

JOSÉ LÚCIO GONÇALVES JÚNIOR

**INFLUÊNCIA DE MODIFICAÇÕES SUPERFICIAIS
(CROMAGEM E TEXTURIZAÇÃO) NO
COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE AÇOS PARA
FABRICAÇÃO DE CILINDROS DE LAMINAÇÃO A
FRIO**



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

2011

JOSÉ LÚCIO GONÇALVES JÚNIOR

**INFLUÊNCIA DE MODIFICAÇÕES SUPERFICIAIS
(CROMAGEM E TEXTURIZAÇÃO) NO COMPORTAMENTO
TRIBOLÓGICO DE AÇOS PARA FABRICAÇÃO DE CILINDROS
DE LAMINAÇÃO A FRIO**

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

Área de Concentração: Materiais e
Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. José Daniel Biasoli
de Mello

Uberlândia – MG

2011

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

G635i Gonçalves Júnior, José Lúcio, 1981-
 Influência de modificações superficiais (cromagem e texturização) no comportamento tribológico de aços para fabricação de cilindros de laminação a frio / José Lúcio Gonçalves Júnior. - 2011. 93 f. : il.

Orientador: José Daniel Biasoli de Mello.

Dissertação (mestrado) – 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. Mello, José Daniel Biasoli de. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA



ALUNO: José Lúcio Gonçalves Júnior

NÚMERO DE MATRÍCULA: 10922EMC008

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

*“Influência de Modificações Superficiais
(Cromagem e Texturização) no Comportamento
Tribológico de Aços para Fabricação de Cilindros
de Laminação a Frio”*

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada na Sala 313 do Bloco 1M, Campus Santa Mônica, em 07 de outubro de 2011, às 09:30 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME
Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello
Profa. Dra. Henara Lillian Costa Murray
Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva
Dra. Claudia Regina Serantoni

ASSINATURA
UFU
UFU
UTFPR
Villares Rolls

Uberlândia, 07 de outubro de 2011

Ao meu avô Lucio Gonçalves
Sebastião, à minha Tia Edna Maria de
Oliveira Araújo e ao amigo Marcio
Melazo.

Agradecimentos

Ao professor José Daniel Biasoli de Mello 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.

À Professora Henara Lillian Costa Murray pela 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 noiva Amanda Coelho Melazo e sua família por sua ajuda e compreensão nos momentos difíceis.

À minha avó Leoniça Nogueira Gonçalves pelo apoio incondicional.

Ao coordenador da Pós Graduação em Engenharia Mecânica Professor Gilmar Guimarães pela amizade e contribuição neste trabalho.

Aos amigos do LabMat, em Florianópolis, que contribuíram de forma significativa para a realização dos ensaios tribológicos e análises via microscopia eletrônica de varredura.

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 e à Eunice, que me auxiliaram em diversas tarefas para o desenvolvimento deste trabalho.

À Capes pelo apoio financeiro.

GONÇALVES JR, J. L. **Influência de modificações superficiais (cromagem e texturização) no comportamento tribológico de aços para fabricação de cilindros de laminação a frio.** 2011. 93f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

Resumo

O presente trabalho analisou o comportamento tribológico de modificações, geralmente utilizado em cilindros para laminação a frio. Iniciou-se o processo com a produção das amostras a partir de um fragmento de cilindro de laminação que foi cortado, originando amostras de aproximadamente 30 x 30 mm, em que se fez tratamento térmico, retificação de ambas as faces e modificações superficiais de cromagem, texturização, cromagem com posterior texturização e texturização com posterior cromagem. Os testes de desgaste foram realizados em modo alternado de deslizamento, com configuração de esfera sobre um plano utilizando-se carga de 9,8 N. Os resultados permitiram concluir que a texturização elevou os parâmetros topográficos, enquanto o revestimento de cromo duro diminuiu os mesmos. Observou-se que não houve alteração significativa do coeficiente de atrito em função das modificações superficiais e que a texturização promoveu um aumento significativo no desgaste do contracorpo, enquanto o revestimento de cromo duro promoveu uma redução do mesmo. A adição do revestimento de cromo duro promoveu a formação de uma tribocamada no contracorpo constituída de cromo e oxigênio, em contrapartida, em corpos sem o recobrimento de cromo duro ocorreu a formação de uma tribocamada constituída de ferro e oxigênio nas amostras. Em função da combinação da baixa carga aplicada e do curto intervalo de tempo, tornou-se impossível a quantificação do desgaste nos corpos pelas diferentes técnicas empregadas. Adicionalmente, estudaram-se sete diferentes materiais utilizados em réplicas, sendo executadas análises quantitativas e qualitativas via interferometria a laser e microscopia eletrônica de varredura. Dos materiais analisados, o material Facsimile apresentou melhores qualidades de replicação.

Palavras Chave: Tribologia. Laminação a frio. Revestimento de Cromo Duro. Texturização.

GONÇALVES JR, J. L. **Influence of surface modifications (surface texturing and hard chromium coating) on the tribological behavior of cold rolling mills Rolls steels**. 2011. 93f. M. Sc. Dissertation. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

Abstract

The present work analyzed the tribological behavior of surface modifications often used in cold rolling mill rolls. Different surface modifications were carried out on samples produced from a fragment of the rolling mill roll: i) texturing; ii) chromium plating; iii) texturing with subsequent hard chrome plating; iv) and hard chrome plating with subsequent texturing. The roll samples were subsequently heat treated and ground on both faces resulting in dimensions of approximately 30 x 30 mm. The wear tests were performed using a reciprocating movement of a ball over flat configuration under a load of 9.8 N. The results showed that surface texturing increased the topographic parameters whereas hard chrome coating decreased them. It was observed that there was no significant change in the coefficient of friction as a function of surface modification. Surface texturing increased the wear of the counter body, while the hard chromium coating reduced it. The addition of the hard chromium coating promoted the formation of a tribolayer on the counter body consisting of chromium and oxygen. On the other hand, for the samples without hard chrome coating the tribolayer consisted of iron and oxygen. As a consequence of the low applied load and the short duration of the tests it became impossible to quantify the wear on the bodies using various techniques. Additionally seven different materials used in replicates. Were investigated using quantitative and qualitative analysis via laser interferometry and scanning electron microscopy. Amongst materials tested, the material Facsimile presented best capacity of replication.

Keywords: Tribology. Cold Mill. Hard Chrome Plating. Texturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Velocidades e Força de atrito durante a laminação.....	06
Figura 2.2 – Densidade de trincas em função do tipo de catalizador.....	12
Figura 2.3 – Figura esquemática representando o teste de desgaste.....	13
Figura 2.4 – Taxa de desgaste para amostras revestidas em diferentes pressões de contato.....	13
Figura 2.5 – Desgaste em função do número de revoluções em amostras revestidas e sem revestimento, com pressão de contato de 3,3 MPa.....	14
Figura 2.6 – Perda de massa acumulada para amostras de aço H13 sob pressão de contato de 11MPa.....	15
Figura 2.7 – Evolução do Coeficiente de atrito em amostras de aço H13 com revestimento em função do número de rotações com velocidade de 600 rpm e pressão de contato de 3,3 MPa.....	15
Figura 2.8 – Evolução do coeficiente de atrito em amostras de aço H13 com revestimento em função do número de rotações (600 rpm e 11MPa).....	15
Figura 2.9 – 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	17
Figura 2.10 – Média da Ondulação W_{ca} comparando amostras texturizadas (\blacklozenge) e (\diamond) texturizadas/revestidas com cromo.....	17
Figura 2.11 – Relação entre a média da rugosidade R_a e a media da ondulação W_{ca} para amostras texturizadas (\blacklozenge) e (\diamond) texturizadas/revestidas com cromo.....	19
Figura 2.12 – Micrografia da seção transversal do cromo depositado em superfícies com EDT para as amostras: (a) A: condição de baixa energia de operação e (b) K condição com alta energia de operação.....	19

Figura 2.13 – Perfis de microdureza em diferentes amostras com EDT e texturizadas com cromo (a) EDT + Depósito de Cromo (A); (a) EDT + Depósito de Cromo (I); (a) EDT + Depósito de Cromo (K).....	20
Figura 3.1 – Figura 3D da face 1 da amostra TC_03 (a) com a componente forma e (b) sem a componente forma.....	23
Figura 3.2 – Filtro aplicado na figura com a forma removida (a) Ondulação e (b) rugosidade.....	24
Figura 3.3 – Tabela fornecida pelo software contendo 29 parâmetros de rugosidade.....	25
Figura 3.4 – Representação gráfica do parâmetro S_{pk}	26
Figura 3.5 – (a) Peça do cilindro utilizado para produção de amostras para testes tribológicos. (b) Detalhe dos cortes transversais produzidos no cilindro.....	27
Figura 3.6 – Etapas do tratamento térmico.....	27
Figura 3.7 – Etapas de produção das amostras.....	29
Figura 3.8 – Tribômetro utilizado nos ensaios de deslizamento.....	30
Figura 3.9 – Calota esférica formada no contracampo durante o ensaio realizado com a amostra SM_01 Face 2.....	30
Figura 3.10 – Cálculo do volume de desgaste assumindo-se a superfície como nivelada.....	31
Figura 3.11 – Representação esquemática da retirada do fragmento de cilindro utilizado para validação de réplicas.....	32
Figura 4.1 – Representação 3D do fragmento de cilindro e dos diferentes materiais de réplicas (a) cilindro (b) fac simlie (c) repliset (d) vipflash (e) vip sil fluida delgada (f) vip sil fluida espessa (g) vip sil viscosa delgada(h) vip sil viscosa espessa.....	34
Figura 4.2 – Parâmetro de rugosidade S_q	35

Figura 4.3 – Parâmetro de Rugosidade S_{dq}	35
Figura 4.4 – Parâmetro de rugosidade S_{pk}	36
Figura 4.5 – Parâmetro S_{bi}	36
Figura 4.6 – Microscopia eletrônica de varredura nas amostras (a) cilindro (b) Fac Simile (c) Repliset (d) Vip Flash (e) Vip Sil Fluida Deslgada (f) Vip Sil Fluida Espessa (g) Vip Sil Viscosa Delgada (h) Vip Sil Viscosa Espessa.....	37
Figura 4.7 – (a) Microestrutura da amostra SM_02 e (b) microestrutura do contracorpo.....	39
Figura 4.8 – Distribuição típica dos valores de dureza em amostra sem modificação superficial.....	40
Figura 4.9 – Microdureza das amostras prontas para ensaios de deslizamento.....	41
Figura – 4.10 – Seção transversal de amostras (a) revestida com cromo duro (b) texturizada com posterior revestimento de cromo duro (c) revestida com cromo duro e posterior texturização.....	41
Figura 4.11 – Perfil de microdureza na amostra texturizada.....	42
Figura 4.12 – Microestrutura da seção transversal da amostra texturizada (a) no centro da amostra e (b) na borda da amostra.....	43
Figura 4.13 – Representação topográfica de amostra sem modificação superficial (a) Interferometria a laser (b) MEV.....	44
Figura 4.14 – Representação topográfica de amostra revestida com cromo duro (a) Interferometria a laser (b) MEV.....	45
Figura 4.15 – Representação topográfica de amostra texturizada (a) Interferometria a laser (b) MEV.....	46

Figura 4.16 – Representação topográfica de amostra texturizada e posteriormente revestida com cromo duro (a) Interferometria a laser após a texturização (b) interferometria a laser após o cromeamento (c) MEV após o cromeamento.....	47
Figura 4.17 – Parâmetros de rugosidade no final da preparação das amostras.....	48
Figura 4.18 – Parâmetros de rugosidade de amostras texturizadas e posteriormente cromadas.....	49
Figura 4.19 – Parâmetro de rugosidade P_c para amostras texturizadas e posteriormente cromadas.....	49
Figura 4.20 – Evolução do coeficiente de atrito para diferentes modificações superficiais.....	50
Figura 4.21 – Evolução da resistência ao contato em função das diferentes modificações superficiais.....	50
Figura 4.22 – Variação do coeficiente de atrito em função do revestimento.....	51
Figura 4.23 – Desgaste do contracorpo para diferentes modificações superficiais (a) SM (b) C (c) T (d) TC.....	52
Figura 4.24 – Taxa de desgaste do contracorpo em função do revestimento.....	53
Figura 4.25 – Aspecto típico das marcas de desgaste em contracorpo atuantes em amostras revestidas com cromo (a) cromada (b) texturizada e cromada (c) espectro típico da região clara obtida por EDX (d) Espectro típico da região escura obtida por EDX.....	54
Figura 4.26 – Detalhe no acúmulo de matéria encontrado nas bordas da marca de desgaste do contracorpo (a) ensaiado com amostra sem modificação superficial (b) ensaiado com amostras texturizada e posteriormente cromada.....	55
Figura 4.27 – Microscopia eletrônica de varredura na marca de desgaste em amostras sem modificação superficial (a) elétrons secundários (b) elétrons retroespalhados.....	56

Figura 4.28 – Microscopia eletrônica de varredura em amostra sem modificação superficial (a) Imagem por elétrons retroespalhados (b) EDX na região escura (c) EDX na região clara.....57

Figura 4.29 – Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários na marca de desgaste de amostra texturizada.....57

Figura 4.30 – Microscopia eletrônica por varredura na marca de desgaste de amostras revestidas com cromo duro (a) imagem por elétrons secundários (b) imagem por elétrons retroespalhados.....58

Figura 4.31 – Microscopia eletrônica por varredura na marca de desgaste de amostras revestidas com cromo duro (a) imagem por elétrons retroespalhados (b) EDX na marca de desgaste (c) EDX fora da marca de desgaste.....59

Figura 4.32 – Microscopia eletrônica por varredura em amostras texturizadas e posteriormente cromadas (a) imagem por elétrons secundários (b) imagem por elétrons retroespalhados.....59

Figura 4.33 – Microscopia eletrônica por varredura em amostra texturizada e posteriormente cromada (a) Imagem por elétrons secundários (b) EDX na região clara da marca de desgaste.....60

Figura 4.34 – Topografia de superfície 3D de amostras ensaiadas (a) SM (b) C (c) T (d) TC.....61

Figura 4.35 – Variação da refletividade da luz em amostras ensaiadas (a) SM (b) C (c) T (d) TC...62

Figura Al 1 – Valores de dureza encontrados na face 1 das amostras após o tratamento térmico.....73

Figura Al 2 – Valores de dureza encontrados na face 2 das amostras após o tratamento térmico.....74

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Composição química do aço VC9 em porcentagem de peso.....	21
Tabela 3.2 – Composição química do aço SAE 52100 em porcentagem de peso.....	21
Tabela 3.3 – Parâmetros de medições via interferometria a laser 3D.....	22
Tabela 3.4 – Nomenclatura das amostras.....	28
Tabela 3.5 – Nomenclatura dos materiais utilizados em réplicas.....	32
Tabela 4.1 – Síntese do estudo de réplicas.....	38
Tabela 4.2 – Composição química da tribocamada (porcentagem em peso).....	54

LISTA DE SÍMBOLOS

E_0 : espessura da chapa antes de atravessar os cilindros.

E_f : espessura da chapa depois de atravessar os cilindros.

l : largura da chapa.

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.

P_c : contagem de picos

S_q : rugosidade superficial quadrática média.

S_{dq} : inclinação média das irregularidades

S_{pk} : altura dos picos da superfície

S_{bi} : capacidade de suporte mecânico da superfície

W_{ca} : ondulação média

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução.....	01
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.....	05
2.1. – Laminação.....	05
2.2. – Texturização aplicada a laminação a frio.....	07
2.3 – Processo de cromeamento.....	11
2.3.1 – Resistencia ao desgaste.....	12
2.4 – Cilindros texturizados e posterior deposição de cromo.....	16
Capítulo 3 – Metodologia.....	21
3.1 – Materiais.....	21
3.2 – Ensaio de dureza e microdureza.....	22
3.3 – Interferometria a laser.....	22
3.4 – Preparação metalográfica e produção das amostras.....	27
3.5 – Ensaio de desgaste por deslizamento.....	29
3.6 – Avaliação de réplicas.....	31
Capítulo 4 – Resultados e Discussão.....	33
4.1 – Avaliação de réplicas.....	33
4.2 – Caracterização metalográfica e dureza.....	38
4.3 – Caracterização topográfica.....	42
4.4 – Testes de desgaste por deslizamento.....	50
Capítulo 5 – Conclusão.....	63
Capítulo 6 – Trabalhos Futuros.....	65
Capítulo 7 – Referências Bibliográficas.....	67
Anexo I – Medições de dureza em amostras após o tratamento térmico.....	73

CAPÍTULO I

Introdução

Os grandes produtores de aço no Brasil encontram-se hoje em um dilema entre sobrevivência e crescimento. Além de competirem entre si, a globalização atual torna o mercado bastante competitivo, obrigando as empresas brasileiras a desenvolverem produtos de alto valor agregado e máxima eficiência no ciclo produtivo (MENDES, 2007).

Um dos principais processos de produção de aço adotados pelas empresas no mundo é a laminação por permitir trabalhar um grande volume de material. A eficiência do processo passa, evidentemente, pelos cilindros de laminação. Os cilindros atuais devem permitir a obtenção de laminados com elevados padrões de qualidade. Os laminados devem apresentar níveis adequados de resistência mecânica, planicidade, rugosidade, espessura de chapa no atendimento a consumidores cada vez mais exigentes (indústria automobilística, linha branca, dentre outros). Por outro lado, os cilindros de laminação devem suportar níveis de carga e temperatura elevados, exigindo tenacidade e resistência ao desgaste em patamares cada vez mais altos para otimização do ciclo produtivo. A melhoria dos cilindros torna-se chave para ganho da produção de aço laminado (MENDES, 2007).

De forma convencional, os materiais para cilindros de laminação dividem-se em dois grupos (SPUZIC et al., 1994). O primeiro consiste de cilindros de ferro fundido, com alta resistência ao desgaste e frágeis, utilizados no acabamento dos laminados; o segundo engloba cilindros de aço que possuem melhor resistência mecânica, dureza uniforme e maior coeficiente de atrito (oferece melhor “mordedura”) e, por isso, são utilizados nas cadeiras iniciais do processo.

Os cilindros de laminação para as últimas cadeiras são, geralmente, ferramentas confeccionadas com dois materiais (BOCCALINI; GOLDENSTEIN, 2001). Eles consistem de um núcleo dútil de aço ou ferro fundido por centrifugação ou estaticamente (vazamento por

gravidade) e de uma casca externa de elevada resistência ao desgaste. Esses cilindros devem manter dureza elevada e resistência ao desgaste mesmo em altas temperaturas.

Para garantir o acabamento exigido por clientes, inúmeras empresas estão utilizando modificações superficiais (texturização e cromeamento) nos laminadores de acabamento.

O processo de texturização promove um importante efeito em produtos laminados em especial para a indústria automotiva. Durante o processo de conformação, as crateras formadas pela textura superficial promovem uma boa reserva de óleo lubrificante, se produzido de forma aleatória, além de promover um bom brilho após a pintura (UTSCH; VINKE, 2005)

Além de melhorar o acabamento, a texturização pode promover um incremento na resistência a fratura, corrosão e a fadiga (CALLE; MACHADO, 2003).

Já o revestimento de cromo duro, que é produzido por eletrodeposição a partir de uma solução contendo ácido crômico e um ânion catalizador na proporção adequada, tem sido extensivamente usado em aplicações industriais que exigem elevada resistência ao desgaste. O revestimento de cromo possui característica com uma dureza de aproximadamente 1000 Hv, resistência a corrosão e ao desgaste (EL-AMOUSH et al., 2011; ASM HANDBOOK, 1994).

A combinação da texturização e do revestimento de cromo tem sido usada como alternativa para elevar a vida útil do cilindro e a qualidade do produto laminado. A texturização garante a rugosidade superficial exigida e o revestimento de cromo duro promove a durabilidade da rugosidade do cilindro (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

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

Inicialmente a proposta inicial do estudo era determinar o mecanismo de desgaste ocorrido no cilindro de laminação a frio através do uso de réplicas. Para tanto, foram obtidas réplicas de diferentes cilindros de laminação em diferentes estágios de uso. Notou-se durante os estudos, que o material da réplica não era adequado para a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Em consequência da incapacidade do material em ser analisado no MEV, foi estabelecida uma metodologia de caracterização da adequabilidade de diversos materiais para réplicas disponíveis no mercado. Um fragmento contendo a superfície ativa de um cilindro de laminação a frio teve sua topografia de superfície caracterizada tanto qualitativa (MEV) quanto

quantitativamente (Interferometria laser). Na sequência, sete materiais de replicação distintos foram utilizados para replicar a mesma região do fragmento de cilindro e caracterizados de modo a estabelecer qual o mais adequado para replicar o tribosistema em estudo.

Com a dificuldade da empresa produtora de cilindros de laminação a frio para replicar os cilindros em diferentes estágios de uso e a necessidade de dar continuidade ao projeto em andamento, decidiu-se avaliar a influência das modificações superficiais no comportamento tribológico de aços usados em cilindros de laminação a frio.

O Capítulo II desse trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre o assunto, abordando o processo de laminação, as influências tribológicas da do revestimento de cromo duro e texturização, bem como as aplicações das modificações superficiais em cilindros de laminação a frio.

No Capítulo III é feita a descrição da metodologia experimental e dos recursos laboratoriais utilizados.

O Capítulo IV apresenta os resultados experimentais e as discussões relevantes ao trabalho.

Concluem-se, no Capítulo V, os principais resultados, enquanto apresentam-se, no Capítulo VI, propostas de trabalhos futuros decorrentes das observações e conclusões desse 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 cromeamento em laminação a frio.

2.1. – Laminação

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, 1981).

Na produção de tiras a frio, a qualidade dos laminados (rugosidade, dimensões, propriedades mecânicas) está diretamente relacionada ao desempenho dos cilindros do trem acabador que 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, 1981). 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.

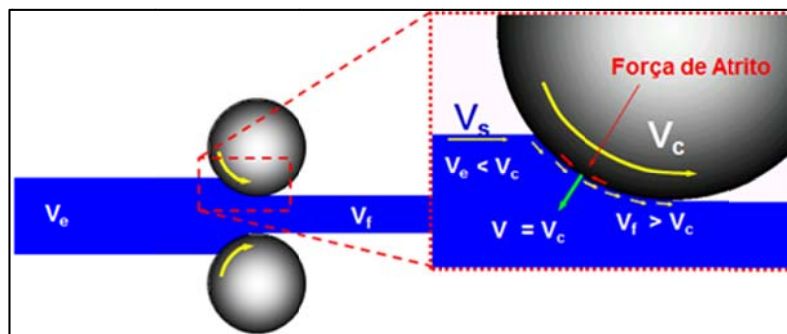


Figura 2.1 – Velocidades e Força de atrito durante a laminação.

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.

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 à saída da chapa.

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

Para otimizar o atrito entre o cilindro e a chapa, podem-se utilizar técnicas de modificações superficiais tais como o recobrimento com cromo duro e a texturização. A seguir mostrar-se-á uma síntese da aplicação da texturização aplicada a laminação a frio, mostrando a função e algumas vantagens do processo.

2.2. – Texturização aplicada a laminação a frio.

Em função da exigência dos consumidores de produtos laminados a frio, os fabricantes são obrigados a produzir produtos laminados com elevados níveis de exigência com relação à forma e a aparência. Para satisfazer a necessidade dos clientes os produtores necessitam produzir o material laminado com uma textura pré-definida, sendo que esta textura é transmitida a chapa pelos cilindros de acabamento (ELKOCA, 2008).

As superfícies texturizadas desempenham um importante papel na fabricação de carrocerias de automóveis. Durante o processo de conformação, os sulcos formados pela superfície texturizada do cilindro, além de ser um bom reservatório para óleo lubrificante, a textura exibe uma refletividade uniforme após a pintura (UTSCH; VINKE, 2005).

Vários autores estudaram a importância da rugosidade superficial da tira para as diferentes aplicações.

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 para esta aplicação de 0,5 a 2,4 μm de Ra.

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 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; YUEN (2011) afirma que além da proporção de redução da chapa, da velocidade de laminação, a espessura da chapa, a rugosidade inicial da chapa interfere no fluxo do material durante a laminação.

Geralmente, a rugosidade da tira laminada diminui com o aumento da redução. Bem como, cilindros de trabalho mais rugosos criam tiras mais rugosa. 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 utilizando aço baixo carbono micro ligado e aço baixo carbono em 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, para a mesma carga e velocidade de laminação apresentaram menor taxa de transferência da rugosidade do cilindro para a tira.

Outra constatação de BUSCH et al. (1987) 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.

No processo de laminação utilizando cilindro texturizado, o cilindro transfere para a tira sua textura superficial e rugosidade pré-definidas. Já que a textura do material 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 (CORTÊS, 2009).

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

Existem várias técnicas para texturização de cilindros de laminação (KAINZ et al, 2005), cada uma com sua particularidade, apresentando diferentes resultados: distribuições de cavidades ou vales, faixas de rugosidade, densidades de picos, homogeneidade da tira e reprodutibilidade (SIMAO et al, 1994; DEUTSCHER, 1997; SUN et al, 2006).

Existem na atualidade, inúmeras técnicas de texturização e a seguir, mostra-se as técnicas mais utilizadas nas indústrias que trabalham com laminação a frio.

- 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,1997).

Resultados obtidos por SUN et al., (2006) mostrou que para o método de texturização por SBT ocorre uma grande variação da rugosidade, com esparsa e desigual distribuição da textura, com transferência da rugosidade menor que 70%.

- Texturização por feixe de laser: Um feixe de laser é focado na superfície do cilindro, este feixe passa por uma roda inversora que interrompe sua passagem intermitentemente. Em cada ponto iluminado ocorre o derretimento localizado da superfície do material formando micro cavidades. A velocidade da roda inversora 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 LBT mostram que a transferência da rugosidade é em torno de 50% e que só é possível transferir 25% da altura dos pico formado, pois o mesmo fica achatado na extremidade superior (DEUTSCHER, 1997).

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 (DEUTSCHER, 1997).

- Texturização por descargas elétricas: Eletrodos são posicionados axialmente a superfície do cilindro, que fica imerso em um meio dielétrico. Descargas elétricas são induzidas entre o eletrodo (anodo) e cilindro (catodo), provocando eletro-erosão em sua superfície. A combinação da corrente, tensão e frequência de oscilação definem a condição final do cilindro texturizado (POIRÉ; PONTET, 1999; SIMAO 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% (SIMAO 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).

- Texturização por feixe de elétrons: Um feixe de elétrons de alta energia é utilizado para derreter a superfície do cilindro, formando micro cavidades. A frequência de pulsação, a

intensidade do feixe de elétrons, o deslocamento e rotação do cilindro são parâmetros utilizados para definição da rugosidade final do mesmo (STAEVES, 1998).

O padrão de textura por EBT se parece com a cavidade formada pelo processo LBT, porém mais irregular, sendo com este sistema obter padrões de cavidades sequenciadas, semi-aleatórias ou completamente aleatórias (DOLVES, 1991).

- Texturização por jato de tinta: Este processo consiste em um microprocessador ligado a um cabeçote de uma impressora de jato de tinta que é utilizado para imprimir na superfície do cilindro uma máscara de tinta com a textura escolhida. Posteriormente este cilindro é submetido ao ataque químico que desgasta a superfície que não foi protegida pela tinta (MUHL; ALDER, 1994).

A vantagem deste processo é o menor custo do equipamento. Assim como no processo a laser, se o sistema de jateamento estiver acoplado em uma unidade de movimentação micro processada, é possível obter qualquer padrão de textura desejada (MUHL; ALDER, 1994).

- Topocrom: É a tecnologia de texturização de cilindro que utiliza campo elétrico entre o eletrodo de trabalho e a superfície do cilindro de laminação, tal qual como no processo de texturização por descargas elétricas. Porém neste caso os íons do eletrólito de cromo são depositados por redução eletrolítica na superfície do cilindro de laminação. Ajustando os parâmetros de eletro deposição é possível controlar o tamanho e a quantidade de material depositado (ZIMNIK; RITTEBACH; MÜLL, 1998).

A faixa da rugosidade da textura obtida pelo método Topocrom vai de 0,2 a 20 μ m Ra, apresenta uma excelente uniformidade e repetibilidade. A precisão da rugosidade controlada é de $\pm 0.1 \mu$ m e a taxa de transferência máxima é elevada. É uma técnica que oferece textura fina, que esta sendo muito demandada pela indústria automobilística (ZIMNIK; RITTEBACH; MÜLL, 1998; MÜLL et al.; 2004).

A textura feito por Topocrom é isotrópica e bem homogênea, com distribuição contínua das cavidades, porém aleatórias. Os resultados apresentaram que os valores de R_a/P_c são sempre os mesmos tanto na superfície superior quanto inferior, valores de R_a mostraram-se dentro da faixa de 0,9 a 1,2 μ m R_a e P_c equivalente a 90 picos/mm (CORTÊS, 2009).

A vantagem principal desta técnica é a alta vida dos cilindros. Resultados mostraram que após a laminação de 1.081 toneladas de material, o decréscimo da rugosidade foi ínfimo. Juntamente com o revestimento de cromo duro, que afere uma maior dureza superficial ao cilindro, o processo diminui a formação de defeitos superficiais no material laminado (CORTÊS, 2009).

2.3 – Processo de cromeamento

Antes de promover a deposição de cromo duro, toda sujeira e filmes passivos devem ser removidos de superfícies de metais ferrosos e não ferrosos. Além de limpar, este processo ainda ajuda na ativação da superfície aumentando a eficácia da adesão do cromo duro (ASM HANDBOOK, 1994).

Para a deposição do revestimento, existem três tipos básicos de soluções nas quais em todas é usado trióxido de cromo (CrO_3) como a fonte principal do metal (ASM HANDBOOK, 1994).

O primeiro tipo de solução surgiu na década de 1920 e passou a ser chamada de solução convencional de cromo usando como catalizador os íons sulfetos (SO_4^{2-}) (ASM HANDBOOK, 1994).

Na década de 1950 surgiram os banhos que utilizavam catalizadores mistos, contendo sulfetos e fluoretos. Em comparação aos banhos convencionais, os catalizadores mistos se caracterizam por promoverem uma dureza mais elevada ao revestimento e maior produtividade. Em contrapartida, o metal é atacado quimicamente enquanto se aquece até a temperatura de deposição. Neste caso, as áreas com baixas densidades de corrente não serão recobertas e são atacadas durante todo o processo (ASM HANDBOOK, 1994).

Para sanar os problemas ocorridos com os banhos de catalizadores mistos, na década de 1980, surgiram os banhos livres de fluoretos que usam como catalizadores os íons sulfetos acrescido de um composto orgânico. Esse tipo de banho evita o ataque químico do metal base durante a deposição, entretanto tem como limitação o difícil controle da proporção entre os dois catalizadores (CHIU et al., 2002).

A quantidade de trincas, dureza, e a fragilização por hidrogênio são alguns fatores que influenciam na qualidade do revestimento.

As microtrincas que não podem ser evitadas com condições presentes de eletrodeposição geram um efeito adverso com relação à resistência à corrosão, uma vez que os agentes corrosivos podem facilmente alcançar o substrato através das microtrincas (WANG et al., 2005). Observa-se que quanto maior o número de trincas presentes, menores elas são e, portanto, maior é a resistência à corrosão, pois menor é a probabilidade de uma trinca atravessar todo o revestimento chegando ao substrato (ASM HANDBOOK, 1994). Seleciona-se a quantidade de trincas do revestimento por meio da escolha do catalizador usado na deposição. A Figura 2.2 mostra a variação da densidade de trincas em função do tipo de catalizador.

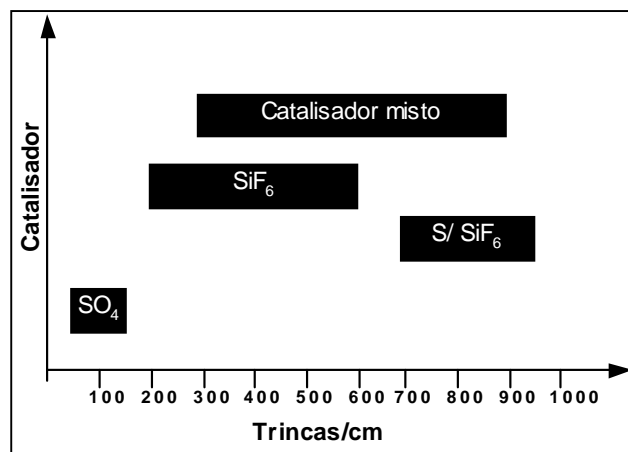


Figura 2.2 – Densidade de trincas em função do tipo de catalisador (ASM HANDBOOK, 1994).

Além de trincas, o revestimento de cromo também está sujeito a fragilização por hidrogênio. Sendo que a susceptibilidade de peças cromadas à fragilização por hidrogênio é afetada pela dureza do aço, pelo processo de retificação, pelos defeitos da superfície e pela relação entre profundidade do revestimento e a dureza da parte a ser revestida (ASM HANDBOOK, 1994).

2.3.1 – Resistência ao desgaste

Existem vários estudos mostrando a eficácia do revestimento de cromo duro em condições que exigem elevada resistência ao desgaste e à corrosão.

Um dos estudos existentes analisa o comportamento do atrito e do desgaste em amostras de aço ferramenta AISI H13 com composição química de Fe–0.36% C–5.21% Cr–1.25% Mo–0.85%. Esse estudo, realizado por CHIU et al. (2002), apresenta, para efeito comparativo, ensaios em amostras revestidas com cromo duro e em amostras sem revestimentos. O equipamento utilizado foi um tribômetro com a configuração com bloco deslizando sobre um cilindro, com esquema mostrado na Figura 2.3 e parte dos resultados são reproduzidos neste capítulo.

Para servir de contracorpo cilíndrico, os autores CHIU et al., (2002) escolheram o aço ferramenta temperado AISI O1 com dureza de 65 HRC (830 HV_{0,3} na microdureza) e realizou-se os testes de desgaste sob pressões de contato de 3,3, 7,2 e 11 MPa, a uma velocidade de 600 rot/min. Após 4000 rotações, retirou-se cada amostra para registrar a perda de massa, até alcançar-se um total de 12 000 rotações.

A Figura 2.3 mostra uma representação esquemática dos testes tribológicos realizados.

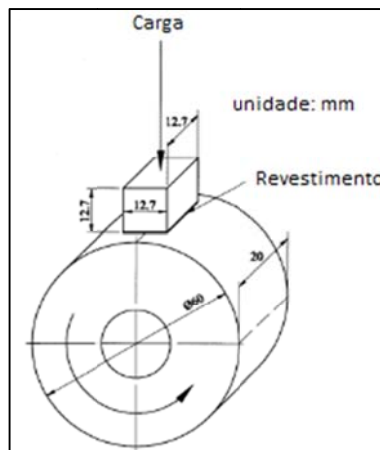


Figura 2.3 – Figura esquemática representando o teste de desgaste (CHIU et al., 2002).

Testes de microdureza realizados mostraram que as amostras, antes do tratamento térmico, apresentaram valores de 220 ± 30 HV. Após a realização do tratamento térmico, os valores subiram para 510 ± 20 HV, enquanto que para o revestimento de cromo duro mostrou valores de 600 a 1100 HV (CHIU et al., 2002).

Apresenta-se na Figura 2.4 a taxa de desgaste dos aços H13 não revestidos e com revestimento de cromo após a realização de 12000 rotações sob pressão de contato de 3,3; 7,2 e 11 MPa (CHIU et al 2002).

Observa-se que a amostra sem revestimento apresentou uma taxa de desgaste (calculado em função da inclinação da curva) aproximadamente 6,15 mg/MPa para o intervalo de 3,3 a 11 MPa de pressão de contato. Já a amostra revestida com cromo duro apresentou o valor de aproximadamente 0,28 mg/MPa (CHIU et al., 2002).

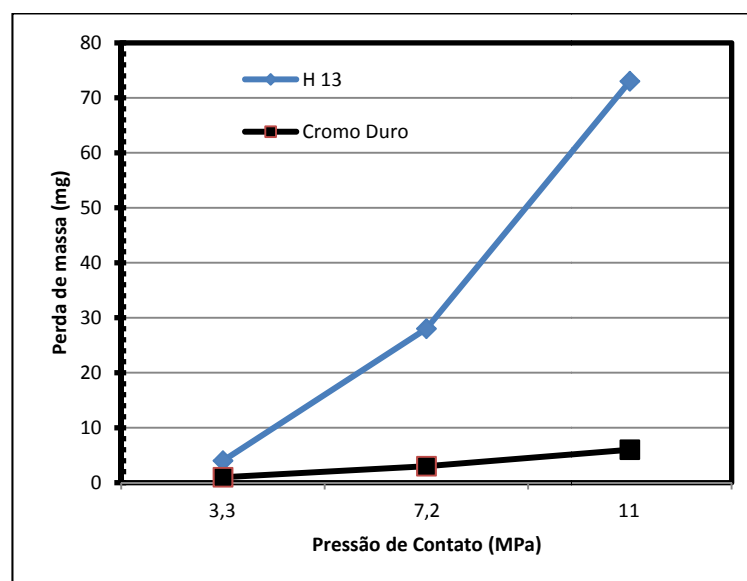


Figura 2.4 – Taxa de desgaste para amostras revestidas em diferentes pressões de contato (CHIU et al., 2002).

A taxa de desgaste, em função do número de revoluções de amostras não revestidas, revestidas com cromo duro sob pressão de contato de 3,3 e 11 MPa são mostradas nas Figuras 2.5 e 2.6 respectivamente (CHIU et al., 2002).

Observando-se a Figura 2.5, sob pressão de contato de 3,3 MPa, o revestimento de cromo duro (H-Cr) possui excelente comportamento em relação ao desgaste, quando comparados às amostras com tratamento térmico, mantendo o bom comportamento quando submetido a pressão de 11 MPa.

Analisando as amostras sem revestimento, e comparando as Figuras 2.5 e 2.6, nota-se que houve um aumento drástico na taxa de desgaste da amostra, saltando de 4×10^{-4} para 6×10^{-3} , ou seja, houve um incremento de 15 vezes quando a pressão de contato sobe de 3,3 para 11 MPa (CHIU et al., 2002).

As propriedades de atrito entre o contra corpo cilíndrico e as amostras sem recobrimento, recobertas com H-Cr, sob pressões de contato de 3,3 MPa e 11 MPa, são mostradas nas Figuras 2.7 e 2.8 respectivamente. Observa-se, na Figura 2.7, que o coeficiente de atrito das amostras revestidas com H-Cr sofre uma ampla flutuação, entretanto para amostras não revestidas o coeficiente de atrito mostra-se mais estável. Isto ocorre devido à rugosidade superficial do H-Cr que contém um grande número de pontos de contato em relação à superfície polida e o início do ponto de colapso do revestimento resulta na flutuação do atrito. A flutuação do atrito surge da produção e ruptura de debris. A média do coeficiente de atrito da amostra revestida de H-Cr de aproximadamente 0,55, é bem próximo da amostra sem revestimento (CHIU et al., 2002).

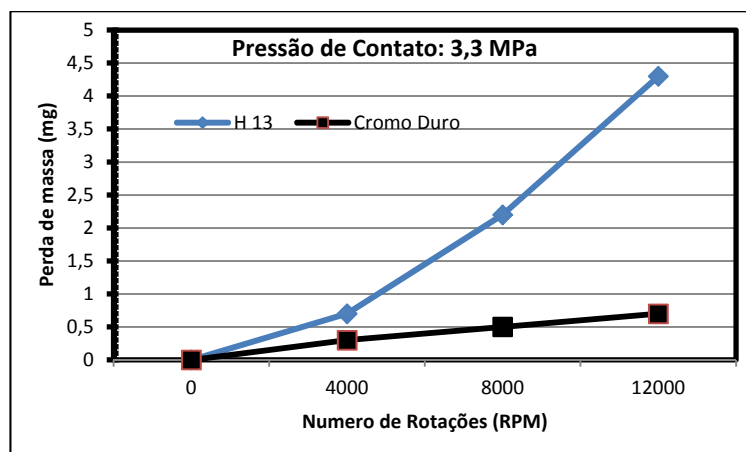


Figura 2.5 – Desgaste em função do número de revoluções em amostras revestidas e sem revestimento, com pressão de contato de 3,3 MPa (CHIU et al., 2002).

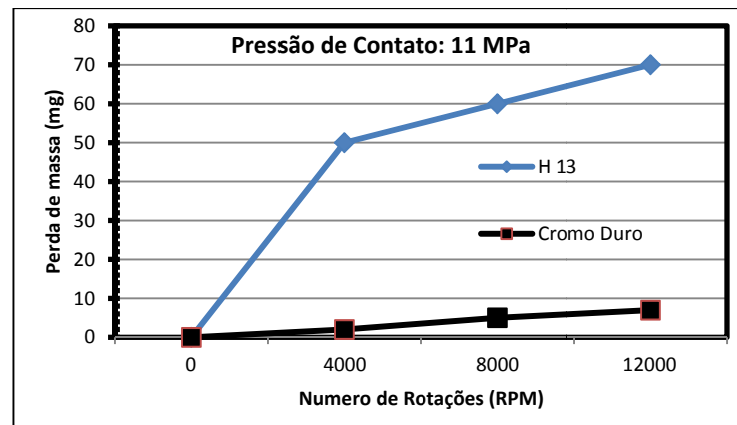


Figura 2.6 – Perda de massa acumulada para amostras de aço H13 sob pressão de contato de 11MPa (CHIU et al., 2002).

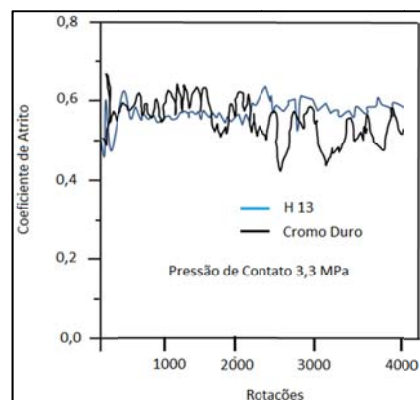


Figura 2.7 – Evolução do coeficiente de atrito em amostras de aço H13 com revestimento de cromo duro e sem revestimento em função do número de rotações com velocidade de 600 rpm e pressão de contato de 3,3 MPa (CHIU et al., 2002).

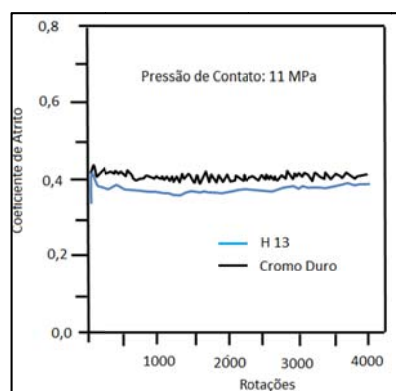


Figura 2.8 – Evolução do coeficiente de atrito em amostras de aço H13 com e sem revestimento de cromo em função do número de rotações (600 rpm e 11MPa) (CHIU et al., 2002).

Quando aplicada uma pressão de contato superior a 11MPa, o coeficiente de atrito médio de amostras revestidas com H-Cr reduz para aproximadamente 0,4, enquanto amostras sem revestimento apresentam valores médios de 0,37 (CHIU et al., 2002).

Os autores CHIU et al., (2002) observaram também que a flutuação dos coeficientes de atrito diminui devido à pressão mais alta.

Com a elevação da pressão de contato, apesar de ocorrer a redução do coeficiente de atrito, notou-se a elevação da taxa de desgaste. Nesse sentido, a espessura da camada protetora é crucial nos casos em que as amostras revestidas são submetidas a um teste longo e com elevada pressão de contato. Nota-se também, que apesar do revestimento de cromo duro apresentar um elevado coeficiente de atrito, este apresenta também, melhor resistência ao desgaste em testes longos com elevada pressão de contato (CHIU et al., 2002).

Nota-se que quando submetidos a uma pressão de contato de 11MPa, o revestimento de cromo duro apresentam excelente resistência ao desgaste se comparada às amostras sem revestimento (CHIU et al., 2002).

Em função do custo adicional do processo de revestimento de cromo duro, muitas empresas questionam as reais vantagens do revestimento e na literatura, apesar de existir grande variedade de estudos mostrando a qualidade do revestimento, existem poucos relatando as desvantagens do cromo duro. Esse fato desperta, assim, grande interesse nas indústrias no entendimento das reais vantagens do uso de revestimentos durante a laminação a frio. A empresa Gerdau S.A., fabricante de cilindros, é um exemplo desse interesse, resultando na parceria desse trabalho.

2.4 – Cilindros Texturizados e posterior deposição de cromo

Além do uso de cromo duro, existe uma combinação entre a texturização do cilindro e o revestimento de cromo duro, que também pode ser vantajosa sob o ponto de vista da vida útil do cilindro de laminação a frio.

O sistema tribológico cromo-aço possui um coeficiente de atrito que é cerca da metade do conjunto aço-aço. Em condições sem lubrificação, esta propriedade permite ao cilindro cromado evitar danos gerados por debris, além de manter a chapa laminada dentro das tolerâncias superficiais exigidas (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

Durante as primeiras etapas da laminação, alguns picos se fraturam facilmente se tornando debris, com a deposição de cromo duro, além de aumentar a dureza superficial, consegue-se manter esses picos fixos ao cilindro por mais tempo. (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

O trabalho de SIMÃO; ASPINWALL (1999) investigou esses efeitos. Neste caso, os cilindros de trabalho, usados nos testes de desgaste, possuíam aproximadamente 44 mm de diâmetro e comprimento de 530 mm, feitos da liga metálica AISI 52100 com composição de 0,95-1,1% C, 1,2-1,6% Cr, 0,25-0,4% Mn, 0,04% P, 0,05% S, 0,1-0,35% Si, com dureza de 813 HV.

Para efeito comparativo, os autores SIMÃO e ASPINWALL (1999) realizaram 11 diferentes texturas com a técnica de texturização por descargas elétricas. 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. Os dados para os parâmetros de rugosidade R_a e P_c com e sem recobrimento com cromo são mostrados na Figura 2.9 (a) e (b) respectivamente.

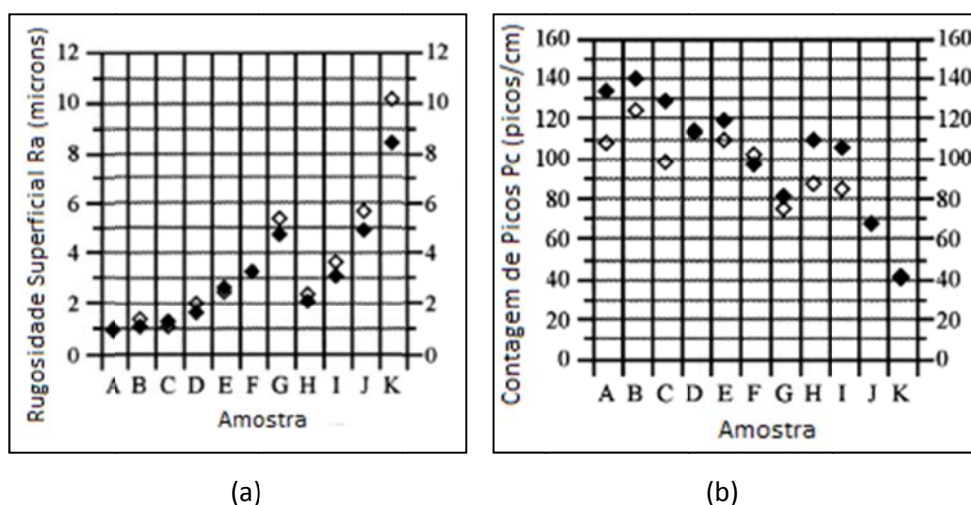


Figura 2.9 – Variação dos parâmetros de Rugosidade (a) R_a e (b) P_c em função do tipo de texturização. – Com revestimento de cromo \diamond – Sem revestimento de cromo \blacklozenge (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

A comparação dos dados para ambas as superfícies, em geral, não revelou diferenças significativas, com exceção da capacidade do processo de revestimento para preservar a topografia da superfície original da peça. A maioria das amostras de cilindros com revestimentos de cromo duro, no entanto, tem valor um pouco maior de rugosidade média da superfície e também mostra uma ligeira diminuição na contagem de picos. A provável razão para esse fato deve-se ao detalhe de alguns picos e vales menores serem recobertos e “ocultados” pelo revestimento de cromo. Sob algumas circunstâncias, o máximo valor de pico a vale de uma camada de cromo em amostras texturizadas diminui quando comparadas às amostras antes de deposição. 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 ligeiramente ocorre um aumento da rugosidade superficial R_a (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

Apresentam-se na Figura 2.10 a média das ondulações da superfície W_{ca} para ambas as amostras (texturizadas e texturizadas posteriormente cromadas). Os dados adquiridos não revelam diferenças significativas. Entretanto, observa-se uma tendência, na maioria das amostras com revestimento de cromo duro, de um leve aumento no valor de W_{ca} . Observam-se tendências similares quando comparadas à rugosidade média da superfície R_a (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

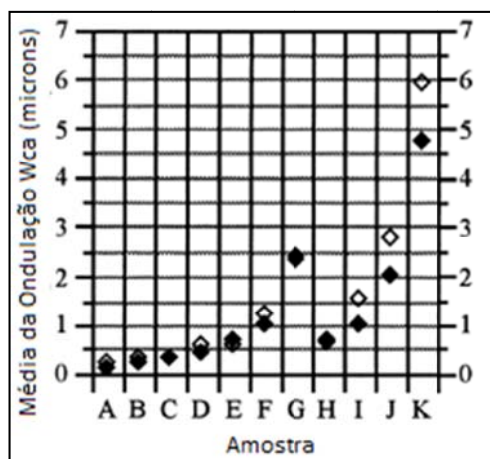


Figura 2.10 – Média da ondulação W_{ca} comparando amostras texturizadas (●) e (◊) texturizadas/revestidas com cromo (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

A Figura 2.11 mostra a correlação entre a rugosidade e a ondulação para amostras simples e amostras texturizadas. Os resultados dos testes indicam claramente que nos dois casos a ondulação da superfície do cilindro W_{ca} aumenta significativamente com o aumento da rugosidade da superfície R_a . Os parâmetros W_{ca} e R_a apresentam valores menores para as superfícies das amostras texturizadas e recobertas. Com o aumento da rugosidade R_a da superfície o W_{ca} também aumenta mantendo a relação W_{ca}/R_a de aproximadamente 0,5 (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

Os resultados sugerem que a ondulação na superfície é introduzida durante a texturização como consequência direta dos esforços para se produzir a rugosidade do cilindro. As características inerentes ao processo de texturização são responsáveis pela natureza aleatória do resultado da texturização e também pela introdução de uma ampla faixa da ondulação na superfície do cilindro. Durante a sequência de laminação, a rugosidade e/ou ondulação são transferidas para a tira laminada (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

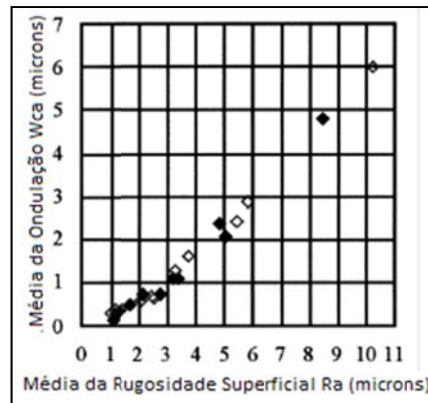


Figura 2.11 – Relação entre a média da rugosidade Ra e a média da ondulação W_{ca} para amostras texturizadas (◆) e (◇) texturizadas/revestidas com cromo (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

A Figura 2.12 detalha a micrografia da seção transversal de duas amostras texturizadas e recobertas com cromo (A e K). As tensões que atuam na camada de cromo duro durante a operação de laminação exigem que a união entre o cilindro e a camada seja extremamente forte, sendo que a adesão entre a camada de cromo e o metal base é dependente das ligações atômicas e a rugosidade superficial não interfere na união entre a camada de cromo e o substrato (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

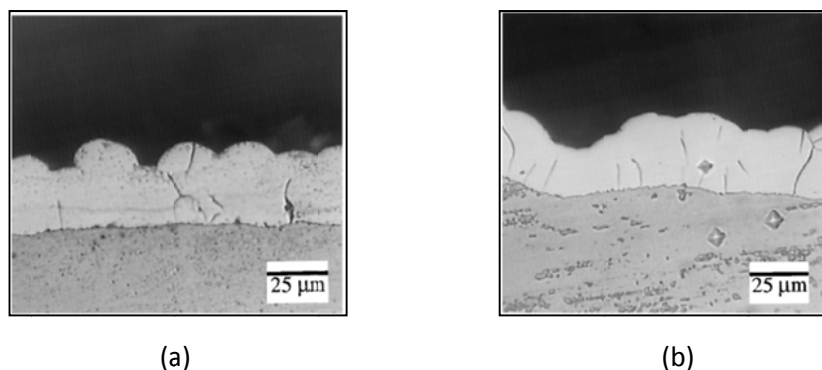


Figura 2.12 – Micrografia da seção transversal do cromo depositado em superfícies texturizadas para as amostras: (a) A: condição de baixa energia de operação e (b) K condição com alta energia de operação (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

A espessura da camada de cromo duro mostrada na Figura 2.12 (a) e (b) é de 20 a 25 μm e as trincas de deposição estão claramente evidentes. Isso é devido ao fato de o cromo duro possuir pouca elasticidade e, as trincas são resultados da alta tensão residual. O aumento da tensão com a espessura da camada até a ruptura do revestimento é mostrado por meio da formação de padrões de trincas e do alívio de tensões. Medições da tensão residual superficial

foram feitas nos sentidos longitudinais e circunferenciais nas amostras, indicando altos valores de tensão entre 350 e 700 Mpa. O cromo depositado usualmente contém trincas microscópicas que variam de forma, de quantidade, de tamanho e de profundidade. A superfície do revestimento sempre ocasiona a abertura de trincas com planaltos entre elas (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

A Figura 2.13 mostra valores de microdureza em função da profundidade em superfícies selecionadas recobertas com cromo duro texturizadas com diferentes valores de entrada de energia. A dureza variou na faixa de 1200 a 1300 HV (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

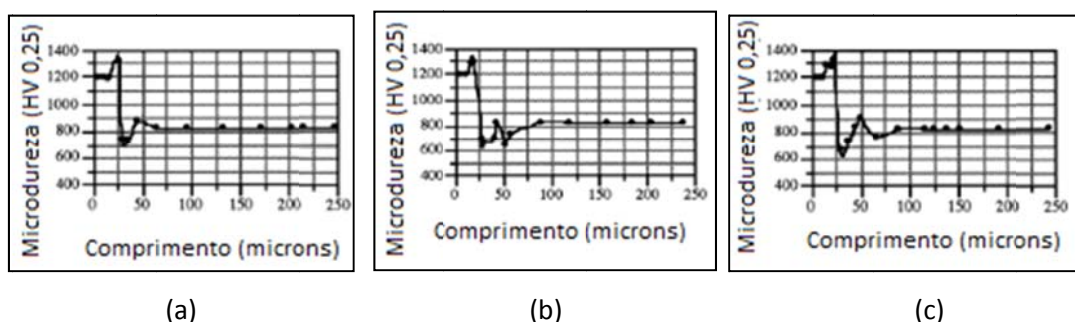


Figura 2.13 – Perfis de microdureza em diferentes amostras texturizadas e texturizadas com cromo (a) Texturizadas + Depósito de Cromo (A); (B) Texturizadas + Depósito de Cromo (I); (c) Texturizadas + Depósito de Cromo (K) (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

A topografia superficial medida por meio dos parâmetros R_a e W_{ca} das amostras com texturizadas e amostras texturizadas e recobertas com cromo não mostrou grandes diferenças. Mas, em contrapartida, a ondulação da superfície do cilindro aumentou significativamente com o aumento da rugosidade R_a para ambas as amostras (texturizadas e texturizadas com revestimento de cromo). Se o R_a aumenta, o valor de W_{ca} aumenta, mas mantendo a relação de R_a/W_{ca} de aproximadamente 0,5 (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

O trabalho de SIMÃO; ASPINWALL (1999) mostra que a espessura da camada de cromo foi de aproximadamente 20 a 25 μm e, as trincas das camadas depositadas foram claramente evidenciadas em função da tensão residual (Figura 2.12). A microdureza da camada de cromo depositada foi independente da rugosidade superficial do substrato tendo valores variando de 1200 a 1300 HV (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

No próximo capítulo, serão mostrados os procedimentos utilizados para a validação de réplicas e verificação do efeito das modificações superficiais. Para tanto, ensaiou-se amostras de aço utilizadas para a fabricação de cilindros de laminação a frio, visando compreender as suas propriedades tribológicas durante ensaios de deslizamento alternado.

CAPÍTULO III

Metodologia

Este capítulo tem por objetivo apresentar, detalhadamente, as técnicas experimentais usadas no presente trabalho bem como os materiais ensaiados.

3.1 – Materiais

O material analisado, tanto na produção das amostras para testes de desgaste quanto para a validação das réplicas, foi um aço para cilindro de laminação a frio, VC9, fornecido pela divisão de cilindros da Gerdau S.A.. A Tabela 3.1 apresenta a composição química do aço.

Tabela 3.1 – Composição química do aço VC9 (porcentagem em peso).

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

Para servir de contra corpo nos ensaios de deslizamento, usaram-se esferas de aço SAE 52100 com diâmetro de 10 mm. A composição química do aço é mostrada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composição química do aço SAE 52100 (porcentagem em peso).

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

3.2 – Ensaios de dureza e microdureza

O procedimento de caracterização das amostras se completa com a realização de medições de dureza Vickers. Nesse caso, usou-se um Durômetro Universal Wolpert com carga de 20 Kgf e trinta ensaios por amostra, sendo quinze em cada face. O elevado número de medições de dureza foi feito objetivando a verificação da homogeneidade das amostras após o tratamento térmico, o que será detalhado posteriormente.

Para a verificação da dureza, após as modificações superficiais, usou-se o método de microdureza Vickers com carga de 100 gramas, tempo de aplicação de 10 segundos e ampliação de 400 vezes. Foram feitas cinco medições de microdureza em cada amostra, após cada modificação superficial. Os ensaios foram realizados num microdurômetro HMV Micro Hardness Tester da Shimadzu.

3.3 – Interferometria a laser

A técnica da interferometria a laser 3D foi realizada utilizando-se um equipamento da marca UBM MESSTECHNIK, e empregada para a avaliação de réplicas (detalhado no Capítulo 4), de modificações superficiais e para o cálculo de desgaste.

Para iniciar as medições via interferometria 3D, primeiramente deve-se selecionar 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).

Utilizou-se densidade de pontos de 1000 x 50 pontos por milímetro, taxa de medição de 300 pts./s e o modo de medição utilizado foi o contínuo.

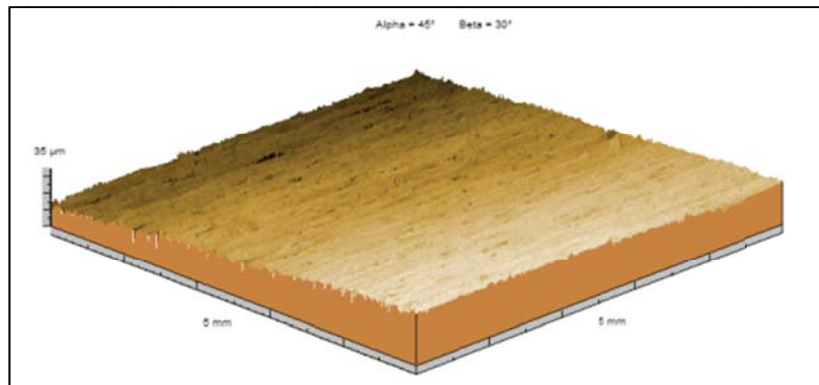
A Tabela 3.3 mostra os parâmetros utilizados para realização das medições via interferometria a laser para as diferentes situações.

Após a definição dos parâmetros e a realização da medição, fez-se a análise das imagens utilizando o *software* Digital Surf MountainsMap Universal®, versão 3.0, com cut-off definido de 0,8 mm.

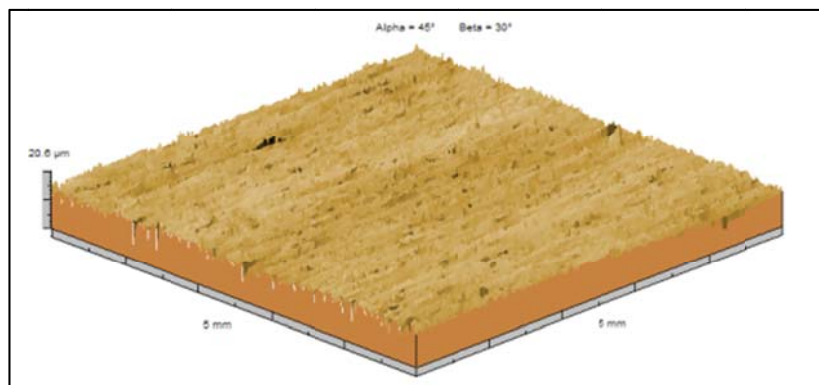
Tabela 3.3 – Parâmetros de medições via interferometria a laser 3D.

	Área (mm ²)
Fragmento de Cilindro	10x10
Réplicas	5x5
Modificações Superficiais	5x5
Marca de Desgaste	15x4

O primeiro passo para a análise das imagens foi a operação de remoção da forma da superfície, realizada por meio de um polinômio de ordem n (escolhido pelo usuário) que melhor se aproxima da superfície. Em seguida, o software subtrai a superfície real com a superfície do polinômio de ordem n encontrado. A superfície resultante representa a ondulação e a rugosidade da superfície originalmente obtida via interferometria. No estudo, utilizou-se um polinômio de ordem 2 (Figura 3.1).



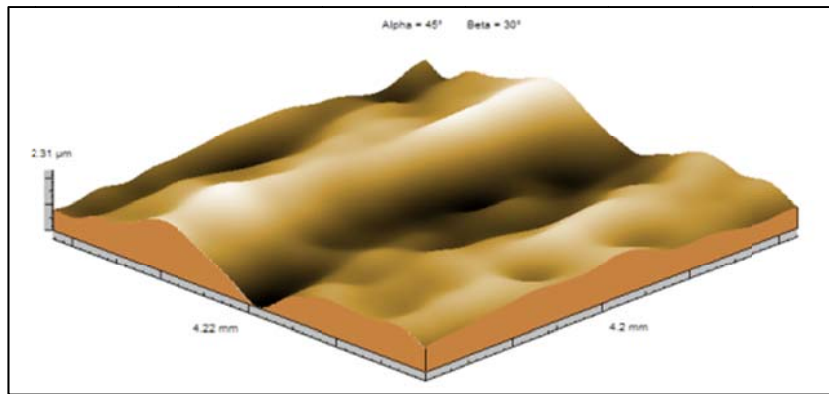
(a)



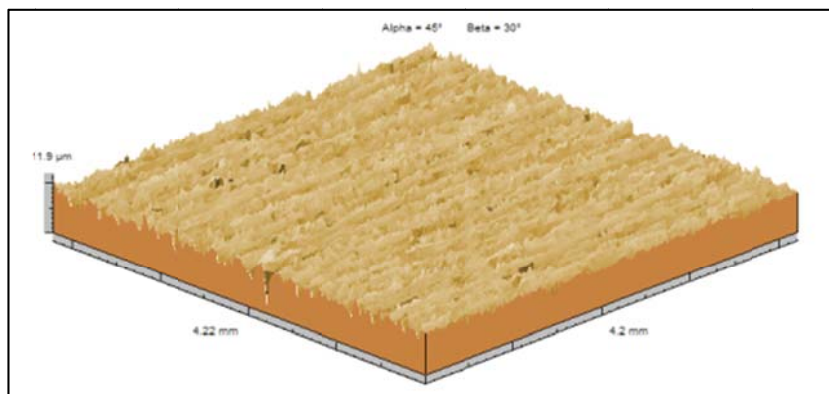
(b)

Figura 3.1 – Figura 3D da face 1 da amostra TC_03 (a) com a componente forma e (b) sem a componente forma.

Na sequência, utilizando a figura com a forma removida, realizou-se uma filtragem das superfícies das amostras (Figura 3.2). Essa operação permite obter a ondulação e a rugosidade de uma dada topografia. Com esta separação, foi possível medir os parâmetros de rugosidade das superfícies. O software utiliza um filtro gaussiano com atenuação de 50%, conforme as recomendações da norma ISO 11562.



(a)



(b)

Figura 3.2 – Filtro aplicado na figura com a forma removida (a) Ondulação e (b) rugosidade.

Para permitir a comparação visual das réplicas com o fragmento de cilindro, após a remoção da componente forma e separação das componentes ondulação e rugosidade, as imagens sofreram um tratamento especial de espelhamento do eixo da altura (eixo z), ocorrendo a transformação de picos em vales e vice-versa.

Para finalizar o processo de avaliação topográfica das superfícies das amostras, o *software* fornece 29 parâmetros de rugosidade, conforme pode ser observado na Figura 3.3.

Parameters calculated on the surface TC_03- Topography > ... > Roughness, gaussian filter, 0.8 mm	
Amplitude Parameters	
Sa	= 0.686 μm
Sq	= 0.905 μm
Sp	= 3.84 μm
Sv	= 8.05 μm
St	= 11.9 μm
Ssk	= -0.908
Sku	= 5.49
Sz	= 11 μm
Area & volume Parameters	
STp	= 0 % (1 μm under the highest peak)
SHTp	= 1.37 μm (20%-80%)
Smmr	= 0.00805 mm ³ /mm ²
Smvr	= 0.00384 mm ³ /mm ²
Spatial Parameters	
SPc	= 0 pks/mm ² (1 μm ; 10 μm)
Sds	= 1669 pks/mm ²
Str	= 0.065
Sal	= 0.000842 mm
Std	= 87 °
Sfd	= 2.55
Hybrid Parameters	
Sdq	= 0.101 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$
Ssc	= 0.0552 1/ μm
Sdr	= 0.5 %
Functional Parameters, gaussian filter, 0.8 mm	
Sk	= 1.83 μm
Spk	= 0.561 μm
Svk	= 1.13 μm
Srl	= 7.69 %
Sr2	= 87.4 %
Functional Parameters	
Sbi	= 0.354
Sci	= 1.28
Svi	= 0.153

Figura 3.3 – Tabela fornecida pelo software contendo 29 parâmetros de rugosidade.

Os parâmetros de rugosidade medidos analisados foram S_q , S_{dq} , S_{pk} , S_{bi} e P_c . Parâmetros de rugosidade são quantificações do perfil de rugosidade. A norma ISO 4287 define os parâmetros de rugosidade bidimensionais. Os parâmetros de rugosidade tridimensionais são extrapolações dos parâmetros bidimensionais. Apesar de ainda não constarem em norma, são bem conhecidos da literatura (DONG; SULLIVAN; STOUT, 1992, 1993). Os parâmetros tridimensionais são definidos em comparação com o plano médio da superfície, calculado por meio do nivelamento, usando o método dos mínimos quadrados aplicados à superfície medida (DONG; MAINSAIL; STOUT, 1995).

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).

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

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

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

O parâmetro funcional S_{pk} corresponde à altura dos picos da superfície e é uma extrapolação do parâmetro 2D R_{pk} . O parâmetro R_{pk} é extraído da curva de Abbott-Firestone e está associado à região que se desgasta nos primeiros contatos relativos entre as superfícies em contato, conforme ilustrado na Figura 3.4.

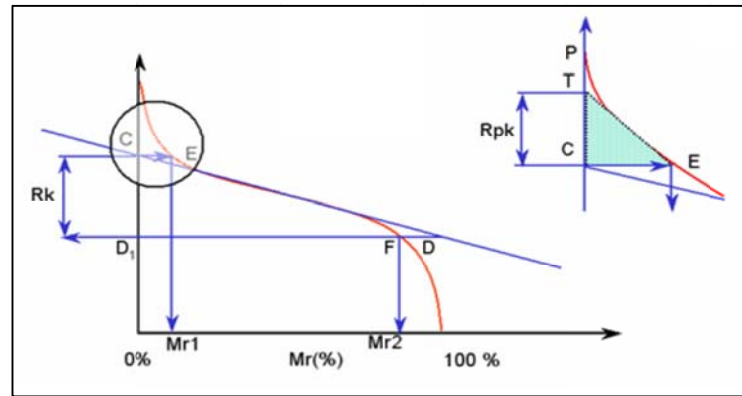


Figura 3.4 – Representação gráfica do parâmetro S_{pk} (TAYLOR HOBSON, 2000).

O parâmetro funcional S_{bi} representa a capacidade de suporte mecânico da superfície e descreve a superfície em função da variação da raiz quadrática média da superfície, conforme mostrado pela Equação 3.3.

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

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.

O parâmetro P_c , representa a contagem de picos que estão acima da linha média de referência.

Com o fim das medições topográficas e caracterizações matemáticas e visuais das mesmas, inicia-se o processo de comparação e análise dos parâmetros obtidos.

3.4 – Preparação metalográfica e produção das amostras

A empresa Gerdau S.A. enviou um fragmento de cilindro para o corte e confecção de amostras visando aos testes tribológicos. A partir da peça enviada (Figura 3.5a), realizaram-se cortes transversais com o Discoton da marca Struers utilizando o disco 01 TRE (Figura 3.5b) e obtendo-se um total de 14 amostras.

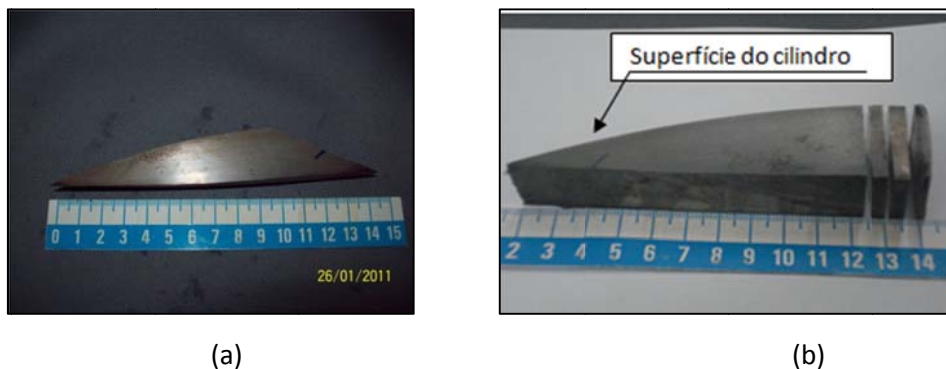


Figura 3.5 – (a) Peça do cilindro utilizado para produção de amostras para testes tribológicos. (b) Detalhe dos cortes transversais produzidos no cilindro.

Com toda a peça de cilindro cortada, fez-se um teste de dureza para verificação da homogeneidade da superfície das amostras. Observou-se, nesse caso, que quanto mais próximo da superfície do cilindro, maior era o valor de dureza.

Assim, a partir da constatação da não homogeneidade da dureza do material, enviou-se as amostras ao Laboratório de Metalurgia e Materiais Cerâmicos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) para um novo tratamento térmico. O referido tratamento consistiu em normalização a 920°C por 2h, resfriamento ao ar soprado, seguido de um revenimento a 600°C 2hs e posterior têmpera a 920°C com revenimento a 280°C por 2hs (Figura 3.6).

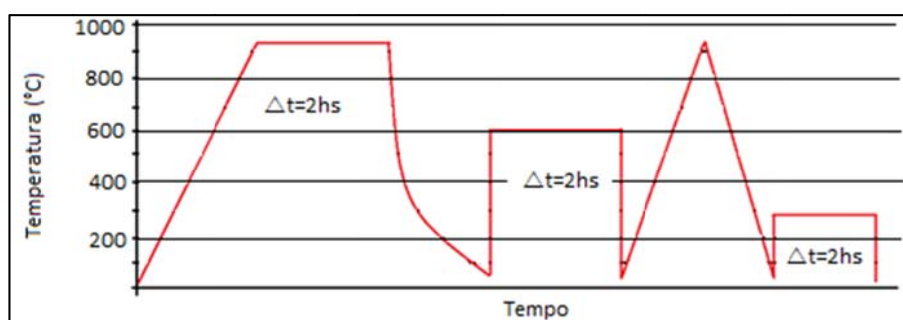


Figura 3.6 – Etapas do tratamento térmico.

Após o tratamento térmico, retificaram-se as amostras para garantir o paralelismo entre faces e, em seguida, realizaram-se testes de dureza, microdureza e caracterização

metalográfica nas amostras para verificação de sua homogeneidade, o que foi constatado com a realização dos testes. A preparação metalográfica consistiu em um lixamento manual usando-se lixas d'água com granulações de #220, #320, #400, #600, #1200 mesh, um polimento usando-se uma Politriz Dap – 7, da Marca Struers com um sistema Pedemin-S acoplado e solução de diamante, com granulação de 3 μm . Logo em seguida, fez-se um ataque com Nital 2% durante 5 segundos.

Em seguida, com amostra atacada, realizou-se uma análise em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Hitachi modelo TM-3000.

Analogamente ao processo de preparação metalográfica das amostras, o contracorpo esférico de aço SAE 52100 de 10 mm de diâmetro também foi preparado.

Observa-se ainda a necessidade de as amostras serem identificadas antes de receberem as modificações superficiais. Nesse caso, cada uma recebeu uma marca em uma única face, indicando que esta receberá a nomenclatura de face 2 e, além disso, cada amostra recebeu um nome específico. A Tabela 3.4 apresenta as denominações das faces.

Tabela 3.4 – Nomenclatura das amostras.

SM_01	Sem modificação Superficial
SM_02	Sem modificação Superficial
T_01	Texturizada
T_02	Texturizada
T_03	Texturizada
TC_01	Texturizada e depois cromada
TC_02	Texturizada e depois cromada
TC_03	Texturizada e depois cromada
C_01	Cromada
C_02	Cromada
C_03	Cromada
CT_01	Cromada e depois texturizada
CT_02	Cromada e depois texturizada
CT_03	Cromada e depois texturizada

O próximo passo é representado pelas modificações superficiais cuja etapa de texturização foi feita pela empresa Uberjato LTDA ME e, a deposição de cromo realizada pela empresa Mecânica Industrial Schiavinato LTDA.

Na texturização usou-se bico reto com comprimento total de 29 mm, diâmetro do furo de 2,5 mm, granalha de aço de diâmetro 0,7 mm, vazão de ar em 4,8 m^3/min e pressão do ar de 7 kgf/cm^2 durante 15 segundos.

O processo de deposição de cromo foi feito com banho ausente de flúor com corrente de 200 A e tensão de 2 V por 2 horas. A Figura 3.7 mostra um esquema das etapas de produção das amostras.

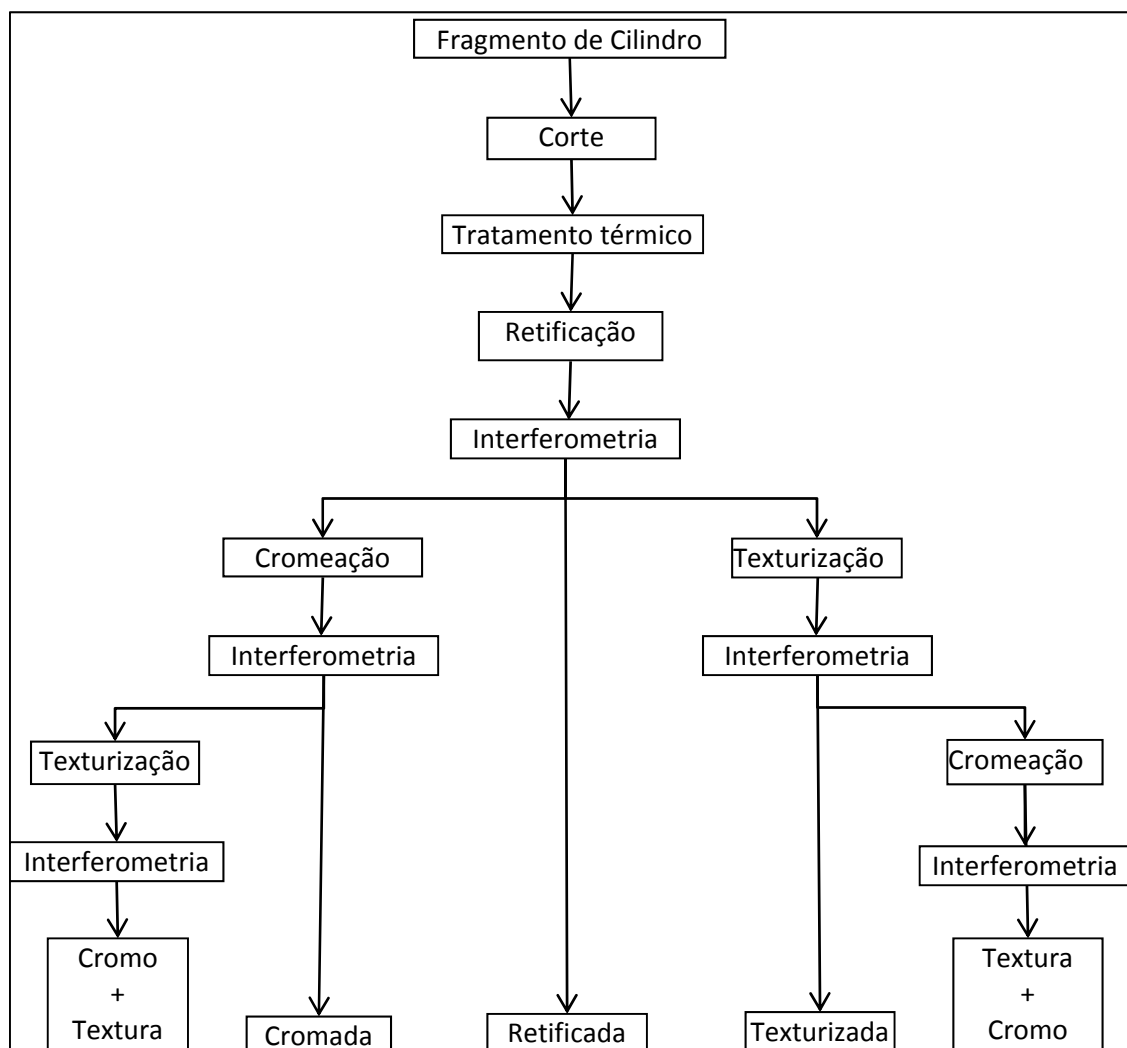


Figura 3.7 – Etapas de produção das amostras

3.5 – Ensaios de desgaste por deslizamento

Com a dificuldade da empresa produtora de cilindros de laminação a frio para replicar os cilindros em diferentes estágios de uso e a necessidade de dar continuidade ao projeto em andamento, decidiu-se avaliar a influência das modificações superficiais no comportamento tribológico de aços usados em cilindros de laminação a frio utilizando testes de deslizamento alternado, com a aplicação de baixa carga para evitar a oxidação do corpo.

Os ensaios de desgaste por deslizamento foram realizados no Laboratório de Materiais (LAbMat) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em um tribômetro da marca CETR

modelo UMT (Figura 3.8), na configuração movimento alternado com pista de deslizamento de 10 mm de comprimento, aplicação de carga de 9,8 N por um sistema mecânico. Os dados coletados durante o ensaio são: força de atrito, coeficiente de atrito aparente e a resistência do contato. O coeficiente de atrito médio é calculado após estabelecimento do regime permanente do ensaio, que corresponde ao tempo a partir do qual a variação desse coeficiente é mínima.



Figura 3.8 – Tribômetro utilizado nos ensaios de deslizamento

Com o objetivo de mensurar o desgaste ocorrido no contracorpo durante os ensaios de desgaste utilizou-se um microscópio da marca Olympus modelo BX60M para fotografar a esfera e medir o diâmetro da calota esférica formada durante o teste (Figura 3.9).

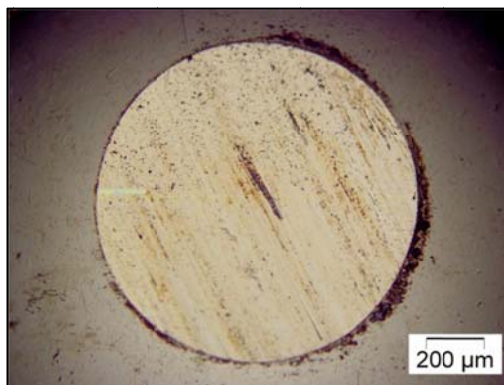


Figura 3.9 – Calota esférica formada no contracorpo durante o ensaio realizado com a amostra SM_01 Face 2.

Com a determinação do diâmetro da calota esférica e utilizando-se o método ilustrado na Figura 3.10 e as Equações (3.1), (3.2) e (3.3), calcula-se o volume desgastado durante o ensaio de deslizamento.

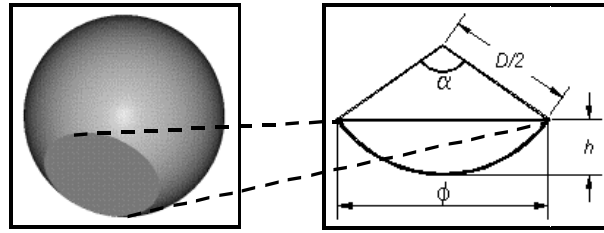


Figura 3.10 – Cálculo do volume de desgaste assumindo-se a superfície como nivelada.

$$Vol = \pi \cdot h \left(\frac{3}{4} \phi^2 + h^2 \right) \quad (3.4)$$

$$h = \frac{\phi}{2} \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (3.5)$$

$$\alpha = 2 \cdot \operatorname{asen} \left(\frac{\phi^2}{D^2} \right) \quad (3.6)$$

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

Ainda com o objetivo de mensurar o desgaste ocorrido na amostra, utilizou-se o método de interferometria a laser 3D conforme citado anteriormente.

3.6 – Avaliação de Réplicas

A princípio, o objetivo do trabalho era determinar o mecanismo de desgaste nos cilindros de laminação a frio através da replicação para posterior reprodução em laboratório. Para tanto, a empresa Gerdau S.A. solicitou a alguns clientes o acesso para promover a replicação dos cilindros. Primeiramente, a empresa utilizou uma replica de cor negra e com baixa rigidez da marca Struers.

Ao tentar analisar via microscopia eletrônica de varredura, verificou-se que o material não suportava o bombardeio do feixe de elétrons. Com isso, surgiu a necessidade de validar outros diferentes materiais de réplicas.

Para realizar a validação, a empresa Gerdau retirou um fragmento da superfície ativa de um cilindro de laminação a frio com dimensões aproximadas de 40 x 40 mm, conforme Figura 3.11.

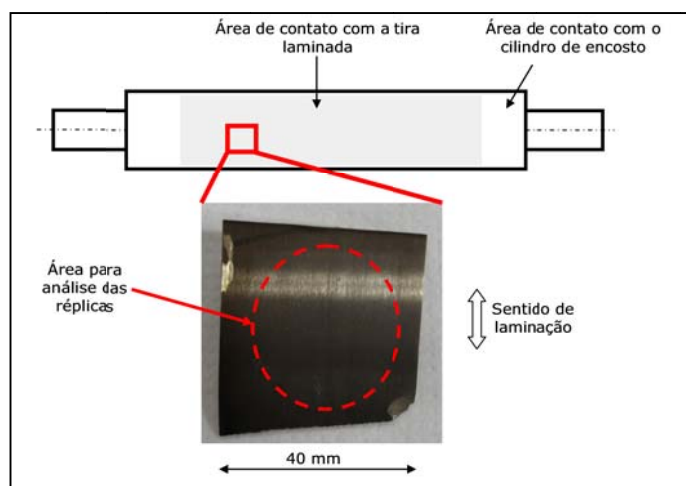


Figura 3.11 – Representação esquemática da retirada do fragmento de cilindro utilizado para validação de réplicas.

Após a retirada do fragmento de cilindro realizou-se a replicação e foi enviado ao Laboratório de Tribologia e Materiais para realização de interferometria a laser e análise via microscopia eletrônica de varredura.

Os materiais enviados receberam a nomenclatura conforme a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Nomenclatura dos materiais utilizados em réplicas.

Material	Denominação
VIPI-SIL Fluida Espessa	VSFE
VIPI-SIL Fluida Delgada	VSFD
VIPI-SIL Viscosa Espessa	VSVE
VIPI-SIL Viscosa Delgada	VSVD
VIPI-Flash	VF
Repliset	R
Facsimile	F

Após análise por interferometria a laser 3D, o fragmento de cilindro e os materiais de réplicas foram submetidos à análise via microscopia eletrônica de varredura. Por serem materiais não condutores de eletricidade, as réplicas foram submetidas a um recobrimento com ouro feito por “sputtering” para viabilizar a condução dos elétrons e possibilitar a visualização das imagens no microscópio.

No próximo capítulo serão mostrados os resultados dos procedimentos aqui abordados.

CAPÍTULO IV

Resultados e Discussão

4.1 – Avaliação de réplicas

A Figura 4.1 mostra as imagens obtidas via interferometria a laser do cilindro e das diferentes réplicas. Nota-se que a superfície ativa do cilindro apresenta riscos que indicam que o mecanismo de desgaste ocorrido neste cilindro é abrasão. Neste mecanismo de desgaste, uma partícula abrasiva (com dureza maior que o cilindro), é engastada na tira, penetra, desliza e remove o material do cilindro.

A análise da Figura 4.1 nota-se que, qualitativamente, as réplicas repliset e vip sil viscosa delgada não apresentaram resultados reproduzindo a superfície metálica do cilindro, ou seja, elas não reproduziram os riscos de abrasão observados na superfície ativa do cilindro de laminação. Após a análise qualitativa, fez-se um estudo quantitativo utilizando os parâmetros de rugosidade definidos no Capítulo 3.

As Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 ilustram os parâmetros quantitativos de rugosidade utilizando com o valor referência o valor obtido para o cilindro. de uma unidade para o fragmento de cilindro.

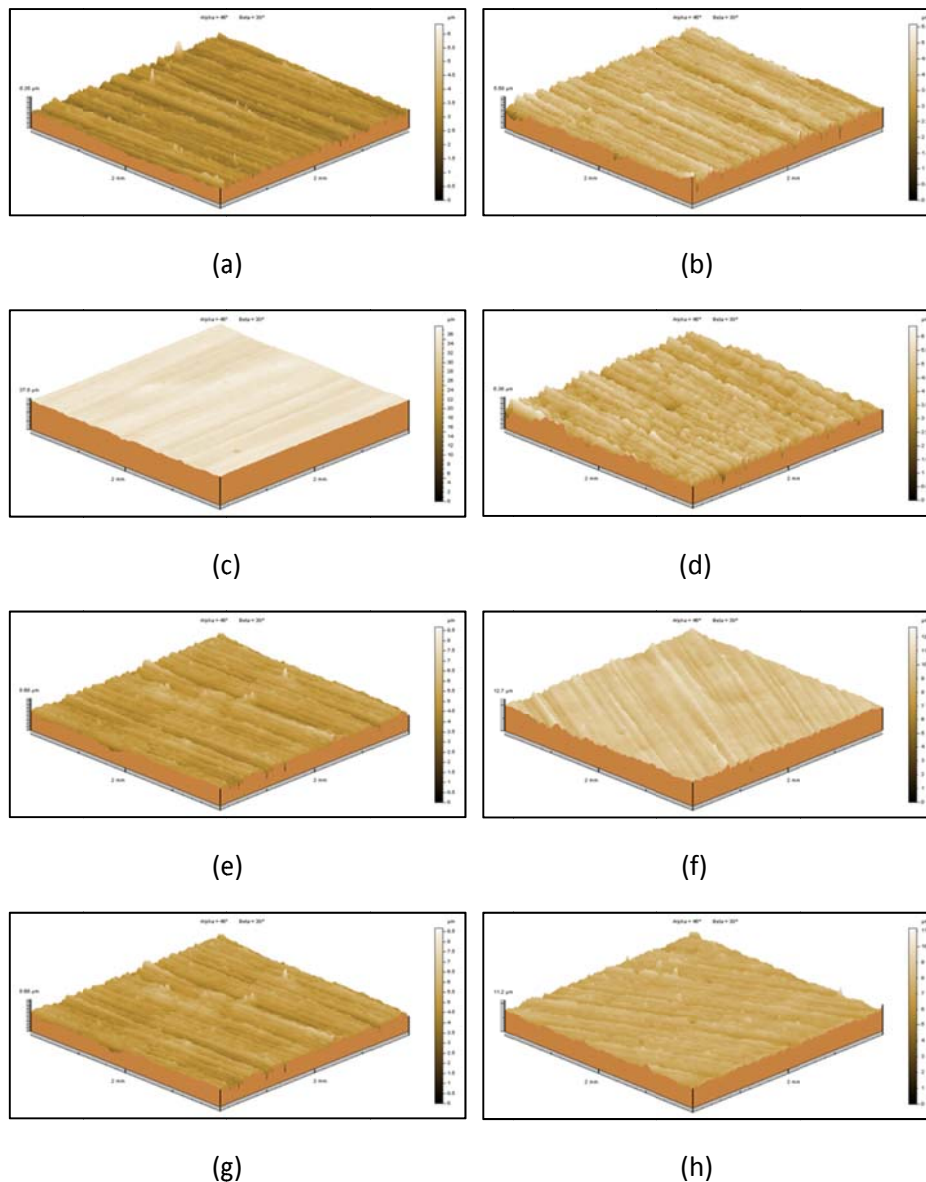


Figura 4.1 – Representação 3D do fragmento de cilindro e dos diferentes materiais de réplicas (a) cilindro (b) fac similie (c) repliset (d) vipflash (e) vip sil fluida delgada (f) vip sil fluida espessa (g) vip sil viscosa delgada(h) vip sil viscosa espessa.

A Figura 4.2 ilustra o parâmetro de rugosidade S_q para os diferentes materiais, observa-se todos os materiais de replicas apresentaram valores superiores ao valor apresentado pelo cilindro e que os materiais Vip Sil Fluida Delgada e Vip Flash apresentaram menor erro em relação aos outros materiais. Em contrapartida, o material Repliset apresentou o dobro do valor apresentado pelo cilindro.

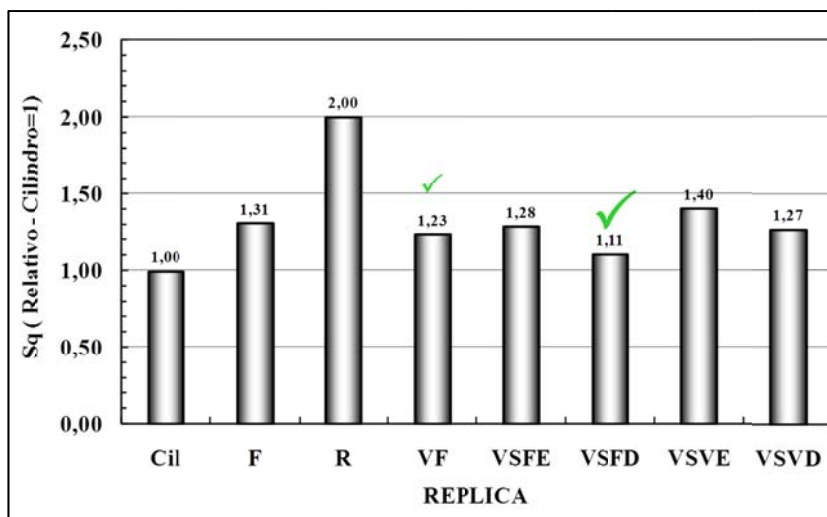


Figura 4.2 – Parâmetro de rugosidade S_q .

A Figura 4.3 mostra o parâmetro de rugosidade S_{dq} , nota-se que todas as réplicas possuem valores inferiores ao valor apresentado pelo cilindro e que os materiais Fac Simile e Vip Sil Viscosa Delgada como os materiais que possuem menor variação em relação ao cilindro.

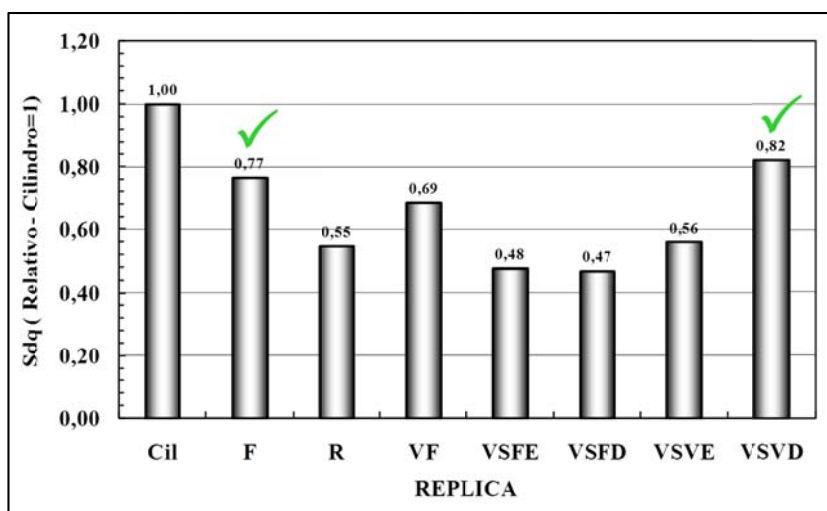


Figura 4.3 – Parâmetro de Rugosidade S_{dq} .

O próximo parâmetro estudado foi o S_{pk} e, conforme pode ser observado na Figura 4.4, os materiais Vip Sil Fluida Delgada, Vip Sil Viscosa Delgada, Repliset e Fac Simile apresentaram o menor erro em comparação a superfície ativa do cilindro.

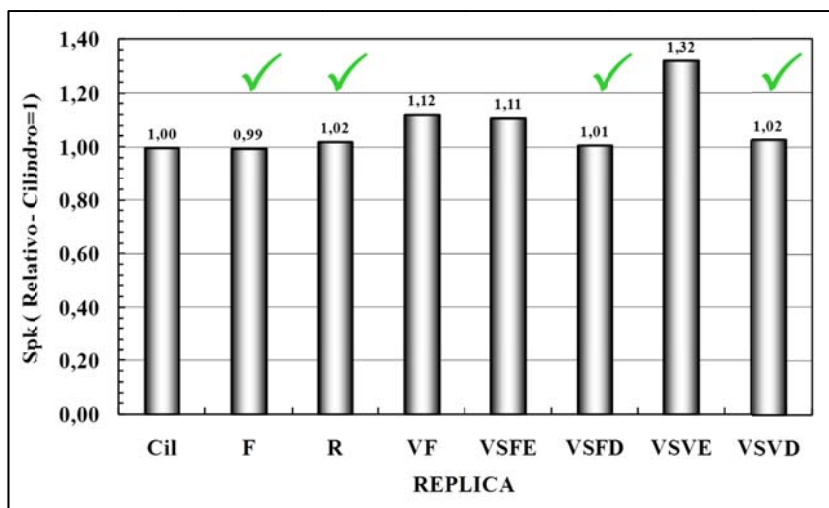


Figura 4.4 – Parâmetro de rugosidade S_{pk} .

A Figura 4.5 revela que o material Vip Sil Viscosa Espessa apresenta o menor valor para o parâmetro S_{bi} e que este valor é o mais próximo do valor encontrado para a superfície do cilindro. Por outro lado, o material Repliset apresentou um valor aproximadamente 4,5 vezes maior que o valor apresentado pela referência.

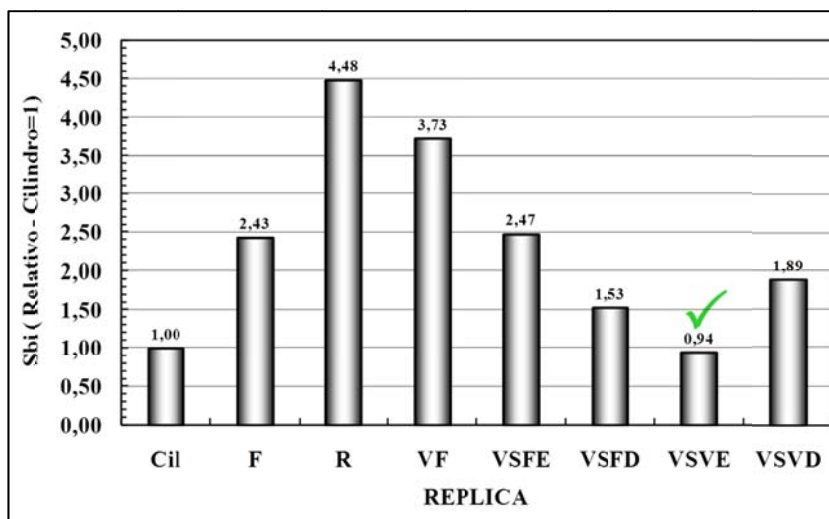


Figura 4.5 – Parâmetro S_{bi} .

A Figura 4.6 revela apresenta o aspecto típico das replicas quando observadas por microscopia eletrônica de varredura. A análise mostra que novamente a superfície ativa do cilindro de laminação apresenta riscos característicos de desgaste abrasivo. Nota-se que os materiais Fac Simile, Repliset, Vip Flash conseguiram reproduzir qualitativamente via

microscopia eletrônica de varredura e o material Vip Sil Viscosa Delgada foi prejudicado pela deposição de ouro.

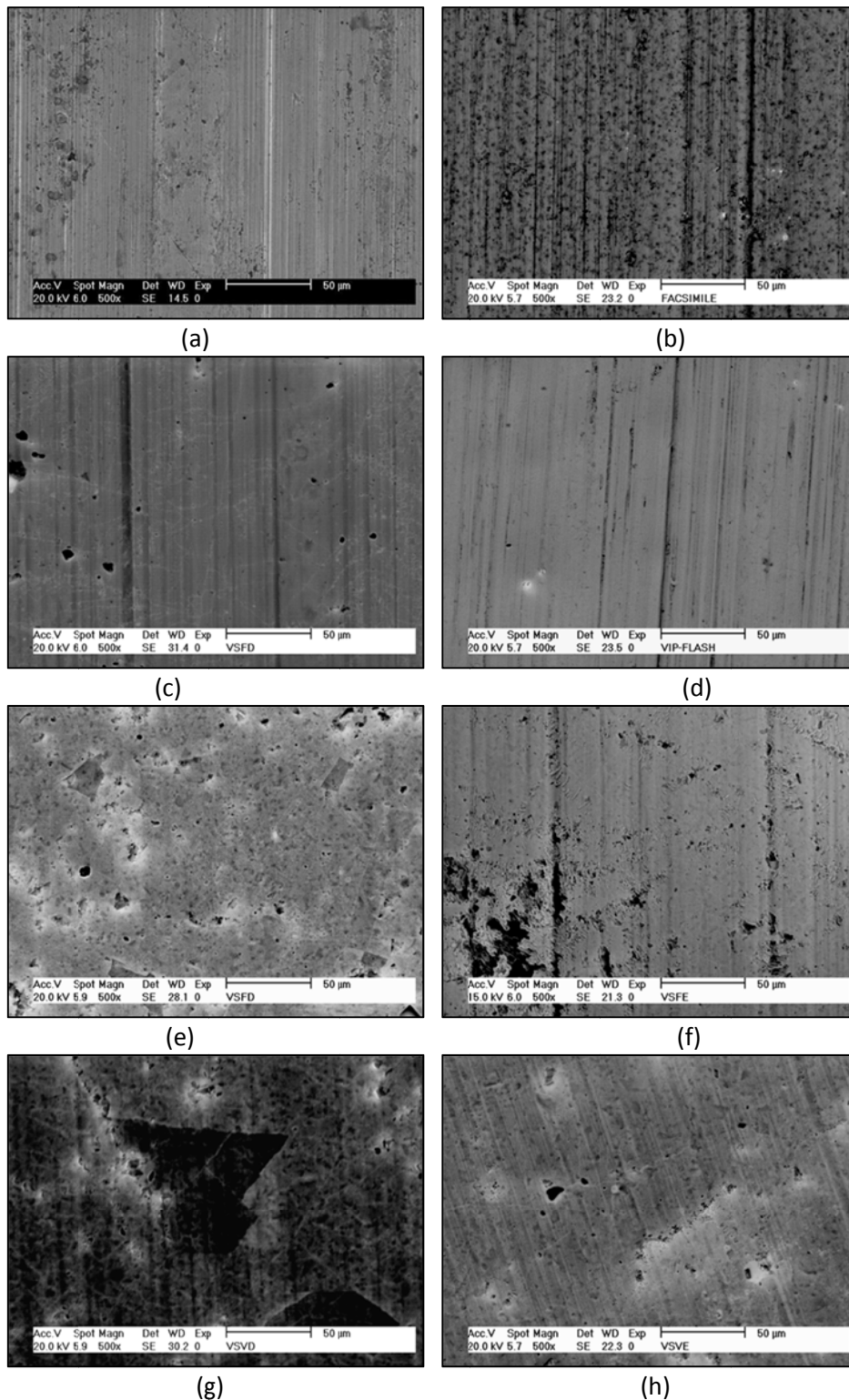


Figura 4.6 – Microscopia eletrônica de varredura nas amostras (a) cilindro (b) Fac Simile (c) Repliset (d) Vip Flash (e) Vip Sil Fluida Deslgada (f) Vip Sil Fluida Espessa (g) Vip Sil Viscosa Delgada (h) Vip Sil Viscosa Espessa.

Em síntese, a Tabela 4.1 mostra os resultados do estudo realizado com os materiais de replicação.

Tabela 4.1 – Síntese do estudo de réplicas.

Denominação	Sq	Spk	Sbi	Sdq	Σ	MEV	Observação
VSFE					0	Não	
VSFD	ok	ok			2	Não	
VSVE			ok		1	Não	
VSVD		ok		ok	2	ok-Não	Ouro Comprometido
VF	ok				1	ok	
R		ok			1	ok	
F		ok		ok	2	ok	

A análise dos resultados quantitativos e qualitativos revelou que o material F (Fac simile) apresentou as melhores qualidades de replicação, pois o mesmo reproduz muito bem aspectos qualitativos (topografia e MEV) e dois dos parâmetros topográficos analisados.

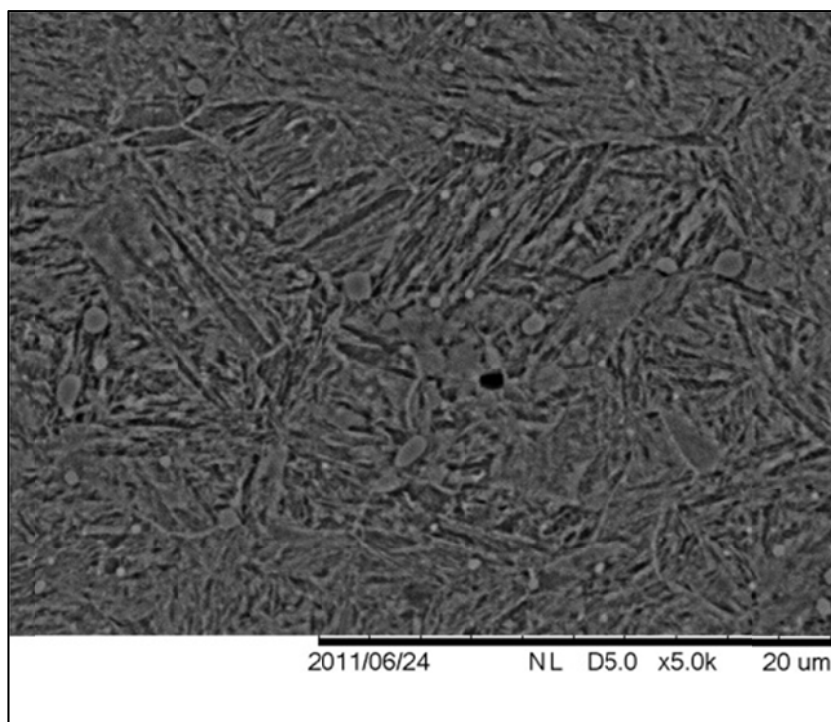
As réplicas Vip-Sil Delgadas reproduzem relativamente bem dois parâmetros topográficos, mas se mostraram inadequadas para a análise via MEV.

Portanto, para a utilização de réplicas para avaliação qualitativa via interferometria a laser e microscopia eletrônica de varredura e avaliação quantitativa, recomenda-se a utilização do material Fac Simile.

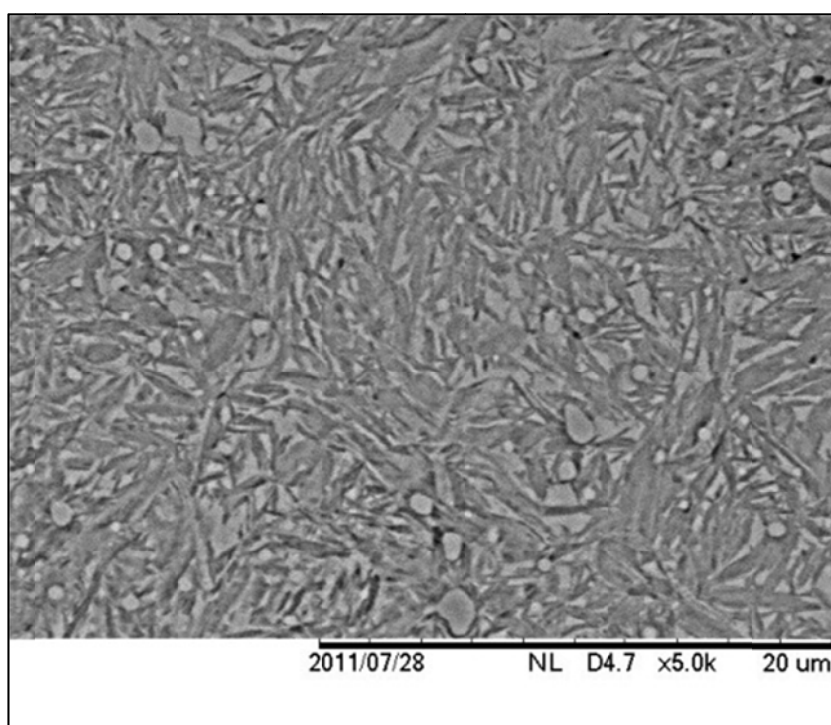
4.2 – Caracterização metalográfica e dureza

Apresenta-se aqui a caracterização metalográfica e dureza das amostras usadas nos ensaios de desgaste.

Antes de iniciar as etapas de modificações superficiais, realizou-se a caracterização metalográfica e dureza no corpo e no contracorpo. Nota-se na Figura 4.7 que em ambos os corpos a microestrutura característica é martensítica. Em contrapartida, testes de dureza Vickers realizados resultaram em valores de 624 ± 47 Hv para o corpo e 772 ± 5 Hv para o contracorpo.



(a)



(b)

Figura 4.7 – (a) Microestrutura da amostra SM_02 e (b) microestrutura do contracorpo.

A Figura 4.8 apresenta uma distribuição típica dos valores de dureza e os resultados individuais são mostrados no Anexo 1, nos quais é possível notar que o tratamento térmico produziu valores próximos de dureza, indicando a homogeneidade da estrutura cristalina.

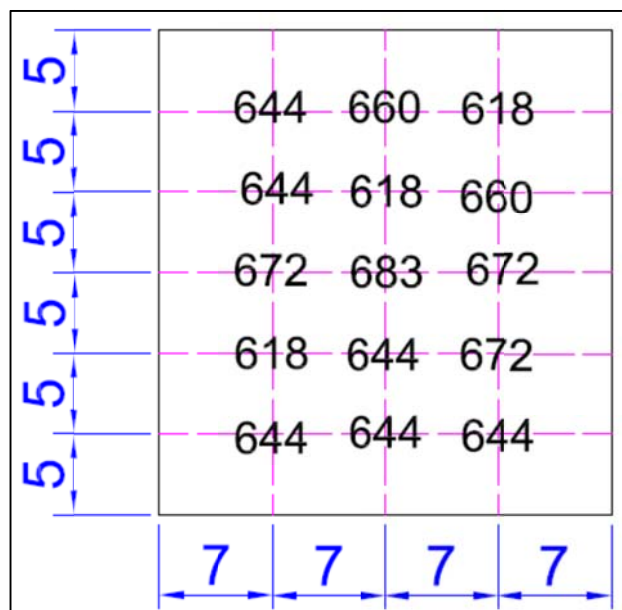


Figura 4.8 – Distribuição típica dos valores de dureza em amostra sem modificação superficial.

Observa-se na Figura 4.9 que o menor valor de microdureza refere-se às amostras sem modificação superficial (SM). Observa-se ainda que a texturização aumentou a dureza, aumentada também com o revestimento de cromo. As amostras texturizadas, depois do cromeamento, apresentaram maior dureza se comparadas às amostras sem modificação, porém menor dureza se comparadas à amostras simplesmente cromadas. As amostras texturizadas e posteriormente cromadas apresentaram valores da dureza intrínseca do cromo duro. Nota-se ainda, que o valor apresentado pela amostra revestida com cromo duro equivale ao valor de aproximadamente 1100 Hv reportado na literatura (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

Com a constatação da alteração nos valores de microdureza das amostras jateadas cortou-se a amostra jateada utilizando-se um MINITON da marca Struers e um disco de CBN com rotação de 350 rpm e carga de 300g, podendo-se assim embutir a amostra e realizar novos testes de microdureza na seção transversal da mesma. Nesse caso, utilizou-se uma carga de 50 gramas com tempo de aplicação de 10 segundos em um perfil com 30 medições espaçadas de 20 μ m uma da outra.

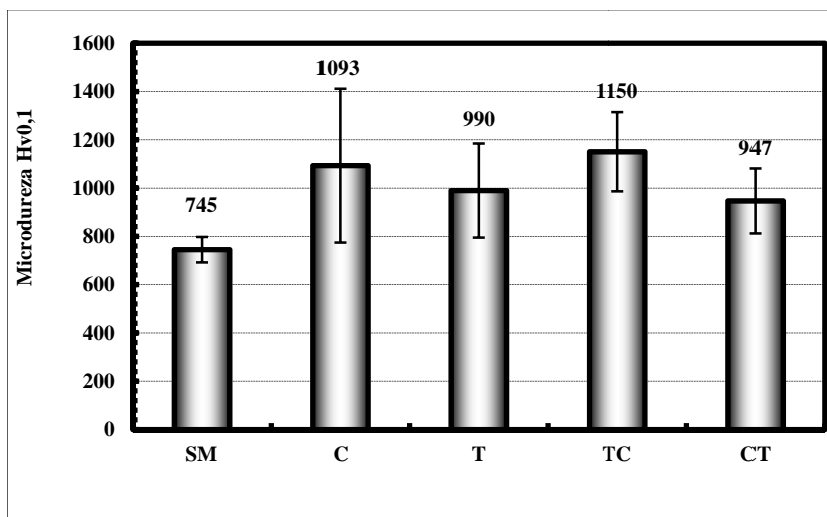
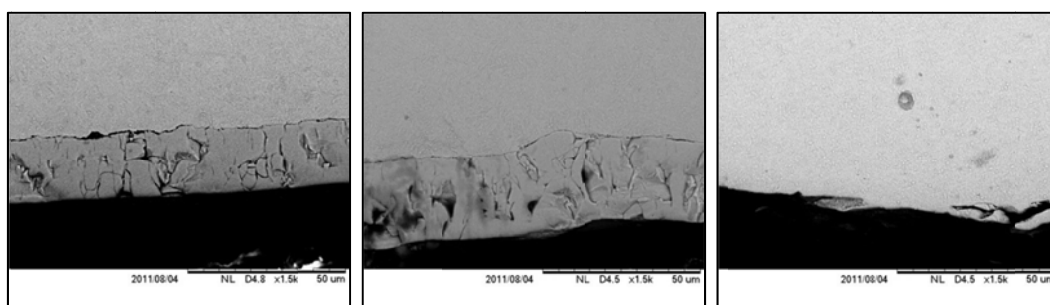


Figura 4.9 – Microdureza das amostras prontas para ensaios de deslizamento.

A Figura 4.10 (a) mostra a seção transversal da amostra revestida somente com cromo duro, destacando a presença da camada de revestimento de aproximadamente 20 μ m. Analogamente, a Figura 4.10 (b) mostra a seção transversal de uma amostra texturizada com posterior revestimento de cromo duro, também apresentando a camada de revestimento de cromo de aproximadamente 20 μ m; enquanto a Figura 4.10 (c) apresenta uma amostra revestida com cromo duro e posterior texturização, sugerindo que o revestimento de cromo duro foi arrancado durante o processo de jateamento, justificando o menor valor de microdureza. Por esta razão, os resultados de amostra do grupo CT foram excluídos das análises posteriores.



(a)

(b)

(c)

Figura – 4.10 – Seção transversal de amostras (a) revestida com cromo duro (b) texturizada com posterior revestimento de cromo duro (c) revestida com cromo duro e posterior texturização.

Procurando explicar o aumento da microdureza em função da texturização por jateamento, preparou-se uma amostra texturizada visando analisar a seção transversal. Foram feitos testes de microdureza Vickers com carga de 100g e tempo de aplicação de 10 segundos equiespaçados por 25µm obtendo-se os resultados apresentados na Figura 4.11.

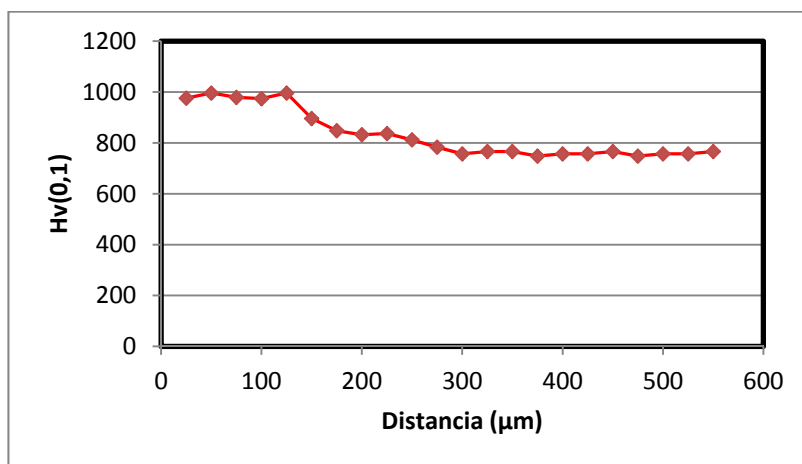
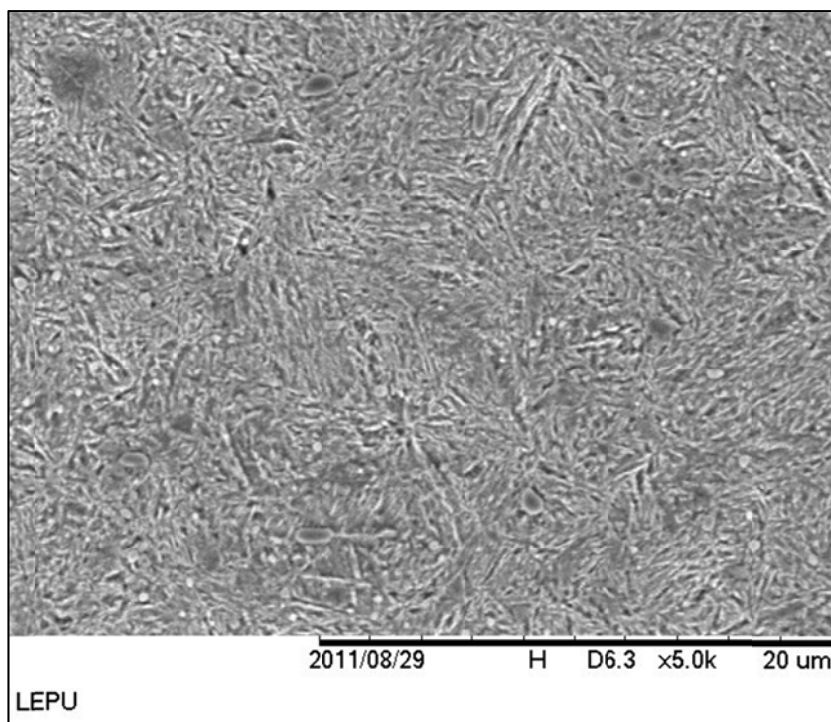


Figura 4.11 – Perfil de microdureza na amostra texturizada.

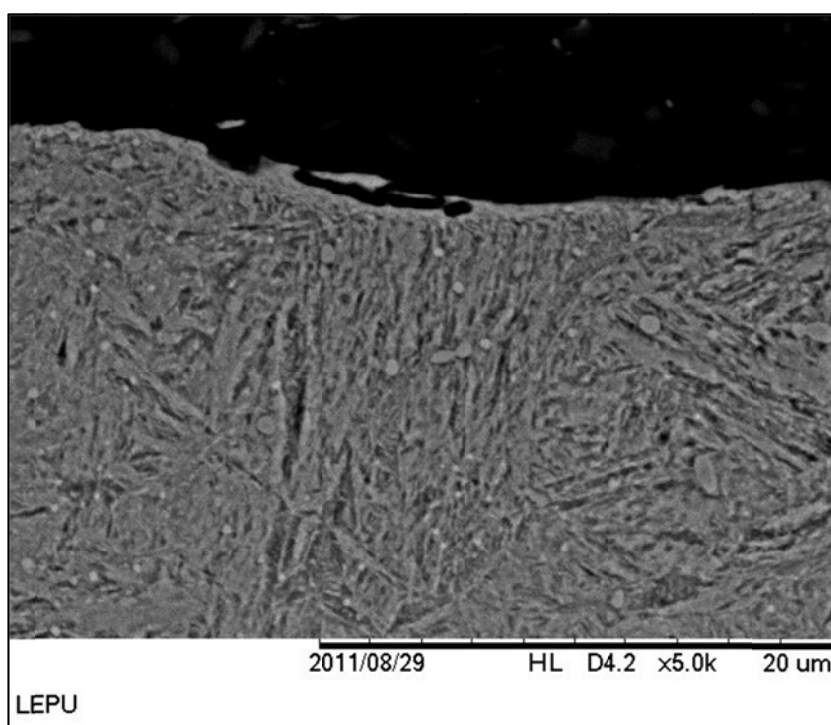
A avaliação do perfil de microdureza na amostra texturizada permite concluir que houve uma alteração no valor de microdureza em função do jateamento. A alteração no valor de dureza ocorreu até uma profundidade de aproximadamente 120 µm elevando o valor da dureza em aproximadamente 20%. Procurando entender a causa do aumento do valor de microdureza, realizou-se análise via microscopia eletrônica de varredura, Figura 4.12 (a) e (b). Nenhuma variação estrutural notável foi observada, mostrando a incapacidade da técnica de microscopia eletrônica de varredura em estabelecer qual a contribuição do encruamento e/ou indução de transformação para o endurecimento.

4.3 – Caracterização topográfica

As Figuras 4.13 a 4.16 mostram as topografias das amostras. Apresentam-se assim, respectivamente, as topografias das superfícies sem modificação superficial, cromada, texturizada e texturizada e posteriormente cromada.

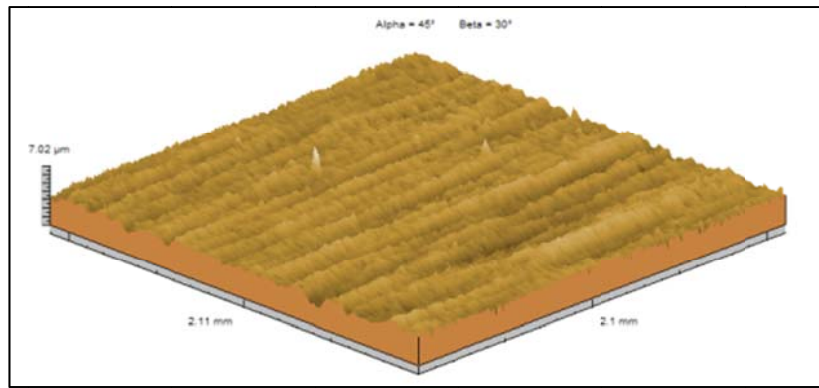


(a)

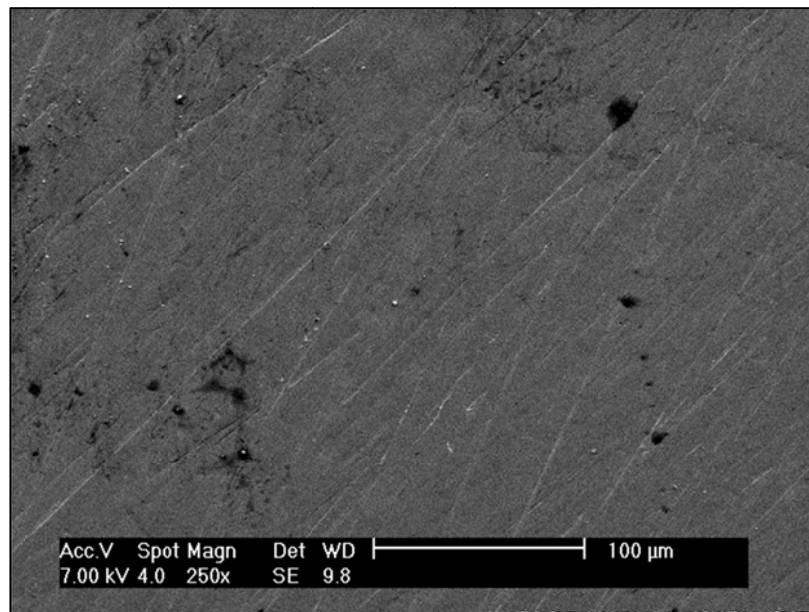


(b)

Figura 4.12 – Microestrutura da seção transversal da amostra texturizada (a) no centro da amostra e (b) na borda da amostra.



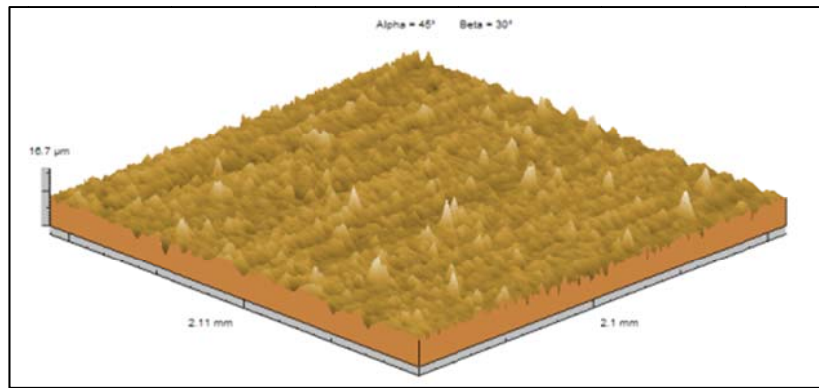
(a)



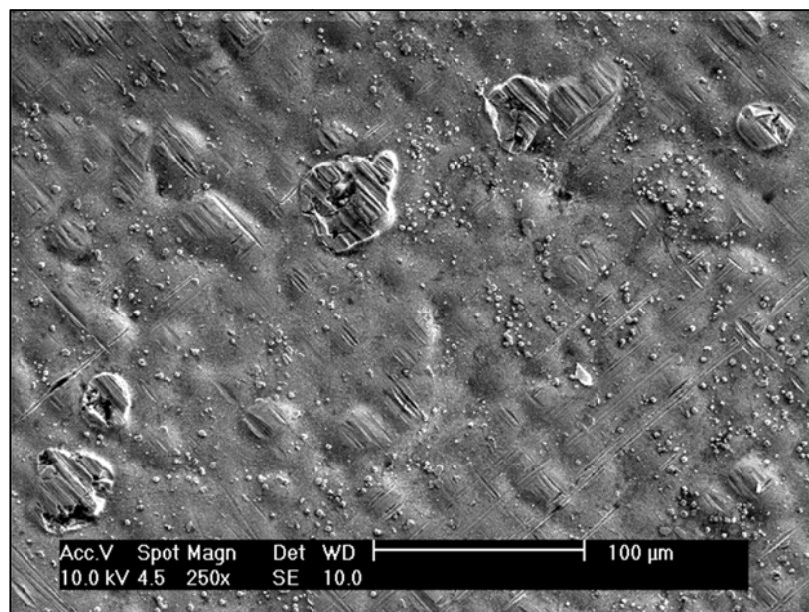
(b)

Figura 4.13 – Representação topográfica de amostra sem modificação superficial (a) Interferometria a laser (b) MEV.

Nota-se na amostra sem modificação superficial que o aspecto qualitativo da amostra representa as marcas de lixamento ocorrido anteriormente. Observa-se na Figura 4.14 que o revestimento de cromo recobriu as marcas promovidas na amostra durante o lixamento, não alterando significativamente o aspecto visual da amostra.



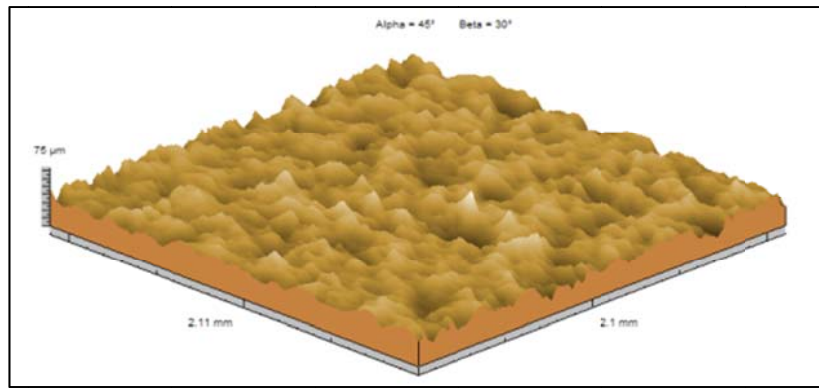
(a)



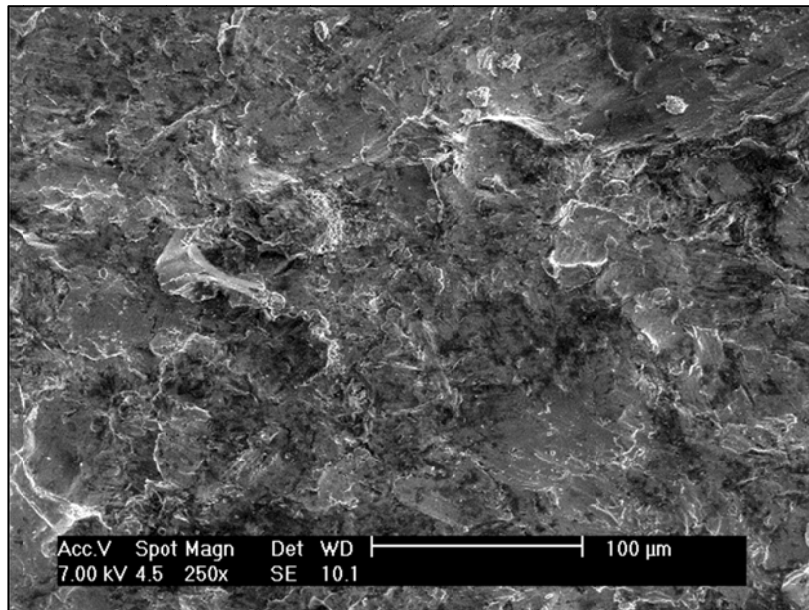
(b)

Figura 4.14 – Representação topográfica de amostra revestida com cromo duro (a) Interferometria a laser (b) MEV.

Entretanto, ao observar a Figura 4.15, nota-se que a texturização produz um aumento significativo da quantidade de protuberâncias encontradas na superfície da amostra, produzindo assim, um efeito notável na topografia de superfície da amostra.



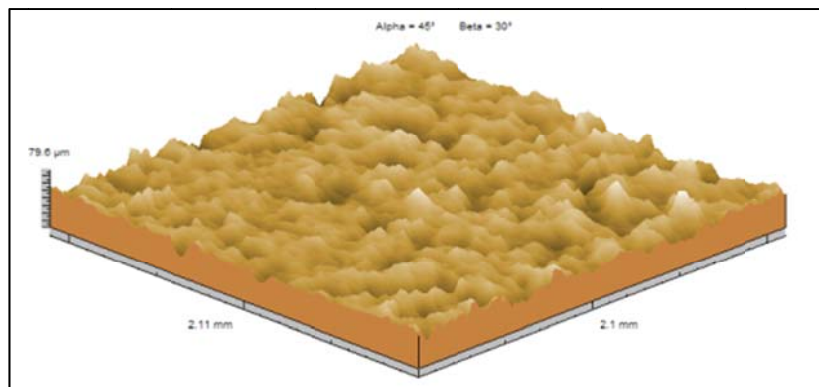
(a)



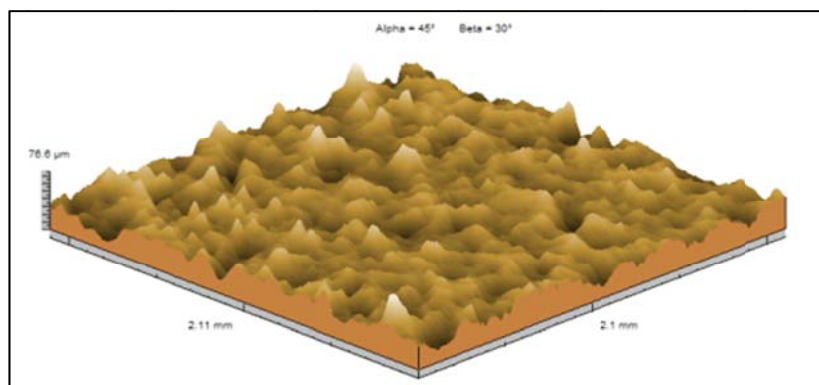
(b)

Figura 4.15 – Representação topográfica de amostra texturizada (a) Interferometria a laser (b) MEV.

Analogamente, a Figura 4.16 (a) mostra o resultado topográfico de uma amostra que primeiramente teve sua superfície modificada por texturização, na qual se nota o mesmo efeito ocorrido na Figura 4.15. Entretanto a Figura 4.16 (b) mostra que o revestimento de cromo duro suavizou a texturização, conforme dados encontrados na literatura (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).



(a)



(b)

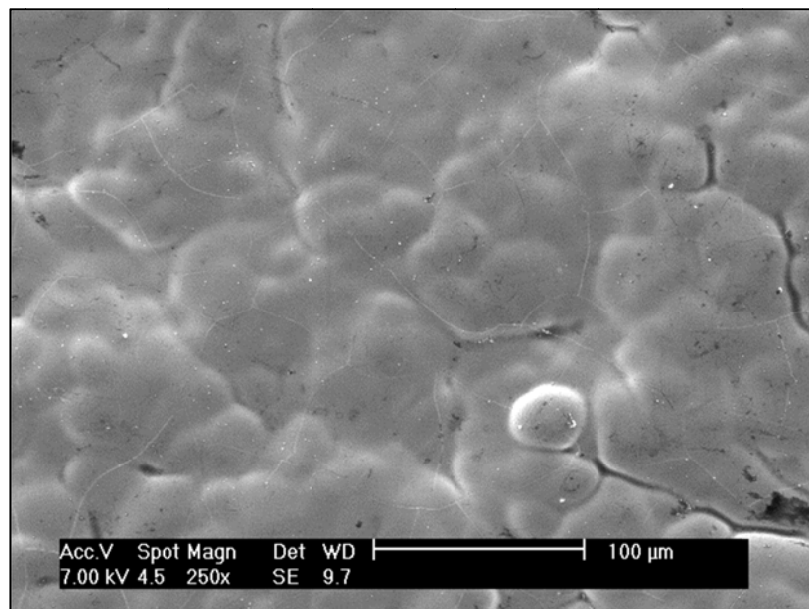


Figura 4.16 – Representação topográfica de amostra texturizada e posteriormente revestida com cromo duro (a) Interferometria a laser após a texturização (b) interferometria a laser após o cromeamento (c) MEV após o cromeamento.

As topografias podem também ser representadas por meio de grandezas quantitativas. Nesse caso, apresenta-se na Figura 4.17, para todas as superfícies amostradas, o seu comportamento quanto a alguns parâmetros de rugosidade.

Nota-se que a amostra sem modificação superficial possui o menor valor das grandezas S_q , S_{dq} e S_{pk} , enquanto a capacidade de apoio representada pelo parâmetro S_{bi} sofre uma redução em função do revestimento de cromo duro e uma elevação em função da texturização. Por outro lado, nota-se que a texturização superficial aumenta consideravelmente os parâmetros S_q , S_{dq} e S_{pk} (Figura 4.17).

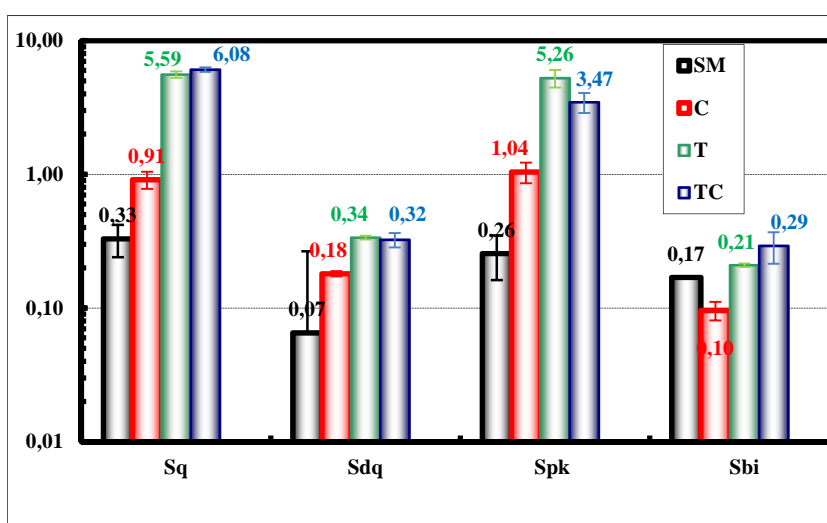


Figura 4.17 – Parâmetros de rugosidade no final da preparação das amostras.

A Figura 4.18 mostra os parâmetros de rugosidade de amostras que foram previamente texturizadas e posteriormente cromadas, novamente confirmando a atenuação dos parâmetros em função do revestimento de cromo duro (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

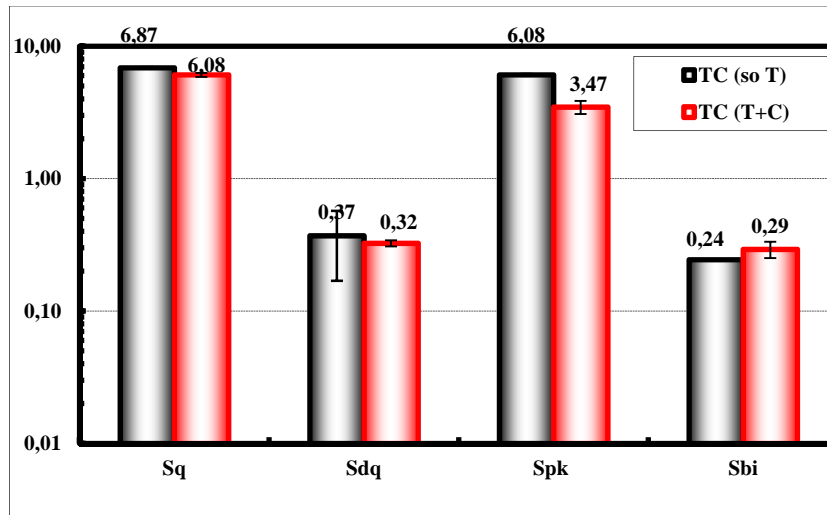


Figura 4.18 – Parâmetros de rugosidade de amostras texturizadas e posteriormente cromadas.

Outro parâmetro analisado no presente trabalho foi o parâmetro P_c , representando a contagem de picos por milímetro quadrado. Apesar dos dados encontrados na literatura serem apresentados em picos por milímetro, nota-se que houve uma redução de aproximadamente 14% em função do revestimento de cromo duro (SIMÃO; ASPINWALL, 1999). Em contrapartida, os resultados apresentados na Figura 4.19 mostraram uma redução de aproximadamente 8%.

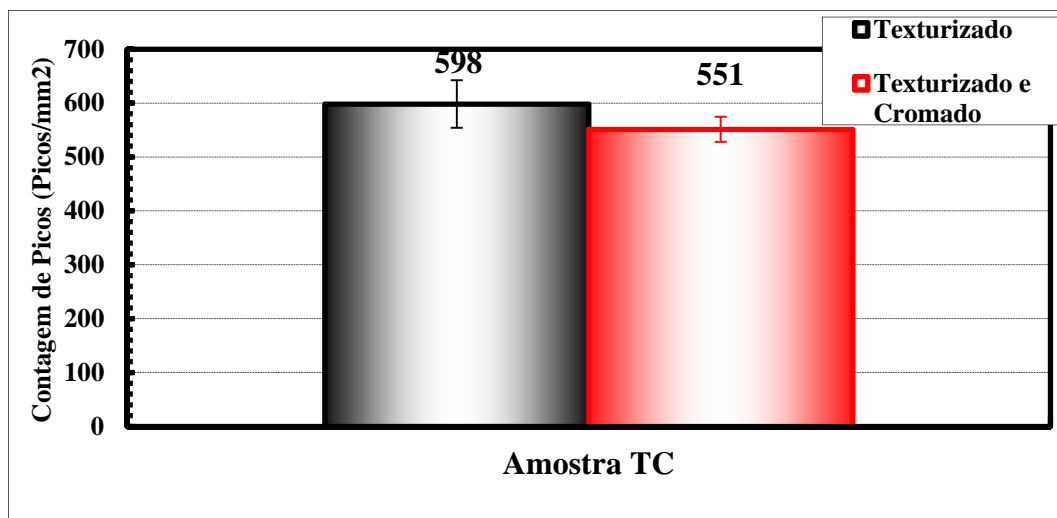


Figura 4.19 – Parâmetro de rugosidade P_c para amostras texturizadas e posteriormente cromadas.

4.4 – Testes de desgaste por deslizamento

A Figura 4.20 mostra a evolução do coeficiente de atrito em função do tempo de teste para as diferentes modificações superficiais. Nota-se que o comportamento das diferentes modificações superficiais está bem próximo do comportamento de amostra sem modificação.

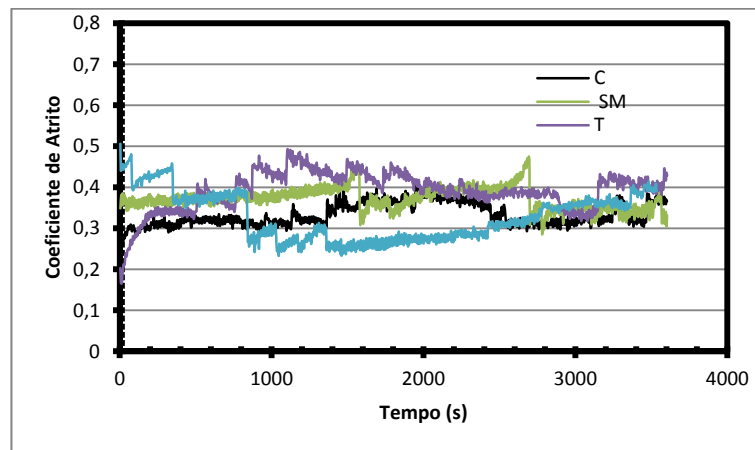


Figura 4.20 – Evolução do coeficiente de atrito para diferentes modificações superficiais.

A Figura 4.21 mostra a evolução da resistência ao contato para as diferentes modificações superficiais, na qual é possível notar que as amostras revestidas com cromo duro apresentaram maior resistência ao contato, enquanto as amostras texturizadas apresentaram menores valores quando comparadas a outros revestimentos.

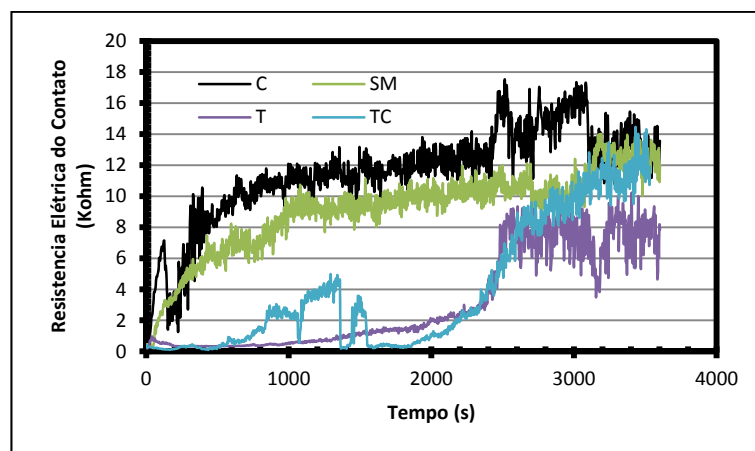


Figura 4.21 – Evolução da resistência ao contato em função das diferentes modificações superficiais.

A Figura 4.22 mostra que para a pressão de contato utilizada, independente do tipo de modificação superficial estudado, o coeficiente de atrito foi de aproximadamente 0,38. Os resultados obtidos não apresentaram redução do coeficiente de atrito em função da texturização ou do revestimento de cromo. O trabalho de CHIU et al. (2002) mostrou que o coeficiente de atrito depende da pressão de contato. Para pressões maiores existe uma pequena redução (20%) no coeficiente de atrito comparando amostras texturizadas e revestidas com cromo. Para baixas pressões de contato, o revestimento de cromo duro não altera o coeficiente de atrito.

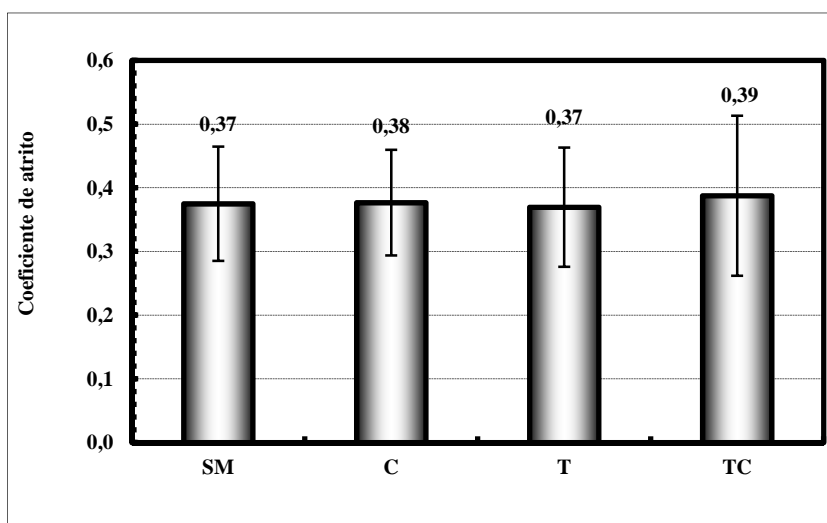


Figura 4.22 – Variação do coeficiente de atrito em função do revestimento.

Qualitativamente, é possível observar na Figura 4.23 o desgaste do contracorpo em função das diferentes modificações superficiais. Nota-se que o revestimento de cromo duro atuou tanto em amostras cromadas como em amostras texturizadas e posteriormente cromadas, reduzindo o desgaste do contracorpo. Em contra partida, amostras texturizadas aumentaram o desgaste do contracorpo.

Com a adição do revestimento de cromo duro, ocorre elevação da resistência de contato elétrico (Figura 4.21) indicando a presença de uma tribocamada isolante. O aspecto macroscópico das marcas de desgaste observados nas Figuras 4.23 (b) e (d) mostram a presença de uma espessa tribocamada inexistente nos contracorpos utilizados nos ensaios com amostras não revestidas (Figura 4.23 (a) e (c)).

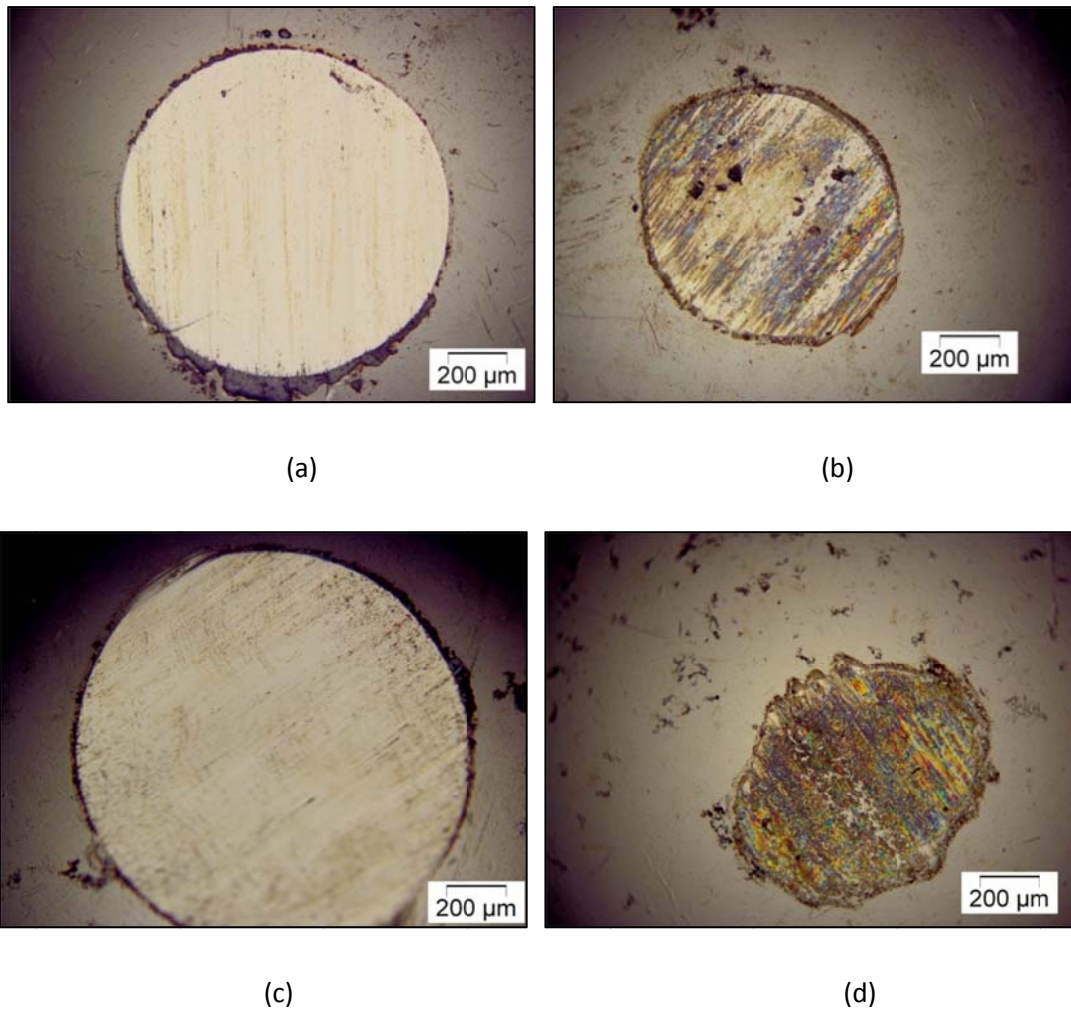


Figura 4.23 – Desgaste do contracorpo para diferentes modificações superficiais (a) SM (b) C (c) T (d) TC.

Ainda analisando o desgaste do contracorpo, agora de forma quantitativa, é possível notar na Figura 4.24 o que foi evidenciado qualitativamente. Sendo que a texturização causa aumento no desgaste do contracorpo, enquanto o revestimento de cromo duro causa redução no mesmo.

A superfície da amostra texturizada, que apresenta uma maior rugosidade superficial, em função de possuir picos mais proeminentes induz maior desgaste abrasivo no contracorpo. Em amostras texturizadas o contato ocorre nas pontas dos picos, elevando a pressão de contato tendo como consequência o aumento do desgaste abrasivo (KOVALCHENKO et al., 2011)

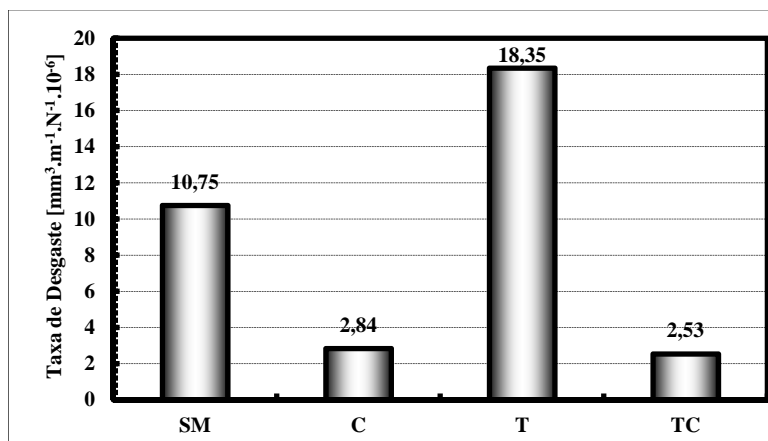


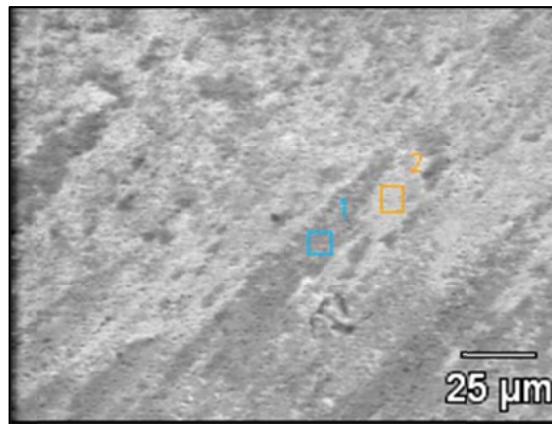
Figura 4.24 – Taxa de desgaste do contracorpo em função do revestimento.

Análises via microscopia eletrônica de varredura mostraram se tratar de uma tribocamada rica em cromo (Figura 4.25) permitindo especular que a presença da camada rica em cromo e oxigênio seja constituída parcialmente por óxido de cromo, garantindo maior resistência ao desgaste.

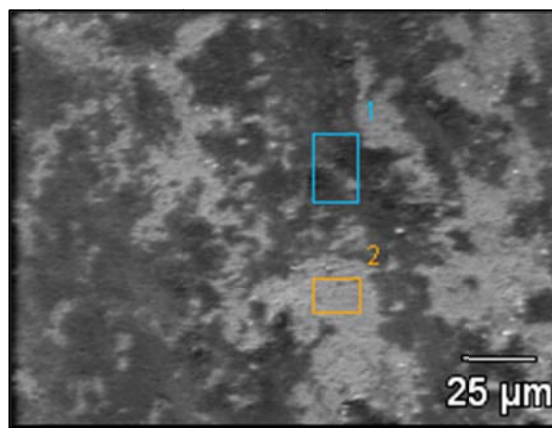
Analisando com mais detalhes as marcas de desgaste no contracorpo, observa-se acúmulo de matéria nas suas bordas (Figura 4.26). A Tabela 4.2 mostra de uma maneira semiquantitativa que a natureza do material acumulado é diferente e que se trata de uma tribocamada rica em oxigênio e ferro, no caso das amostras sem revestimento de cromo, e ricas em ferro, oxigênio e cromo nas amostras revestidas com cromo duro.

Tabela 4.2 – Composição química da tribocamada (porcentagem em peso).

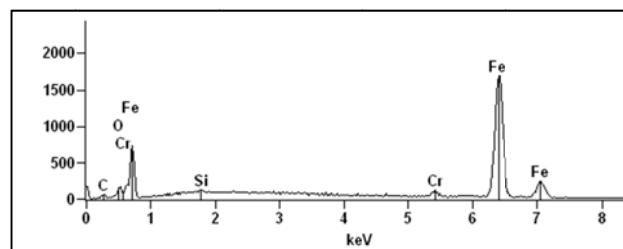
	O	Cr	Fe
SM	27,3	0,97	Balanço
TC	28,9	18,7	Balanço



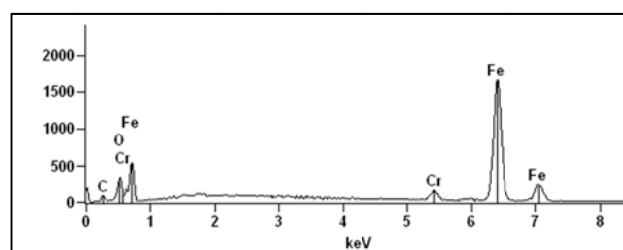
(a)



(b)

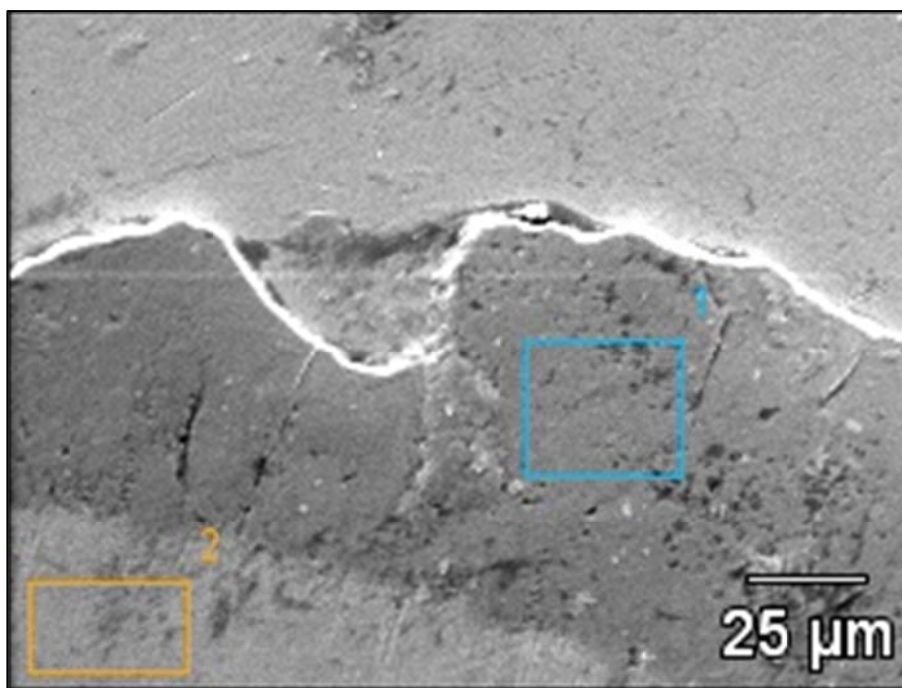


(c)

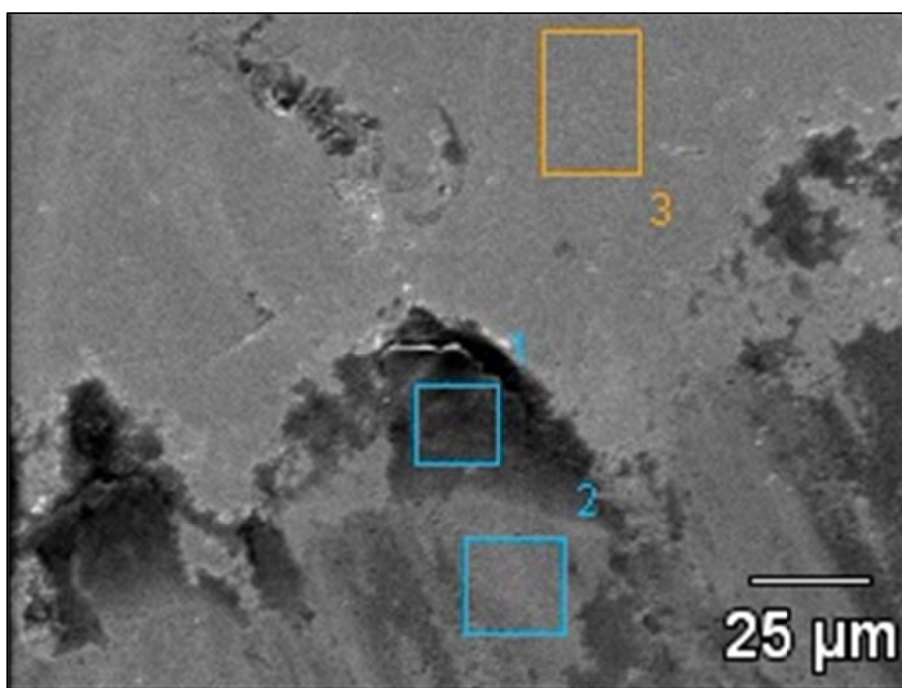


(d)

Figura 4.25 – Aspecto típico das marcas de desgaste em contracorpo atuantes em amostras revestidas com cromo (a) cromada (b) texturizada e cromada (c) espectro típico da região clara obtida por EDX (d) Espectro típico da região escura obtida por EDX.



(a)



(b)

Figura 4.26 – Detalhe no acúmulo de matéria encontrado nas bordas da marca de desgaste do contra corpo (a) ensaiado com amostra sem modificação superficial (b) ensaiado com amostras texturizada e posteriormente cromada.

É razoável supor que os óxidos mistos de ferro e cromo sejam mais protetores que os óxidos de ferro. A transferência de cromo do corpo para o contracorpo promove a formação de uma tribocamada com dureza suficientemente elevada para aumentar a resistência ao desgaste abrasivo (AHN e KWON, 1999)

O mecanismo de desgaste predominante nas amostras é o desgaste por deslizamento, com a formação de uma tribocamada que aparece ou na amostra, ou no contracorpo. Esta tribocamada é proveniente da cominuição das partículas de desgaste, sua deformação e oxidação. Observa-se na Figura 4.27 o fenômeno citado.

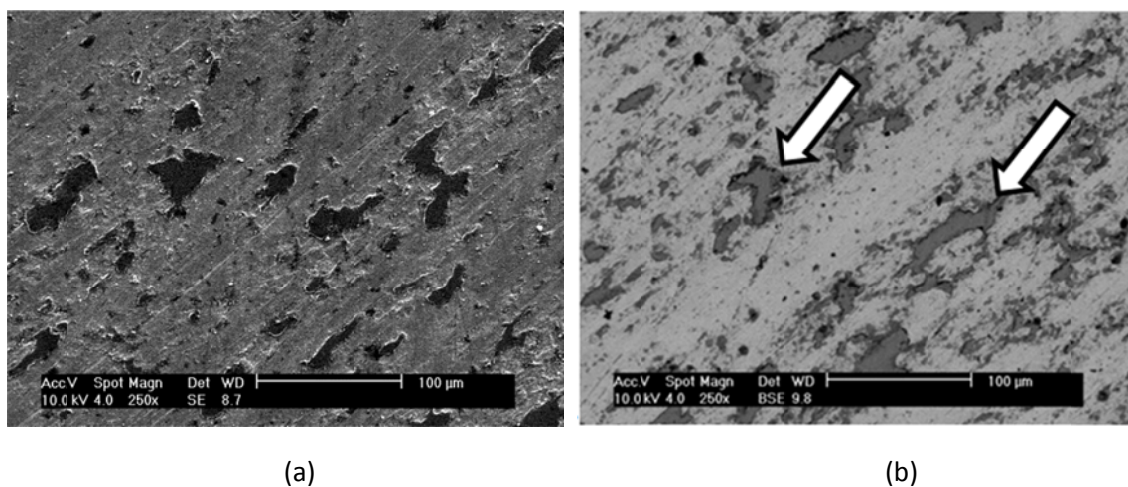
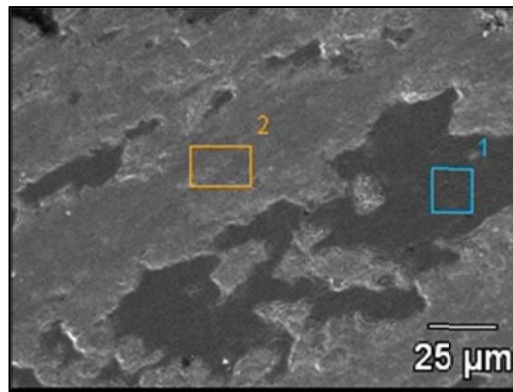
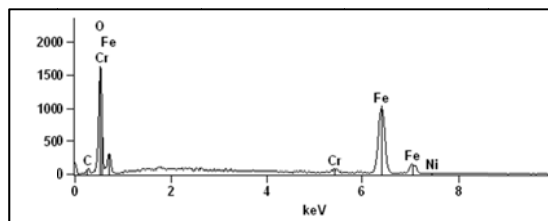


Figura 4.27 – Microscopia eletrônica de varredura na marca de desgaste em amostras sem modificação superficial (a) elétrons secundários (b) elétrons retroespalhados.

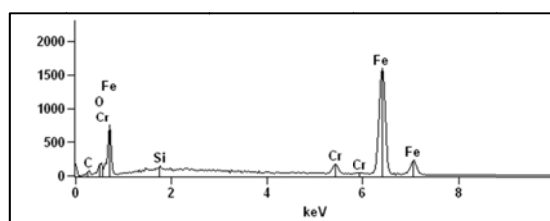
Ainda na Figura 4.27 (b) é possível observar a formação de “ilhas” de terceiro corpo, em que a imagem gerada por elétrons retroespalhados revela serem essas “ilhas” formadas por elementos leves, que são confirmados utilizando-se a técnica de EDX, como sendo oxigênio (Figura 4.28 (b) e (c)). Notam-se ainda, na Figura 4.28, os riscos de abrasão ocasionados pelo deslizamento.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.28 – Microscopia eletrônica de varredura em amostra sem modificação superficial (a) Imagem por elétrons retroespalhados (b) EDX na região escura (c) EDX na região clara.

Ao analisar as amostras texturizadas, notou-se grande semelhança com as amostras sem revestimento. Segundo ZUM GAHR; MATHIEU; BRYLK (2007), um dos objetivos da texturização é o acúmulo de debris nos sulcos da textura. Na Figura 4.29, nota-se, na seta em destaque, o acúmulo de partículas de desgaste ainda não deformadas nas reentrâncias produzidas pela texturização.

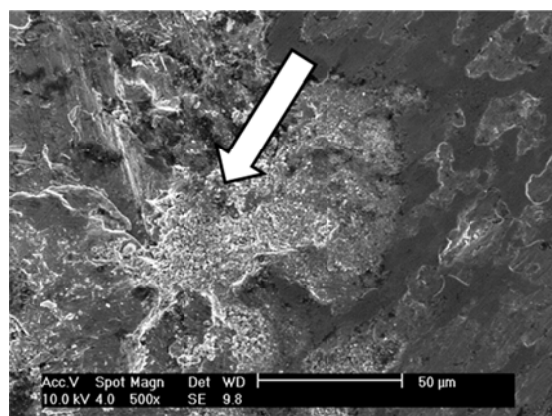


Figura 4.29 – Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários na marca de desgaste de amostra texturizada.

A análise de amostras revestidas com cromo duro revelou uma forte componente mecânica, com a quebra dos picos, levando ao alisamento da superfície, conforme ilustrado na Figura 4.30.

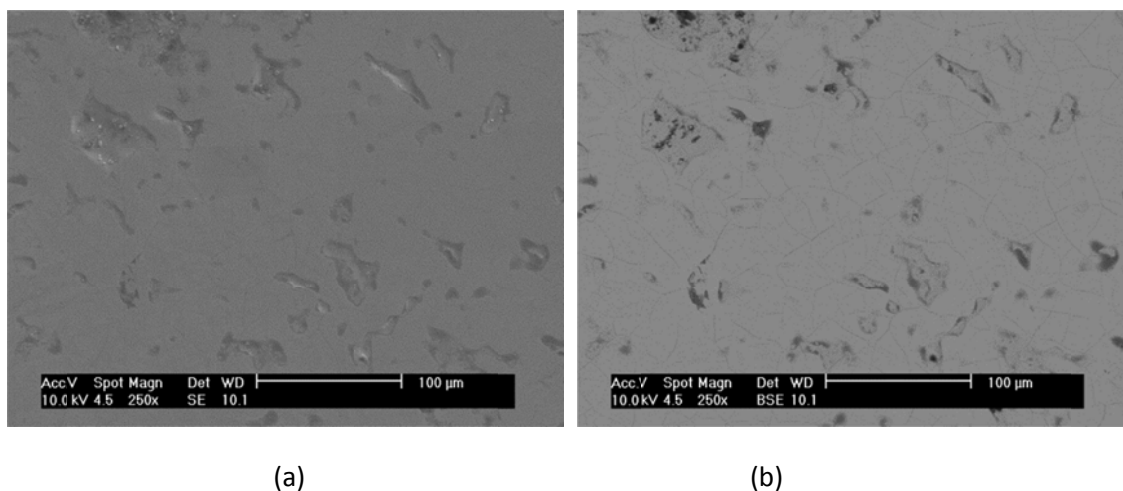
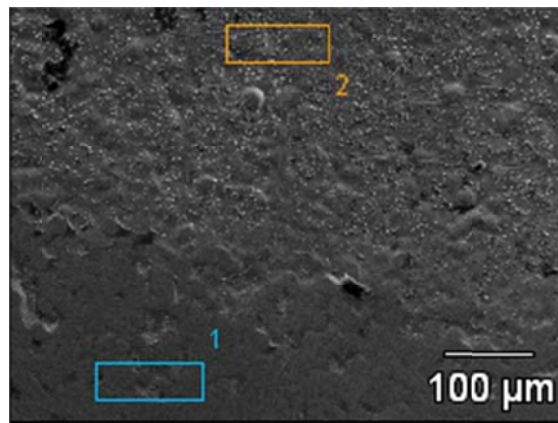


Figura 4.30 – Microscopia eletrônica por varredura na marca de desgaste de amostras revestidas com cromo duro (a) imagem por elétrons secundários (b) imagem por elétrons retroespalhados.

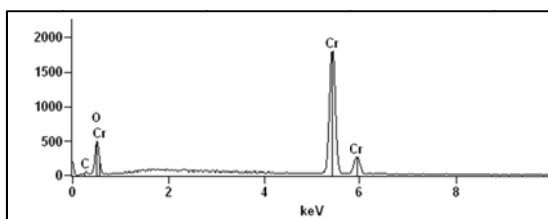
Para confirmar a teoria da forte predominância da componente mecânica no desgaste de amostras revestidas com cromo duro, utilizou-se a técnica de EDX como mostrado na Figura 4.31.

A análise feita por EDX, tanto na região da marca de desgaste (Figura 4.31 (b)) quanto na região fora da marca de desgaste (Figura 4.31 (c)), revela a predominância de cromo evidenciando que as alterações induzidas foram predominantemente de caráter mecânico (alteração na topografia de superfície).

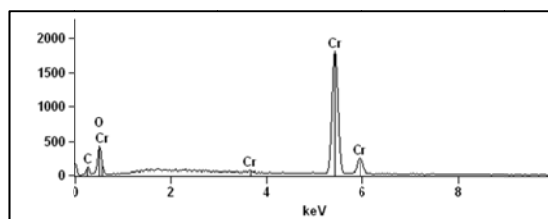
As amostras texturizadas e posteriormente cromadas apresentaram mecanismos de desgaste equivalentes, com predominância de formação de tribocamada rica em oxigênio nos picos das protuberâncias desgastadas, conforme a Figura 4.32. Segundo MILAN et al. (2005) esses desgastes formam pequenos fragmentos que permanecem na região de ensaio, são fortemente deformados e sofrem oxidação.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.31 – Microscopia eletrônica por varredura na marca de desgaste de amostras revestidas com cromo duro (a) imagem por elétrons retroespalhados (b) EDX na marca de desgaste (c) EDX fora da marca de desgaste.

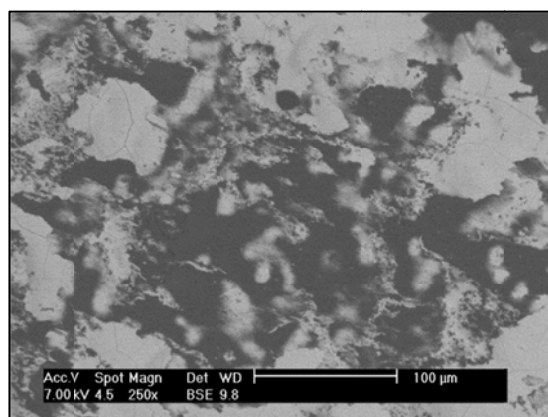
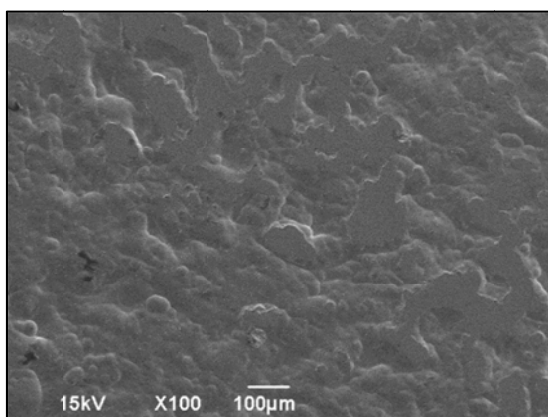
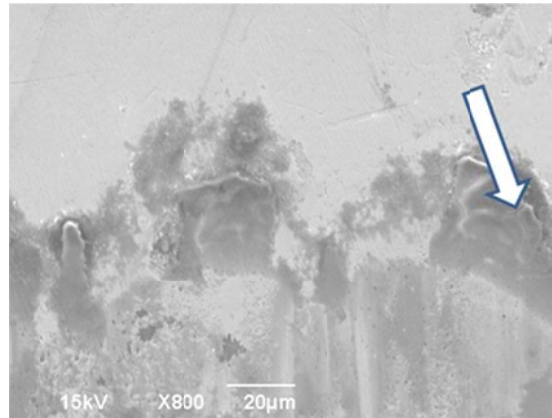


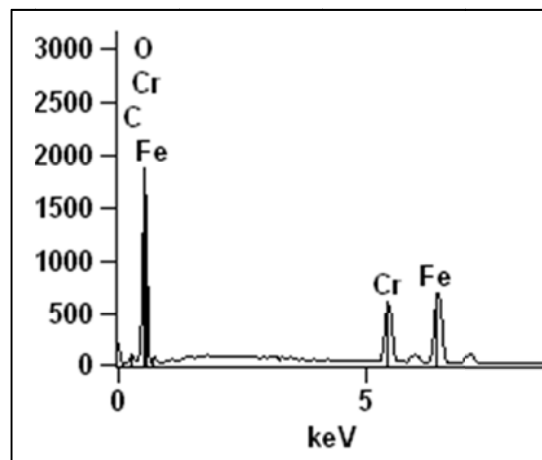
Figura 4.32 – Microscopia eletrônica por varredura em amostras texturizadas e posteriormente cromadas (a) imagem por elétrons secundários (b) imagem por elétrons retroespalhados.

Conforme ilustrado por MILAN et al (2005), o mecanismo de desgaste induz uma transferência mútua de matéria entre o corpo e o contracorpo.

Nota-se, na Figura 4.33, que no contracorpo que deslizou contra amostras texturizadas e posteriormente cromadas, ocorreu um acúmulo de material na borda da região desgastada. Esses acúmulos de matéria são gradativamente fraturados, contribuindo para a formação da tribocamada.



(a)



(b)

Figura 4.33 – Microscopia eletrônica por varredura em amostra texturizada e posteriormente cromada (a) Imagem por elétrons secundários (b) EDX na região clara da marca de desgaste.

A principal diferença do contracorpo ensaiado com amostras revestidas com cromo e sem revestimento de cromo está na composição química do material acumulado nas bordas da

marca de desgaste. O contracorpo ensaiado com amostras revestidas com cromo duro apresentou uma tribocamada rica em ferro, cromo e oxigênio (Figura 4.33), enquanto o contracorpo ensaiado com amostras sem revestimento de cromo apresentou uma tribocamada rica em ferro e oxigênio (Figura 4.26)

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

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

Em seguida, buscou-se avaliar o desgaste pela técnica interferométrica (Figura 4.34). É possível notar, em amostras sem revestimento, acúmulo de material na região ensaiada (Figura 4.34 (a)). Em contrapartida, em amostra revestida com cromo duro, nota-se leve marca de desgaste (Figura 4.34 (b)). Já em amostras submetidas ao processo de texturização, fica impossível identificar a região ensaiada (Figura 4.34 (c) e (d)).

Como evidenciado pela Figura 4.34, não foi possível quantificar o desgaste utilizando-se a técnica interferométrica.

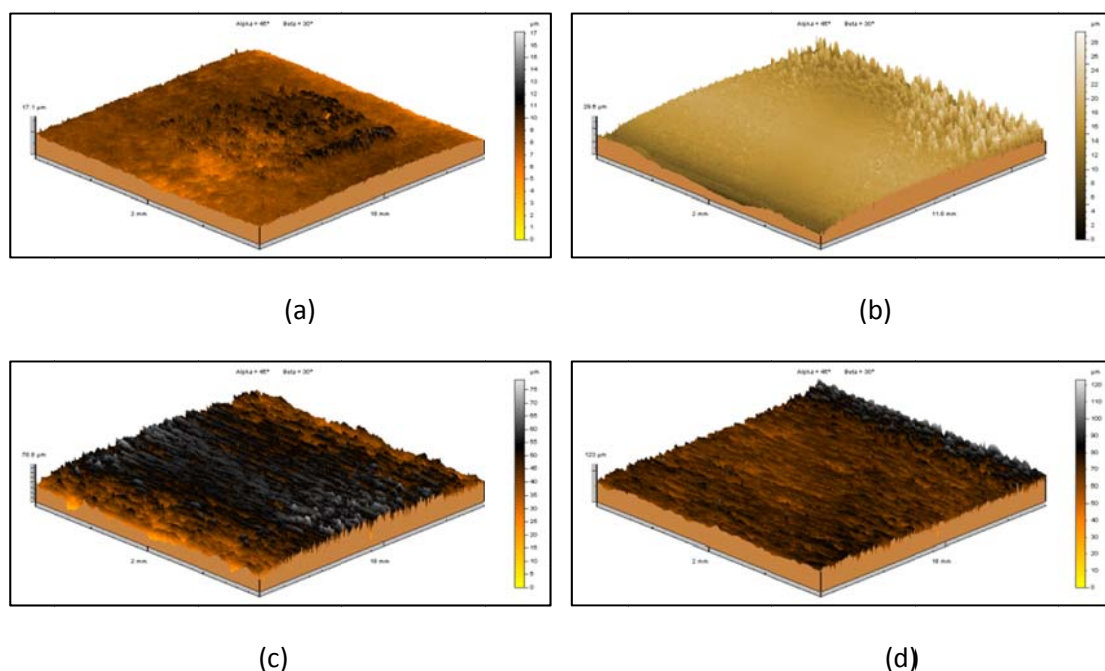


Figura 4.34 – Topografia de superfície 3D de amostras ensaiadas (a) SM (b) C (c) T (d) TC

Algumas referencias reportam que o desgaste pode ser inferido pela perda de refletividade ótica de uma superfície sem, no entanto quantificá-lo (Wang; Wong; Hong, 2006 Matsui et al, 2007)

A Figura 4.35 mostra a forte variação que as modificações superficiais produziram na reflexão do laser utilizado para medir a topografia de superfície, indicando que essas modificações alteram significativamente o comportamento da liga VC9.

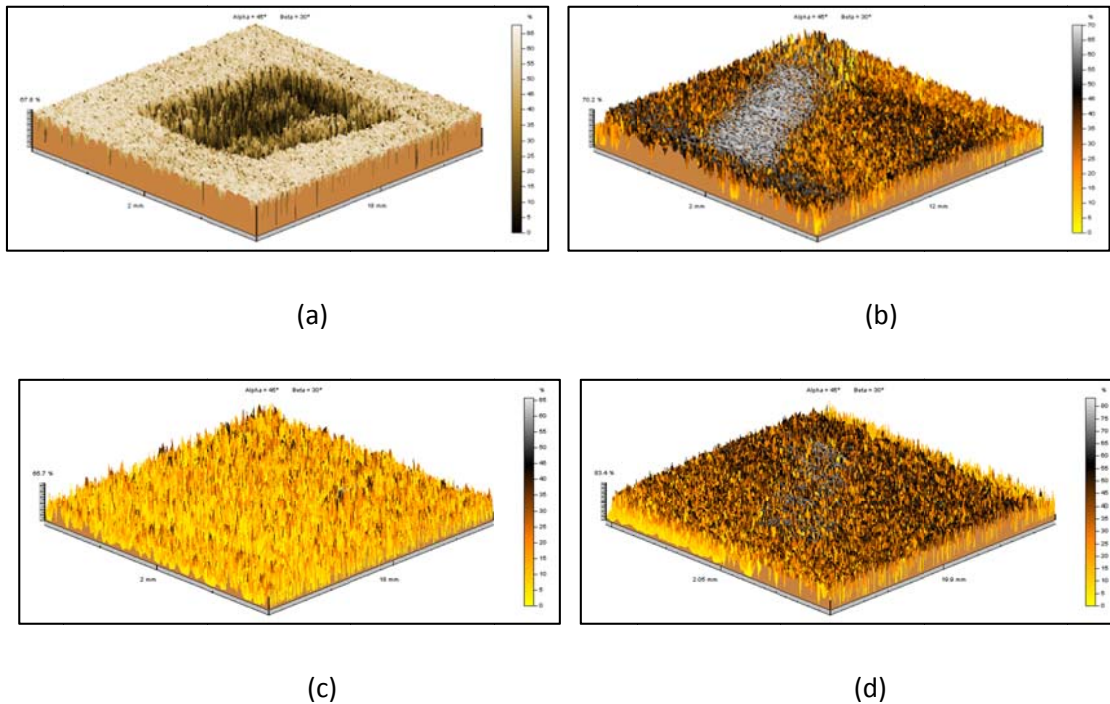


Figura 4.35 – Variação da refletividade da luz em amostras ensaiadas (a) SM (b) C (c) T (d) TC.

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

CAPÍTULO V

Conclusão

Os resultados mais relevantes encontrados a partir dos resultados deste trabalho foram:

- A análise dos resultados quantitativos e qualitativos das réplicas revelou que o material F (Fac Simile) apresentou as melhores qualidades de replicação, pois o mesmo reproduz muito bem aspectos qualitativos (topografia e MEV) e dois dos parâmetros topográficos analisados. Portanto, para a utilização de réplicas para avaliação qualitativa via interferometria a laser e microscopia eletrônica de varredura e avaliação quantitativa, recomenda-se a utilização do material Fac Simile.
- Os resultados de micrografia e dureza permitiram concluir que as amostras cromadas e, posteriormente texturizadas, perderam o revestimento de cromo durante o processo de texturização.
- A texturização promoveu aumento significativo nos parâmetros topográficos, enquanto o revestimento de cromo duro suavizou os mesmos.
- Não houve alteração significativa do coeficiente de atrito em função das modificações superficiais.
- A texturização promove significativo aumento no desgaste do contracorpo, enquanto o revestimento de cromo duro produz redução do mesmo.
- A adição do revestimento de cromo duro promoveu a formação de uma tribocamada no contracorpo constituída de cromo e oxigênio. Em contrapartida, em amostras sem

o recobrimento de cromo duro ocorreu a formação de uma tribocamada constituída de ferro e oxigênio nas amostras.

- Em função da combinação da baixa carga aplicada e do curto intervalo de tempo, tornou-se impossível a quantificação do desgaste nas amostras por meio das diferentes técnicas empregadas.
- **Em síntese, as modificações superficiais (texturização e cromeamento) influenciaram significativamente tanto na topografia quanto no comportamento tribológico de aços para cilindro de laminação a frio.**

CAPÍTULO VI

Trabalhos Futuros

Os ensaios realizados neste trabalho abriram a possibilidade de analisar o comportamento tribológico do aço VC9 das seguintes maneiras:

- Incrementar a técnica de replicação/monitoração do cilindro de forma a caracterizar detalhadamente o mecanismo de desgaste atuante, subsidiando o desenvolvimento de metodologia com vistas à sua reprodução laboratorial.
- Realizar o monitoramento do processo de cromeação de acordo com os parâmetros utilizados por indústrias produtoras de laminados, otimizando a adesividade e homogeneidade do revestimento.
- Executar o processo de texturização adequando os parâmetros com os já estabelecidos industrialmente.
- Promover a elevação da força de contato e/ou o tempo de ensaio para permitir a avaliação quantitativa do desgaste ocorrido nas amostras.

CAPÍTULO VI

Revisão Bibliográfica

AHN, H. S.; KWON, O. K. Tribological behaviour of plasma-sprayed chromium oxide coating. **WEAR**, v. 225-229, p 814-824, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. **ASM Handbook**: Surface Engineering. Materials Park, OH: ASM Internacional, 1994. v. 5 1056 p.

BOCCALINI Jr., M., GOLDENSTEIN, H. Solidification of high speed steels. **International Materials Reviews**, v. 46, n. 2, p. 92-115, 2001.

BÜNTEN, R.; STEINHOFF, K.; RASP, W.; KOPP, R.; AND PAWELSKI, O.; Development of a FEM-Model for the Simulation of the Transfer of Surface Structure in Cold-Rolling Processes, **Journal of Material Processing Technology**. p 369-376 , 1996.

BUTLER, R.D.; POPE, R.J.; Surface Roughness and Lubrification in Press Working of Autobody Sheet Steel, **Sheet Metal Industries**, p.579-592. 1967.

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** , p E48.1 -7; 1987.

CALLE, M.A.; MACHADO, I.; Efeitos do processo de jateamento com granalhas na microestrutura e nas propriedades mecânicas de um aço SAE 1070. **II Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Uberlândia, Brasil, Maio 2003.

CHIU L. H.; YANG C.F.; HSIEH W.C.; CHENG A.S. Effect of contact pressure on wear resistance of AISI H13 tool steels with chromium nitride and hard chromium coatings. **Surface Coatings and Technology**, p. 282-288, 2002.

CORTÊS, P. E. F. **Desenvolvimento de acabamento *rolled-on* em aço inoxidável**. 2009. 108 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

DEUTSCHER, O.; Methods for Attaining Particular Roughness on Cold Rolled Strip, **Iron Steel Engineer**, p.35-40, 1997.

DIETER, G. E. Metalurgia mecânica. Editora Guanabara Koogan, 1981, Rio de Janeiro, Brasil, p. 518-525.

DOLVES, J.; Electron Beam Texturing of Rolls, **Iron and Steel Engineer**. p. 33-38. 1991.

DONG, W.P.; MAINSAIL, E.; STOUT, K. J. Reference Planes for the Assessment of Surface Roughness in Three Dimensions, *International Journal of Machine Tools as Manufacture*, volume 35, numero 2, p 263-271, 1995.

DONG, W.P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. Comprehensive Study of Parameters for Characterizing Three-Dimensional Surface Topography I: Some Inherent Properties of Parameter Variation, **Wear**, volume 159, p 161-171, 1992

DONG, W.P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. Comprehensive Study of Parameters for Characterizing Three-Dimensional Surface Topography II: Statiscal Properties of Parameter Variation, **Wear**, volume 167, p 9-21, 1993.

DONG, W.P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. Comprehensive Study of Parameters for Characterizing Three-Dimensional Surface Topography III: Parameters for Characterising Ampliturde and Some Functional Properties, **Wear**, volume 178, p 29-43, 1994.

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**, p 529-533, 2011.

ELKOCA, O. A study on the characteristics of electrical discharge textured skin pass mill work roll. **Surface & Coatings Technology**, p 2765–2774, 2008.

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

ISO 11562 1993 – **Metrological characterization of phase correct filters and transmission bands for use in contact (stylus) instruments**. International Standard ISO 11562, 1993

KAINZ, A.; PAESOLD, D.; RIHA, G. KEINTZEL, G.; KRIMPELSTÄTTER, K.; ZEMAN, K.; Finite Element Simulation of Skin-Pass and Temper Rolling Processes with Special Emphasis on Roughness Transfer; **NAFEMS World Congress 2005**, 2005.

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

KOVALCHENKO, A.; AJAYI, A.; ERDEMIR, A.; FENSKE, G.; Friction and wear behavior of laser textured surface under lubricated initial point contact. **Wear**. V. 271. p. 1719-1725, 2011.

MATSUI, J; FUKUDA, K; KAMAKURA, A; TSUSAKA, Y; KAGOSHIMA, Y; TOYODA, N; YAMADA, I; Structure estimation of diamond-like carbon films by synchrotron X-ray reflectivity measurement. *Beam Interactions with Materials & Atoms*. V.261. 634-638, 2007.

MENDES, J. L. T. **Influência de Parâmetros Microestruturais no Comportamento**. 2007. 160 p. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MILAN, J.C.G.; CARVALHO, M.A.; XAVIER, R.R., FRANCO, S.D.; De Mello J.D.B. Effect of temperature, normal load and pre-oxidation on the sliding wear of multi-component ferrous alloys. **Wear**. V. 259. p. 412–423, 2005.

MÜLL, K. et al., TOPOCROM-a Superior Method to Texture Work Rolls. **MS&T Conference Proceedings**. p. 553-557. 2004.

MUHL, J.; ALDER, G.M.; Direct Printing of Etch Masks under Computer Control; **6th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces**, 1994.

POIRÉ, L.; PONTET, J.; **New Dull Finished Stainless Steel for Building Use**; Relatório Interno Ugin S. A., 1999.

ROBERTS, L.; An Approximate Theory of Temper Rolling, **Iron and Steel Engineer**. p 56-68. 1972.

SILVA, R. C. R. **Laminação de Encruamento do Aço Inox 430: Teoria e Prática**, Relatório técnico interno ArcelorMittal Inox Brasil, RT10-007, 1998.

SIMÃO, J.; ASPINWALL, D.K.; WISE, M.L.H.; EL-MENSHAWY, M.F.; Mill Roll Texturing Using EDT. **Journal of Materials Processing Technology**, p.204-214, 1994.

SIMÃO, J ; ASPINWALL D. K.. Hard chromium plating of EDT mill work rolls. **Journal of Materials Processing Technology**,. p 281-287, 1999.

SPUZIC, S.; STRAFFORD, K.N.; SUBRAMANIAN, C.; SAVAGE. Wear of hot rolling mill rolls: an overview. **Wear**, 176, p. 261-271, 1994.

STAEVES, J.; **Beurteilung der Topografie von Blechen in Hinblick auf die Reibung bei der Umformung**, Dissertation, Universität Darmstadt, 1998

SUN, D.; YAO, L.; FAN, Q.; ZHANG, J.; Research on Service Performances between Different Textured Cold Rolls, **AISTech Proceedings**, V.2, 2006

TAYLOR HOBSON PRECISION **Guide to surface texture parameters**. 2000.

TOBIYAMA, Y.; ABOTANI, K.; Hot-Dip Galvanized Steel Sheet with Excellent Surface Quality for Automotive Outer Panels, **JFE Technical Report**, p 55, 2004.

UTSCH, M.; VINKE, P.; EDT: Roll Texturing Technology as a Base of Modern Surfaces in Automotive Cold Mill Flat Products. **Iron & Steel techonogy**. p 50, 2005.

WANG, L.; KIM, D.S.; NAM K.S.; KIM M.; KWON S.C. Microstructure of electroplated hard chromium coatings after plasma nitrocarburizing. **Surface & Coatings Technology**. v.190, p 151 – 154, 2005.

WANG, W.H.; WONG, Y.S.; HONG, G.S. 3D measurement of crater wear by phase shifting method. **WEAR**. v 261. P. 164-171. 2007.

WEIDERMANN, C., Influence of Steel Sheet Topography on Deep Drawing Process, **10th Biennial IDDRG Congress**, p 245-251. 1978.

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. p 971–979. 2011.

ZUM GAHR, K. H.; MATHIEU, M.; BRYLK, B. Friction control by surface engineering of ceramic sliding pairs in water. **Wear**, v. 263, p 920–929, 2007.

ZIMNIK, W.; RITTEBACH, B.; MÜLL, K.; Pretex – a New Process for the Textured Sheet. **MPT-International**. p 80-85. 1998.

ANEXO I

ANEXO I - MEDIÇÕES DE DUREZA EM AMOSTRAS APÓS O TRATAMENTO TÉRMICO.

Para a avaliação da homogeneidade da microestrutura das amostras após o tratamento térmico, realizou-se 15 testes de microdureza em cada face das amostras. A Figura Al 1 representa os valores encontrados na face 1, enquanto a Figura Al 2 representa os valores encontrados na face das amostras.

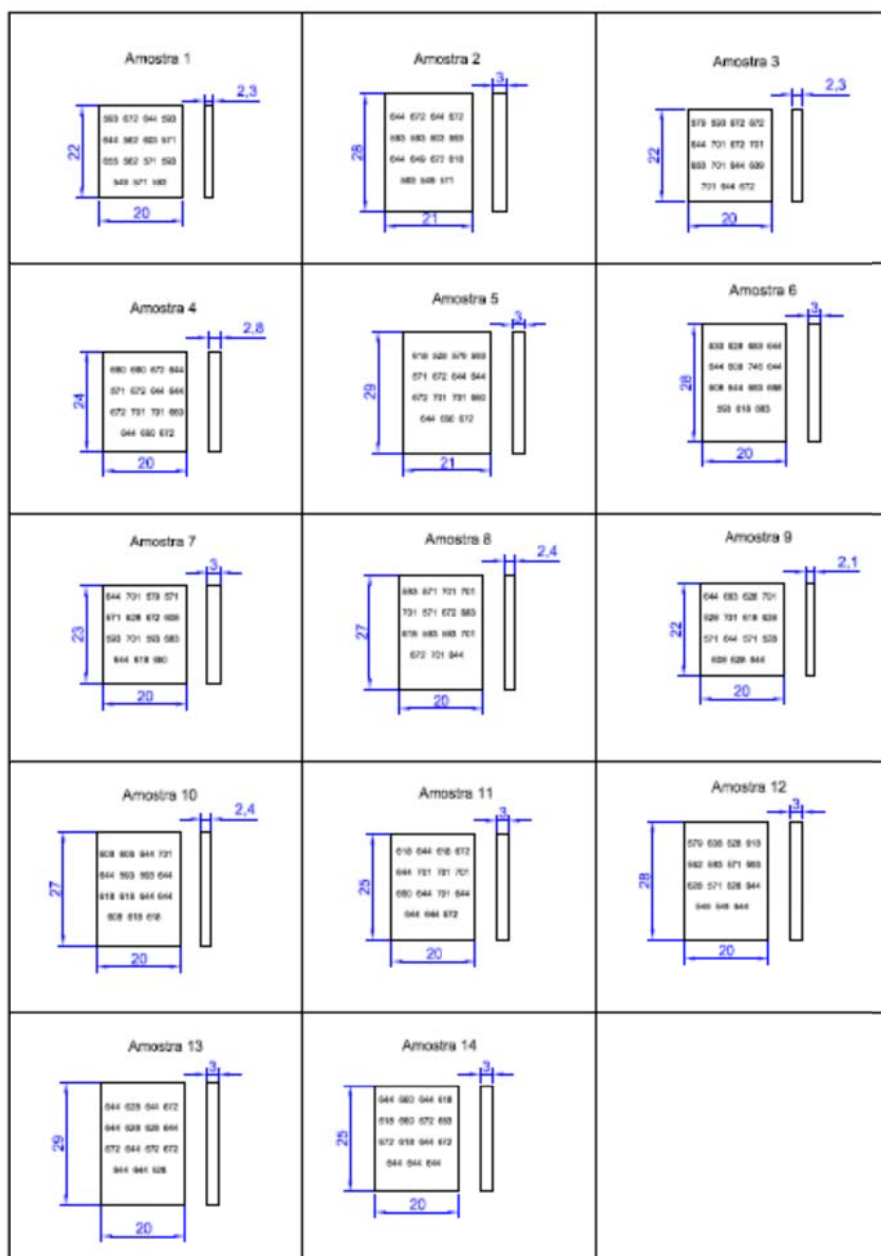


Figura Al 1 – Valores de dureza encontrados na face 1 das amostras após o tratamento térmico.

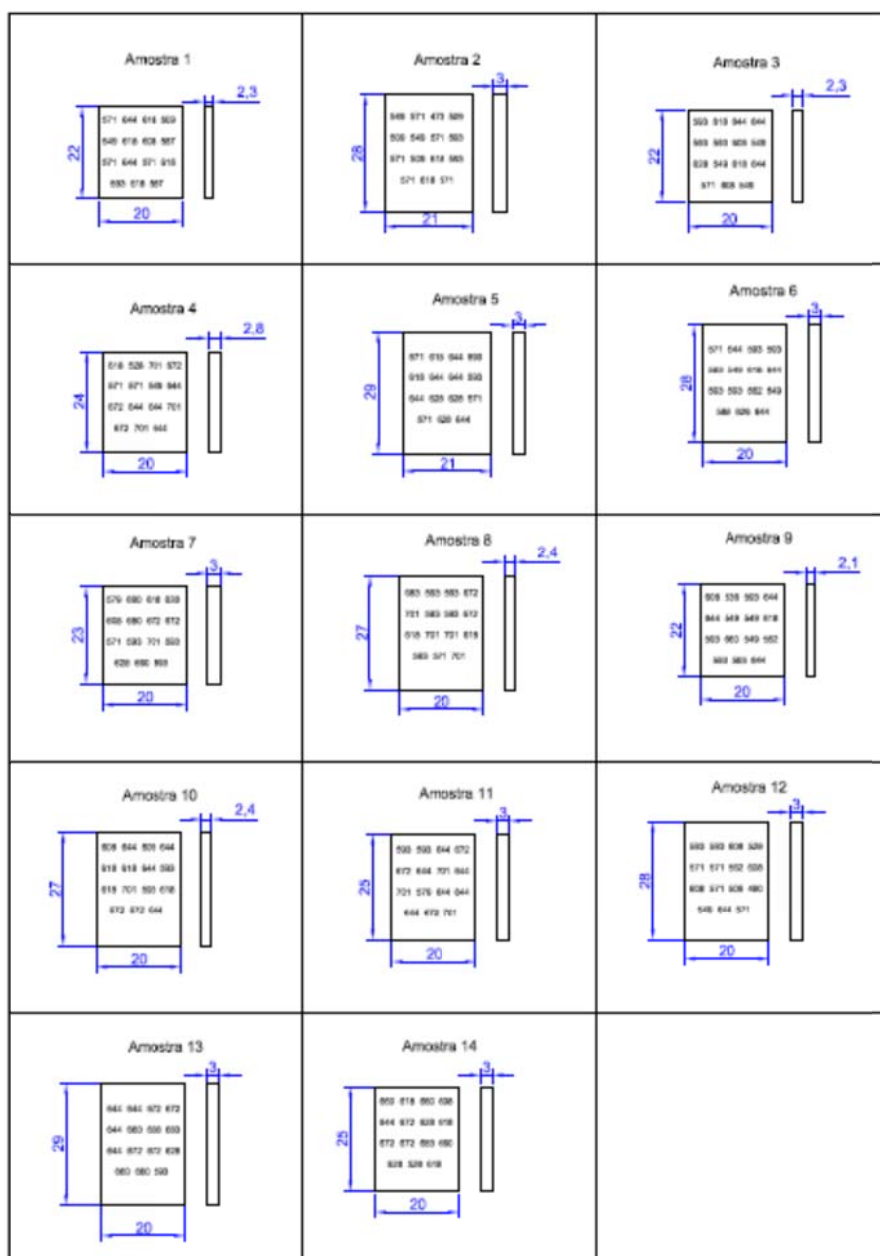


Figura A1 2 – Valores de dureza encontrados na face 2 das amostras após o tratamento térmico.