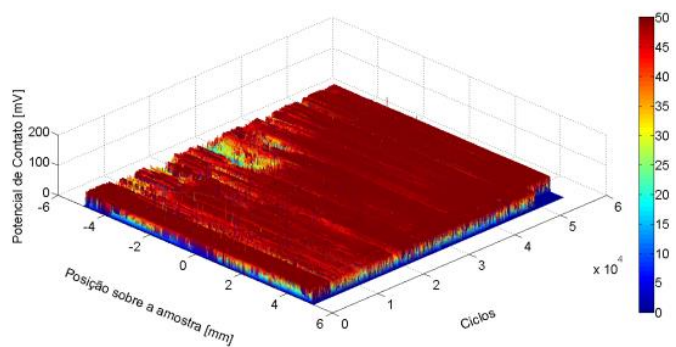
Para a amostra com revestimento de NiP, aparecerem apenas pequenas oscilações após um transiente inicial, mas aparentemente uma tribocamada isolante existe em quase toda a extensão do ensaio.



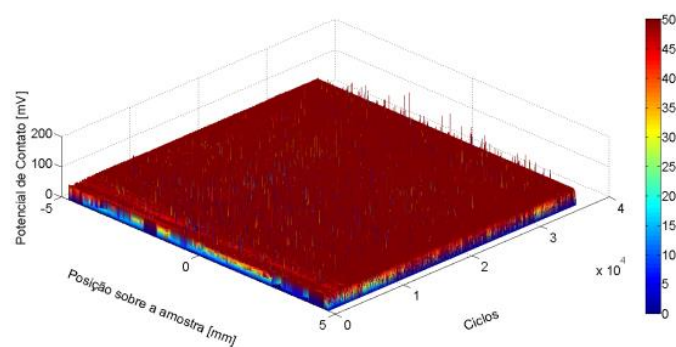
(a)



(b)

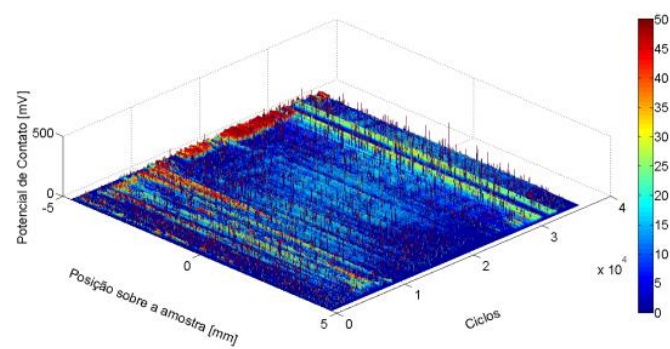


(c)

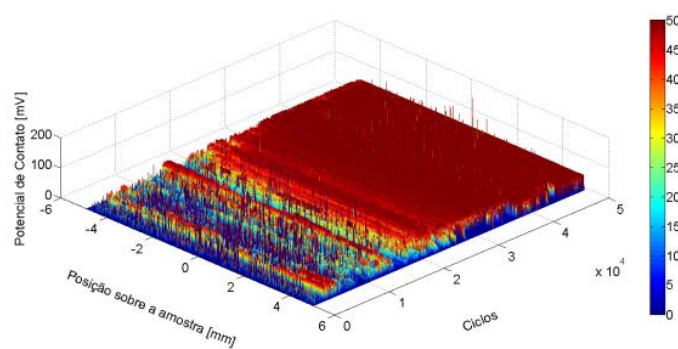


(d)

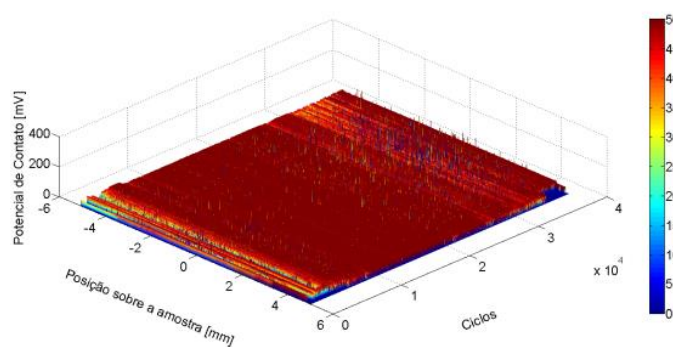
Figura 4.28 – Evolução típica do potencial de contato para amostras texturizadas ensaiadas por 5 h: (a) EDT; (b) EDT + Cr; (c) EDT + NiP; (d) EDT + nitretação.



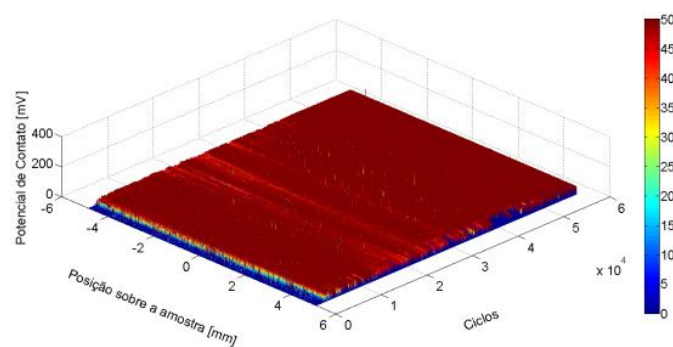
(a)



(b)



(c)



(d)

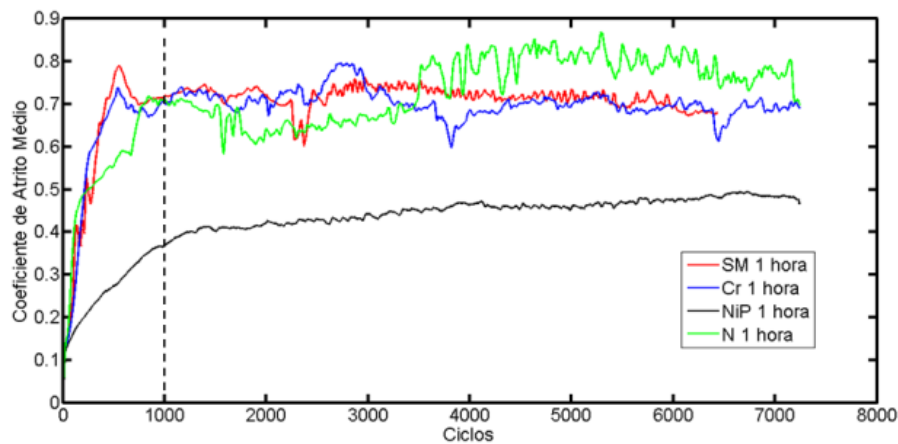
Figura 4.29 – Evolução típica do potencial de contato para amostras sem texturização ensaiadas por 5 h: (a) sem modificação; (b) cromo duro; (c) NiP (d) nitretadas.

As amostras revestidas com NiP apresentaram uma variação mais gradual e contínua do coeficiente de atrito, mas após aproximadamente 5000 ciclos houve uma tendência de estabilização do atrito, novamente sugerindo um regime permanente que corresponde a um equilíbrio entre formação e degradação de tribocamadas protetoras. Porém, o coeficiente de atrito atingido após a estabilização foi inferior ao observado para as amostras sem modificação, cromadas e nitretadas.

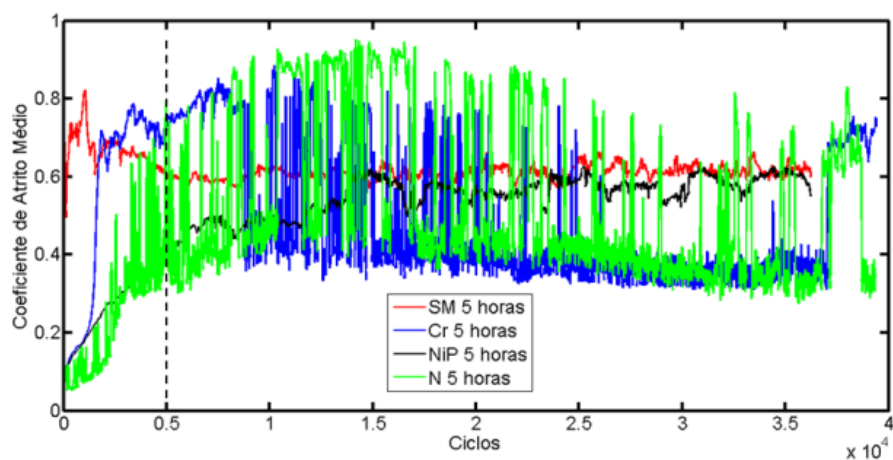
Ao analisar os testes com 5 h de duração, a tendência observada para as amostras sem modificação superficial com 1 h de ensaio manteve-se, ou seja, após um transiente inicial, o coeficiente de atrito estabilizou-se e permaneceu constante até o fim das 5 h (Figura 4.26 (c)). Já as amostras de cromo duro, apesar da aparente estabilização do coeficiente de atrito após 4000 ciclos, apresentaram uma tendência de queda, mas com ampla variação do coeficiente de atrito após 10.000 ciclos de ensaio. Este comportamento já havia sido identificado na literatura e possivelmente está associado ao início do ponto de colapso do revestimento, que com sua ruptura produz debris na área de contato (CHIU et al., 2002).

É possível observar que as amostras revestidas com NiP com 5 h de ensaio apresentaram regiões de comportamento ligeiramente constante, mas também regiões onde o coeficiente de atrito apresenta grandes aumentos ou grandes quedas, como havia sido observado para as amostras revestidas com cromo duro. Além disso, observou-se uma grande variabilidade entre diferentes repetições. Este comportamento sugere uma competição entre formação e deterioração de tribocamadas de baixo atrito. As amostras nitretadas ensaiadas por 5 h também apresentaram uma tendência de grande variabilidade do coeficiente de atrito após uma aparente estabilização inicial, mas neste caso não foram observadas grandes regiões contínuas de baixo ou elevado atrito, sugerindo uma competição mais acirrada entre formação e degradação das tribocamadas protetoras.

Para as amostras previamente texturizadas, a evolução do coeficiente de atrito é mostrado na Figura 4.31. Para amostras somente texturizadas, novamente observa-se um transiente inicial, com uma posterior tendência à obtenção de um regime permanente de desgaste após aproximadamente 4000 ciclos. Este comportamento, semelhante ao que havia sido observado para as amostras somente retificadas (sem modificação), deve refletir a obtenção de um regime onde as taxas de remoção e formação de uma tribocamada entram em equilíbrio.



(a)



(b)

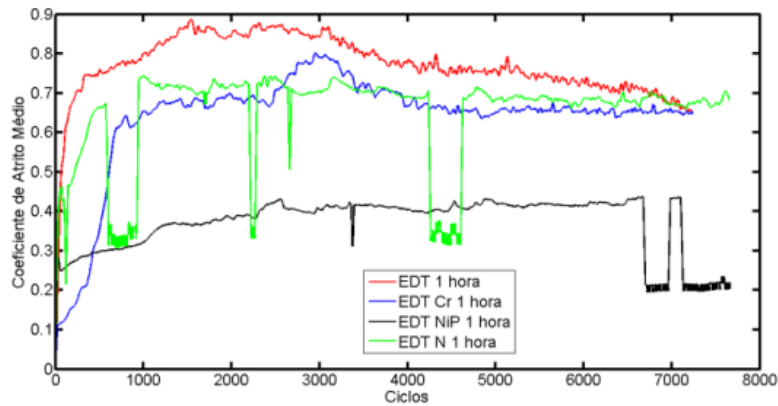
Figura 4.30 – Evolução típica do coeficiente de atrito para amostras sem texturização: (a) ensaiadas por 1 h; (b) ensaiadas por 5 h.

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 arrancamento de uma tribocamada de baixo atrito. Porém, quando comparados com as amostras cromadas sem texturização prévia, os períodos de oscilação foram bem mais curtos.

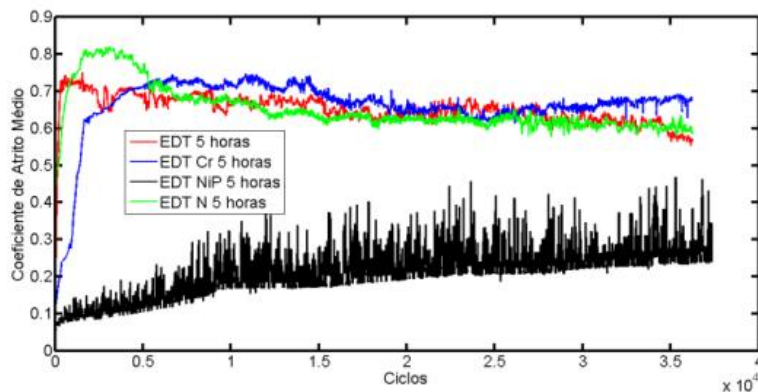
Para as amostras com revestimento de NiP tanto para 1 quanto para 5 h observou-se uma tendência suave de aumento contínuo do coeficiente de atrito médio. Além disso, observa-se em alguns locais picos de valor de atrito mais altos (0.3-0.4), mas eles têm uma frequência e uma duração muito menores que as regiões de alto atrito observadas para as amostras sem texturização com cromo duro, ou seja, pode-se supor que as tribocamadas de baixo atrito para

amostras revestidas com NiP sejam mais estáveis para amostras previamente texturizadas que não texturizadas.

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 4.31 – Evolução típica do coeficiente de atrito para amostras texturizadas: (a) EDT, 1 h; (b) EDT, 5 h; (c) EDT + cromo duro, 1 h; (d) EDT + cromo duro, 5 h; (e) EDT + NiP, 1 h; (f) EDT + NiP, 5 h; (g) EDT + nitretação, 1 h; (h) EDT + nitretação, 5 h.

Após a análise da evolução espacial e temporal do coeficiente de atrito, foram calculados coeficientes de atrito médios (Figura 4.32) para cada condição superficial. Para computar o coeficiente de atrito médio, foi calculada a média (e o correspondente desvio padrão) considerando-se todos os pontos a partir de 4000 ciclos (para que o transiente inicial fosse desconsiderado) de todas as repetições realizadas. A Figura 4.32 (a) mostra o valor médio para amostras sem texturização prévia ensaiadas por 1 h, onde observa-se que para o atrito médio não houve diferença estatisticamente significativa entre as amostras sem modificação, com

cromo duro e nitretada. Já a amostra com revestimento de NiP apresentou um coeficiente de atrito médio inferior, novamente sugerindo que na presença de NiP seja formado um tribosistema com coeficiente de atrito menor que os demais revestimentos/modificações. O aumento do tempo de ensaio de 1 para 5 h (Figura 4.32 (b)) não alterou significativamente o coeficiente de atrito médio, com exceção da amostra com NiP, para a qual houve uma pequena tendência de aumento, apesar de o valor para 5 h ainda ser o menor dentre as condições superficiais investigadas. A texturização prévia das amostras também não influenciou de forma significativa o coeficiente de atrito médio, nem para 1 h de ensaio (Figura 4.32 (c)) nem para 5 h (Figura 4.32 (d)). Porém, para as amostras texturizadas com revestimento de NiP, novamente o coeficiente de atrito médio foi inferior ao das demais condições superficiais. Além disso, houve uma leve tendência de um menor coeficiente de atrito para a amostra previamente texturizada, quando comparada com a de NiP somente retificada, bem como uma ligeira tendência de aumento do coeficiente de atrito médio com o tempo de ensaio de 1 para 5 h.

As variações do coeficiente de atrito podem ser influenciadas pelo tipo de contato entre o corpo e o contracorpo, o qual pode ser elástico ou plástico e é definido pelo índice de plasticidade. O índice de plasticidade (ψ), definido inicialmente por GREENWOOD e WILLIAMSON (1967), representa uma estimativa da tendência do contato entre duas superfícies ser predominantemente plástico ou elástico dependendo das propriedades mecânicas destas superfícies e de sua rugosidade superficial. O índice de plasticidade pode variar de 0 a infinito. Para valores de ψ abaixo de 0,6 o contato deve ser predominantemente elástico e para valores acima de 1 o contato deve ser predominantemente plástico. Na faixa de 0,6 a 1 o contato é elasto-plástico (GREENWOOD ; WILLIAMSON, 1967).

O índice de plasticidade (ψ) é definido pela Equação 4.1. Assim, ele depende da combinação do módulo de elasticidade dos materiais em contato (E'), da dureza do corpo (H), do desvio padrão das distribuições das alturas (σ) e do raio médio das asperidades (β).

$$\psi = \left[\frac{E'}{H} \right] \sqrt{\frac{\sigma}{\beta}} \quad \text{Equação 4.1}$$

A combinação do módulo de elasticidade dos corpos em contato depende do módulo de elasticidade de cada material (E_1 e E_2) e dos coeficientes de Poisson dos materiais (ν_1 e ν_2), sendo definido conforme Equação 4.2:

$$\frac{1}{E'} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad \text{Equação 4.2}$$

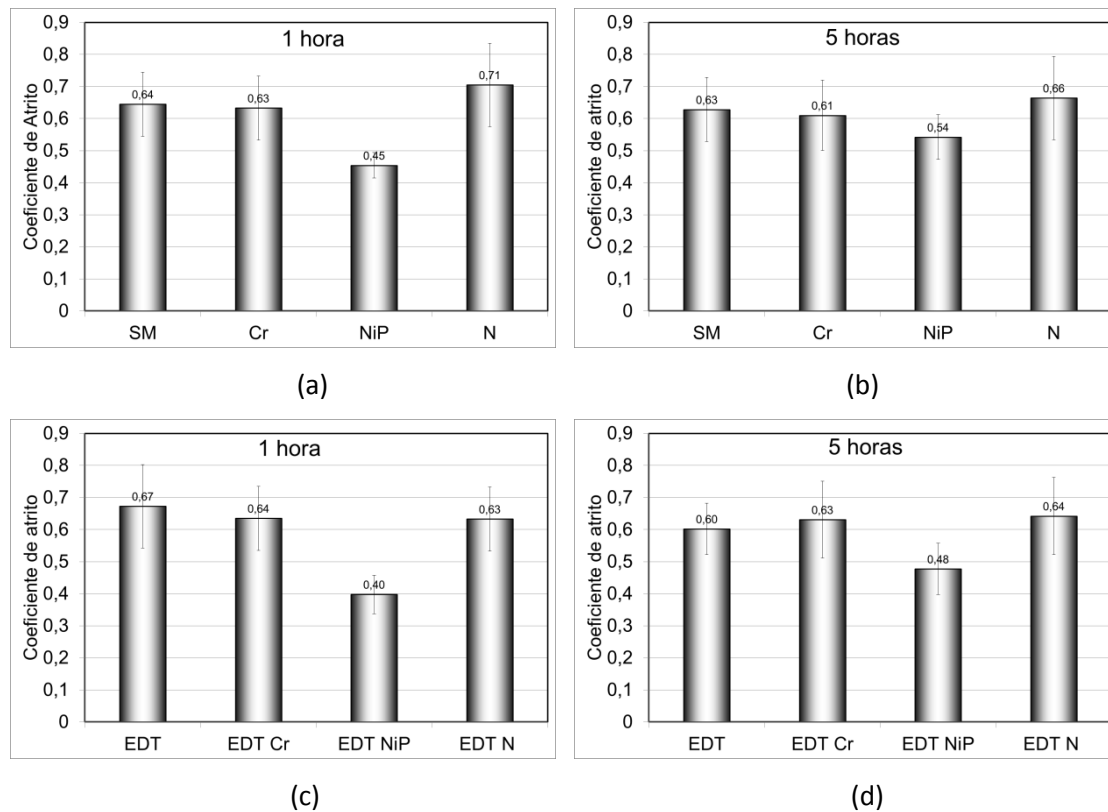


Figura 4.32 – Coeficiente de atrito médio para amostras: (a) sem texturização ensaiadas por 1 h (b) sem texturização ensaiadas por 5 h (c) texturizadas ensaiadas por 1 h (d) texturizadas ensaiadas por 5 h.

Segundo HUTCHINGS (1992) o valor de $\sqrt{\frac{\sigma}{\beta}}$ pode ser aproximado pelo valor da inclinação média das irregularidades, representado pelo valor do parâmetro de rugosidade S_{dq} .

Portanto, o índice de plasticidade pode ser calculado utilizando a expressão apresentada na Equação 4.3.

$$\psi = \left[\frac{E'}{H} \right] S_{dq} \quad \text{Equação 4.3}$$

Procurou-se investigar se o menor coeficiente de atrito para as amostras com revestimento de NiP e se as variações de coeficiente de atrito observadas com o aumento do tempo poderiam estar associados a variações no índice de plasticidade dos contatos envolvidos. A Figura 4.33 mostra a variação do índice de plasticidade antes e após os ensaios para amostras sem texturização. Uma primeira observação inicial é que todos os tratamentos superficiais utilizados resultaram em redução no índice de plasticidade, quando comparados com a amostra sem modificação.

Observa-se também que ao ensaiar amostras sem modificação por 1 h o índice de plasticidade tende a aumentar. Porém, para longos tempos de ensaio (5h), o valor do índice de plasticidade volta a ser semelhante ao da amostra não desgastada. Para as amostras revestidas

com cromo duro, o desgaste das amostras não causa alteração significativa no índice de plasticidade. Já as amostras revestidas com NiP e as amostras nitretadas tiveram uma redução do valor do índice de plasticidade em função do ensaio de deslizamento, independentemente se a duração do ensaio foi de 1 ou 5 h. Portanto, o desgaste das amostras evolui no sentido de criar superfícies mais lisas e consequentemente contatos menos severos.

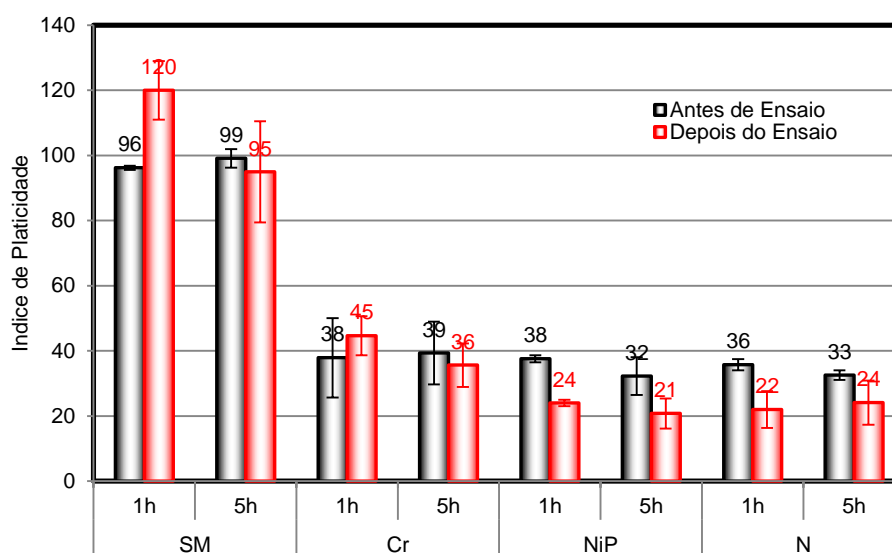


Figura 4.33 – Índice de plasticidade para amostras sem texturização antes e após os ensaios de deslizamento.

Ao comparar amostras sem texturização antes do ensaio (Figura 4.33) e amostras texturizadas antes do ensaio (Figura 4.34) é possível observar que o processo de texturização elevou o valor do índice de plasticidade das amostras. Isso obviamente ocorre em função do aumento de rugosidade superficial promovido pela texturização superficial. Ao analisar a Figura 4.34 é possível observar que, assim como havia ocorrido para as amostras não texturizadas, novamente todos os revestimentos/modificações superficiais utilizados (cromo duro, NiP e nitretação a plasma) reduziram o valor do índice de plasticidade quando comparadas com a amostra somente texturizada (EDT).

Analisando-se o efeito do desgaste no índice de plasticidade das amostras previamente texturizadas, observa-se que para as amostras somente texturizadas o ensaio de deslizamento reduziu o índice de plasticidade, sugerindo algum alisamento da superfície. Para as amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro, o índice de plasticidade reduziu após 1 h de ensaio, mas após 5 h de ensaio este valor retornou ao calculado antes dos ensaios. Isso sugere que o desgaste inicialmente gera uma superfície mais lisa, mas que esta situação não sobrevive por longos tempos de deslizamento e que os mecanismos de desgaste evoluem no sentido de gerar novamente superfícies rugosas. Ao contrário do cromo duro, o índice de

plasticidade das amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP não apresentou diferenças significativas após 1 h de ensaio, mas teve uma redução após ensaios de 5 h, ou seja, alterações significativas só são observadas após longos tempos de ensaio. As amostras nitretadas tiveram redução do parâmetro tanto para ensaios de 1 h quanto para ensaios de 5 h, demonstrando alterações significativas na topografia das superfícies em função do desgaste mesmo para tempos curtos de ensaio. Porém, deve-se salientar que para todas as amostras ensaiadas, em nenhum caso o processo de desgaste resultou em alterações drásticas no índice de plasticidade que pudessem representar uma transição de contato plástico para elástico ou vice-versa e que em todas as situações o contato foi fundamentalmente plástico.

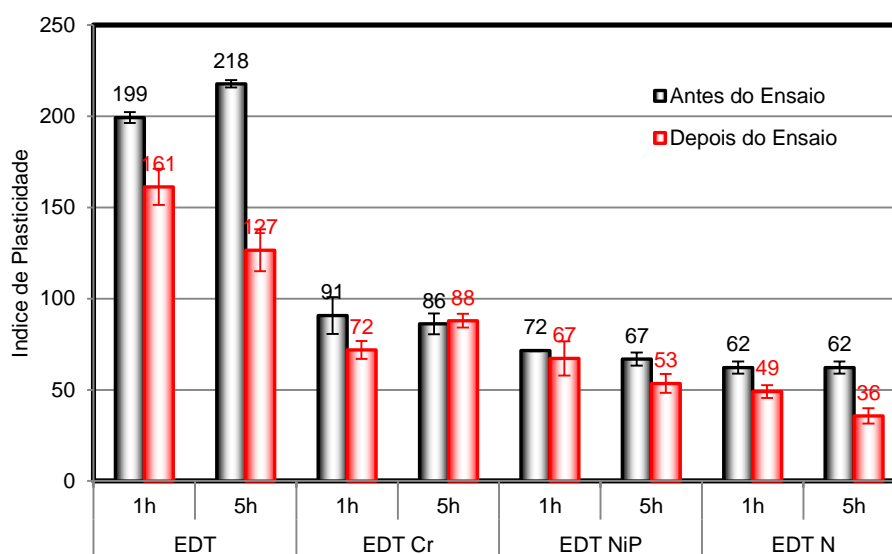


Figura 4.34 – Índice de plasticidade para amostras texturizadas antes e após os ensaios de deslizamento.

Para quantificar o desgaste dos contracorpos utilizou-se a perda de massa média das diferentes repetições para cada condição (Figura 4.35). Inicialmente, mostra-se um resumo das taxas de desgastes médias das amostras. É possível observar que para amostras sem modificação superficial 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. Comportamento semelhante foi observado para as amostras com revestimento de cromo duro.

O revestimento de NiP reduziu a taxa de desgaste do corpo tanto para ensaios de 1 h quanto para 5 h quando comparado com as amostras sem modificação, sendo que a taxa de desgaste das amostras reduziu de 1 para 5 h de teste. Assim, o revestimento de NiP

aparentemente induz a formação de uma tribocamada de relativamente baixo atrito, a qual protege tanto a amostra quanto o contracorpo contra desgaste.

Comparando-se a amostra nitretada com a amostra sem modificação, a nitretação reduziu a taxa de desgaste do corpo para ensaios de 1 h, mas para 5 h de ensaio a taxa de desgaste da amostra nitretada foi semelhante à da amostra sem modificação. Assim, parece que para as amostras nitretadas, inicialmente o desgaste ocorre preferencialmente no contracorpo, mas que essa situação não permanece para longos tempos de ensaio.

A análise das amostras texturizadas revelou que todas as amostras reduziram sua taxa de desgaste quando o tempo de ensaio passou de 1 para 5 h, mostrando que as superfícies inicialmente rugosas das amostras texturizadas sofrem um desgaste intenso, mas que o alisamento promovido pelo processo de desgaste aparentemente resulta em alguma proteção das amostras contra posterior desgaste. A alteração da topografia provocada pelo processo EDT reduziu a taxa de desgaste da amostra quando comparada com a amostra somente retificada (sem modificação). A texturização com posterior revestimento de cromo duro não apresentou diferença significativa em comparação com amostras somente texturizadas. O revestimento de NiP em amostras previamente texturizadas reduziu a taxa de desgaste das amostras quando comparadas com as amostras somente texturizadas. A nitretação após texturização aumentou a taxa de desgaste das amostras, quando comparadas com as amostras somente texturizadas.

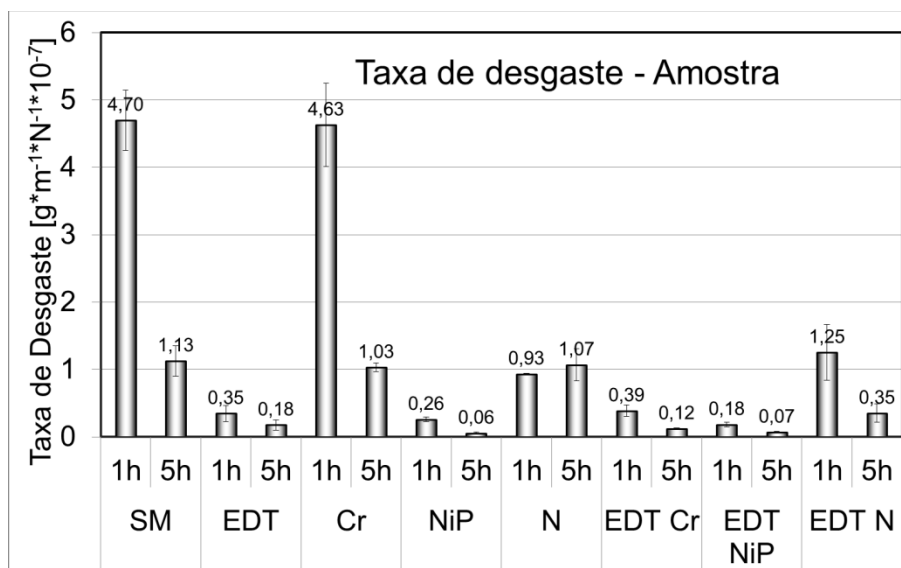


Figura 4.35- Taxa de desgaste das amostras.

A seguir, apresenta-se o desgaste sofrido pelos contracorpos (Figura 4.36). Inicialmente, observa-se que para algumas condições, 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 tendência de aumento da taxa de desgaste com o tempo para as amostras sem modificação, EDT, cromadas e EDT + nitretadas e uma tendência de queda para as amostras com NiP. Ainda é possível observar na Figura 4.36 que em amostras que receberam apenas o revestimento de NiP a taxa de desgaste para ensaios de 5 h foi negativa, ou seja, ocorreu uma elevação na massa do contracorpo. É razoável supor que houve a formação de uma tribocamada protetora no contracorpo ao ensaiar amostras revestidas com NiP.

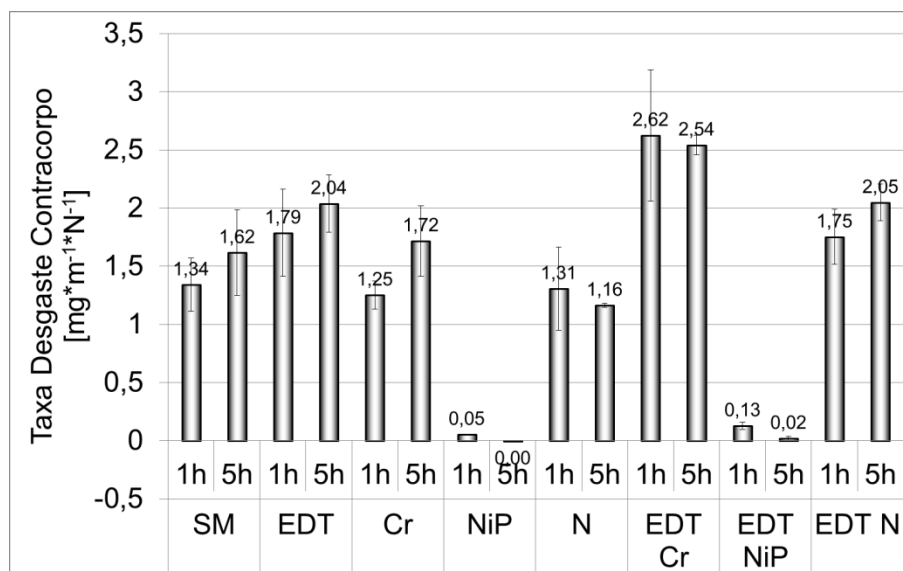


Figura 4.36 – Taxa de desgaste do contracorpo para diferentes modificações superficiais e tempos de ensaio de deslizamento.

A Figura 4.37 apresenta imagens de elétrons secundários obtidas em amostras sem modificação superficial. Para efeito comparativo, a Figura 4.37 (a) apresenta uma imagem da superfície original antes do ensaio de desgaste, onde é possível observar as marcas do processo de retificação realizado antes do ensaio. Após um tempo de ensaio de 1 h (Figura 4.37 (b)), a topografia da amostra foi completamente alterada. O desgaste provocou “alisamento” em algumas regiões da superfície, mas existem regiões aparentemente mais baixas que são mais rugosas.

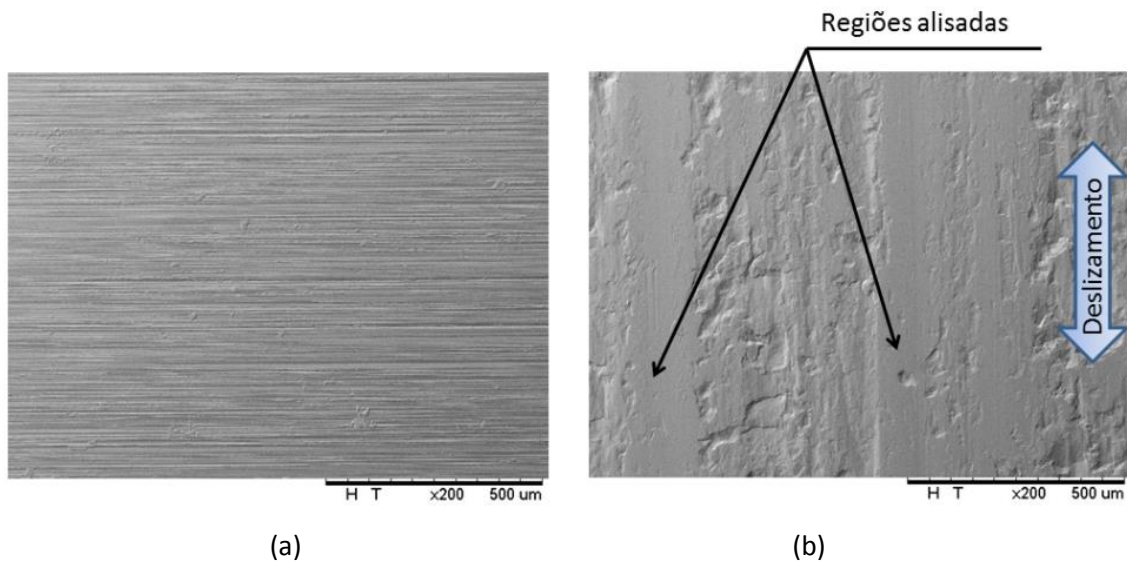


Figura 4.37 – Imagens por MEV típicas de uma amostra sem modificação superficial: (a) sem ensaio de desgaste e (b) ensaiada por 1 h.

Ao observar-se as trilhas de desgaste com maior aumento (Figura 4.38) usando elétrons secundários (Figura 4.38(a)) e retroespalhados (Figura 4.38(b)) verificou-se que nas regiões mais rugosas da trilha de desgaste existe uma tribocamada não contínua (ver indicações com setas), com aspecto bastante “retalhado”, rica em elementos mais leves (ver regiões mais escuras na imagem de elétrons retroespalhados). Aparentemente, as partes mais profundas das regiões rugosas das trilhas correspondem a regiões onde a tribocamada foi fortemente cominuída, deformada e oxidada, ficando cada vez mais espessa e frágil ocorrendo o lascamento de grandes volumes do material, enquanto as regiões com presença de tribocamadas aparecem um pouco mais altas. Isto sugere uma competição entre formação e arrancamento de tribocamadas ricas em elementos mais leves. Por outro lado, as regiões lisas nas trilhas de desgaste aparentemente não mostram estas tribocamadas, sugerindo um desgaste fundamentalmente mecânico, o qual aparentemente leva ao desgaste das protuberâncias mais altas da superfície.

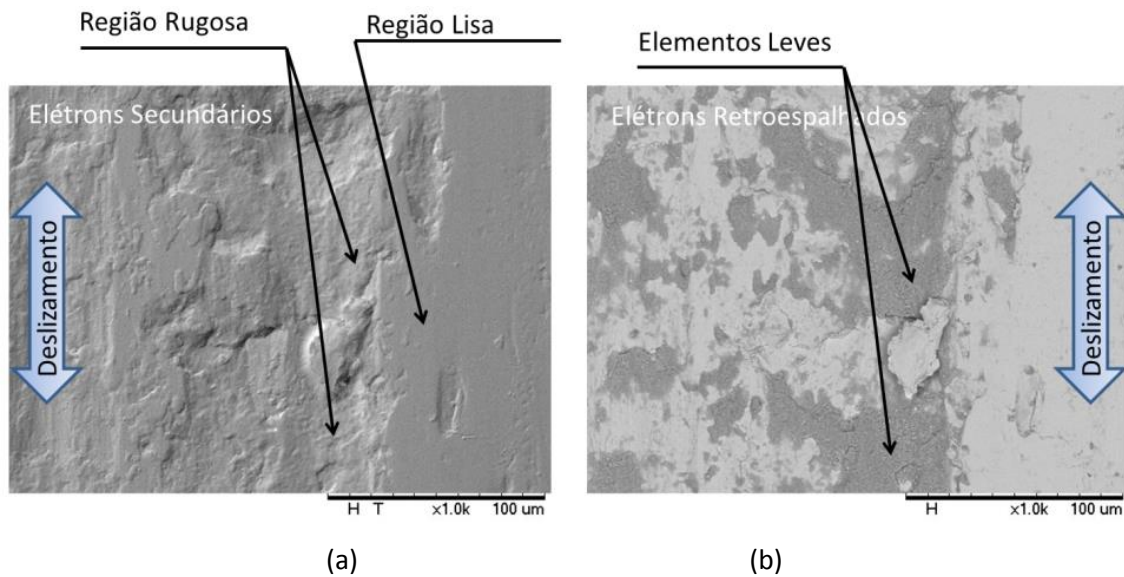


Figura 4.38 – Imagens por MEV típicas de uma amostra sem modificação superficial ensaiada por 1 h (a) imagem via elétrons secundários (b) imagem via elétrons retroespalhados.

A análise por EDX da amostra revelou que a tribocamada formada é composta por ferro e oxigênio, conforme mostra a Figura 4.39. A presença desta tribocamada corrobora a ideia de que após uma região de transição inicial, tem-se um razoável equilíbrio entre as taxas de remoção da tribocamada rica em oxigênio e ferro que seja protetora da superfície, mas que existe uma constante competição entre formação e remoção desta tribocamada.

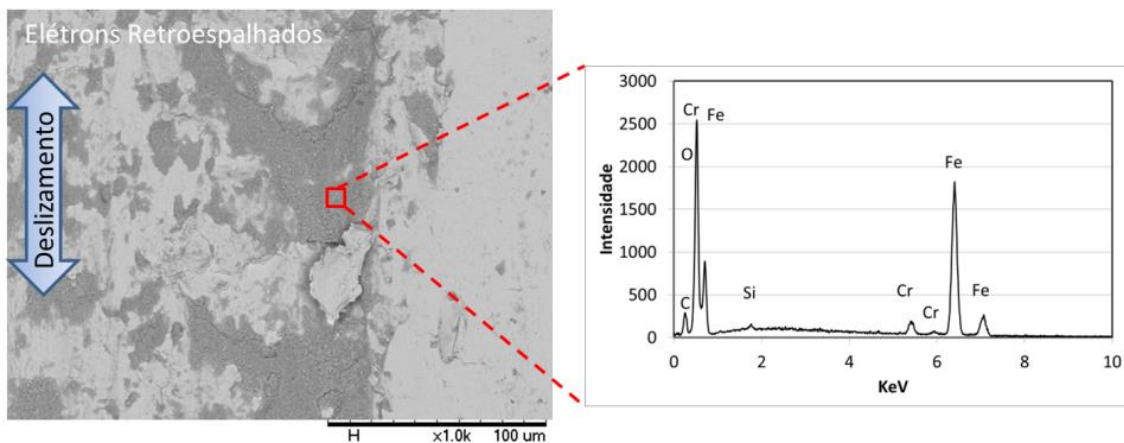


Figura 4.39 – Análise de EDX típica de amostra sem modificação superficial ensaiada por 1 h.

Ao elevar o tempo de ensaio para 5 h, Figura 4.40, novamente não se observa as marcas da retificação na superfície. Porém, ao comparar as trilhas com as das amostras ensaiadas por 1 h, não existem regiões perfeitamente lisas como havia sido observado na Figura 4.38, onde o desgaste havia sido puramente mecânico. Analisando em conjunto as imagens de elétrons

secundários e retroespalhados, é possível observar novamente a presença de uma tribocamada retalhada, onde as partes aparentemente mais fundas (ver seta) correspondem a regiões delascamento desta tribocamada. Além disso, essa tribocamada se apresenta em geral um pouco mais lisa que a observada após 1 h de ensaio. É razoável supor que à medida em que o tempo de ensaio aumenta a superfície evolui no sentido de formar, alisar e remover a tribocamada.

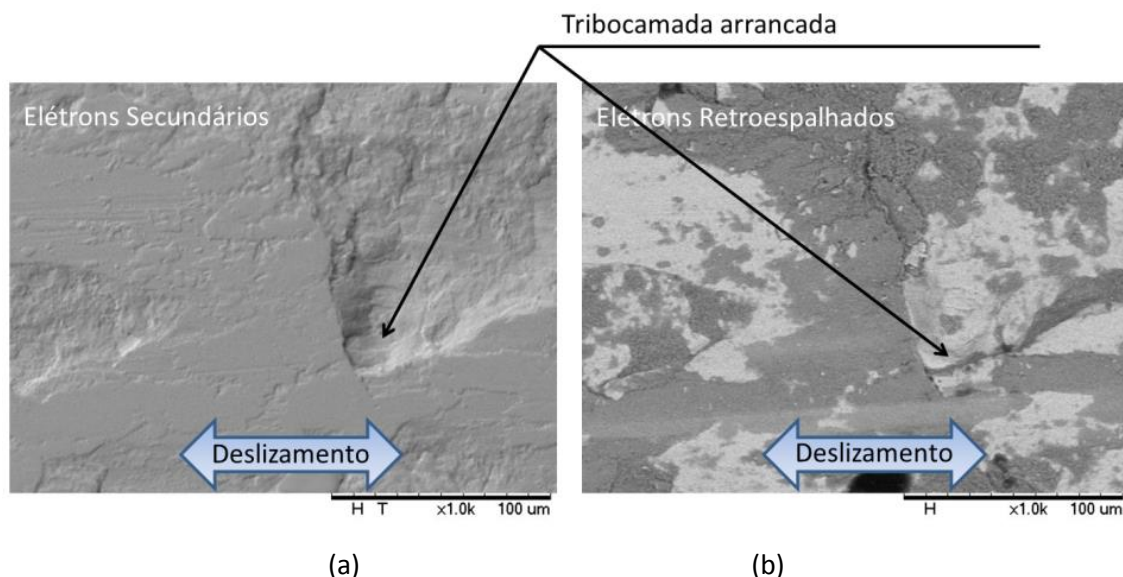


Figura 4.40 – MEV de amostras sem modificação superficial ensaiadas por 5 h (a) via elétrons secundários (b) via elétrons retroespalhados.

Ao observar-se os debriscoletados ao final dos ensaios via elétrons retroespalhados, notou-se que estes se encontram fragmentados e oxidados, mostrados na Figura 4.41. A geometria dos debris é compatível com os as regiões mais fundas encontradas nas superfícies da amostra desgastada e por estarem oxidados supõe-se que estes fragmentos fizeram parte da tribocamada formada na amostra, a qual foi posteriormente lascada.

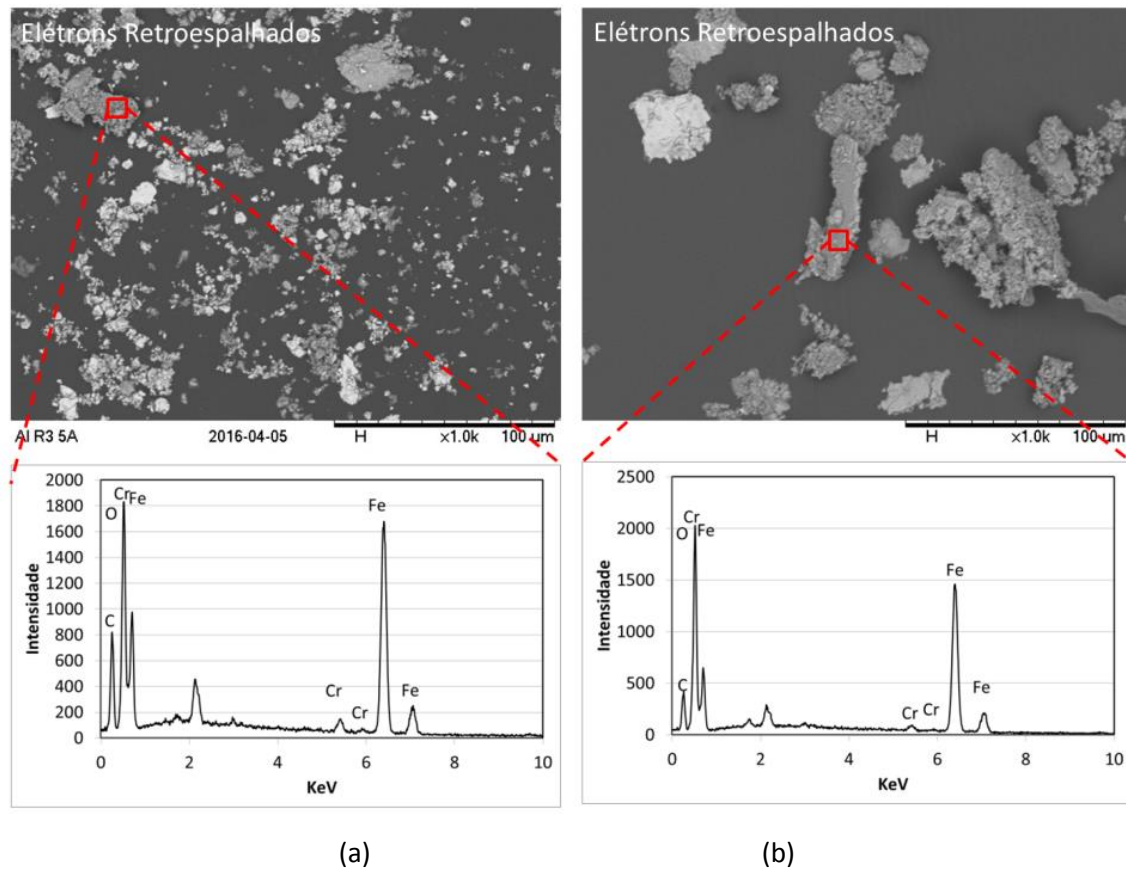
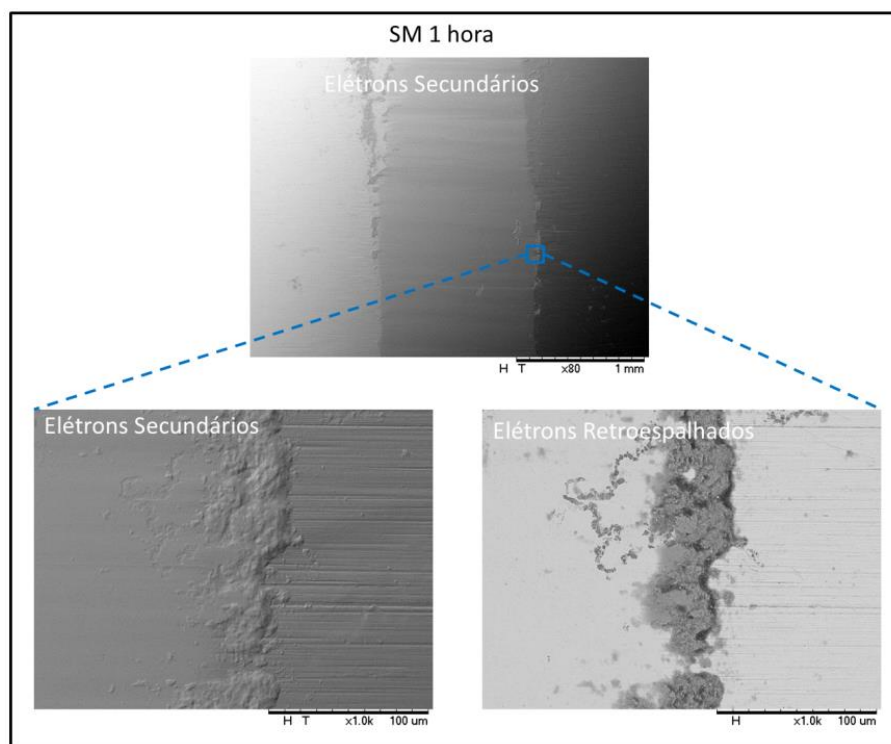
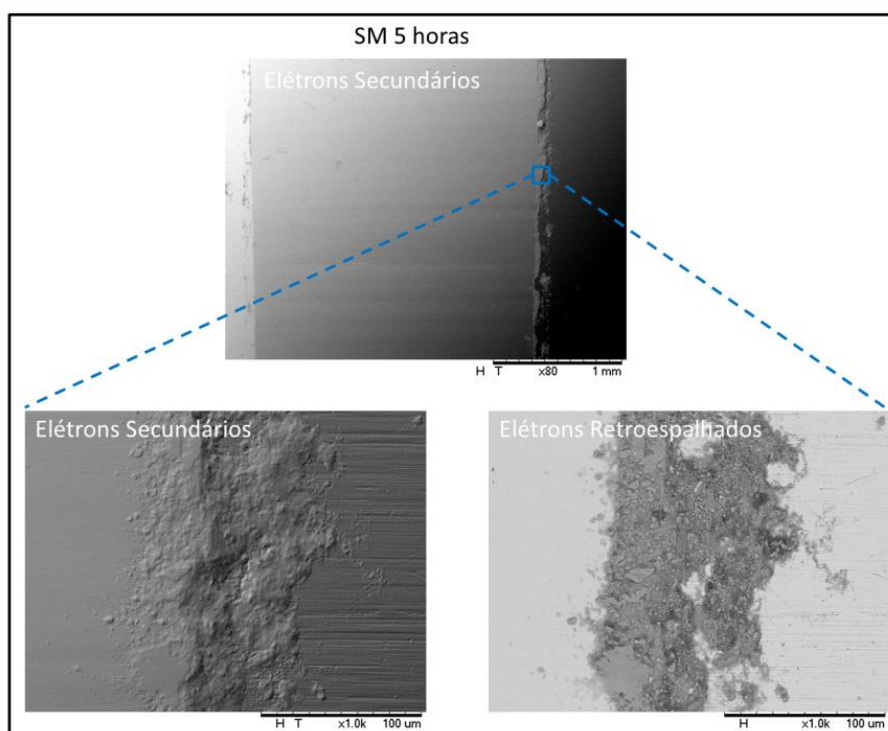


Figura 4.41 – Imagens via elétrons retroespalhados e análise de EDX de debris recolhidos após ensaio com amostras sem modificação superficial (a) 1 h (b) 5 h.

O contracorpo ensaiado com amostras sem modificação superficial observado via microscopia eletrônica de varredura apresentou um pequeno acúmulo de material nas bordas da marca de desgaste tanto para 1 h quanto para 5 h, Figura 4.42(a e b). A observação dessas regiões via elétrons retroespalhados sugere que o material acumulado, de cor mais escura, é composto por elementos leves.



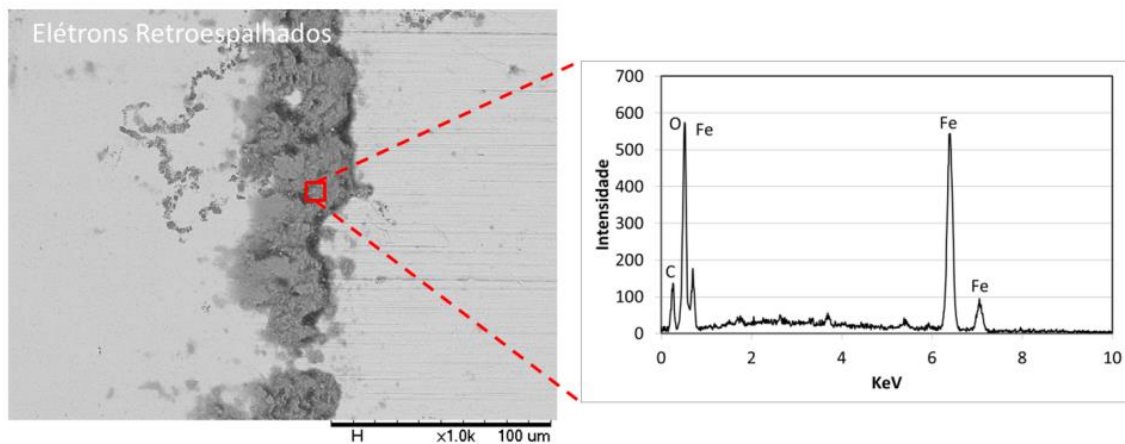
(a)



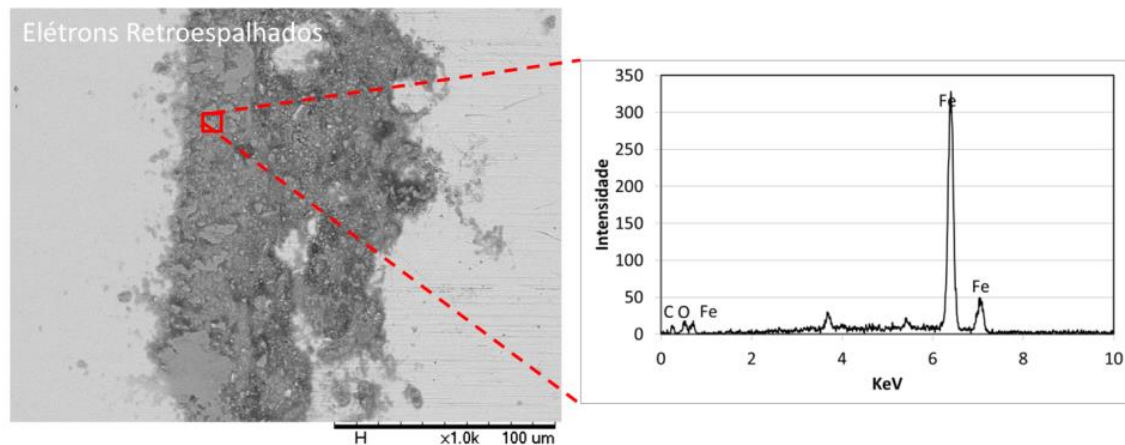
(b)

Figura 4.42 – MEV de contracorpo típico ensaiado com amostras sem modificação superficial (a) ensaiado por 1 h(b) ensaiado por 5 h.

A análise do material acumulado nas bordas da marca de desgaste via EDX revelou que se trata de uma tribocamada rica em ferro e oxigênio, para 1 e 5 h de ensaio, como mostrado na Figura 4.43.



(a)

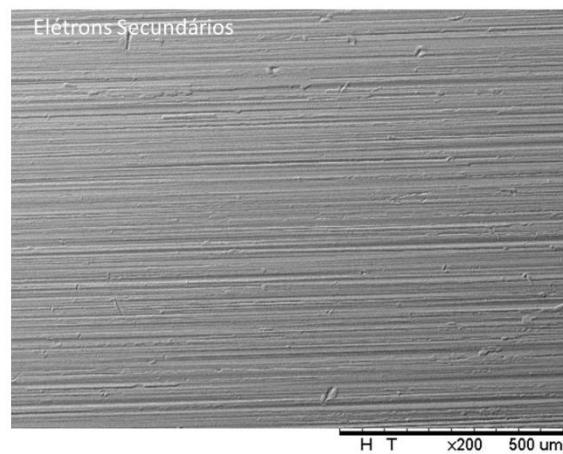


(b)

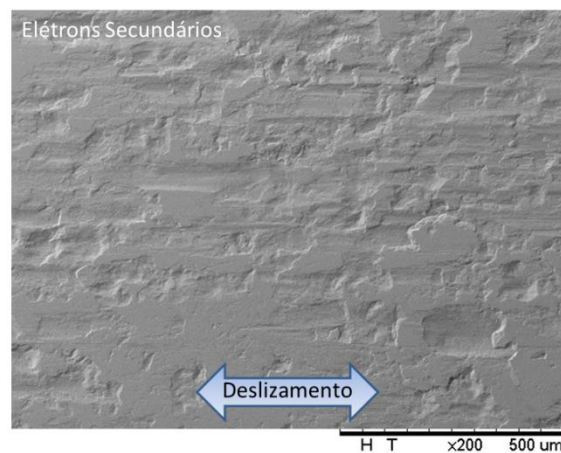
Figura 4.43 – Análise via EDX de contracorpo típico ensaiado contra amostras sem modificação (a) ensaiado por 1 h (b) ensaiado por 5 h.

Para as amostras revestidas com cromo duro, a superfície original antes do teste de deslizamento (Figura 4.44 (a)) possui uma topografia constituída por ranhuras, provenientes do processo de retificação feito anteriormente ao processo de revestimento de cromo duro. Já a Figura 4.44 (b) mostra a topografia da amostra após 1 h de deslizamento. A amostra que foi ensaiada por 1 h apresentou topografia com regiões lisas e regiões rugosas, sendo que as regiões mais lisas são aparentemente mais altas. Analogamente ao encontrado nos ensaio em amostras sem modificação superficial, ao elevar o tempo de ensaio para 5 h a topografia mostrou-se com uma porcentagem maior de áreas alisadas quando comparadas a ensaios de 1

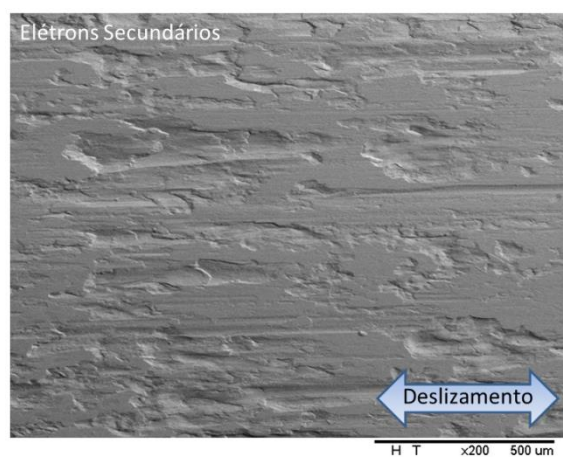
h de deslizamento. A Figura 4.44 (c) mostra a superfície de uma amostra revestida com cromo duro ensaiada por 5 h.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.44 – MEV de uma trilhatípica formada em uma amostra revestida com cromo duro (a) antes do deslizamento (b) após 1 h de deslizamento (c) após 1 h de deslizamento.

Ao analisar a superfície da marca de desgaste via elétrons secundários com mais detalhes, na Figura 4.45 (a) e (c), é possível notar que, assim como em amostras sem modificação superficial, o teste de deslizamento de 1 h provocou um alisamento da superfície em regiões aparentemente mais altas. As Figuras 4.45 (b) e (d) mostra a imagem via elétrons retroespalhados da topografia, onde é possível observar que as regiões desgastadas apresentam elementos leves tanto nas regiões mais rugosas quanto nas regiões mais lisas.

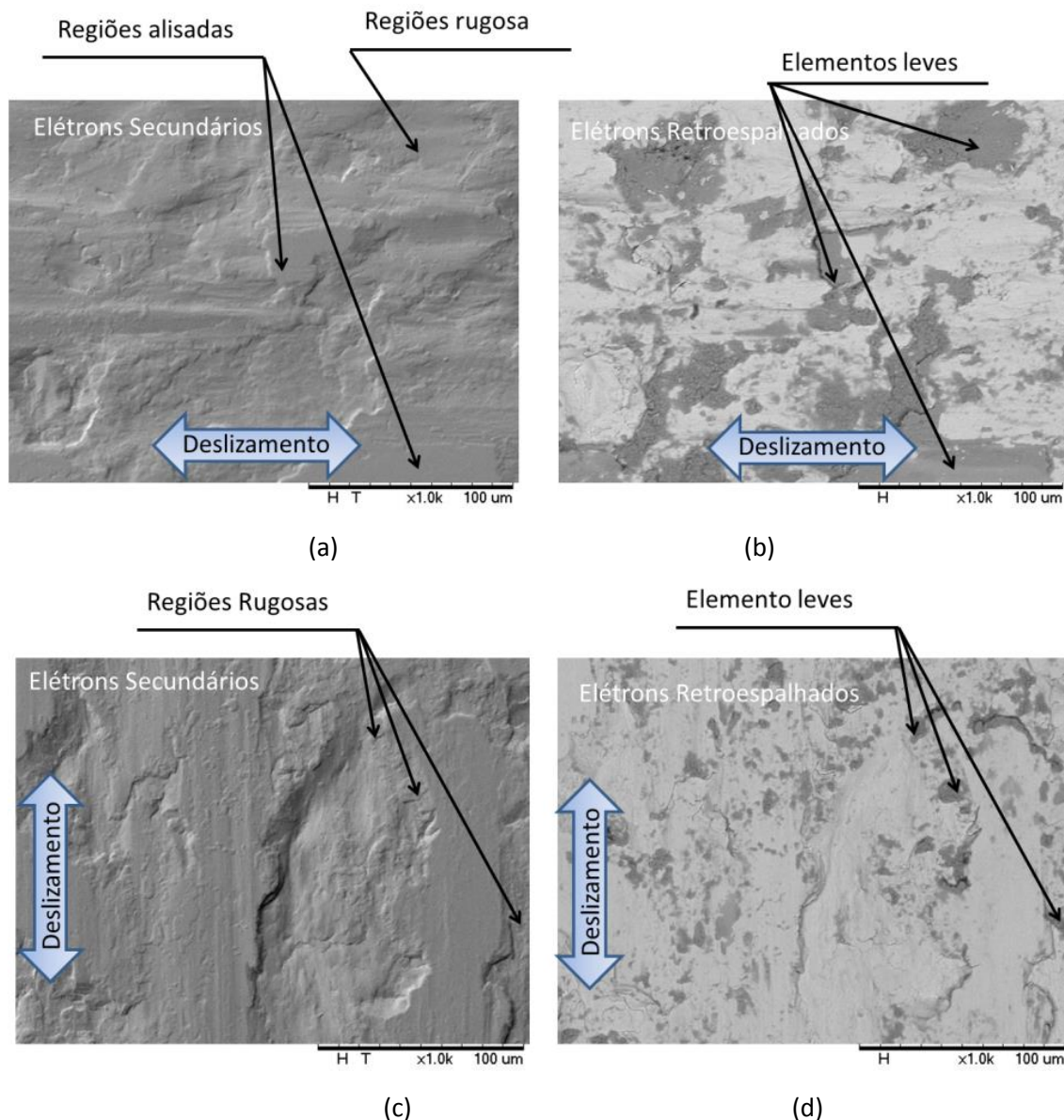


Figura 4.45 – MEV de trilhas típicas produzidas em uma amostra recoberta com cromo duro (a) 1 h, elétrons secundários e (b) 1 h, elétrons retroespalhados (c) 5h, elétrons secundários e (d) 5h, elétrons retroespalhados.

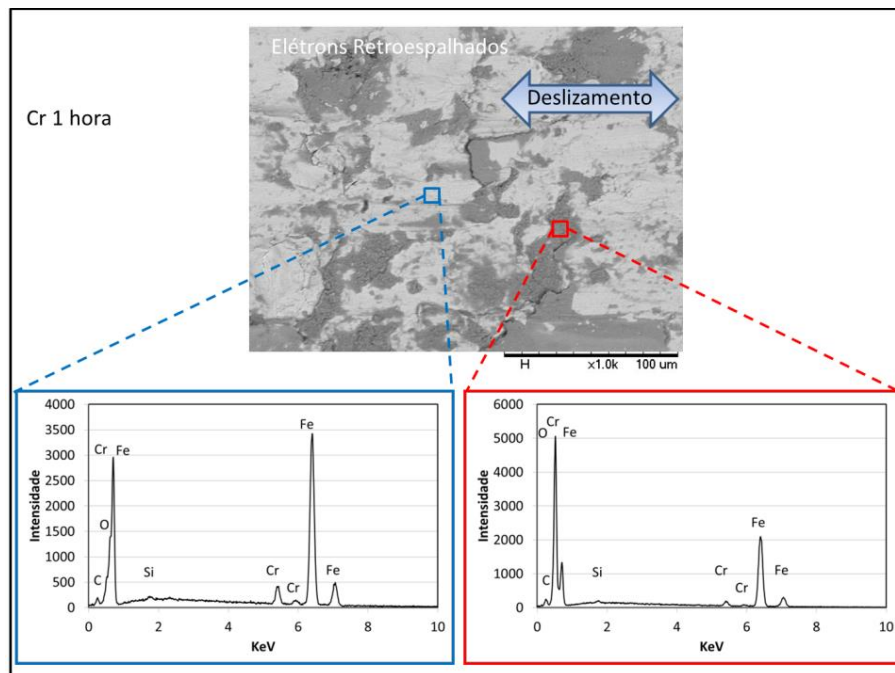
EDX da amostra ilustrado na Figura 4.46 mostram que a região clara é rica em ferro e possui quantidade de cromo semelhante à encontrada no substrato de aço VC 10. Já as regiões

escuras são compostas de ferro e oxigênio e a quantidade de cromo encontrada é semelhante às das regiões claras, sugerindo que grande parte do revestimento de cromo duro foi removido durante o ensaio de deslizamento. Tanto para 1 h quanto para 5 h de ensaio, aparentemente ocorre a formação de uma tribocamada nas regiões aparentemente mais altas com a presença de ferro e oxigênio e as partes rugosas aparentemente mais baixas são originadas após a remoção da tribocamada, causados possivelmente 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).

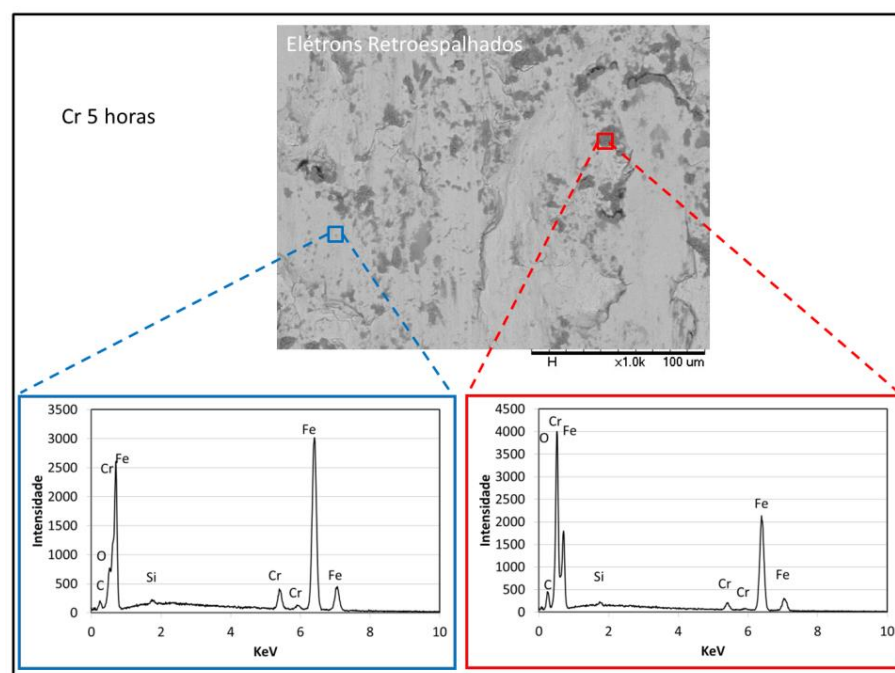
Os debris mostrados na Figura 4.47 mostram que os testes de 5 h fragmentam mais os debris e que tanto para 1 h quanto para 5 h os debris são compostos por Ferro, Cromo e Oxigênio. Além disso, observa-se que eles apresentam uma geometria em forma de flocos. É razoável supor que o desgaste envolva contínuo 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 análise do contracampo revelou que o deslizamento alternado provocou um acúmulo de material nas bordas da marca de desgaste. Ao observar as imagens via elétrons retroespalhados, Figura 4.48, tanto para 1 h quanto para 5 h, é possível observar que o material aderido é composto por elementos leves. Já a análise via EDX revelou que a tribocamada formada é composta por ferro e oxigênio, de forma semelhante ao observado para as amostras sem modificação.

Amostras revestidas com NiP não tiveram diferenças significativas ao serem ensaiadas por 1 h ou 5 h. A Figura 4.49 (a) mostra a topografia de uma amostra revestida com NiP antes dos ensaios de deslizamento e a Figura 4.49 (b) mostra a topografia típica de uma amostra revestida com NiP após o ensaio de deslizamento de 1 h, onde é possível observar que o ensaio recobriu a topografia original da amostra possivelmente com uma tribocamada. Nota-se ainda que esta tribocamada é aparentemente lisa.



(a)



(b)

Figura 4.46 – Imagem via elétrons retroespalhados e análise de EDX de uma amostra revestida com cromo duro após deslizamento por: (a) 1 h; (b) 5 h.

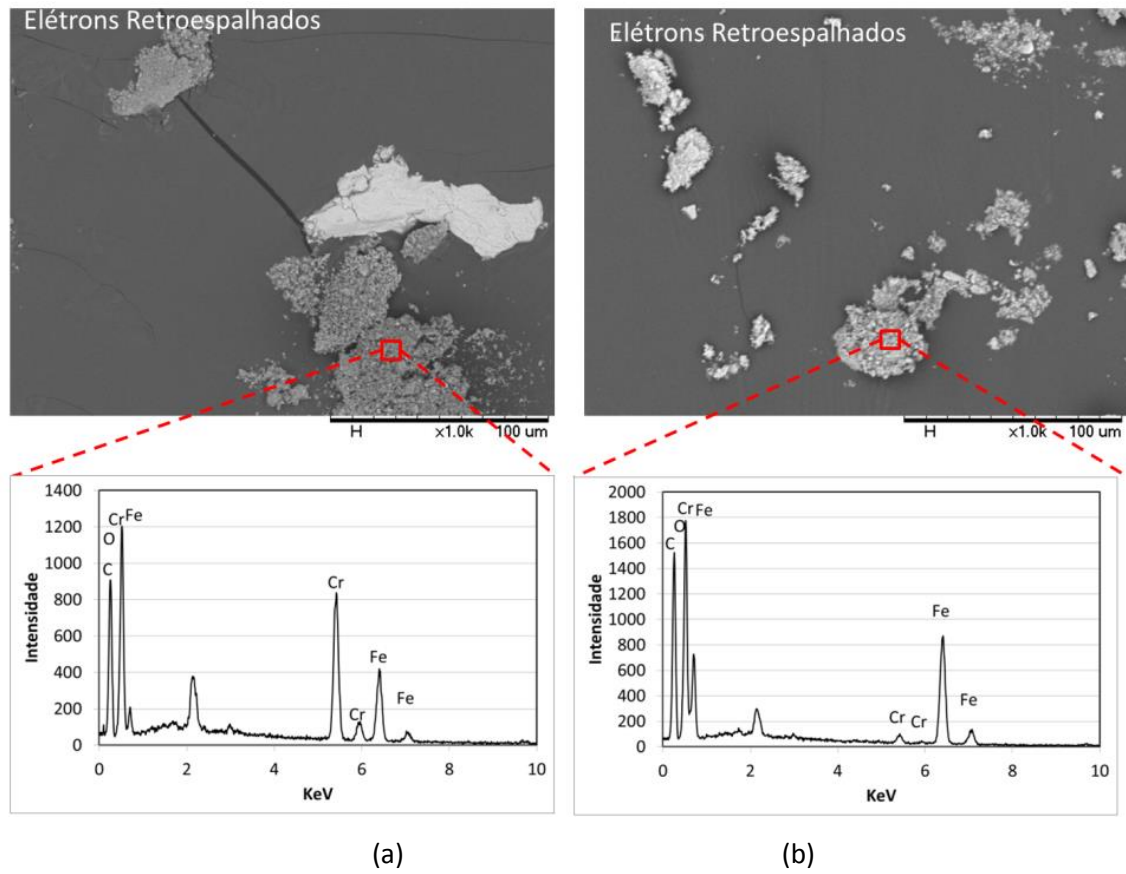


Figura 4.47 - Imagens via elétrons retroespalhados e análise de EDX de debriscoletados após ensaio com amostras revestidas com cromo duro: (a) 1 h; (b) 5 h.

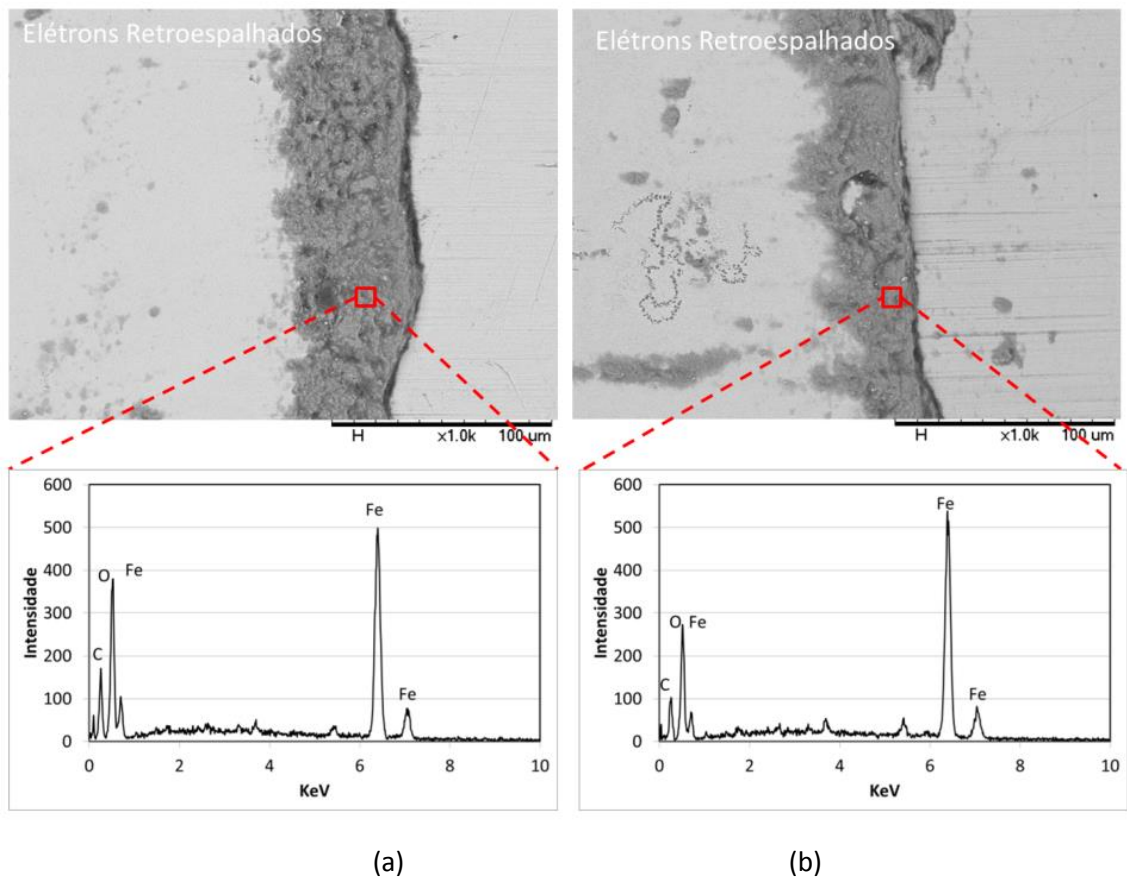


Figura 4.48 – MEV de contracorpo ensaiado contra amostras revestidas com cromo duro por: (a) 1 h; (b) 5 h.

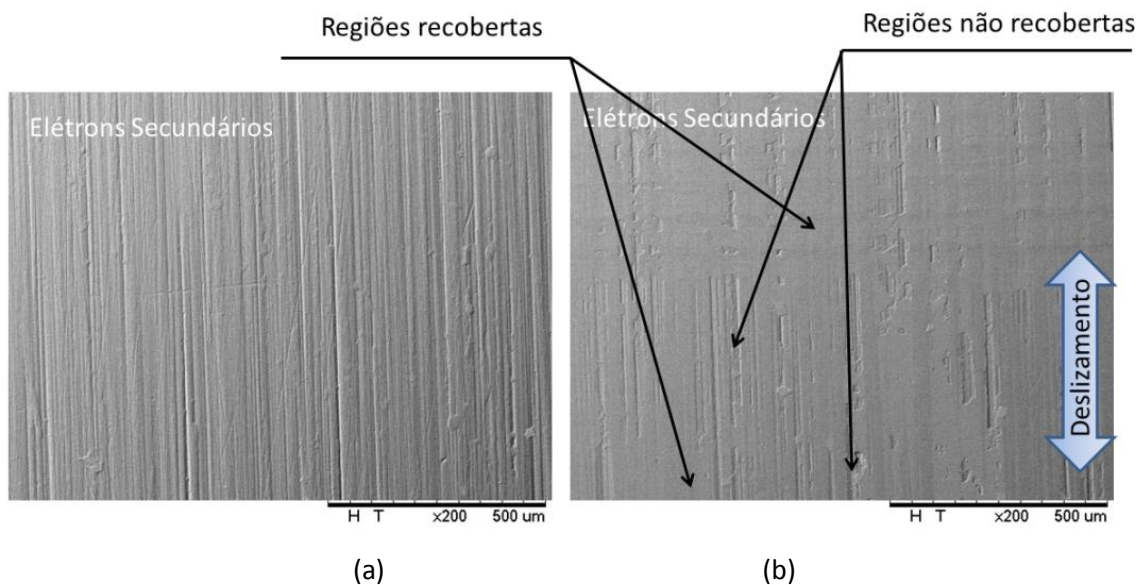


Figura 4.49 – Imagens de MEV típicas para amostras revestidas com NiP: (a) antes do teste de deslizamento; (b) após 1 h de deslizamento.

Ao ampliar os detalhes da imagem e observar via elétrons secundários, Figura 4.50 (a), e elétrons retroespalhados, Figura 4.50 (b) é possível observar que a maior parte da topografia original aparentemente foi recoberta por uma espessa tribocamada. Porém, enquanto em algumas regiões esta tribocamada aparentemente foi cominuída, oxidada e fraturada, em outras a topografia original da amostra foi preservada. A tribocamada formada possui regiões com a presença de elementos leves, mostradas nas regiões escuras da Figura 4.50 (b). Nota-se que nestas regiões a tribocamada aparentemente está tão espessa que possui regiões trincadas. Em contrapartida, as regiões que aparentemente estão mais altas na Figura 4.50 (a) também possuem porções claras, sem elementos leves, mostradas na Figura 4.50 (b).

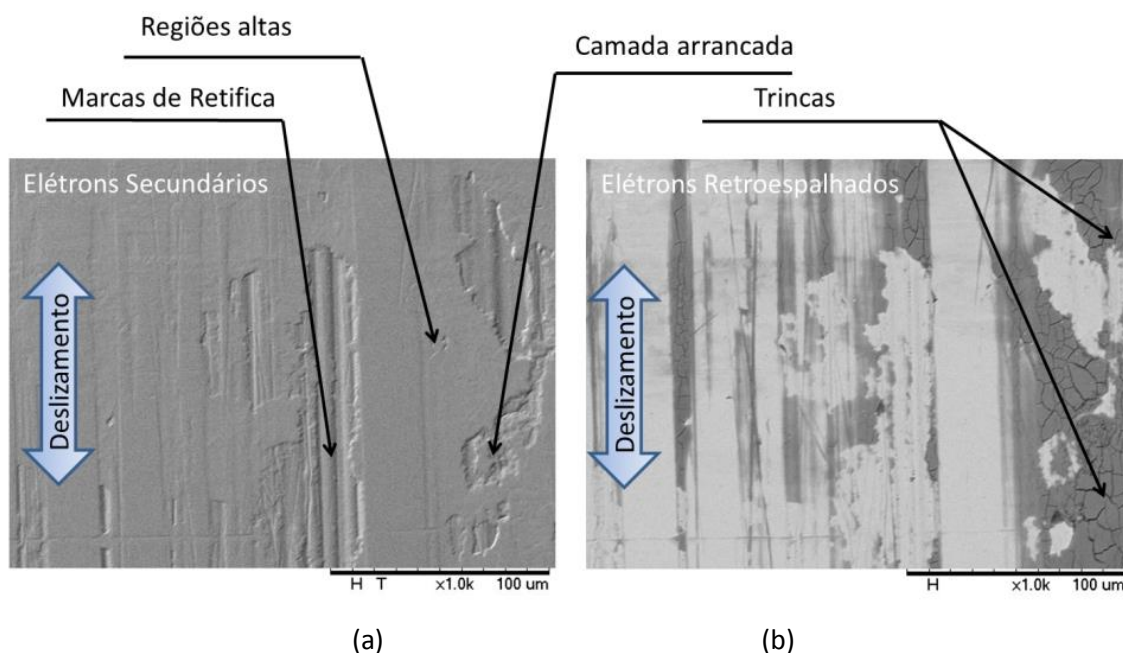


Figura 4.50 – Imagens por MEV de uma amostra recoberta com NiPtípica após 1 h deslizamento: (a) elétrons secundários e (b) elétrons retroespalhados.

A Figura 4.51 mostra espectros por EDX realizados nas regiões claras e escuras da Figura 4.51 (b). É possível observar que a região clara é rica em ferro, níquel e fósforo, enquanto a região escura é composta por ferro, níquel, fósforo e oxigênio.

A variação do coeficiente de atrito mostrado na Figura 4.27 havia mostrado regiões alternadas de valores mais altos e mais baixos. Supõe-se que as regiões de maior atrito coincidam com o lascamento da tribocamada. Porém, este valor ainda é inferior ao observado para o cromo duro. Como a espessura do revestimento de NiP é bem maior que o de cromo duro, é razoável supor que o revestimento ainda esteja presente nas regiões onde o lascamento da tribocamada ocorra, mantendo assim o coeficiente de atrito mais baixo em relação ao cromo duro.

Pode-se supor que estes resultados sugiram que durante alguns períodos do ensaio a formação da tribocamada seja mais significativa que a sua deterioração e que esta camada apresente baixo coeficiente de atrito. Em algum momento a sua remoção torna-se mais significativa, possivelmente por um arrancamento de grandes porções desta tribocamada. A sua cinética de formação faz com que o atrito então permaneça elevado por um período, para então novamente restabelecer-se em valores mais baixos.

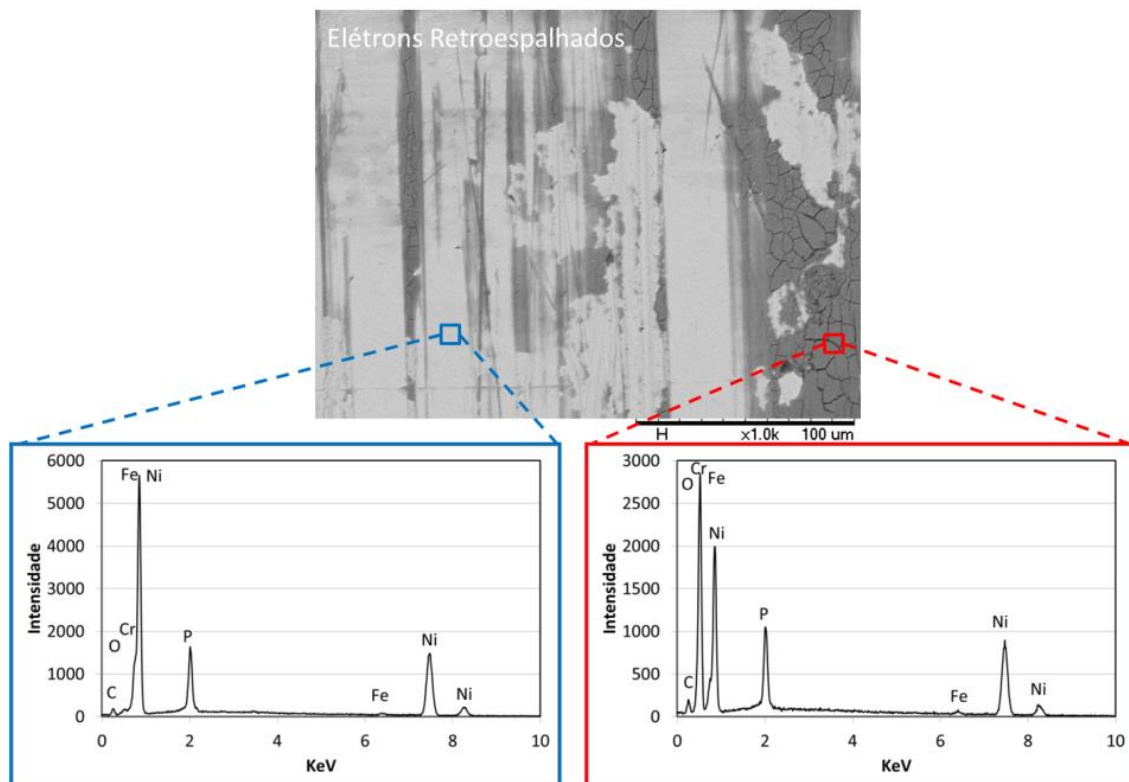


Figura 4.51 – Imagem via elétrons retroespalhados e análise de EDX de uma amostra revestida com NiP após deslizamento por 1 h.

Imagens dos debris via elétrons retroespalhados, Figura 4.52, mostraram aspecto semelhante ao observado para os testes com cromo duro, mas com alguns debris maiores e trincados, provavelmente provenientes do lascamento em mais espessas das tribocamadas.

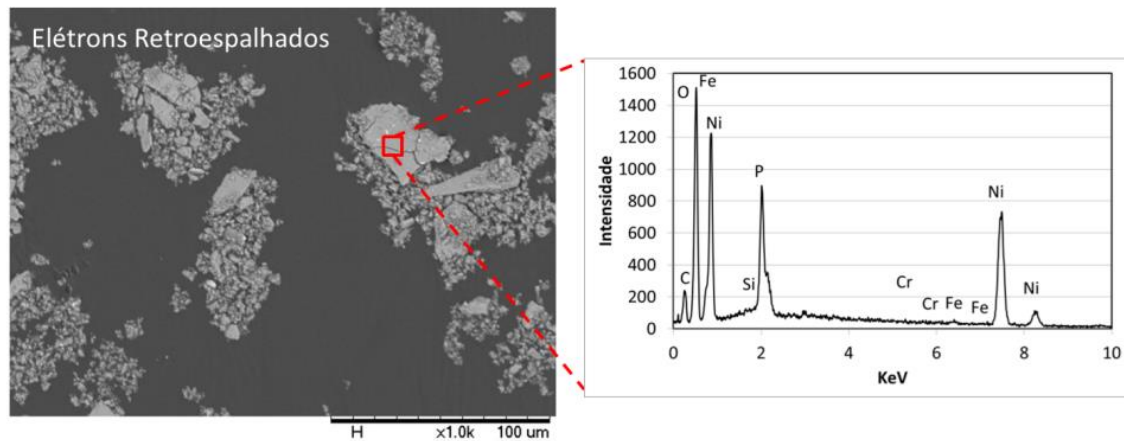


Figura 4.52 – Imagens via elétrons retroespalhados de debriscoletados após ensaios das amostras revestidas com NiP.

Ao observar-se os contracorpos que deslizaram sobre essas amostras em imagens via microscopia eletrônica de varredura, Figura 4.53, nota-se que o deslizamento provocou a formação de uma tribocamada no cilindro que cobre grande parte da marca de desgaste. Imagens via elétrons secundários sugerem que a tribocamada corresponde às regiões mais elevadas da marca de desgaste e imagens via elétrons retroespalhados sugerem que a tribocamada seja formada por elementos leves.

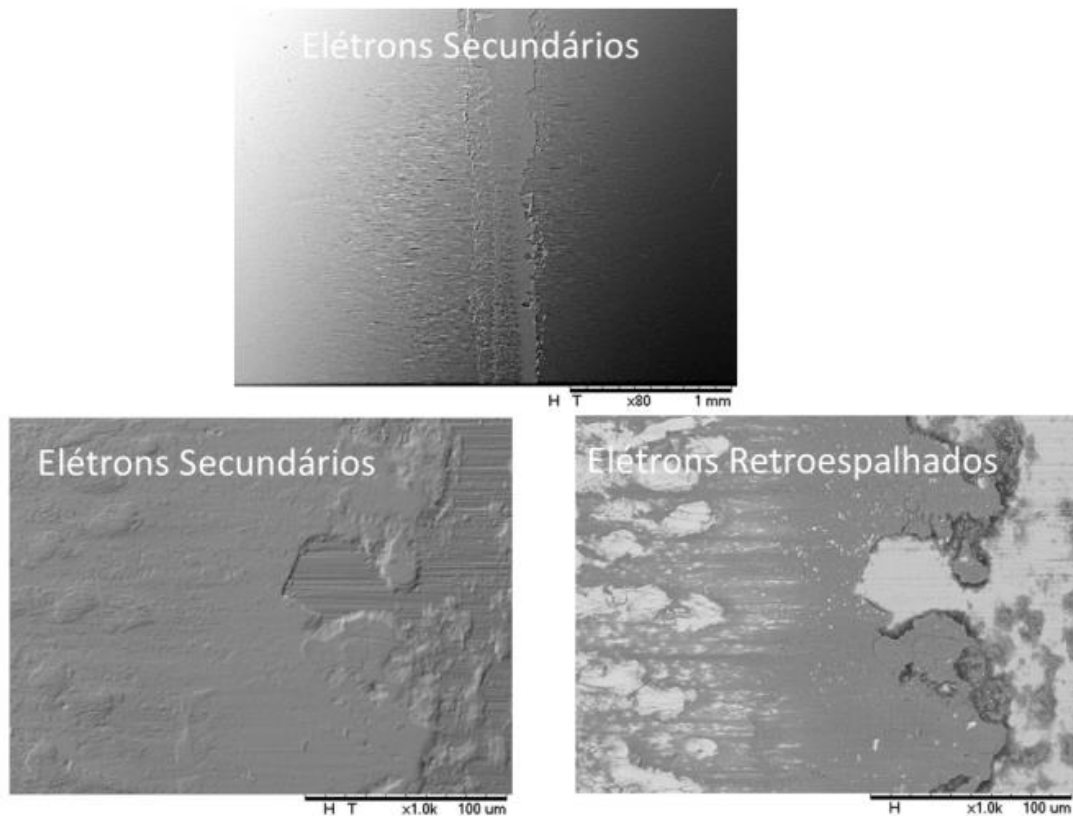


Figura 4.53 – MEV de contracorpo típico ensaiado contra amostras revestidas com NiP.

Análise via EDX do contracorpo, Figura 4.54, mostrou que a tribocamada formada é composta por ferro, níquel, fósforo e oxigênio. Aparentemente, esta tribocamada protege tanto a amostra quanto o contracorpo do desgaste, resultando nas baixas taxas de desgaste observadas para o corpo e o contracorpo, além de apresentar coeficiente de atrito relativamente baixo.

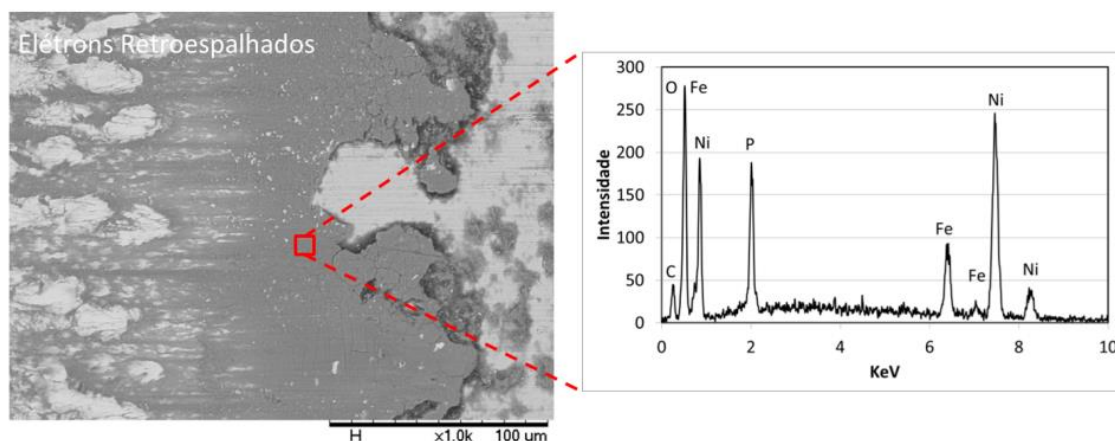


Figura 4.54 – Análise de EDX de contracorpo ensaiado contra amostras revestidas com NiP.

As amostras que sofreram tratamento de nitretação e foram ensaiadas por 1 h (Figura 4.55) apresentaram regiões onde a topografia é semelhante à original antes do processo de deslizamento, com a presença de marcas que possivelmente são marcas da ferramenta de retificação, mas também outras regiões mais lisas aparentemente mais altas que a superfície original, além de regiões relativamente rugosas onde aparentemente ocorreu lascamento.

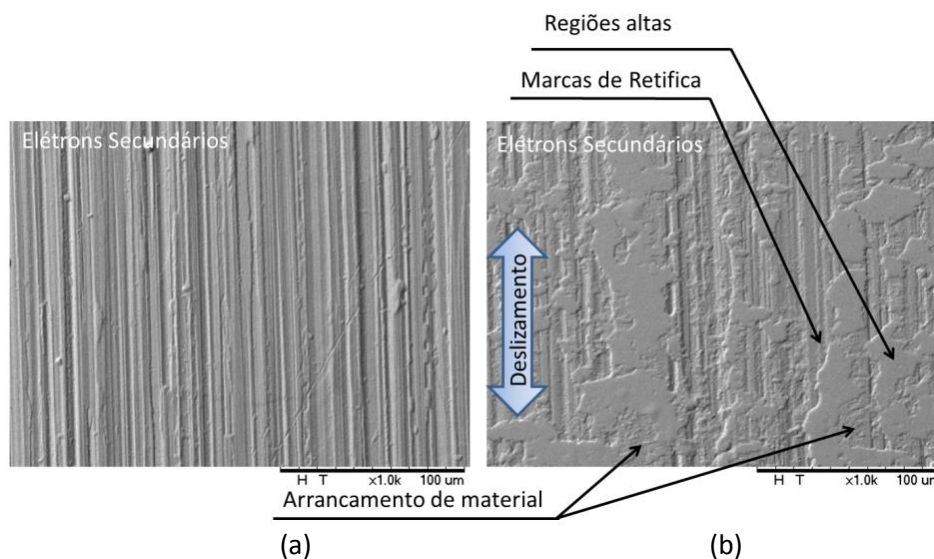


Figura 4.55 – Imagens de MEV típicas para amostras nitretadas: (a) sem desgaste e (b) após 1 h de deslizamento.

A Figura 4.56 mostra a comparação das imagens via elétrons secundários (a) e retroespalhados (b), onde é possível observar que as regiões mais altas mostradas na imagem via elétrons secundários correspondem a regiões mais escuras mostradas na imagem via elétrons retroespalhados. Ao aumentar o tempo de ensaio para 5 h as amostras aparentemente foram desgastadas removendo a topografia original. A Figura 4.56 (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 formando ilhas de terceiro corpo. A Figura 4.56 (d) mostra a imagem via elétrons retroespalhados que sugere a formação de ilhas de terceiro corpo de elementos leves. O espectro por EDX mostrado na Figura 4.57 mostra que as regiões escuras são ricas em ferro e oxigênio.

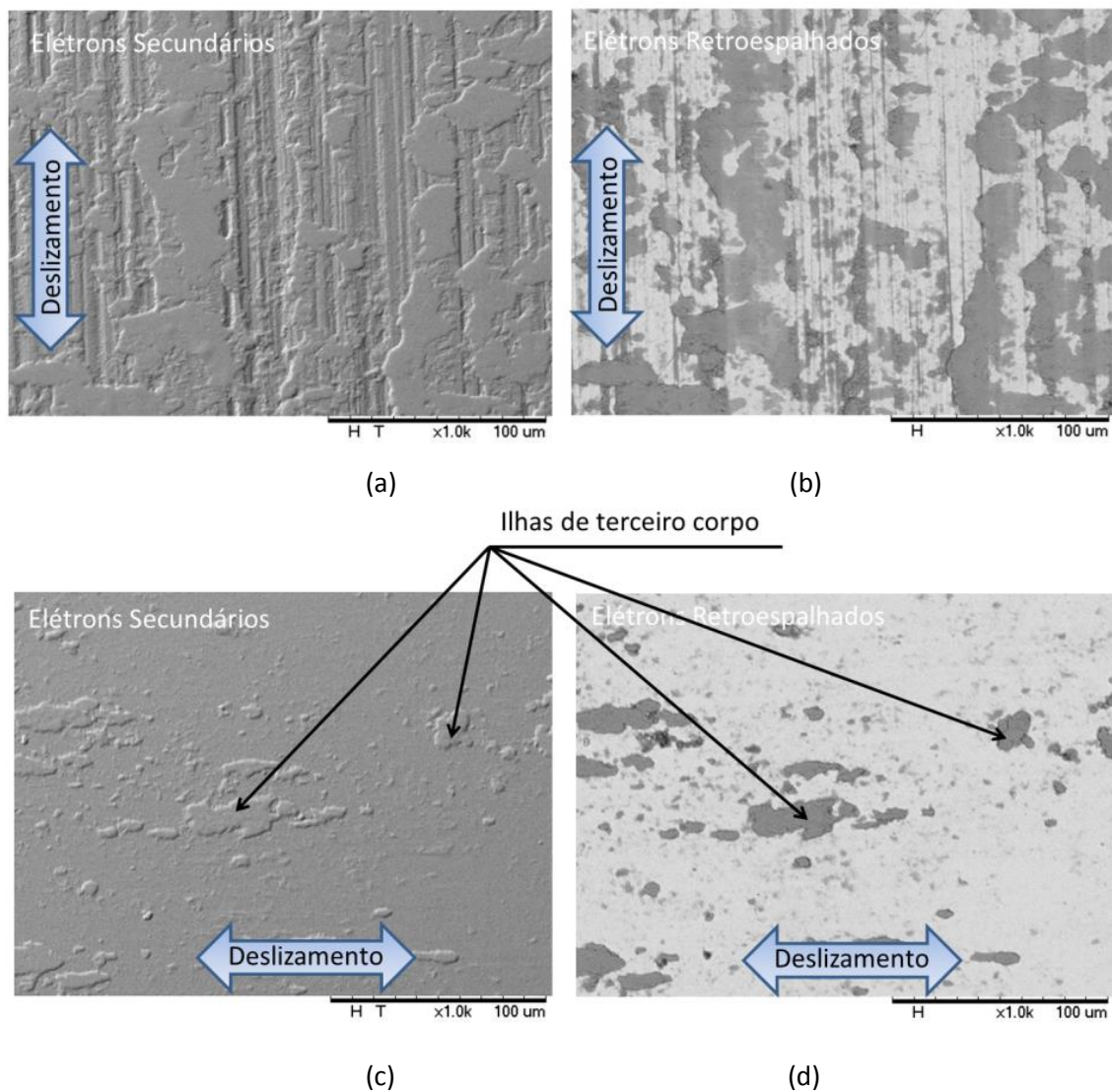


Figura 4.56 – Imagens de MEV típicas para amostras nitretadas ensaiadas por: (a) 1 h, elétrons secundários; (b) 1 h, elétrons retroespalhados; (c) 5 h, elétrons secundários e (d) 5 h, elétrons retroespalhados.

Os debris observados via elétrons retroespalhados na Figura 4.58 mostram que não existe diferença significativa para testes com 1 h e 5 h de duração. 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.

Ao observar o contracorpo tanto ensaiados por 1 h quanto por 5 h com amostras nitretadas observou-se um pequeno acúmulo de material nas bordas da marca de desgaste qual é rica em elementos leves (Figura 4.59). Os espectros da Figura 4.60 mostram que o material acumulado é constituído de ferro e oxigênio.

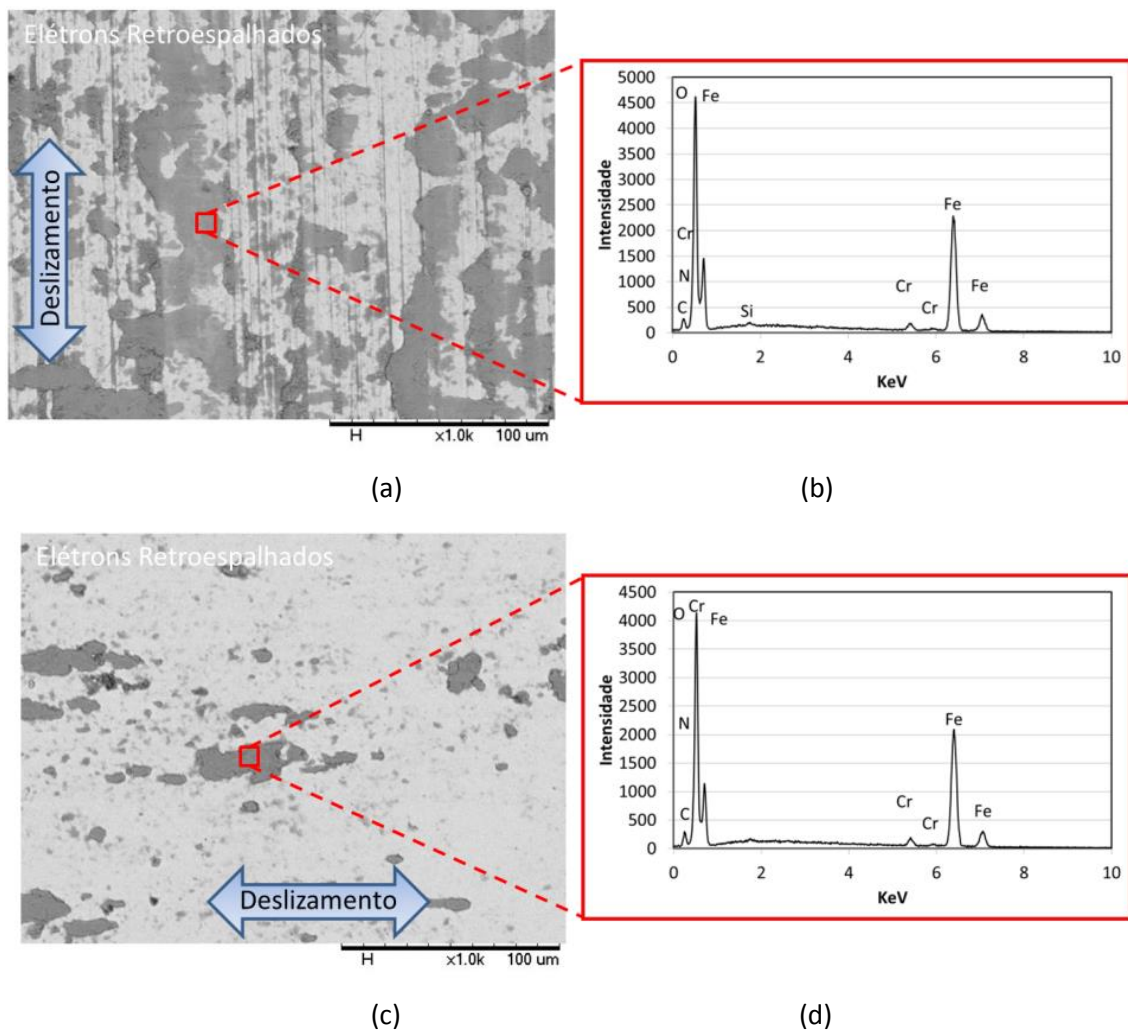


Figura 4.57 – Espectros da região escura típica de amostra nitretada ensaiada por: (a) 1 h; (b) 5 h.

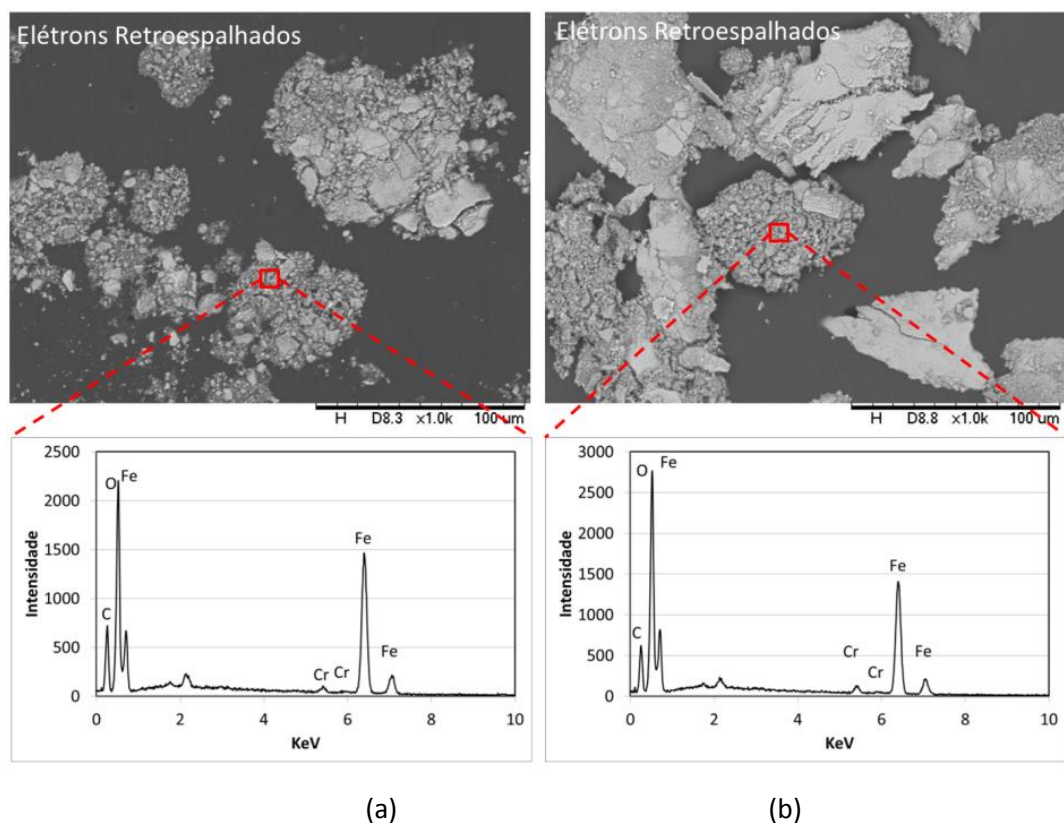


Figura 4.58 – Imagens via elétrons retroespalhados e espectros EDX de debriscoletados após ensaios das amostras nitretadas por (a) 1 h e (b) 5 h.

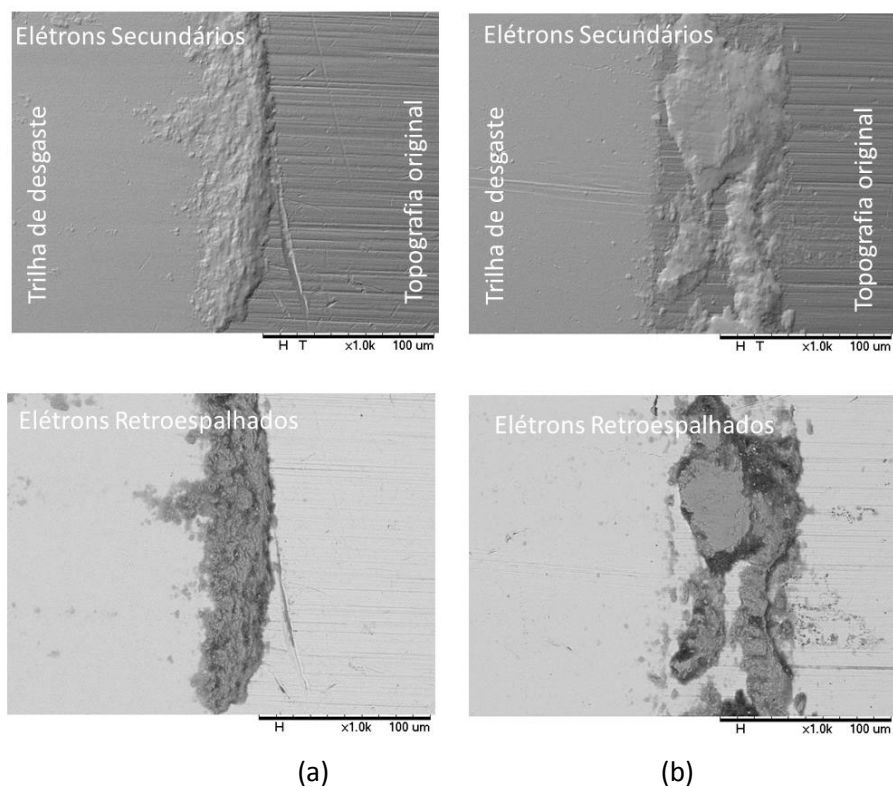


Figura 4.59 – Imagens via elétrons secundários e retroespalhados do contracorpo ensaiado contra amostras nitretadas por (a) 1 h e (b) 5 h.

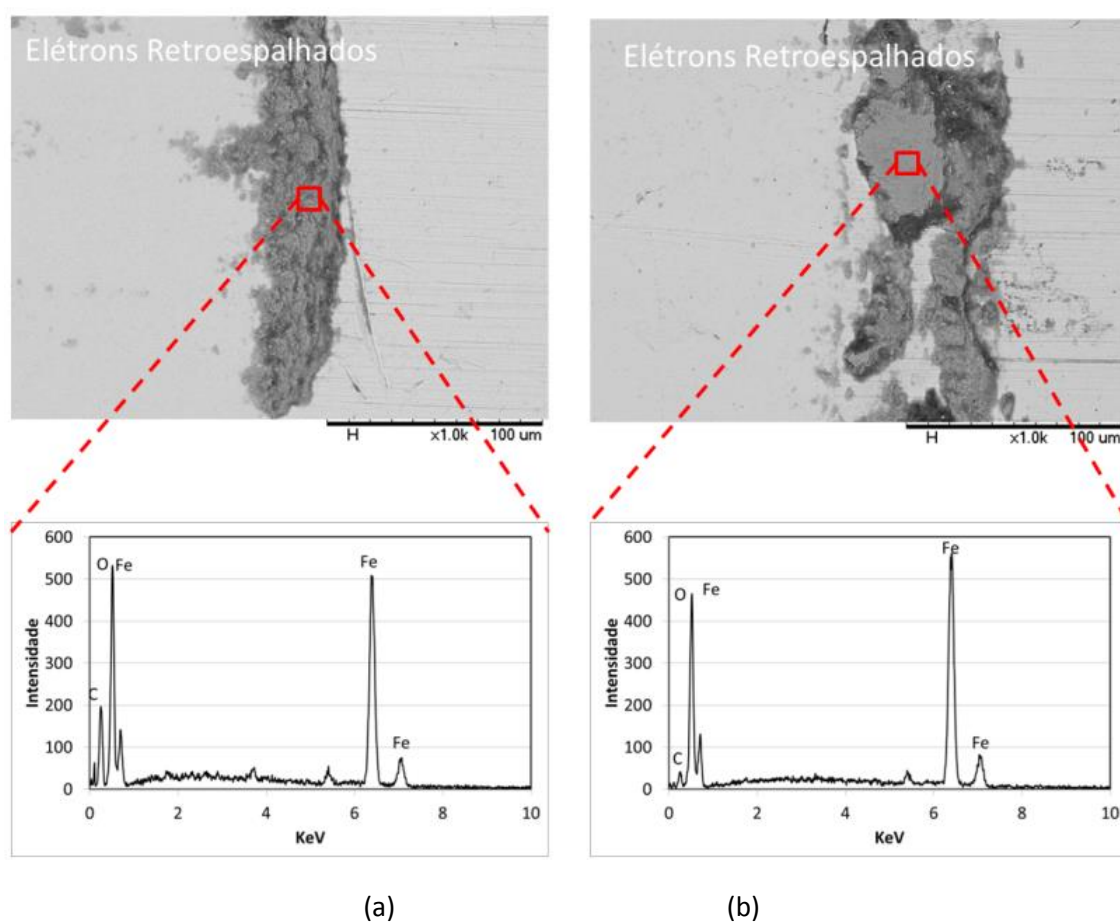


Figura 4.60 – Imagens via elétrons retroespalhados e espectros EDX do contracorpo ensaiado contra amostras nitretadas por (a) 1 h e (b) 5 h.

As imagens das trilhas de desgaste formadas nas amostras texturizadas por EDT são apresentadas na Figura 4.61. Imagens via elétrons secundários de amostras texturizadas antes do deslizamento (Figura 4.61 (a)), e após 1 h de deslizamento (Figura 4.61 (b)) mostram que o deslizamento alternado provoca o alisamento em algumas regiões da superfície, mas ainda existem algumas regiões que são integrantes da superfície original.

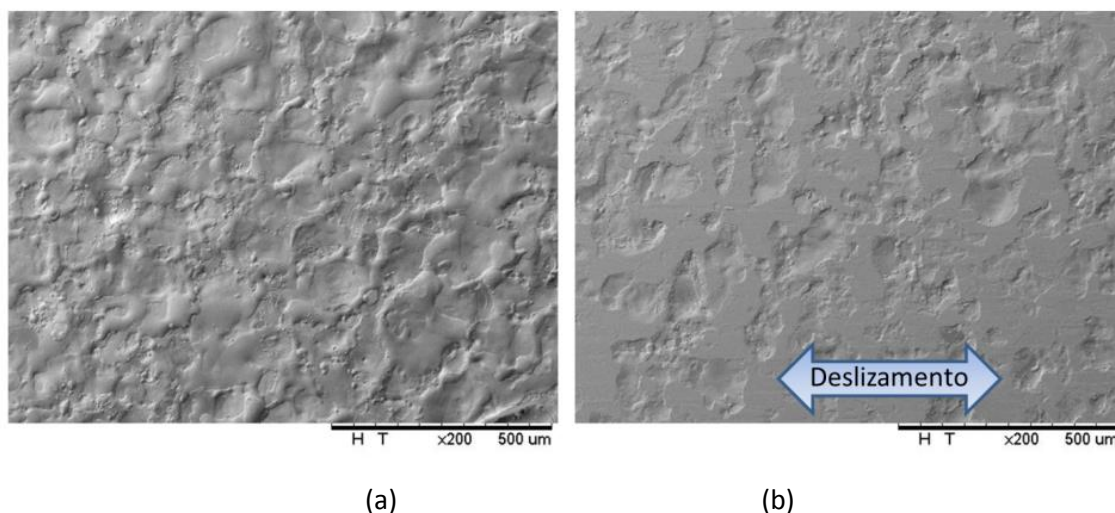


Figura 4.61 – Imagens via microscopia eletrônica de varredura de amostras texturizadas (a) sem desgaste (b) após 1 h de deslizamento.

Observando com maior ampliação a região desgastada após 1 h de deslizamento via elétrons secundários (Figura 4.62 (a)) e elétrons retroespalhados (Figura 4.62 (b)) é possível observar que ainda existem regiões mais profundas que possivelmente são componentes da superfície original e não sofreram desgaste, as quais se apresentam mais claras. Existem ainda regiões mais altas, que são parcialmente lisas e parcialmente rugosas. A imagem via elétrons retroespalhados sugere que estas regiões mais altas e rugosas, com coloração mais escura, tenham a presença de elementos mais leves, enquanto que as regiões mais altas e lisas são parcialmente claras e parcialmente escuras. Com aumento do tempo de ensaio para 5 h a topografia mostrou-se com uma porcentagem menor de topografia original (Figura 4.62 (c)) quando comparada com amostras ensaiadas por 1 h. Além disso a elevação do tempo de ensaio promoveu um aumento na proporção das regiões escuras observadas na Figura 4.62 (d). A tribocamada caracterizada pelas regiões escuras da imagem via elétrons retroespalhados mostrou aspecto retalhado, provavelmente indicando uma grande competição entre formação e destruição.

Os debrís coletados após os ensaios (Figura 4.63) sugerem a ocorrência de mecanismos semelhantes ao observados para as amostras não texturizadas, mas que com a elevação do tempo de ensaio os debrís são mais severamente cominuídos.

O aspectodos contracorpos foi semelhanteao observado para as amostras sem modificação, as cromadas e as nitretadas (Figura 4.64).

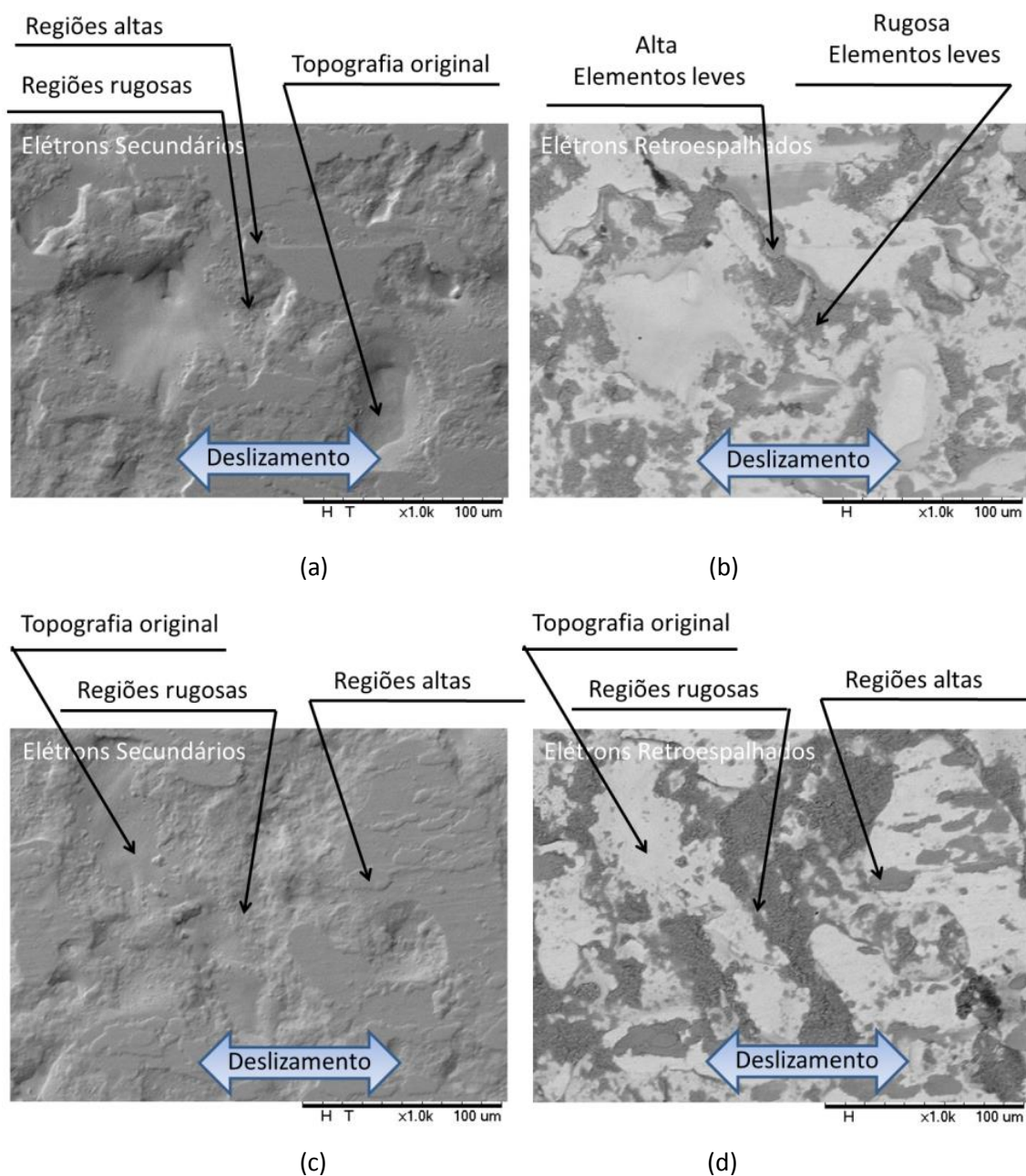


Figura 4.62 – Imagens via microscopia eletrônica de varredura de amostra texturizada (a) ensaiada por 1 h via elétrons secundários (b) ensaiada por 1 h via elétrons retroespalhados (c) ensaiada por 5 h via elétrons secundários (d) ensaiada por 5 h via elétrons retroespalhados.

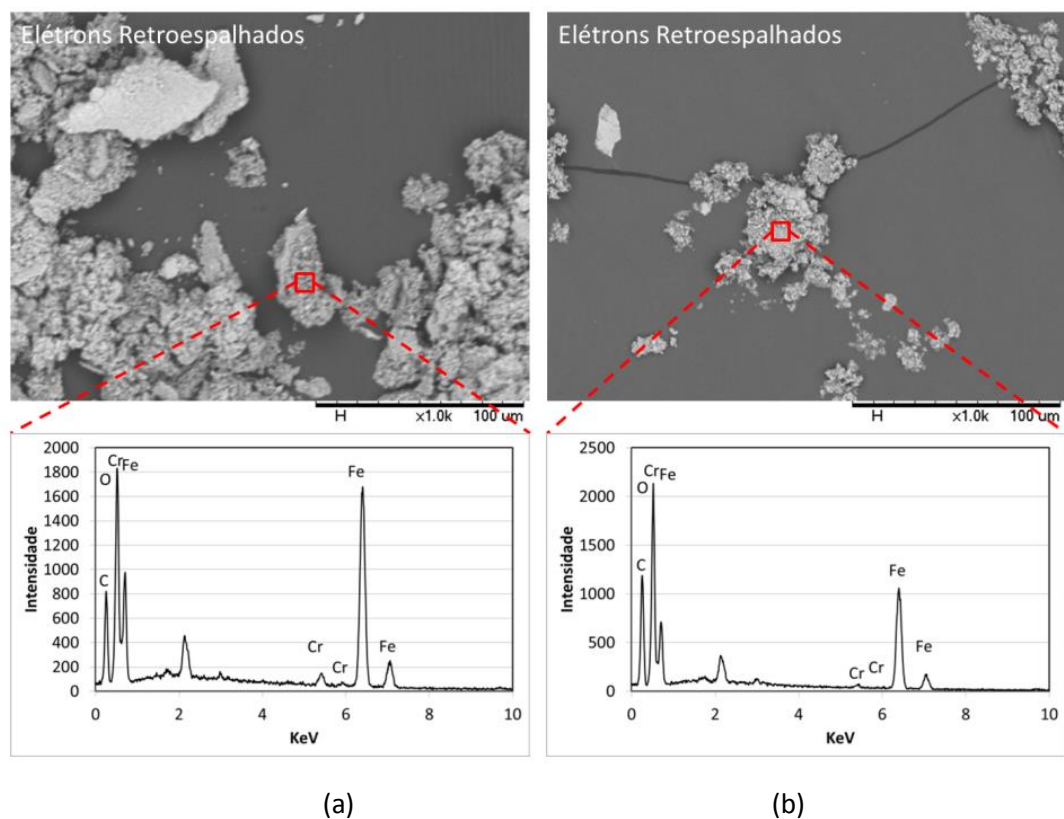


Figura 4.63 – Imagens via elétrons retroespalhados de debriscoletados após ensaios de amostras texturizadas por: (a) 1 h; (b) 5 h.

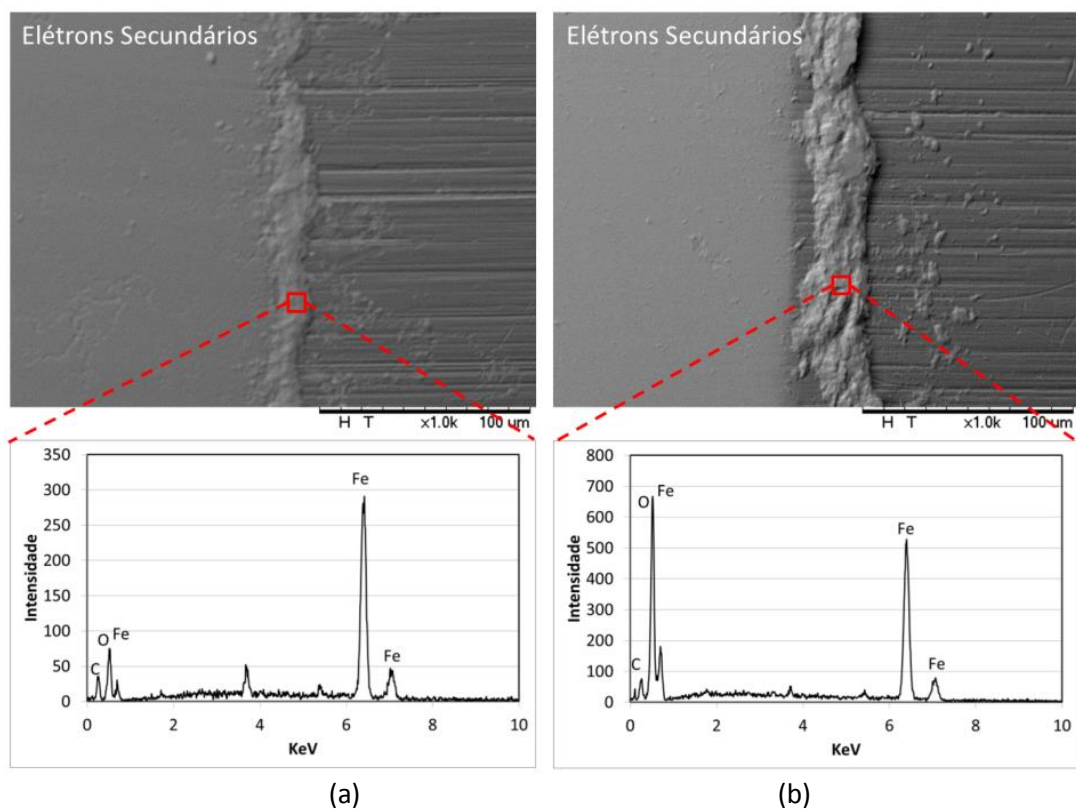


Figura 4.64 – Imagens via elétrons secundário de contracôrpo ensaiado contra amostras texturizadas por: (a) 1 h; (b) 5 h.

A Figura 4.65 (a) mostra imagem via elétrons secundários de amostras texturizadas com posterior recobrimento de cromo duro antes do deslizamento e a Figura 4.65 (b) mostra imagem de amostra ensaiada por 1 h. É possível observar que para a combinação do processo de texturização com posterior revestimento de cromo duro, o ensaio de desgaste por 1 h não provocou alteração total da topografia da amostra, podendo ser visualizadas regiões mais profundas que possivelmente não sofreram contato durante o ensaio. Nota-se também que ao comparar com amostras somente texturizadas a porcentagem de regiões não desgastadas é maior para amostras que possuem posterior revestimento de cromo duro do que para amostras somente texturizadas.

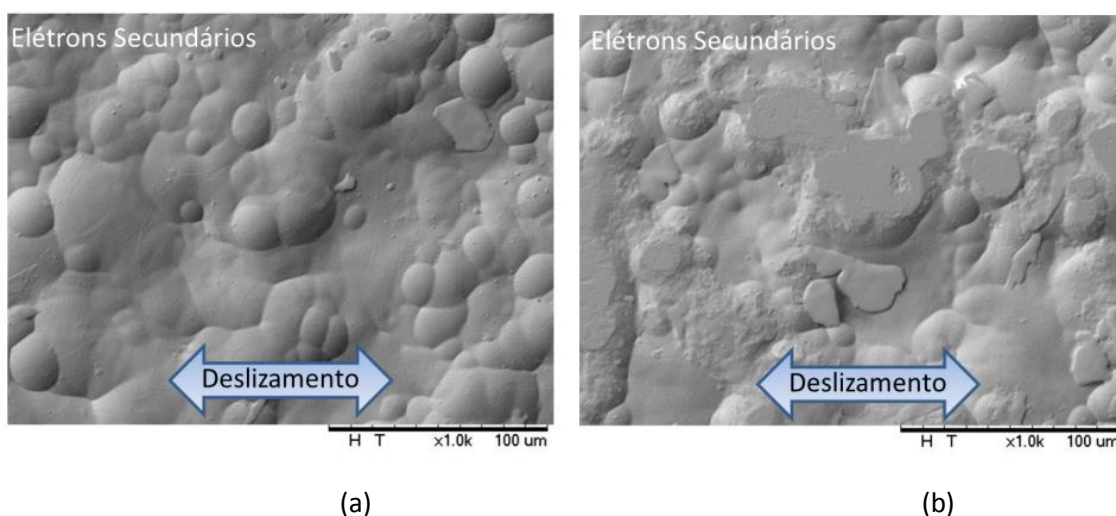


Figura 4.65 – Imagens via microscopia eletrônica de varredura de amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro (a) antes do deslizamento (b) ensaiadas por 1 h.

A análise via elétrons secundários (Figura 4.66 (a)) e retroespalhados (Figura 4.66 (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 aparentemente mais profundas da topografia. Nota-se ainda que as regiões mais lisas (aparentemente mais altas) são regiões com provável formação de tribocamada. Além das regiões lisas é possível observar também a presença de tribocamada nas regiões aparentemente mais rugosas, ainda não “alisadas”. Analogamente ao ensaio de 1 h, o ensaio de 5 h permaneceu com regiões constituídas da topografia original, regiões alisadas compostas por uma tribocamada rica em ferro, cromo e oxigênio e manteve o revestimento de cromo duro até o final do teste. A Figura 4.66 (c) mostra imagens via elétrons secundários típica de uma amostra texturizada com posterior revestimento de cromo duro ensaiadas por 5 h e a Figura 4.66 (d) mostra a imagem via elétrons retroespalhados da mesma região.

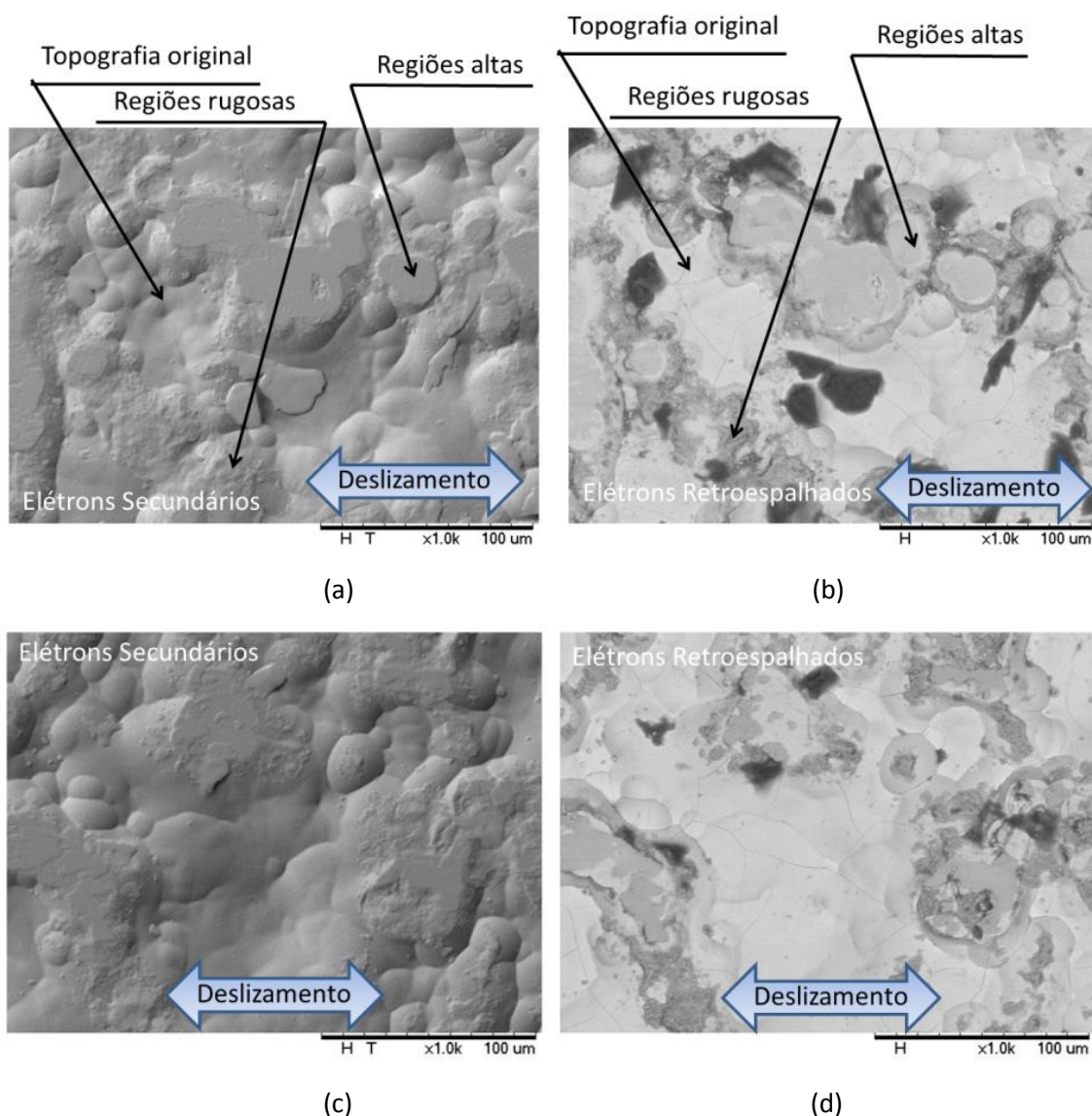
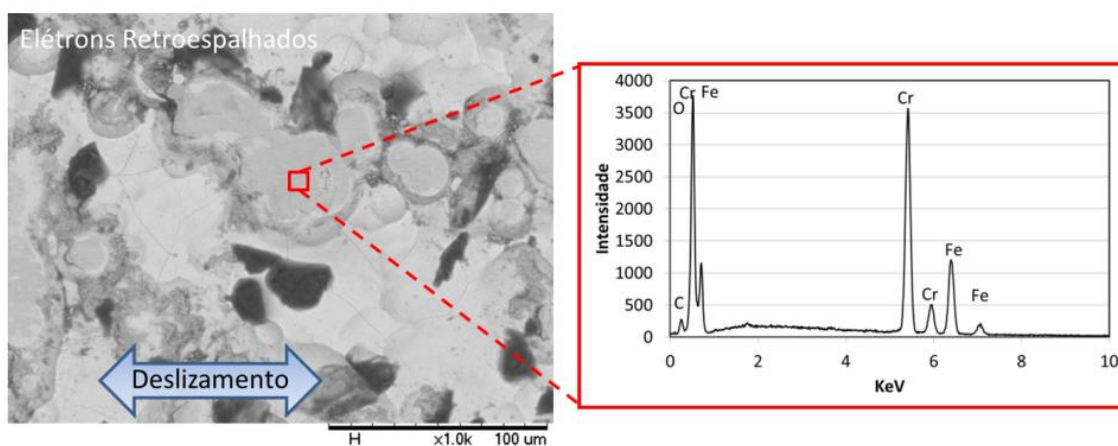
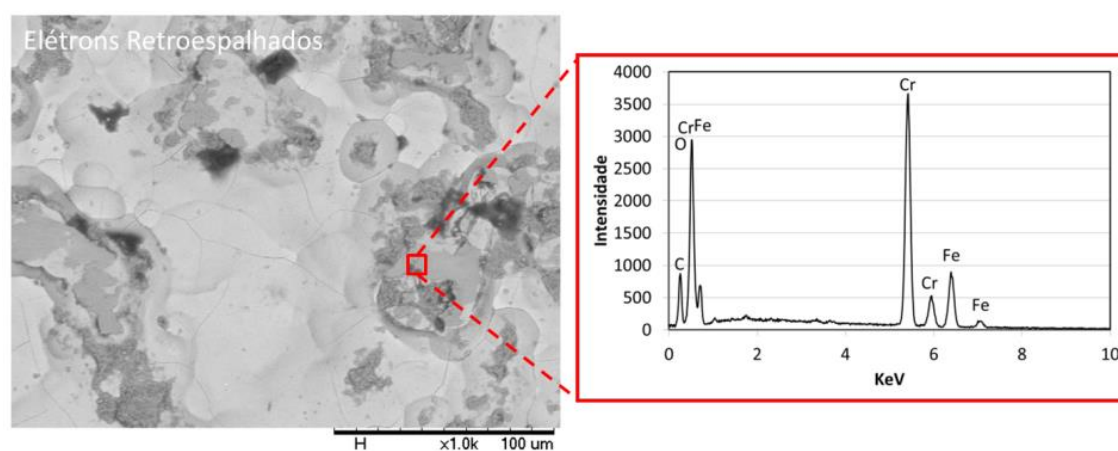


Figura 4.66 – Imagens via microscopia eletrônica de varredura de amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro (a) após 1 h de deslizamento via elétrons secundários (b) após 1 h de deslizamento via elétrons retroespalhados (c) após 5 h de deslizamento via elétrons secundários (d) após 5 h de deslizamento via elétrons retroespalhados.

Análise via EDX da região escura da Figura 4.66 (b) e (d) revelou que a tribocamada é formada por Ferro, Oxigênio e Cromo, conforme Figura 4.67 (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.



(a)



(b)

Figura 4.67 – 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 debrís recolhidos após os ensaios de amostras texturizadas com posterior recobrimento de cromo duro (Figura 4.68) se apresentaram fragmentados. A análise de EDX mostrou que para os ensaios de 1 h os debrís são formados por ferro, cromo e oxigênio. Já para ensaios de 5 h os debrís são constituídos por ferro e oxigênio.

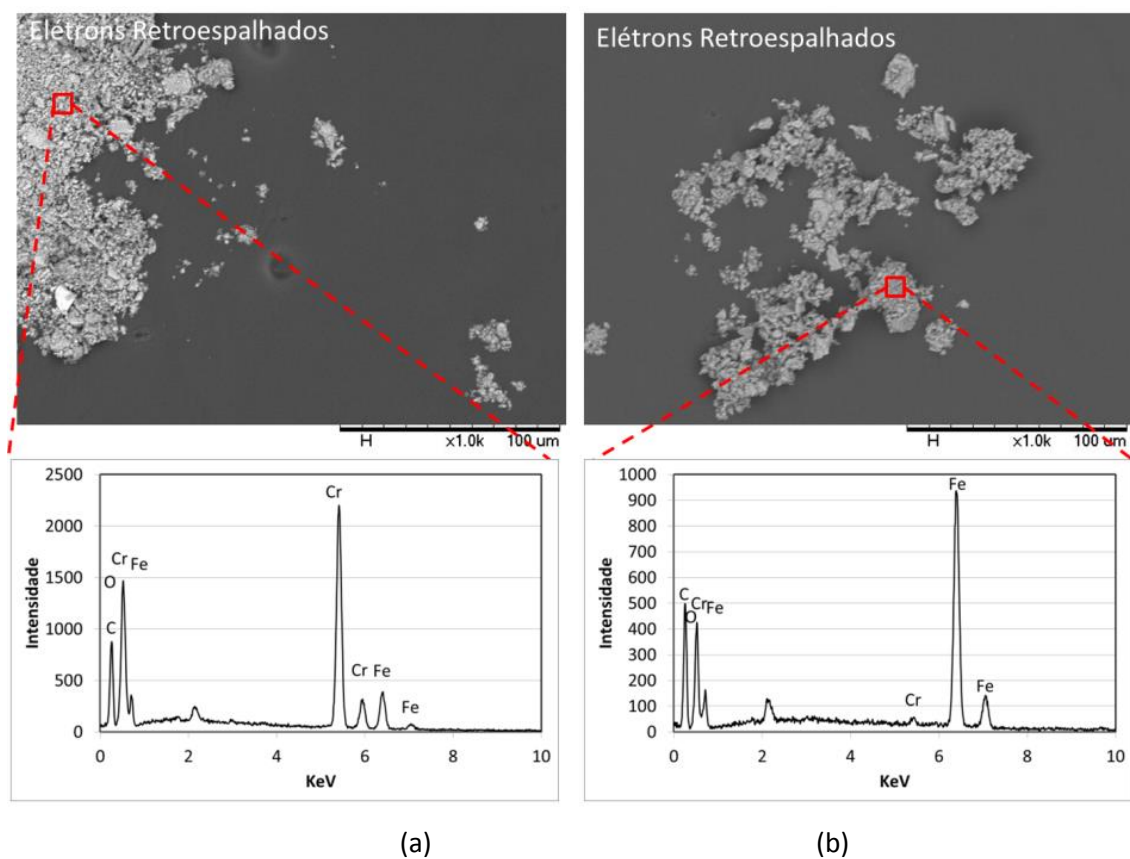


Figura 4.68 – MEV de debris coletados após ensaios de amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro via elétrons retroespalhados e análise de EDX: (a) 1h e (b) 5 h.

O aspecto das trilhas formadas no contracorpo foi semelhante ao das amostras somente texturizadas (Figura 4.69). A análise por EDX (Figura 4.70) 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.

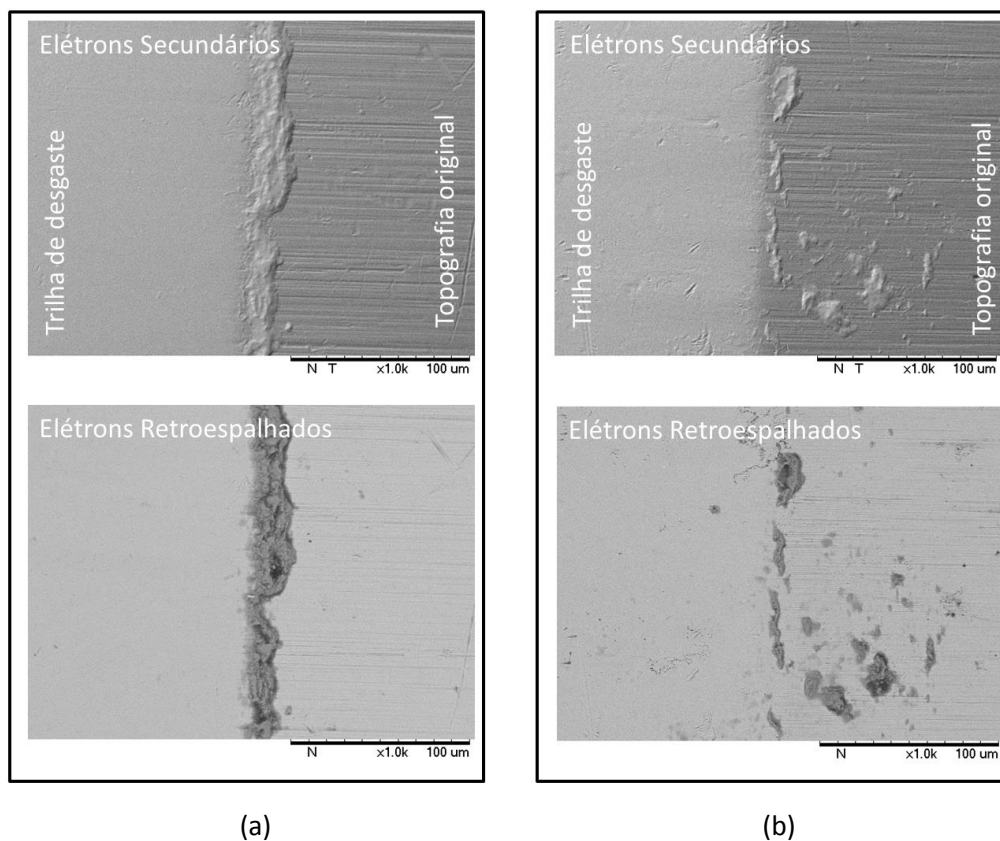


Figura 4.69 – Imagens via elétrons secundários, retroespalhados e espectros EDX do contracorpo ensaiado contra amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro por: (a) 1 h e (b) 5 h.

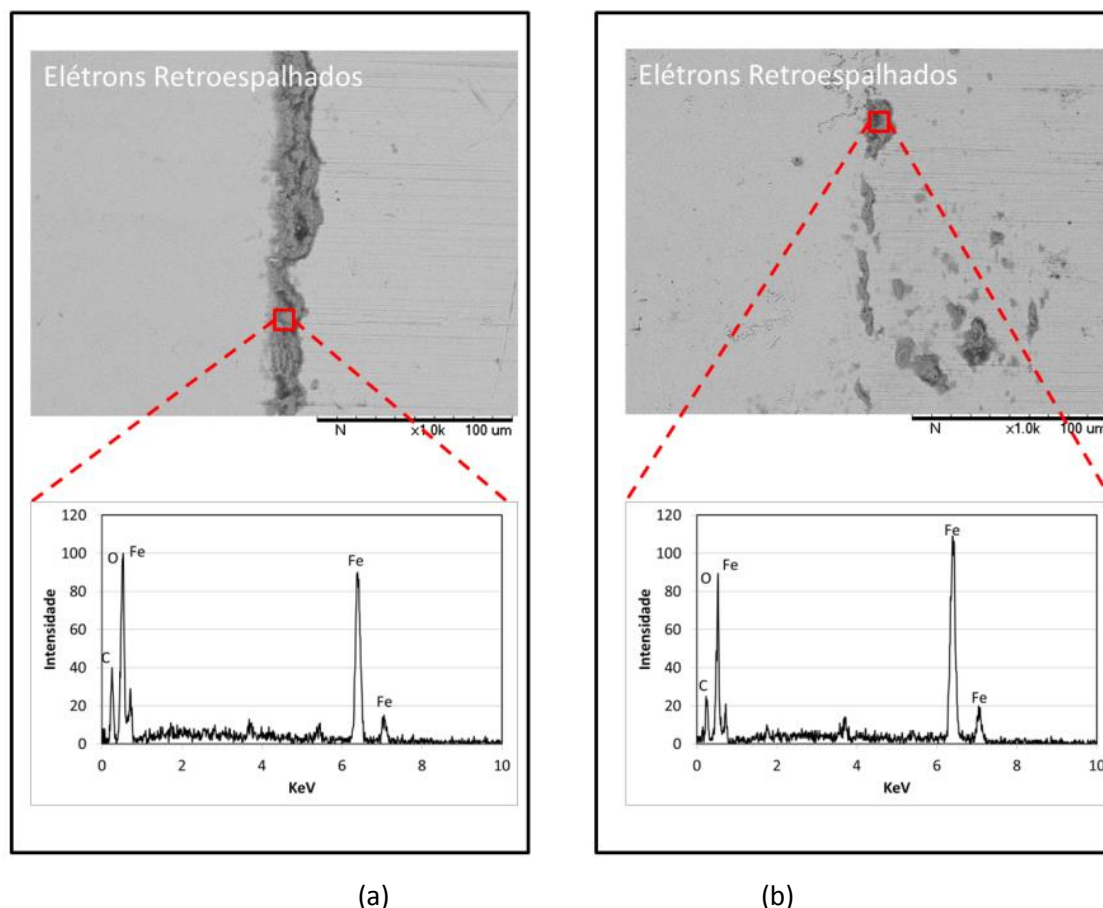


Figura 4.70 – Análise de EDX realizado em contracorpo ensaiado com amostras texturizadas com posterior revestimento de cromo duro ensaiadas por (a) 1 h (b) 5 h.

A texturização com posterior revestimento de níquel químico, assim como amostras texturizadas e texturizadas com posterior recobrimento de cromo duro, apresentou conservação de algumas regiões com topografia original, enquanto que o deslizamento provocou o surgimento de algumas regiões alisadas (Figura 4.71).

Observação das amostras via elétrons secundários, Figura 4.72 (a), e retroespalhados, Figura 4.72 (b) mostrou que somente pequenas porções das regiões mais lisas são ricas em elementos mais leves. Esta observação sugere que o deslizamento promove a formação de uma tribocamada aparentemente lisa, mas que a oxidação nesta tribocamada não é muito intensa. As Figuras de amostras ensaiadas por 5 h via elétrons secundários (Figura 4.72(c)) e retroespalhados (Figura 4.72 (d)) mostraram que as partes mais lisas são mais escuras, indicando a presença de oxigênio em maior concentração. Porém o restante da trilha de desgaste também parece estar recoberta, nas regiões onde contato efetivamente ocorreu entre as superfícies, por uma tribocamada contendo oxigênio em menores teores.

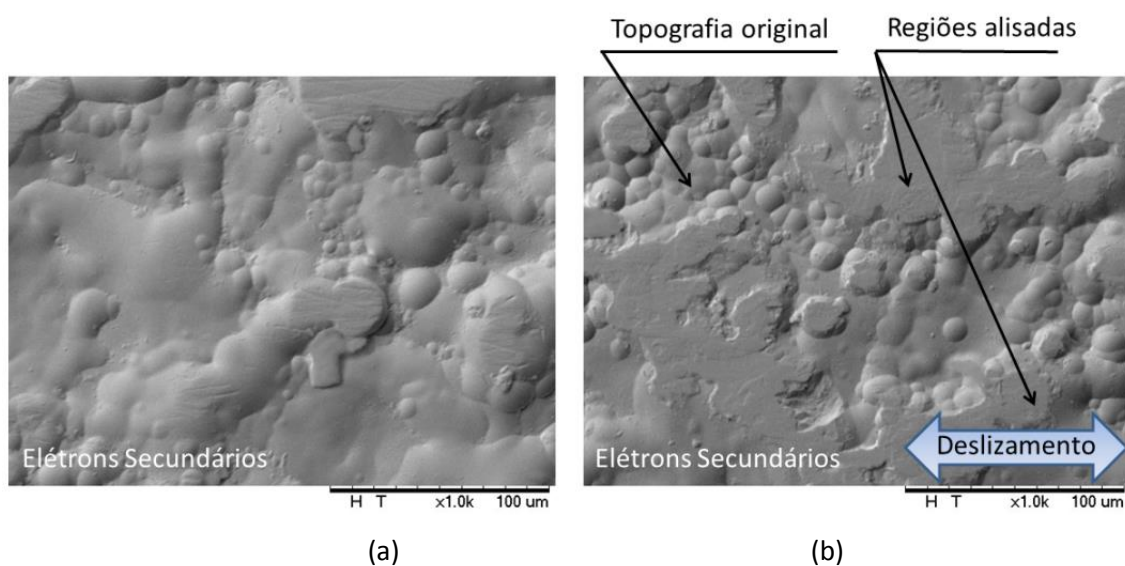


Figura 4.71 – MEV de amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP: (a) antes do deslizamento; (b) ensaiadas por 1 h.

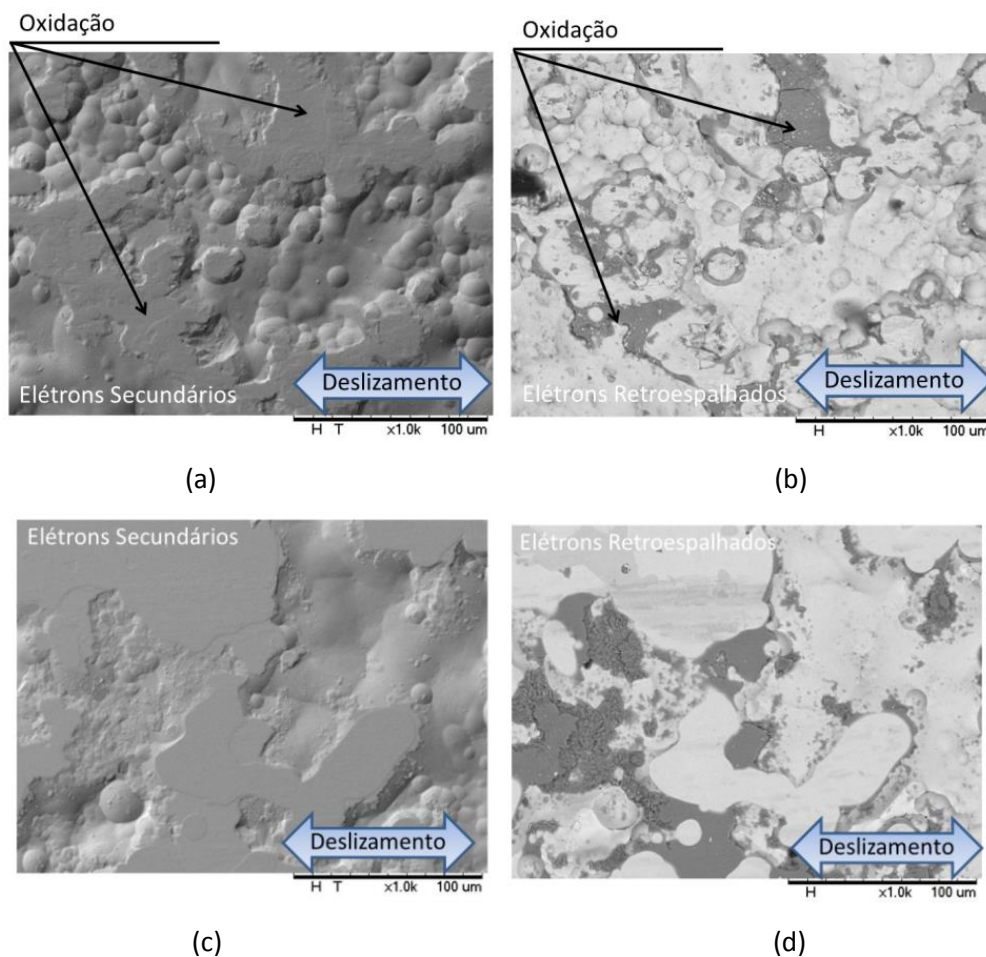
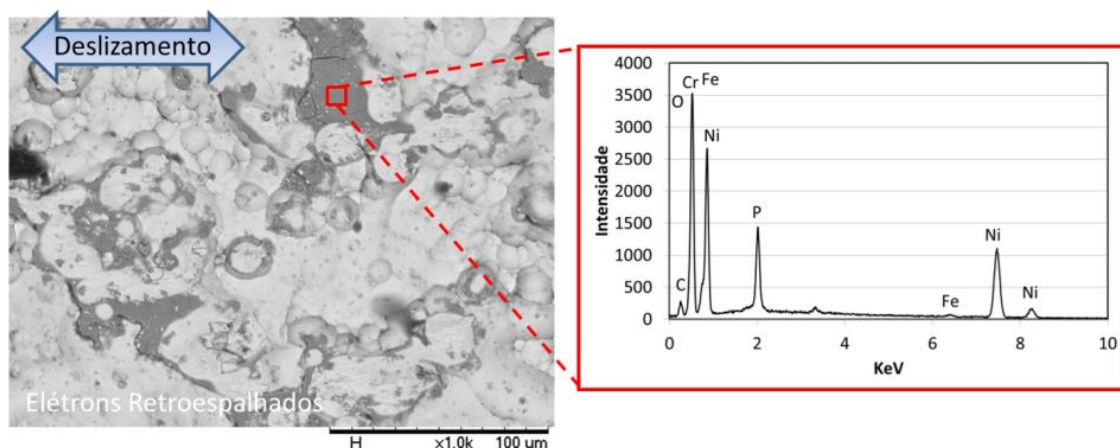
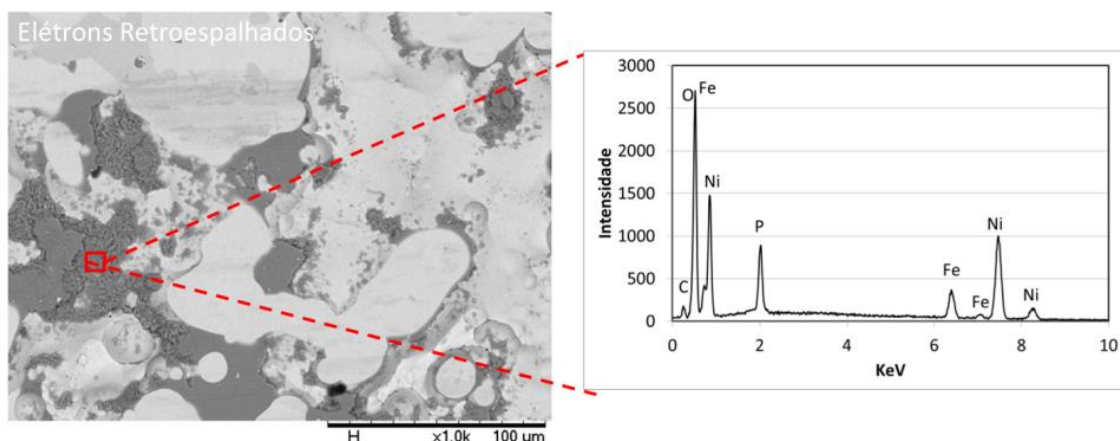


Figura 4.72 – MEV de amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP ensaiadas por: (a) 1 h, elétrons secundários; (b) 1 h, elétrons retroespalhados; (c) 5 h, elétrons secundários; (d) 5 h, elétrons retroespalhados.

Os elementos químicos das regiões mais escuras da tribocamada foram identificados por análise via EDX como sendo níquel, fósforo e oxigênio, conforme Figura 4.73 (a) para 1 h e 4.73 (b) para 5 h. Nas regiões mais claras a análise de EDX revelou a presença de ferro, níquel e fósforo. Considerando-se as baixas taxas de desgaste sofridas pelas amostras e pelos contracorpos nesta condição, aparentemente a formação desta tribocamada protege o corpo e o contracorpo contra o desgaste.



(a)



(b)

Figura 4.73 – Análise via EDX da região oxidada em amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP ensaiadas por: (a) 1 h (b) 5 h.

Ao observar os debris de amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP é possível observar por imagens via elétrons retroespalhados que tanto para 1 h de deslizamento (Figura 4.74 (a)) quanto para 5 h (Figura 4.74 (b)) os debris se encontram fortemente fragmentados e a análise de EDX mostrou a presença do revestimento de NiP no material recolhido após o ensaio.

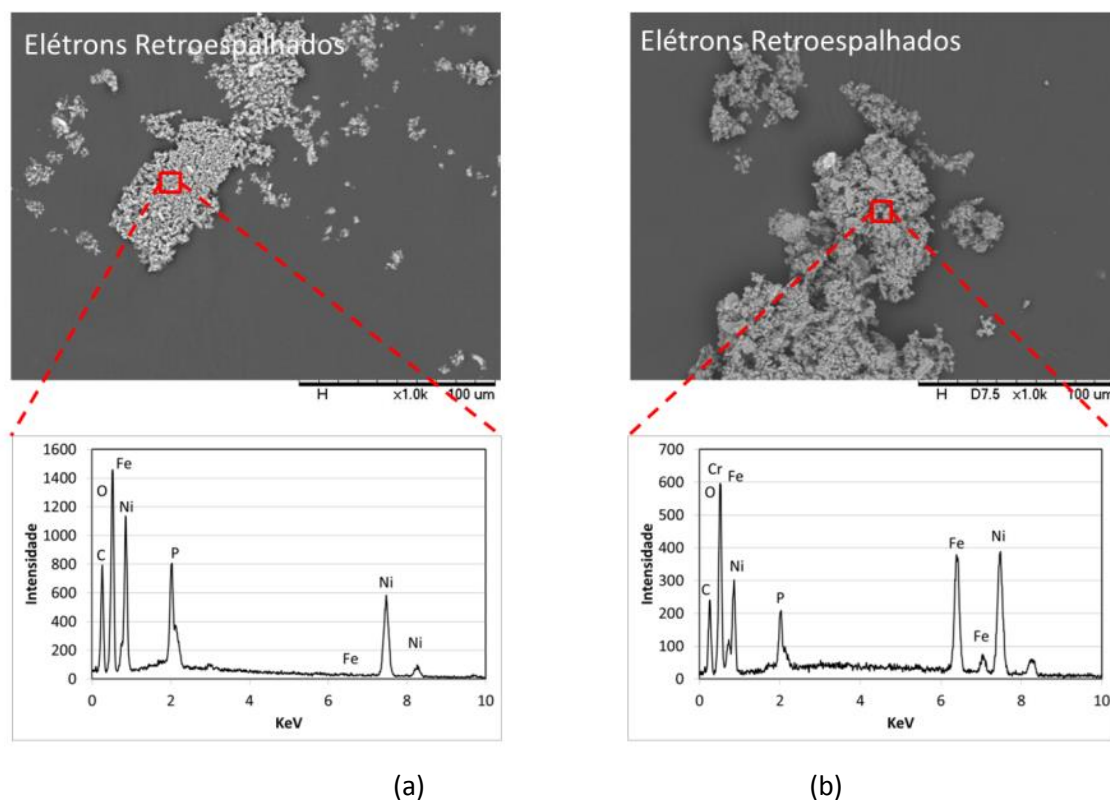


Figura 4.74 –MEVde debris coletados após ensaios de amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP via elétrons retroespalhados e análise de EDX: (a) 1h e (b) 5 h.

A Figura 4.75 mostra imagens via elétrons secundários de contracorpo típico ensaiado por 1 h e 5 h com amostras revestidas com NiP. É possível observar um acúmulo de material nas bordas da região de contato do contracorpo com a amostra.

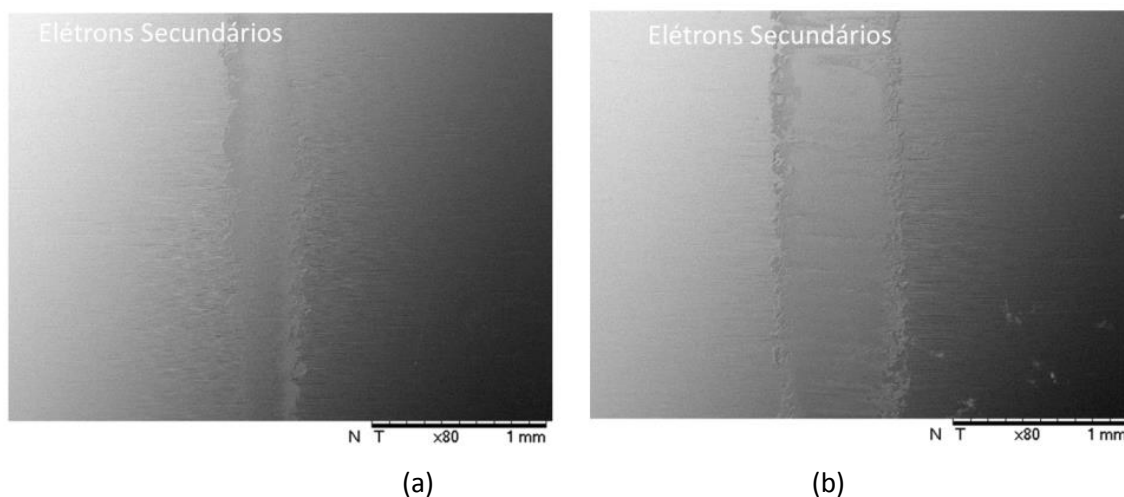


Figura 4.75 – MEV típico de contracorpo ensaiado contra amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP por: (a) 1 h e (b) 5 h.

Ao observar com maiores aumentos imagens via elétrons secundários e retroespalhados, nota-se a presença de uma espessa tribocamada que cobre a maioria da superfície dos contracorpos. A presença de regiões escuras no material acumulado sugere a presença de elementos leves (Figura 4.76 (a) e (b)).

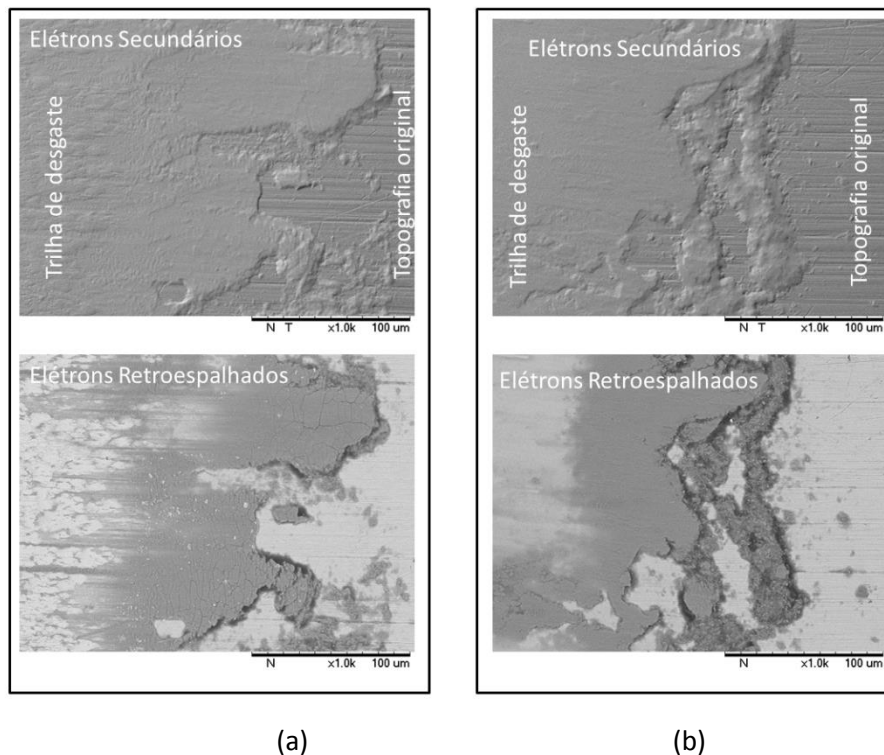


Figura 4.76 – MEV de contracorpo ensaiado contra amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP ensaiados por: (a) 1 h e (b) 5 h.

A análise de EDX da tribocamadapresente nos contracorpos (Figura 4.77) tanto para 1 quanto para 5 h, mostrou a presença de Ferro, Oxigênio, Níquel e Fósforo, que parece proteger o contracorpo do desgaste e reduzir o coeficiente de atrito do tribossistema.

O desgaste de amostras texturizadas com posterior nitretação por 1h levou a uma maior porcentagem de regiões não desgastadas do que quando comparada com amostras somente texturizadas (Figura 4.78 (a)), comprovando o efeito benéfico do endurecimento conferido pela nitretação na redução do desgaste. O aumento do tempo de ensaio para 5 h (Figuras 4.78 (c) e (d)) simplesmente aumentou a porcentagem das regiões desgastadas, mas a aparência das tribocamadas ficou semelhante.

Os debrís coletados após os ensaios (Figura 4.79) e as trilhas formadas nos contracorpos (Figura 4.80) mostraram aspecto semelhante ao observado para as amostras somente texturizadas

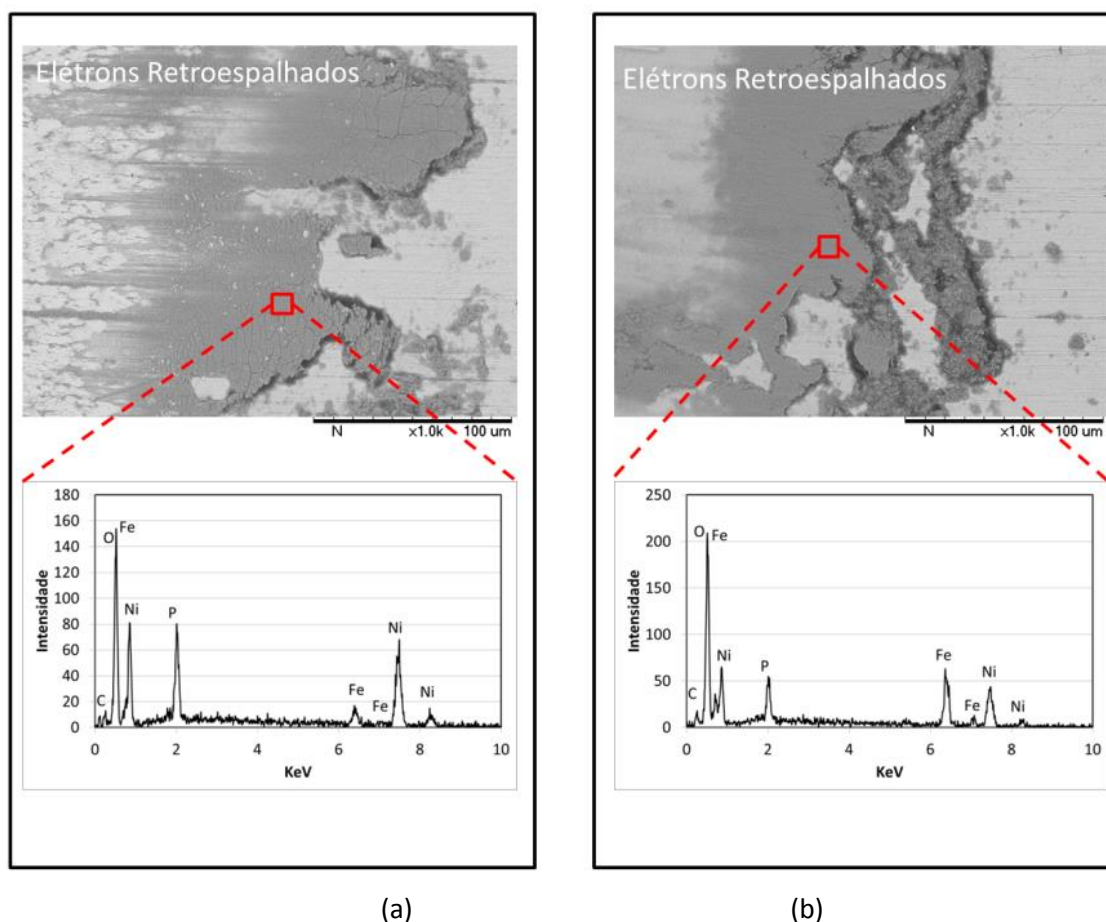


Figura 4.77 – Análise de EDX da tribocamada em contracorpo ensaiado com amostras texturizadas com posterior revestimento de NiP ensaiadas por (a) 1 h e (b) 5 h.

Além do importante efeito dos revestimentos/modificações superficiais no comportamento tribológico do sistema cilindro de laminação / chapa, outra importante função destes é aumentar o tempo de vida da textura presente no cilindro. Dessa forma, a verificação da manutenção da topografia das amostras em função do revestimento foi feita em amostras texturizadas quantificando a topografia antes e após os ensaios de deslizamento. A Figura 4.81 mostra a variação do parâmetro topográfico S_q em função do tipo de modificação superficial e do tempo de ensaio. Nota-se na Figura que amostras que foram somente texturizadas e ensaiadas por 1 h sofreram uma pequena elevação da rugosidade quadrática média, mas que esta variação não foi estatisticamente significativa. Comportamento semelhante foi observado para todas as amostras revestidas ensaiadas por 1 h. Ao elevar-se o tempo de ensaio para 5 h, o valor de S_q da amostra somente texturizada sofreu uma redução significativa. O revestimento de cromo duro após a texturização resultou num aumento de S_q , ao passo que para o revestimento de NiP não houve variação significativa após 5h. Para a amostra nitretada, o comportamento foi semelhante ao da amostra somente texturizada.

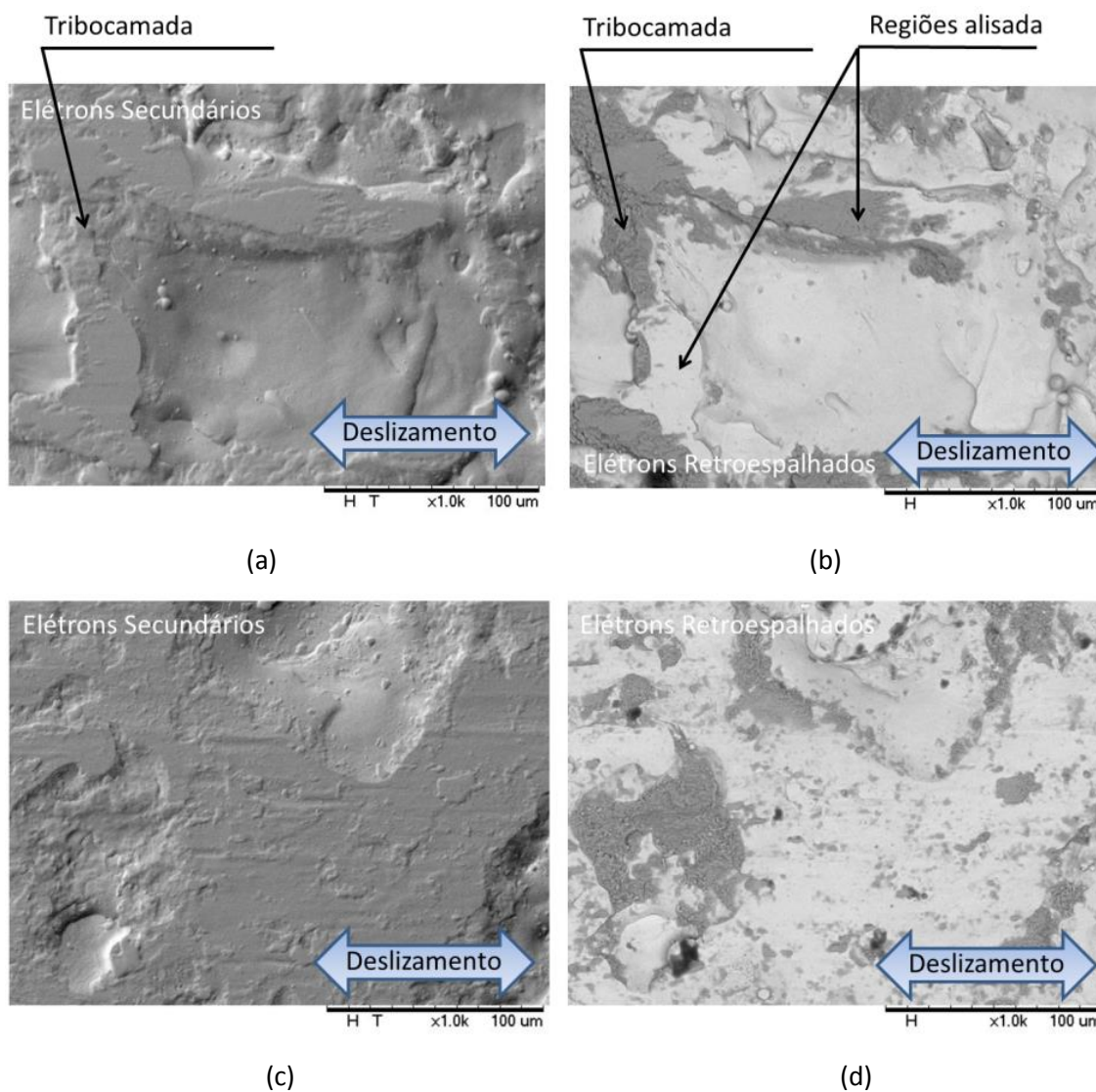


Figura 4.78 – MEV de amostras texturizadas com posterior nitretação após deslizamento por: (a) 1 h, elétrons secundários; (b) 1 h, elétrons retroespalhados; (c) 5 h, elétrons secundários; (d) 5 h, elétrons retroespalhados.

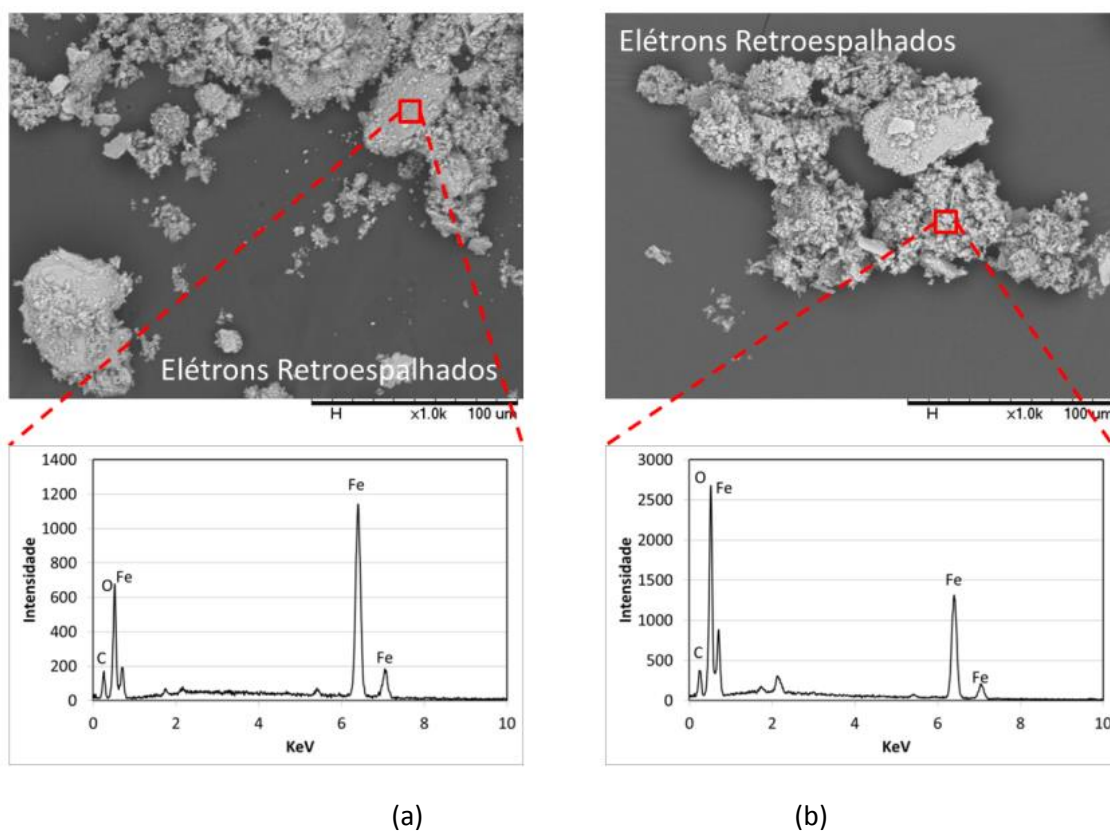


Figura 4.79– Imagens de debris de amostras texturizadas com posterior nitretação via elétrons retroespalhados e análise de EDX ensaiados por (a) 1h e (b) 5 h.

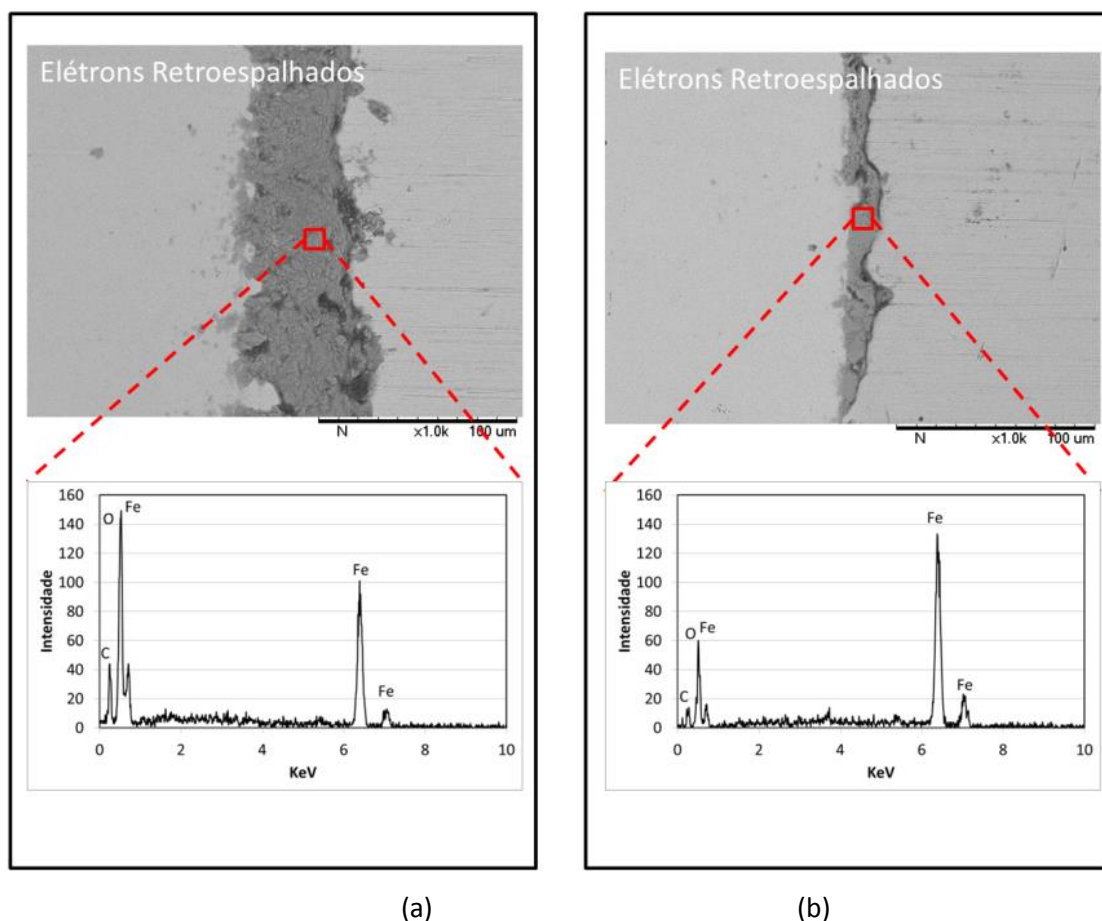


Figura 4.80– Imagens via elétrons retroespalhados e análise de EDX da tribocamada em contracorpo ensaiado contra amostras texturizadas com nitretação ensaiadas por: (a) 1 h e (b) 5 h.

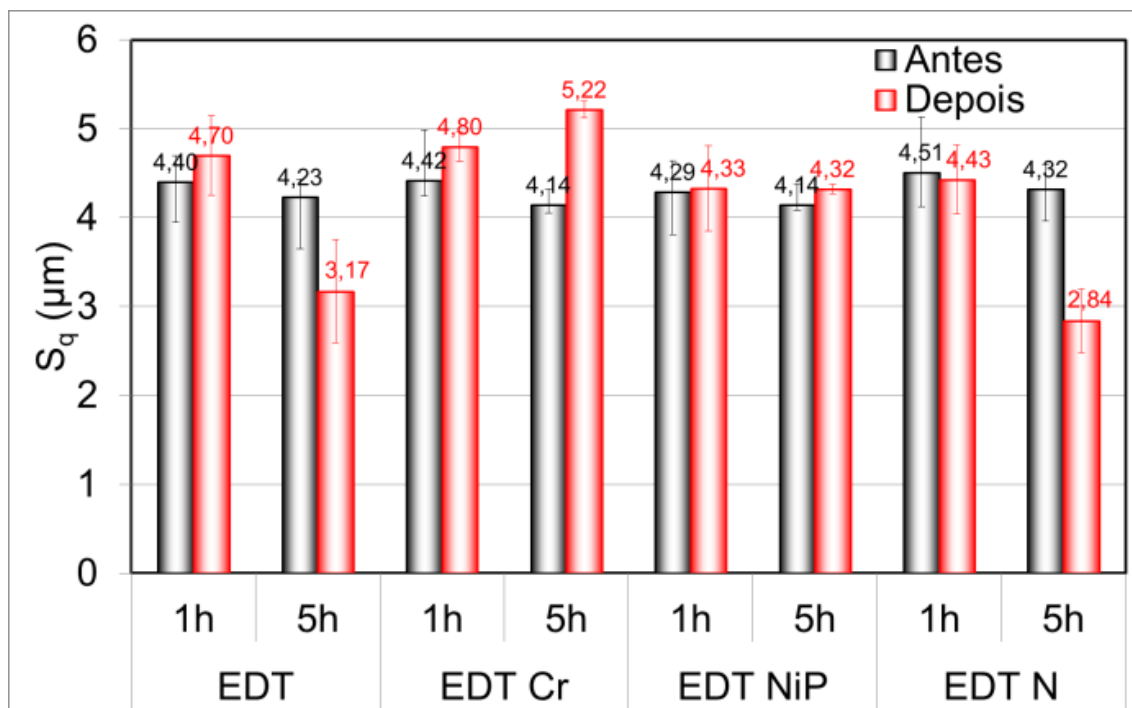


Figura 4.81 – Variação do parâmetro topográfico S_q em função do tipo de modificação superficial e do tempo de ensaio

O parâmetro S_{dq} mostrado na Figura 4.82 mostrou que amostras texturizadas ensaiadas por 1 h sofrem uma redução da inclinação média das irregularidades e ao elevar o tempo de ensaio para 5 h a redução do parâmetro se torna mais significativa. A adição do revestimento de cromo duro após texturização não resultou em diferença significativa no parâmetro em relação a amostras sem revestimento ensaiadas por 1 h. 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. O revestimento de NiP em amostras previamente texturizadas praticamente eliminou não provocou alterações significativas para ensaios de 1 hora e uma redução do parâmetro para ensaios de 5 horas. O comportamento do parâmetro S_{dq} para a amostra nitretada foi comparável ao da amostra somente texturizada.

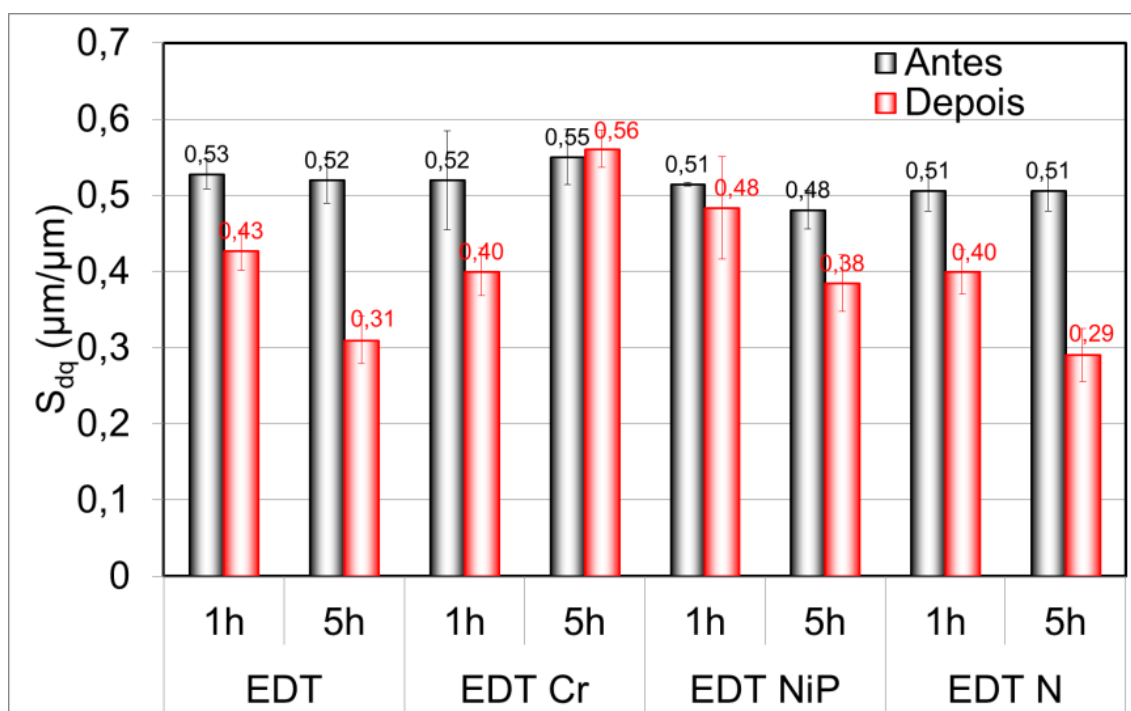


Figura 4.82 – Variação do parâmetro topográfico S_{dq} em função do tipo de modificação superficial e do tempo de ensaio

Ao verificar o comportamento do parâmetro S_{pk} antes e após os ensaios de 1 h e 5 h notou-se que para todas as situações o ensaio de deslizamento reduziu o seu valor (Figura 4.83). 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.

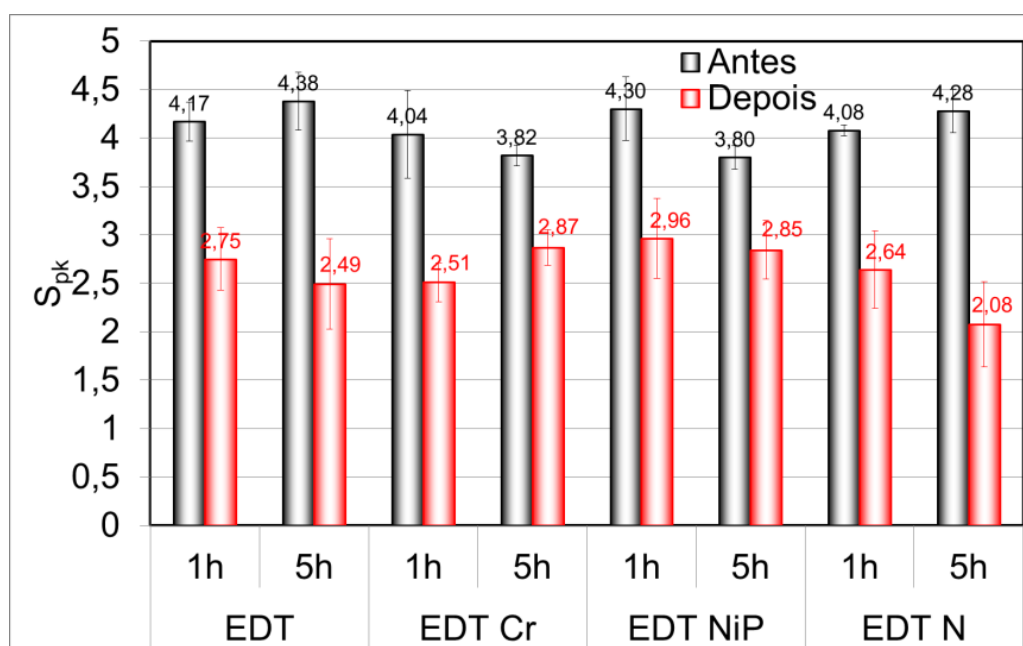


Figura 4.83 – Variação do parâmetro topográfico S_{pk} em função do tipo de modificação superficial e do tempo de ensaio

A análise do parâmetro S_{bi} (Figura 4.84) mostrou uma tendência de redução da capacidade de suporte mecânico com o deslizamento, o qual foi mais intenso para as amostras com revestimento/modificação superficial após a texturização.

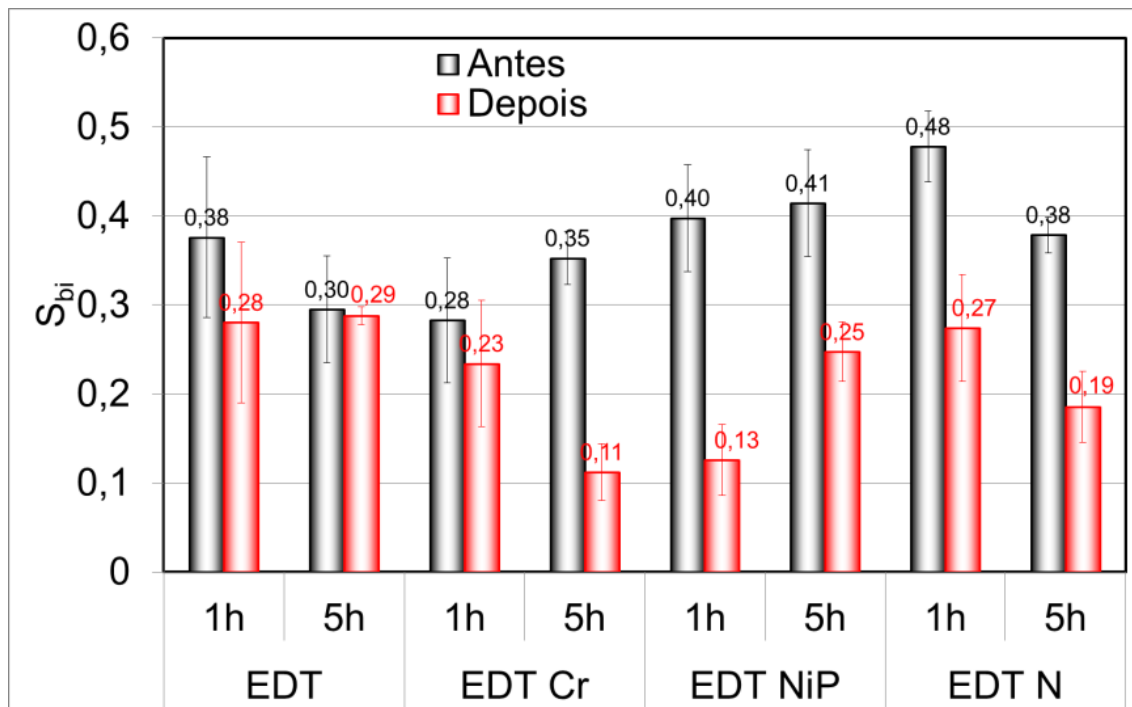


Figura 4.84 – Variação do parâmetro topográfico S_{bi} em função do tipo de modificação superficial e do tempo de ensaio

Este trabalho propõe-se a apresentar possíveis substitutos ao cancerígeno cromo duro. De uma forma geral, pôde-se observar que o comportamento tribológico das duas opções investigadas (nitretação a plasma e revestimento de NiP) foi pelo menos 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. Desta forma, ambas poderiam em princípio substituir satisfatoriamente o cromo duro.

Analisando-se de forma mais detalhada, o revestimento de cromo duro e a nitretação não alteraram significativamente o coeficiente de atrito quando comparados com amostras somente de aço VC 10. Por sua vez, o revestimento de NiP provocou uma redução no valor do mesmo. Além disso, o revestimento de NiP resultou em taxas de desgaste bem inferiores aos demais tratamentos. Ocorreu a formação de uma tribocamada protetora no corpo e no contracorpo rica em níquel, fósforo e oxigênio, que aparentemente reduz a taxa de desgaste de ambos e o coeficiente de atrito do sistema. Dos parâmetros topográficos analisados o

revestimento de NiP conseguiu ser o que mais resistiu a alteração topográfica para os parâmetros S_q , S_{dq} e S_{pk} para ensaios de 1 h e dos parâmetros S_q e S_{pk} para ensaios de 5h. Desta forma, dentre os revestimentos investigados, o níquel fósforo é o que melhor preserva a topografia superficial do cilindro durante a campanha da laminação, reduzindo a necessidade de condicionamento freqüente.

Em função desta análise, considera-se que o revestimento de NiP seja o melhor candidato a substituto do cromo duro na indústria de laminação a frio, em vista das complicações ambientais e de saúde apresentadas pelo cancerígeno cromo duro.

CAPÍTULO V

Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo central o estudo de novos revestimentos para substituição do cancerígeno cromo duro, amplamente utilizado pela indústria de laminação a frio. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia experimental capaz de reproduzir, com boa acuracidade, os mecanismos de desgaste atuantes na laminação a frio. Os mecanismos de desgaste foram determinados através de análise de réplicas obtidas em cilindros laminadores reais e a metodologia de ensaio em laboratório foi feita utilizando um tribômetro com a configuração de movimento alternado. As seguintes conclusões puderam ser obtidas:

1 – A aplicação da metodologia mostrou que em geral a prévia texturização das amostras elevou o desgaste do contracorpo.

2 – O uso do revestimento de NiP provocou a formação de uma tribocamada protetora tanto no corpo quanto no contracorpo ocasionando a redução do coeficiente de atrito e a redução da taxa de desgaste no corpo e no contracorpo.

3 – A nitretação em amostras sem prévia texturização provocou um leve aumento do coeficiente de atrito para ensaios de 1 hora quando comparada com as amostras sem modificação e com revestimento de cromo duro. Porém, para os ensaios de 5 horas, o valor do coeficiente foi similar aos de amostras sem modificação. No caso de amostras nitretadas com prévia texturização o coeficiente de atrito não teve alteração significativa quando comparadas com amostras somente texturizadas e revestidas com cromo duro.

4 – O revestimento de NiP foi o que levou a menor alteração dos parâmetros topográficos para amostras previamente texturizadas em função dos ensaios de deslizamento e portanto é o que deve permitir maior tempo de uso do cilindro antes que nova texturização seja necessária.

5 – Com os resultados obtidos propõe-se que o revestimento de NiP seja um bom candidato a substituir o revestimento de cromo duro em cilindros de laminação a frio.

CAPÍTULO VI

Sugestões para trabalhos futuros

Utilizar a metodologia desenvolvida para avaliar o comportamento tribológico de outros possíveis revestimentos/modificações superficiais. Em particular, citam-se revestimentos de carbono amorfo (DLCs), uma vez que a aparentemente sua técnica de deposição pode ser adaptada para revestir cilindros de grandes dimensões.

Avaliar o comportamento tribológico destes revestimentos/modificações para o caso de texturização determinística, em particular no caso da técnica de texturização eletroquímica sem mascaramento (MECT), a qual apresenta baixo custo e alta velocidade de processamento, requisito necessário para a texturização de superfícies com grandes dimensões.

Avaliar o comportamento tribológico dos revestimentos/modificações superficiais investigados em condições lubrificadas

Escalonar o uso do revestimento de NiP através da execução de um projeto piloto, visando verificar o seu desempenho em uma situação real de laminação a frio.

CAPÍTULO VII

Referências Bibliográficas

BALARAJU, J. N.; SESHADRI, S. K. Synthesis and characterization of electroless nickel-high phosphorus coatings. **Metal Finishing**, v. 97, n. 7, p. 8-13, 1999. ISSN 0026-0576.

BARAL, A.; ENGELKEN, R. D. Chromium-based regulations and greening in metal finishing industries in the USA. **Environmental Science & Policy**, v. 5, n. 2, p. 121-133, 2002. ISSN 1462-9011.

BAUDRAND, D. W. TRENDS IN ELECTROLESS NICKEL PLATING ... AND A LOOK AT THE FUTURE. **Plating and Surface Finishing**, v. 70, n. 12, p. 24-26, 1983 1983. ISSN 0360-3164.

BECH, J.; BAY, N.; ERIKSEN, M. A Study of Mechanisms of Liquid Lubrication in Metal Forming. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 47, n. 1, p. 221-226, 1998. ISSN 0007-8506.

BECKER, E. P.; LUDEMA, K. C. A qualitative empirical model of cylinder bore wear. **Wear**, v. 225-229, Part 1, p. 387-404, 1999. ISSN 0043-1648.

BELIN, M. Triboscopy: A new quantitative tool for microtribology. **Wear**, v. 168, n. 1-2, p. 7-12, 1993. ISSN 0043-1648.

BELIN, M.; LOPEZ, J.; MARTIN, J. M. Triboscopy, a quantitative tool for the study of the wear of a coated material. **Surface and Coatings Technology**, v. 70, n. 1, p. 27-31, 1994. ISSN 0257-8972.

BINDER, C. **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE COMPONENTES DE FERRO SINTERIZADO NITRETADOS POR PLASMA EM REATOR DE ESCALA INDUSTRIAL** 2006. 94 f. Dissertação Mestrado - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Florianópolis.

BODGER, B. E.; MCGRANN, R. T. R.; SOMERVILLE, D. A. The evaluation of tungsten carbide thermal spray coatings as replacements for electrodeposited chrome plating on aircraft landing gear. **Plating and Surface Finishing**, v. 84, n. 9, p. 28-31, Sep 1997. ISSN 0360-3164.

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.

BOZZI, A. C.; DE MELLO, J. D. B. **Triboscopia: Princípios potencialidades da técnica e aplicação em ensaios de desgaste por deslizamento.** 61º Congresso Anual da ABM. Rio de Janeiro - RJ: Anais do 61º Congresso Anual da ABM: 4010-4018 p. 2006.

BUSCH, M. L.; BIAUSSER, H.; BIARD, G.; LE BON, A.; GRUMBACH, M. **Metallurgical and Mechanical Aspects of Temper Rolling Process.** 4th International Steel Rolling Conference – the Science and Technology on Flat Rolling. E: 48.1 -7 p. 1987.

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. 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.

DEUTSCHER, O. DIFFERENT METHODS FOR ATTAINING A PARTICULAR ROUGHNESS ON COLD-ROLLED STRIP. **Stahl Und Eisen**, v. 115, n. 7, p. 39-45, Jul 17 1995. ISSN 0340-4803.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy.** McGraw Hill Book Company, 1988. p.

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.

DOS SANTOS, M. B.; COSTA, H. L.; DE MELLO, J. D. B. Potentiality of triboscopy to monitor friction and wear. **Wear**, v. 332–333, p. 1134-1144, 2015. ISSN 0043-1648.

DUNCAN, R. N. Corrosion resistance of electroless nickel for petroleum applications. **ELECTROLESS NICKEL CONFERENCE**, 1981.

ECHEVERRIGARAY, F. G.; BAUMVOL, I. J. R.; FIGUEROA, C. A. **INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO SUPERFICIAL DE BALL MILLING NA NITRETAÇÃO A PLASMA A BAIXA TEMPERATURA DE LIGAS FERROSAS.** XVII Encontro de Jovens pesquisadores da UCS. Caixias do Sul - RS 2006.

EL-AMOUSH, 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.

FLETCHER, D. I.; KAPOOR, A.; STEINHOFF, K.; SCHULEIT, N. Wear behaviour and surface form evolution of a novel titanium carbide implanted surface under lubricated conditions. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 214, n. 6, p. 597-610, June 1, 2000 2000.

FRANCO, L. A.; SINATORA, A. 3D surface parameters (ISO 25178-2): Actual meaning of Spk and its relationship to Vmp. **Precision Engineering**, v. 40, p. 106-111, 2015. ISSN 0141-6359.

GIACOMELLI, R. O. **EFEITOS DA NITRETAÇÃO A PLASMA E COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE FILMES DE DLC EM SUBSTRATOS DE FERRO FUNDIDO CINZENTO E NODULAR**. 2015. 167 f. Dissertação de Mestrado - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Florianópolis.

GREENWOOD, J. A.; WILLIAMSON, J. B. P. Contact of nominally flat surfaces In: SCIENCES, M. A. P., Proceedings of the Royal Society of London, 1967. London. p.300–319.

GUTZEIT, G.; MAPP, E. T. “Kanigen” chemical nickel plating : . Corrosion technology, v. 3, Oct. 1956, p. 331–336. **Wear**, v. 1, n. 3, p. 263, 1957. ISSN 0043-1648.

HILGENBERG, K.; STEINHOFF, K. Texturing of skin-pass rolls by pulsed laser dispersing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 225, p. 84-92, 2015. ISSN 0924-0136.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Edward Arnold, 1992. p. ISBN 9780340561843.

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

JONES, C. K.; MARTIN, S. W.; STRUGES, D. J.; HUDIS, M. Ion Nitriding. Heat Treatment’73, 1975. London. The Metal Society. p.71-79.

KARAMIŞ, M. B. An investigation of the properties and wear behaviour of plasma-nitrided hot-working steel (H13). **Wear**, v. 150, n. 1–2, p. 331-342, 1991. ISSN 0043-1648.

KASPER, A. S. Correlation of Instrumentation with Painted Appearance. SOC. Of Automotive Engineers, 1965. p.22-28.

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.

LO, S.-W.; HORNG, T.-C. Lubricant Permeation From Micro Oil Pits Under Intimate Contact Condition. **Journal of Tribology**, v. 121, n. 4, p. 633-638, 1999. ISSN 0742-4787.

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.

MALLORY, G. O. The electroless nickel plating bath. In: INC, G. P., ELECTROLESS NICKEL CONFERENCE, 1979. Cincinnati. p.20.

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.

Metals handbook. 8. ASM International, 1973. p. ISBN 0378-3804.

MILAN, J. C. G.; CARVALHO, M. A.; XAVIER, R. R.; FRANCO, S. D.; DE MELLO, J. D. B. Effect of temperature, normal load and pre-oxidation on the sliding wear of multi-component ferrous alloys. **Wear**, v. 259, n. 1–6, p. 412-423, 2005. ISSN 0043-1648.

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

OULD, C.; BADICHE, X.; MONTMITONNET, P.; GACHON, Y. PVD coatings for mill rolls for cold rolling of high carbon steel strips—Laboratory tests. **Wear**, v. 306, n. 1–2, p. 103-112, 2013. ISSN 0043-1648.

PARKER, K. EFFECTS OF HEAT-TREATMENT ON THE PROPERTIES OF ELECTROLESS NICKEL DEPOSITS. **Plating and Surface Finishing**, v. 68, n. 12, p. 71-&, 1981 1981. ISSN 0360-3164.

PAWELSKI, I. O.; RASP, I. W.; ZWICK, W.; NETTELBECK, I. H. J.; STEINHOFF, I. K. The influence of different work-roll texturing systems on the development of surface structure in the temper rolling process of steel sheet used in the automotive industry. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 45, n. 1, p. 215-222, 1994/09/01 1994. ISSN 0924-0136.

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.

RAMALHO, A.; MIRANDA, J. C. Friction and wear of electroless NiP and NiP + PTFE coatings. **Wear**, v. 259, n. 7–12, p. 828-834, 2005. ISSN 0043-1648.

SILVA, E. D.; FRANÇA, L. P.; NASCIMENTO, M. M. G. S.; ZOPELARO, R. M.; NETO, O. C.; SOARES, R. A. R.; GENESTRA, M. Propostas à Prevenção de Riscos Ambientais relacionados ao Tratamento de Superfície com Cromatos. **Cadernos UniFOA**, v. Edição Especial, p. 48-58, Maio 2008 2008.

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. 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.

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.

STEINHOFF, K.; RASP, W.; PAWELSKI, O. Development of deterministic-stochastic surface structures to improve the tribological conditions of sheet forming processes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 60, n. 1–4, p. 355–361, 1996. ISSN 0924-0136.

STOUT, K. **Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions**. Penton Press, 2000. p. ISBN 9781857180237.

STOUT, K. J.; SULLIVAN, P. J.; DONG, W. P.; MAINSAH, E.; LUO, N.; MATHIA, T.; ZAHOUANI, H. **THE DEVELOPMENT OF METHODS FOR THE CHARACTERISATION OF ROUGHNESS IN THREE DIMENSIONS**. 1st Edition. University of Birmingham: Commission of the European Communities, 1993. p.

SUN, D.; YAO, L.; FAN, Q.; ZHANG, J. Research on Service Performances between Different Textured Cold Rolls. AISTech, 2006.

TAHERI, R.; OGUOCHA, I. N. A.; YANNAKOPOULOS, S. The tribological characteristics of electroless NiP coatings. **Wear**, v. 249, n. 5–6, p. 389–396, 2001. ISSN 0043-1648.

TAYLOR HOBSON, P. Guide to surface texture parameters. 2000.

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.

XIE, H. B.; JIANG, Z. Y.; YUEN, W. Y. D. Analysis of friction and surface roughness effects on edge crack evolution of thin strip during cold rolling. **Tribology International**, v. 44, n. 9, p. 971–979, 2011. ISSN 0301-679X.

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.