



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia



Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
PPGE3M

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE SUPERFÍCIE E DO COMPORTAMENTO  
AO DESGASTE ABRASIVO DE HASTES DE CILINDROS HIDRÁULICOS  
REVESTIDAS PELOS PROCESSOS HVOF E CROMO DURO ELETRODEPOSITADO

RICHARD DE MEDEIROS CASTRO

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre  
2012



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia



Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
PPGE3M

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE SUPERFÍCIE E DO COMPORTAMENTO  
AO DESGASTE ABRASIVO DE HASTES DE CILINDROS HIDRÁULICOS  
REVESTIDAS PELOS PROCESSOS HVOF E CROMO DURO ELETRODEPOSITADO

RICHARD DE MEDEIROS CASTRO  
Tecnólogo em Automação Industrial

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processo de Fabricação

Porto Alegre  
2012

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Processo de Fabricação, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Banca Examinadora:

Dr. Eng<sup>o</sup>. Alberto Moreira Guerreiro Brito

Prof. Dr. Eng<sup>o</sup>. Alexandre Milanez

Prof. Dr. Eng<sup>o</sup>. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGE3M

*Dedico este trabalho,*

*A DEUS; a minha esposa e filhas e a todos os meus familiares pelo apoio nos momentos de maior dificuldade; a todos que me incentivaram e foram responsáveis pelo sucesso de mais uma etapa da minha vida.*

## AGRADECIMENTOS

A DEUS, por me dar forças e não me deixar desistir, por ser presença constante em minha vida.

A toda minha família, pelo apoio, em especial minha esposa, Ladislei Marques Felipe Castro, pela compreensão e pelo incentivo diário durante o desenvolvimento desse trabalho e as minhas filhas Larissa Felipe Castro e Tuany Felipe Castro por serem minhas fontes de inspiração.

A todos os colegas de trabalho da Escola Técnica e Faculdade SATC, professores que contribuíram com seus conhecimentos e que fizeram parte desta jornada, em especial aos professores Luiz Carlos de Cesaro Cavaler, Fernando Michelin Marques e Rodrigo Cardoso Costa e Norton Zanette Kejelin.

A todos os professores do PPGE3M, por ter dado a excelente oportunidade de compartilhar que me foi dada, pela sua paciência e pelos ensinamentos constantes.

Ao meu orientador Dr. Alexandre da Silva Rocha pela compreensão, colaboração e orientação no desenvolvimento do trabalho.

Ao proprietário da indústria metalúrgica Rijeza LTDA Darlan Geremia, pela colaboração dos materiais e equipamentos cedidos para a aspersão térmica.

A todos os “professores e colegas da UFRGS”, com os quais pude trocar ideias e receber sugestões para o aperfeiçoamento do trabalho, em especial ao GES - Grupo de Engenharia de Superfícies.

Aos coordenadores dos cursos de graduação da Faculdade SATC, Luciano Biléssimo, Roderval Marcelino, Joeci Casagrande, pela oportunidade que me foi dada;

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	IX
LISTA DE TABELAS .....	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	XVI
RESUMO .....	XVIII
ABSTRACT .....	XIX
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo geral.....	3
1.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Justificativa para a pesquisa.....	3
2.0 REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1 Estudos relacionados ao tema.....	5
2.2 Cilindros hidráulicos .....	8
2.2.1 Principais componentes sujeitos ao desgaste .....	10
2.2.2 Textura superficial.....	13
2.2.3 Parâmetros de Rugosidade.....	14
2.3 Tribologia .....	19
2.4 Atrito e desgaste.....	20
2.5 Mecanismos de desgaste.....	22
2.5.1 Desgaste abrasivo .....	23
2.6 Engenharia de superfícies .....	25
2.7 Revestimento por eletrodeposição – Cromo duro.....	27
2.8 Aspersão térmica.....	28
2.8.1 Classificação dos processos de aspersão térmica .....	30
2.8.2 Principais aplicações de revestimentos por aspersão térmica .....	31
2.8.3 Preparação da superfície para deposição do revestimento.....	32

2.8.4	Limpeza e obtenção de rugosidade no substrato .....	32
2.8.5	Pré-aquecimento .....	33
2.9	Aspersão a chama de alta velocidade – HVOF .....	33
2.9.1	Pós utilizados no processo HVOF .....	35
2.9.2	Porosidade .....	37
2.9.3	Acabamento e pós-tratamento dos revestimentos .....	38
3.0	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	39
3.1	Seleção do material das hastes .....	40
3.1.1	Análise química e metalografia .....	40
3.2	Especificação da vedação para os ensaios em bancada de teste .....	42
3.3	Preparação dos corpos de prova planos (CPP) .....	43
3.4	Preparação das hastes dos cilindros hidráulicos (CPH) .....	44
3.5	Aplicação dos revestimentos nos CPP e CPH .....	45
3.5.1	Deposição do WC-CrCr pelo processo HVOF .....	45
3.6	Caracterização dos revestimentos para os CPP .....	50
3.6.1	Preparação metalográfica .....	50
3.6.2	Medições de microdureza Vickers .....	50
3.6.3	Microscopia de varredura eletrônica (MEV) .....	51
3.6.4	Ensaio de desgaste e perfilometria .....	51
3.6.5	Medições de Rugosidade .....	55
3.7	Caracterização dos revestimentos para os CPH.....	56
3.7.1	Descrição da bancada de teste.....	56
3.7.2	Obtenção dos parâmetros de rugosidade .....	59
3.7.3	Medições de vazamento de óleo.....	60
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	61
4.1	Microscopia ótica – microestrutura dos revestimentos .....	61
4.2	Microdureza Vickers .....	64
4.3	Ensaio de Desgaste Abrasivo em Roda de borracha e areia.....	66
4.3.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	67
4.3.2	Medições de rugosidade.....	71
4.4	Pino sobre disco ( <i>Pin on Disk</i> ).....	72

4.4.1	Ensaio de perfilometria.....	74
4.5	Resultados dos CPH (hastes hidráulicas) .....	77
4.5.1	Comparativos de rugosidade.....	78
4.5.2	Desgaste das hastes e vedações.....	82
4.5.3	Vazamento de óleo .....	86
5.0	CONCLUSÕES.....	90
5.1	Corpos de prova planos (CPP).....	90
5.2	Corpos de prova – hastes dos cilíndricos hidráulicos (CPH) .....	90
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	92
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	93



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Componentes principais de um cilindro hidráulico e exibição da fuga óleo em função do desgaste da haste e vedações.....	4
Figura 1.2	Características macrosuperficiais. (a) haste de um cilindro hidráulico revestida com cromo duro e (b) superfície ampliada 200x. ....	4
Figura 2.1	Principais aplicações dos cilindros hidráulicos. (a) braços de uma retroescavadeira e (b) trem de pouso e flaps de aviões. ....	5
Figura 2.2	Cilindro hidráulico. (a) representação do vazamento externo ocasionado pelo desgaste do conjunto haste/vedação e (b) haste em cromo duro após ter completado 400.000 ciclos. ....	6
Figura 2.3	Tipos de vedações utilizados como referência para a avaliação dos revestimentos. ....	8
Figura 2.4	Esquema de funcionamento de um cilindro hidráulico. ....	9
Figura 2.5	Principais componentes e vedações sujeitos ao desgaste. (a) conjunto de vedações do êmbolo e haste e (b) vedações da haste. ....	11
Figura 2.6	Preparação da superfícies das hastes hidráulicas. (a) processo manual de polimento de haste e (b) haste após o processo de polimento e montagem no cilindro hidráulico. ....	12
Figura 2.7	Aparências de microfissuras em revestimento de cromo duro em haste hidráulica. ....	12
Figura 2.8	Características das superfícies quanto à textura. ....	13
Figura 2.9	Tipos de perfis das superfícies. ....	15
Figura 2.10	Curva referente à proporção de material. ....	15
Figura 2.11	Interpretação da curva de Abbott com inclinação. (a) curva suave e (b) curva acentuada. ....	16
Figura 2.12	Representação gráfica dos parâmetros da DIN EN ISO 13565-2.....	16
Figura 2.13	Definição da média aritmética do perfil ( $R_a$ ). ....	17
Figura 2.14	Definição do parâmetro distância máxima entre picos e vales ( $R_z$ ). ....	18

Figura 2.15	Perfil evidenciando $R_{m\acute{a}x}$ e $R_y$ . .....	19
Figura 2.16	Causas de falha e sua perda relativa sobre a economia. ....	21
Figura 2.17	Mecanismos de desgaste conforme DIN 50320. ....	22
Figura 2.18	Modos de desgaste abrasivo. ....	24
Figura 2.19	Micromecanismos do desgaste abrasivo. ....	24
Figura 2.20	Técnicas para proteção contra o desgaste. ....	26
Figura 2.21	Princípio do processo de eletrodeposição do cromo. ....	28
Figura 2.22	Princípio de deposição de um revestimento por aspersão térmica. ....	29
Figura 2.23	Características das camadas depositadas por aspersão térmica. ....	30
Figura 2.24	Princípio de funcionamento de uma tocha aspersão térmica HVOF tipo convergente divergente. ....	33
Figura 2.25	Esquema típico das instalações do processo a chama de alta velocidade – HVOF....	34
Figura 2.26	Pó de WC-CoCr. (a) morfologia tridimensional. (b) seção transversal. ....	36
Figura 2.27	Metalografia da aspersão térmica (HVOF), detalhes da porosidade. ....	37
Figura 3.1	Espectrômetro utilizado para análise química do material base (substrato).40	
Figura 3.2	Micrografia do aço AISI/SAE 1045. Reagente: Nital 1%.....	41
Figura 3.3	Vedações hidráulicas. (a) configuração dos alojamentos para vedações elastoméricas e guias em PTFE e (b) vedações utilizadas nos testes.....	42
Figura 3.4	CPP utilizados na caracterização dos revestimentos.....	44
Figura 3.5	Haste dos cilindros hidráulicos .....	44
Figura 3.6	Processo de jateamento com óxido de alumínio nos CPP e CPH.....	46
Figura 3.7	Dispositivos utilizados durante a aspersão térmica dos corpos de prova.....	47
Figura 3.8	Unidade de controle TAFA-HP/HVOF – JP5000. (a) detalhe do controlador dos parâmetros e combustível e (b) reservatório do material de adição. ....	48
Figura 3.9	Aspersão térmica HVOF, nos corpos de prova. (a) hastes hidráulicas. (b) corpos de prova planos. ....	49
Figura 3.10	Processo de acabamento final do revestimento (polimento). (a) aspecto anterior ao polimento e (b) componentes utilizados no polimento.....	49
Figura 3.11	Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado na caracterização do ensaio de desgaste. ....	51
Figura 3.12	Ensaio de desgaste conforme ASTM G65-00. (a) equipamento utilizado no ensaio e (b) forma esquemática do ensaio.....	52

Figura 3.13	Ensaio de desgaste conforme ASTM G99-04. (a) imagem do equipamento de medida de desgaste por deslizamento e (b) forma esquemática do ensaio.54
Figura 3.14	Equipamento utilizado para a medição da trilha de desgaste. (a) perfilômetro Ambios Technology XP-2 e (b) software de aquisição dos perfis medidos.54
Figura 3.15	Detalhe da medição do perfilômetro. (a) metodologia empregada na medição da trilha e (b) componentes principais de leitura do perfilômetro. 55
Figura 3.16	Medição de rugosidade. (a) modelo do rugosímetro utilizado nas medições e (b) software de aquisição de dados de rugosidade.....56
Figura 3.17	Bancada de teste com os seus principais componentes. ....57
Figura 3.18	Desenho esquemático do blocos condicionadores das hastes. (a) vista 3D do bloco e (b) nomenclatura dos elementos de vedação. ....58
Figura 3.19	Representação da medição de rugosidade dos CPH. (a) detalhe da medição na haste e (b) aparatos de medição.....59
Figura 4.1	Micrografias da camada de cromo duro eletrodepositado. (a) ampliação de 200x e (b) ampliação de 500x.....61
Figura 4.2	Micrografias da camada aspergida com WC-CoCr por HVOF. (a) ampliação de 200x e (b) ampliação de 500x. ....61
Figura 4.3	Software ( <i>Image-Tool</i> ) utilizado para a quantificação de porosidade.....62
Figura 4.4	Medição de espessura do revestimento de cromo duro. (a) valores das medições de espessura ao longo do CPP e (b) valor médio adquirido.....63
Figura 4.5	Medição de espessura do revestimento de WC-CoCr. (a) valores das medições de espessura ao longo do CPP e (b) valor médio adquirido.....64
Figura 4.6	Impressão do penetrador Vickers ( $HV_{0.01}$ ) nos corpos de prova de cromo duro em diferentes ampliações.....64
Figura 4.7	Impressão do penetrador Vickers ( $HV_{0.01}$ ) nos corpos de prova de WC-CoCr em diferentes ampliações. ....65
Figura 4.8	Perfis de microdureza ( $HV_{0.01}$ ) nos CPP de WC-CoCr e cromo duro. ....65
Figura 4.9	Resultados do ensaio de desgaste conforme ASTM G65-00. (a) marcas carecterísticas do ensaio e (b) média da perda de volume.....66
Figura 4.10	Perda de volume obtida a cada CPP após 30 minutos. (a) revestimento cromo e (b) WC-CoCr.....67
Figura 4.11	Micrografia após o ensaio das superfícies de cromo. (a) 250x e (b) 1400x. 67
Figura 4.12	Micrografia após o ensaio das superfícies de cromo. (a) 500x e (b) 5500x. 68

Figura 4.13	Análise microestrutural da superfície de WC-CoCr em diferentes ampliações. ....	68
Figura 4.14	Regiões do desgaste produzido pelo ensaio ASTM G65-00 analisada via MEV para o WC-CoCr. ....	69
Figura 4.15	Análise microestrutural da superfície após o ensaio de desgaste do revestimento de WC-CoCr e EDS dos três pontos representados. ....	70
Figura 4.16	Ensaio de desgaste conforme ASTM G99-00. (a) evolução dos coeficientes de atrito e (b) média dos coeficientes de atritos. ....	72
Figura 4.17	Trilhas de desgaste dos revestimentos de cromo duro e WC-CoCr. (a) e (b) cromo duro (12,5x) e (c) e (d) WC-CoCr (12x e 100x) respectivamente. ...	73
Figura 4.18	Imagens dos perfis de desgaste produzidas através dos softwares 2D - True Map dos CPP (06 à 10) de cromo duro e média dos perfis de desgaste. ....	74
Figura 4.19	Imagens dos perfis de desgaste produzidas através dos softwares 2D - True Map dos CPP (01 à 05) de WC-CoCr e média dos perfis de desgaste. ....	75
Figura 4.20	Média dos perfis de desgaste dos CPP para os revestimentos em cromo duro e WC-CoCr após a execução do ensaio de pino sobre disco. ....	76
Figura 4.21	Topografia 3D da superfície adquirida através do software <i>True Map</i> . (a) CPP revestidos em cromo duro (b) CPP revestidos em WC-CoCr. ....	77
Figura 4.22	Curva de sustentação de material ( <i>Abbott-Firestone</i> ). (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio – cromo duro. ....	79
Figura 4.23	Perfil de avaliação das superfícies das hastes cromadas. (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio. ....	79
Figura 4.24	Curva de sustentação de material ( <i>Abbott-Firestone</i> ). (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio – WC-CoCr. ....	80
Figura 4.25	Perfil de avaliação das superfícies das hastes de WC-CrCo. (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio. ....	80
Figura 4.26	Parâmetros de rugosidade médio antes e após o ensaio do cromo duro. ....	81
Figura 4.27	Parâmetros de rugosidade médio antes e após o ensaio do WC-CoCr. ....	81
Figura 4.28	Superfícies das hastes revestidas com cromo duro após o teste em bancada correspondente a 60.000 ciclos. ....	83
Figura 4.29	Região de contato da vedação com a haste cromada. (a) vedação G1.1 - ampliação de 20x e (b) vedação do ponto G2.1- ampliação de 20x. ....	84

Figura 4.30	Superfícies das hastes revestidas com WC-CoCr após o teste em bancada correspondente a 60.000 ciclos. ....	85
Figura 4.31	Região de contato da vedação com a haste aspergida. (a) vedação G5.2 - ampliação de 20x e (b) vedação do ponto G6.3 - ampliação de 20x. ....	86
Figura 4.32	Total dos vazamentos em (ml) de cada revestimento para os três ensaios após a finalização dos 60.000 ciclos. (a) cromo duro e (b) WC-CoCr. ....	87
Figura 4.34	Vazamentos de óleo ao longo do ensaio. (a) comparação dos vazamentos individuais a cada ensaio e (b) média dos vazamentos e desvio padrão dos ensaios. ....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Comprimento de amostragem ( <i>cut-off</i> ) conforme tipos de perfis.....	14
Tabela 2.2	Recomendações para parâmetros de superfície recomendados por fabricantes de vedações. ....	17
Tabela 2.3	Formas típicas de desgaste para os principais mecanismos.. ....	23
Tabela 2.4	Comparação de atrito e desgaste de alguns materiais (teste de pino em anéis). ....	25
Tabela 2.5	Características de alguns processos de aspersão térmica. ....	31
Tabela 2.6	Principais materiais de aspersão em forma de pós mais comumente utilizados e respectivos métodos de fabricação. ....	35
Tabela 2.7	Comparação das durezas HV <sub>10</sub> dos revestimentos com relação ao processo de aspersão. ....	37
Tabela 3.1	Composição química do metal base utilizada para a confecção dos corpos de prova e hastes hidráulicas. ....	41
Tabela 3.2	Dados técnicos referentes às vedações e guias utilizados. ....	43
Tabela 3.3	Quantidade dos corpos de prova utilizados nos ensaios de desgaste, metalografia e dureza. ....	44
Tabela 3.4	Quantidade de hastes utilizadas nos testes em bancada .....	45
Tabela 3.5	Parâmetros da aspersão utilizados na deposição do WC-CoCr. ....	48
Tabela 3.6	Composição química do pó utilizado na aspersão .....	48
Tabela 3.7	Parâmetros do ensaio de desgaste (Rubber Wheel) .....	52
Tabela 3.9	Parâmetros utilizados nos testes das hastes em bancada .....	58
Tabela 4.1	Resultados de medidas de microdureza Vickers (HV <sub>0,01</sub> ) .....	64
Tabela 4.2	Resultados de medidas de microdureza Vickers (HV <sub>0,01</sub> ) da seção transversal do substrato dos corpo de prova. ....	66
Tabela 4.3	Comparações dos parâmetros de rugosidade R <sub>a</sub> , R <sub>z</sub> , R <sub>máx</sub> e R <sub>mr</sub> antes e após o ensaio de desgaste. ....	71
Tabela 4.4	Condições quanto as superfícies dos corpos de prova revestidos.....	72

Tabela 4.5	Volume perdido do WC-CoCr quantificados por perfilometria .....	76
Tabela 4.6	Informação dos parâmetros e medições de rugosidade realizadas durante o ensaio das hastes de cromo duro e WC-CoCr .....	78
Tabela 4.7	Diferença percentual (%) entre a média dos parâmetros de rugosidade antes e após o ensaio. ....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ACT	-----	<i>Advanced Concept T-ring</i>
ASTN	-----	<i>Aerospace Sealing Technology News</i>
AISI	-----	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	-----	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ASM	-----	<i>American Society for Materials</i>
ASME	-----	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ABNT	-----	Associação Brasileira de Normas Técnicas
WC	-----	Carbeto de tungstênio
CLA	-----	<i>Center Line Average</i>
CVD	-----	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
CNC	-----	Controle Numérico Computadorizado
CPH	-----	Corpo de Prova Hastes
CPP	-----	Corpo de Prova Plano
DIN	-----	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
HV	-----	Dureza Vickers
EDS	-----	Espectroscopia de Energia Dispersiva
HVOF	-----	<i>High Velocity Oxygen Fuel</i>
ISO	-----	<i>International Organization for Standardization</i>
LACAMI	-----	Laboratório de Caracterização Microestrutural
MEV	-----	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	-----	Norma Brasileira Regulamentadora
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-----	Óxido de alumínio
SiO <sub>2</sub>	-----	Óxido de silício
PVD	-----	<i>Physical Vapor Deposition</i>
PTFE	-----	Politetrafluoroetileno
R	-----	Rugosidade (perfil)
SENAI	-----	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SAE	-----	<i>Society of Automotive Engineers</i>
THSP	-----	<i>Thermal Spraying</i>
VL	[mm <sup>3</sup> ]	Volume perdido



AVL	[mm <sup>3</sup> ]	Ajuste do volume perdido
$v$	[m/s]	Velocidade do pistão
$\lambda_c$	[mm]	<i>Cutt-off</i>
$A_1$	[ $\mu\text{m}^2$ ]	Área dos picos superiores em contato da superfície lisa
$A_2$	[ $\mu\text{m}^2$ ]	Área dos vales em contato da superfície lisa
$A_p$	[m <sup>2</sup> ]	Área do pistão
$A_r$	[m <sup>2</sup> ]	Área da coroa
C	[mm]	Distância do chanfro
$d_1$	[mm]	Diâmetro da haste
$D_1$	[mm]	Diâmetro externo da vedação
F	[N]	Força de carregamento
$F_f$	[N]	Força de atrito
$l$	[mm]	Comprimento avaliado
$L_1$	[mm]	Largura da vedação
$L_m$	[mm]	Percurso de medição
LM	[g]	Perda de massa
$M_{r1}$	[%]	Fração de contato relativa aos picos
$M_{r2}$	[%]	Fração de contato relativa aos vales
$P_1$	[Pa]	Pressão de entrada
$P_2$	[Pa]	Pressão de saída
$Q_1$	[m <sup>3</sup> /s]	Vazão de entrada
$Q_2$	[m <sup>3</sup> /s]	Vazão de saída
$Q_L$	[m <sup>3</sup> /s]	Vazão de fuga (vazamento)
$r_1$	[mm]	Raio do alojamento da vedação
$R_a$	[ $\mu\text{m}$ ]	Rugosidade média
$R_k$	[ $\mu\text{m}$ ]	Rugosidade do núcleo do perfil
$R_{m\acute{a}x}$ , $R_y$ e $R_t$	[ $\mu\text{m}$ ]	Maior distância entre pico e vale
$R_{mr}$	[%]	Área total de sustentação
$R_{pk}$	[ $\mu\text{m}$ ]	Altura do pico reduzida
$R_{vk}$	[ $\mu\text{m}$ ]	Profundidade reduzida dos vales
$R_z$	[ $\mu\text{m}$ ]	Amplitude média de rugosidade
S	[mm]	Altura do rebaixo da vedação
$y(x)$	[ $\mu\text{m}$ ]	Distância de cada ponto até a linha de centro
$\alpha$	[°]	Ângulo do chanfro da haste
$\mu$	[---]	Coefficiente de atrito
$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Densidade

## RESUMO

Devido à necessidade de obtenção de uma superfície resistente ao desgaste e a oxidação, os cilindros hidráulicos são tradicionalmente revestidos com cromo duro eletrodepositado. Todavia, este tipo de revestimento apresenta uma redução gradual do coeficiente de atrito, interferindo diretamente na lubrificação da haste, ocasionando danos aos elementos de vedação e promovendo consequentes vazamentos. Outro apelo contrário à utilização do processo de revestimento com cromo é a presença, em elevados níveis, de cromo hexavalente  $\text{Cr}^{+6}$ , apresentando alto poder cancerígeno e de contaminação ambiental.

Atualmente, o processo de aspersão térmica em alta velocidade (HVOF - *High Velocity Oxi-Fuel*) se caracteriza como uma técnica de revestimento alternativa ao cromo duro, utilizando materiais compósitos (metal-cerâmico), os quais propiciam baixas taxas de desgaste. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de revestimentos aplicados em hastes de cilindros hidráulicos revestidas com WC-CoCr pelo processo HVOF, em comparação ao revestimento de cromo duro eletrodepositado.

As técnicas de caracterização empregadas foram divididas em duas etapas, sendo que a primeira foi: análise microestrutural, ensaios de dureza e desgaste, medições de rugosidade e perfilometria, em corpos de prova planos e, na segunda etapa, a análise dos revestimentos adquiridos através de uma bancada de testes de hastes de cilindros hidráulicos, onde a caracterização foi obtida através de, medições específicas dos principais parâmetros de rugosidades aplicadas a superfícies de vedação, como  $R_z$ ,  $R_{\text{máx}}$  e  $R_{\text{mr}}$ , desgaste visuais das hastes e vedações e medições de vazamento de óleo.

Ao final, os resultados mostram que o revestimento aspergido, indica características competitivas em relação à eletrodeposição de cromo, podendo ser aplicado em hastes de cilindros hidráulicos com algumas vantagens, como por exemplo, maior resistência ao desgaste, menor coeficiente de atrito, menores taxas de vazamento e melhores condições finais de superfícies.

Palavras-chave: Cromo duro, Aspersão térmica, HVOF, Desgaste, Cilindros hidráulicos.

## ABSTRACT

To obtain a surface that is resistant to wear and oxidation, hydraulic cylinders are typically coated with in hard chromium through the process of electroplating process. However, this type of coating displays a gradual reduction of the friction coefficient as the lubrication directly interferes with the shaft mechanism, which in turn causes damage to the sealing elements and promotes subsequent leakage. Another disadvantage in using the electroplated hard chromium process is the presence of high level hexavalent chromium  $\text{Cr}^{+6}$  which is not only carcinogenic, but also extremely contaminating to the environment.

Currently, the alternative process of high-speed thermal spraying (HVOF - High Velocity Oxy-Fuel), as opposed to hard chrome coating, uses composite materials (metal-ceramic) possessing low wear rates. This study aims to evaluate and compare the performance of hydraulic cylinder rods coated with WC-CoCr in the HVOF process, and those coated with electroplated hard chromium.

The characterization techniques employed were divided into two steps, the first of which was: microstructural analysis, testing the hardness, wear, roughness and profilometry and on specimens plans and, in the second step, analysis of the coating obtained through a bench test rods of hydraulic cylinders, where the characterization was through achieved , specific measurement of the main parameters of roughness applied to sealing surfaces, as  $R_z$ ,  $R_{\text{máx}}$  and  $R_{\text{mr}}$ , wear visual of the rods and seals and measurements of oil leakage.

At the end, the results show that the sprayed coating, indicate competitive characteristics in relation to the electrodeposition of chromium, which can be applied in rods of hydraulic cylinders with some advantages, such as improved wear resistance, coefficient friction low, lower rates of leakage and condition final better surface.

Keywords: Hard Chrome, Thermal spray, HVOF, wear, hydraulic cylinders.

## 1.0 INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas encontrados nas indústrias, em componentes que ficam submetidos a esforços de fricção ou ainda no caso dos sistemas óleo-hidráulicos, que dependem da eficiência de filtragem do fluido para a retenção dos particulados sólidos é o desgaste. Além da contaminação interna, os cilindros hidráulicos, como parte integrante desses sistemas estão sujeitos à contaminação externa, pois sua haste é o elemento responsável pela ação linear da movimentação e, isso faz com que os efeitos de agentes abrasivos externos possam atuar de forma severa. Com esse efeito, os elementos de interface se formam, ocasionando microcortes e microsulcamentos nas hastes e, como consequência, a fuga de óleo e a perda da eficiência mecânica do sistema hidráulico.

Outro fator fundamental para obter-se a confiabilidade funcional do sistema de vedação dos cilindros hidráulicos é a qualidade e acabamento da superfície a ser vedada. As irregularidades da superfície têm que estar dentro das condições exigidas. As características mais frequentemente usadas para descrever a microssuperfície são os parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_{máx}$  e, estes estão definidos na norma DIN/ISO 4287. Como a eficiência hidráulica de vedação está relacionada também com processo de usinagem, cada caso deve ser estudado de forma única e, isso se torna o diferencial das indústrias fabricantes desses componentes (TRELLEBORG, 2011).

Entre os componentes que estruturam um sistema óleo-hidráulico, os cilindros hidráulicos são equipamentos que devem ser estudados de forma, com que todos os requisitos para o correto funcionamento do circuito possam ser atendidos, trazendo benefício durante todo o seu estado de funcionamento. De maneira geral os cilindros hidráulicos são os principais componentes desses circuitos e sua função é transformar energia hidráulica em energia mecânica, levando uma máquina ou processo a realizar um determinado trabalho mecânico (RABIE, 2009).

Segundo Sartwell, *et al* (2006), em vários equipamentos, os cilindros hidráulicos ficam submetidos a mais de 400.000 ciclos de operação, ocasionando muitas vezes o desgaste prematuro dos seus componentes, haja vista que características quanto a variações de temperatura, umidade e pressão e, agentes químicos e físicos, interferem no correto

funcionamento destes componentes. Buscando reproduzir algumas dessas características aplicadas aos sistemas hidráulicos, e sabendo da tendência proposital com relação a elevações de pressão para a melhoria da característica peso/potência nesses sistemas, se torna necessário a pesquisa de processos e materiais que possam atender essas solicitações.

Tradicionalmente, a eletrodeposição de cromo duro é uma técnica que vem sendo utilizada a mais de 50 anos para proteger hastes de cilindros hidráulicos contra desgaste e corrosão, proporcionando um melhor acabamento superficial, e com isso minimizando os efeitos de fuga de óleo (SARTWELL, 2006).

Existem vários processos que estão sendo avaliados e/ou aplicados como fontes alternativas para a cromagem, incluindo-se a deposição química e física de vapor (CVD - *Chemical Vapor Deposition* e PVD - *Physical Vapor Deposition*) e revestimentos com laser (NUCCI, 2005). Os processos de aspersão térmica vêm se apresentando como técnicas promissoras na deposição de revestimentos. Estudos mostram que a técnica de aspersão térmica ultrasônica (HVOF – *High Velocity Oxygen Fuel*) pode ser empregada tanto para a fabricação de novos revestimentos quanto para recuperação de hastes já usadas, apresentando um aumento considerável na vida útil dos componentes que interagem com essa superfície, como por exemplo, os elementos de vedação.

Segundo Sartwell, 2006 há duas razões básicas por trás das atividades para substituir cromo duro como revestimento de componentes hidráulicos. O principal impulsionador é a restrição sobre os níveis permitidos de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ), altamente cancerígeno. Em segundo lugar, há a necessidade de uma considerável melhoria na eficiência dos componentes hidráulicos, aumentando a vida útil das vedações e hastes, devido ao aumento da resistência ao desgaste desses elementos.

Tendo em vista a importância desses equipamentos para o uso industrial, tem-se como objetivo deste trabalho, estudar/analisar o comportamento dos mecanismos de desgaste abrasivo que agem nas hastes revestidas em cromo duro utilizados em sistemas óleo-hidráulicos industriais, bem como propor alterações da superfície (uso de revestimentos alternativos), tanto para hastes novas, quanto para a reutilização de hastes descartadas, possibilitando um ganho na sua vida útil em todos os processos industriais. Entre esses setores que utilizam esses componentes podem ser destacados os seguintes: aeronáutico, mineração, cerâmico, automotivo, equipamentos agrícolas, etc.

### 1.1 Objetivo geral

O objetivo desse trabalho é investigar o desempenho de hastes de cilindros hidráulicos fabricadas em aço ABNT 1045 revestidas com WC-CoCr via aspersão térmica de alta velocidade - HVOF (*High Velocity Oxi-Fuel*), em comparação às hastes de cilindros revestidas tradicionalmente com cromo duro eletrodepositado. Nesse estudo serão comparados os revestimentos, através de ensaios de desgaste normalizados, parâmetros específicos de rugosidade (área de sustentação) para o processo de interação hastes/vedações e medições de fuga de óleo, realizadas através de uma bancada de teste, simulando o funcionamento das hastes utilizadas em cilindros hidráulicos.

### 1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos dessa dissertação tem-se que:

- Compreender os micromecanismos de desgaste abrasivo que atuam durante o processo de utilização das hastes com revestimentos em carboneto de tungstênio e cromo duro;
- Propor alternativas quanto às características de superfícies para a melhoria do sistema de vedação dos cilindros hidráulicos;
- Avaliar o desempenho de processo e revestimento alternativo aplicados em hastes de atuadores hidráulicos, através de uma bancada de testes;

### 1.3 Justificativa para a pesquisa

Um dos principais fatores que pode aumentar a eficiência na movimentação de cargas com auxílio dos cilindros em um sistema óleo hidráulico está relacionado com uso correto dos elementos de vedação e das características da superfície das hastes dos cilindros hidráulicos. O efeito de fuga de óleo torna o sistema instável e, com uma capacidade de carga muito inferior daquela que o mesmo foi projetado, causando também a não linearidade das velocidades pré-ajustadas dos equipamentos e, dispositivos que utilizam esses componentes. Mas, para que a vedação tenha o seu sucesso esperado e a capacidade de carga chegue aos seus valores dimensionados, o acabamento da superfície (parâmetros de rugosidade) e a resistência ao desgaste das hastes, deve ser correspondido de tal forma que a fuga de óleo no meio externo seja insignificante. A Figura 1.1 mostra os principais componentes de um cilindro hidráulico para a identificação da fuga do óleo.

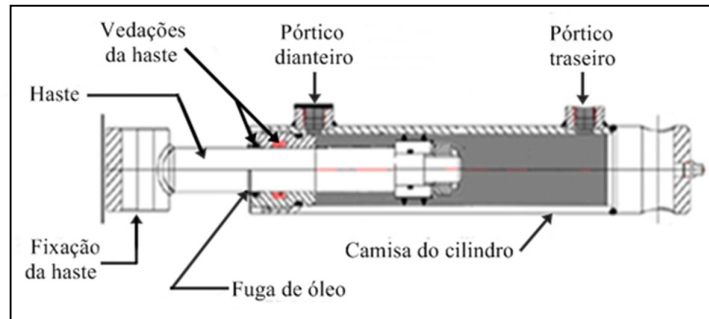


Figura 1.1 Componentes principais de um cilindro hidráulico e exibição da fuga óleo em função do desgaste da haste e vedações.

A Figura 1.2 retrata as características macro das superfícies de uma haste hidráulica após ter ocorrido o processo de desgaste abrasivo, tendo como principal micromecanismo o efeito de microsulcamento/corte. Nessas hastes os principais elementos do sistema tribológico são: os elementos de interface e o ambiente. Os elementos de interface podem estar ligados à contaminação do fluido hidráulico, através de resíduos sólidos vindo do desgaste dos componentes internos desses sistemas e, o ambiente através de agentes externos agressivos, que contribuem também para o desgaste dessa haste. Em oposição a este fenômeno, sabe-se que os cilindros hidráulicos possuem elementos chamados raspadores, responsáveis pela limpeza da haste durante a execução do seu trabalho.

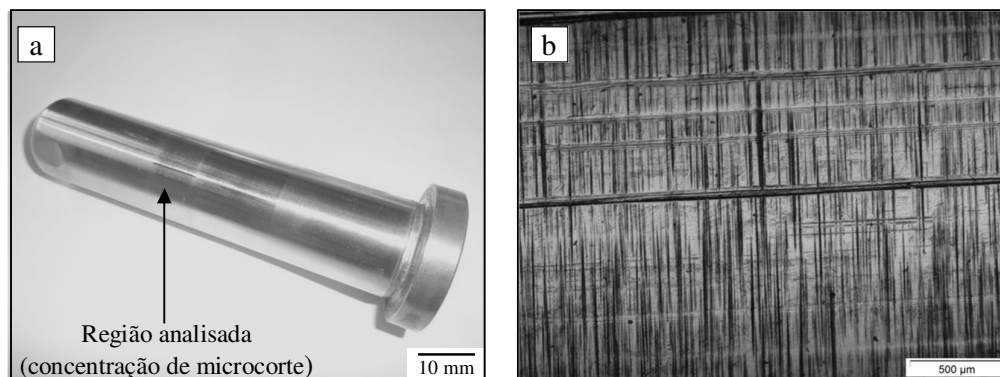


Figura 1.2 Características macrosuperficiais. (a) haste de um cilindro hidráulico revestida com cromo duro e (b) superfície ampliada 200x.

Anteriormente foram citados os principais mecanismos de desgaste que podem estar envolvidos em um componente em serviço. Conforme a caracterização feita do componente em estudo (haste) dessa dissertação, foi possível identificar que os micromecanismos atuantes correspondem ao desgaste abrasivo, e por isso será dado ênfase apenas nesse tipo de mecanismo, o qual alimenta os conceitos básicos para o desenvolvimento deste.

## 2.0 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo procura apresentar, de forma sucinta, o conhecimento base para auxiliar nas discussões e análise dos resultados dessa dissertação. Basicamente esses conceitos essenciais serão divididos em subcapítulos que são: estudos relacionados ao tema, cilindros hidráulicos, atrito e desgaste e engenharia de superfície.

### 2.1 Estudos relacionados ao tema

Há muito tempo o cromo duro tem sido uma prática comumente utilizada para proteger hastes de cilindros hidráulicos contra o desgaste, a corrosão e para possibilitar uma melhor condição da superfície, minimizando os efeitos de vazamento de óleo. Hoje, as aplicações estão praticamente em todos os setores industriais. Na Figura 2.1, são apresentados aplicações dos revestimentos de cromo duro em situações críticas.

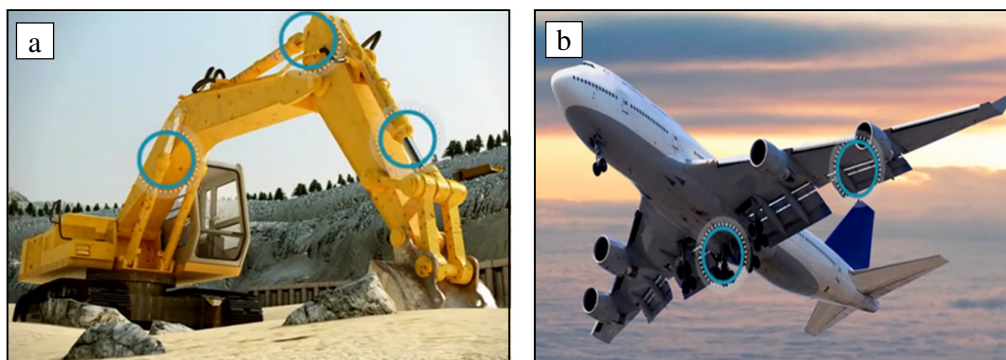


Figura 2.1 Principais aplicações dos cilindros hidráulicos. (a) braços de uma retroescavadeira e (b) trem de pouso e flaps de aviões, Trelleborg (2011).

Segundo Sartwell, *et al.* (2006), a eletrodeposição de cromo duro é uma técnica que tem sido utilizada já há mais de 50 anos na produção mundial em processos chamados críticos, ou seja, na fabricação de peças que necessitarão de resistência ao desgaste e corrosão e, também em atividades de recuperação de componentes de aeronaves comerciais e militares. Esse revestimento é usado pelos fabricantes das peças originais das aeronaves, especificamente nos trem de pouso e atuadores hidráulicos.



Embora o uso de cromagem ainda permaneça em alguns processos de fabricação, existe a necessidade de tecnologias alternativas para diminuir os efeitos de desgaste sobre os componentes. Além disso, existe a preocupação sobre a exposição dos trabalhadores ao cromo hexavalente ( $C^{+6}$ ), altamente cancerígeno, no momento de fabricação e também do controle sobre descarte de metais pesados, através dos efluentes gerados (FLITNEY, 2007). Com isso existe uma limitação crescente ao seu uso e, tornando-se necessário o desenvolvimento de novos processos para revestimentos de componentes mecânicos.

Ainda segundo Flitney (2007), há duas razões básicas por trás das atividades para substituir cromo duro para os revestimentos de componentes hidráulicos. O grande impulsionador continua sendo sim as restrições sobre os níveis permitidos de cromo hexavalente, e como uma exigência secundária de algumas indústrias, uma considerável melhoria na eficiência dos componentes hidráulicos, aumentando a vida útil das vedações e hastes. Na Figura 2.2 é representada a fuga de óleo do cilindro hidráulico quando ocorre o desgaste em vedações e haste.

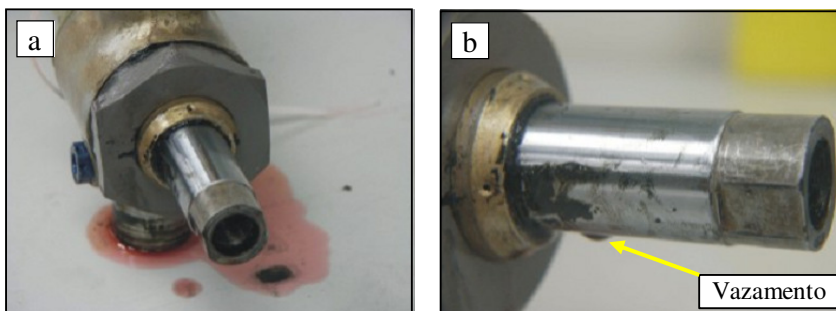


Figura 2.2 Cilindro hidráulico. (a) representação do vazamento externo ocasionado pelo desgaste do conjunto haste/vedação e (b) haste em cromo duro após ter completado 400.000 ciclos, Sartwell (2006).

De acordo com Flitney (2007), a exigência secundária desejada pelos usuários finais dos cilindros hidráulicos inclui: a redução do desgaste da vedação, a vida mais longa dos componentes do atuador, especialmente as hastes que inclui a redução do desgaste e resistência à corrosão melhorada, a redução na frequência de revisão e um menor custo total do equipamento.

A iniciativa original para o desenvolvimento desta pesquisa foi impulsionada pelas críticas sobre a eficiência dos cilindros hidráulicos em situações de grande carregamento, citando-se o trem de pouso de aeronaves, mas também há um interesse crescente em todo o mercado, como por exemplo, grandes fabricantes de máquinas de terraplanagem e de equipamentos de mineração.

Outra pesquisa que pode ser citada como importantíssima quanto à alternativa para o uso do cromo duro nos processos industriais é chamada de *Hard Chrome Alternatives Team* (HCAT), que é um esforço conjunto dos departamentos de defesa dos EUA e Canadá, com as empresas aeroespaciais e depósitos de equipamentos militares (trem de pouso, cubo de hélices, equipamentos hidráulicos, entre outros). O objetivo dessa equipe é trabalhar juntos para gerar e compartilhar todos os dados necessários para validar o uso do HVOF, substituindo o cromo duro tanto na fabricação dos componentes originais do equipamento, quanto nos reparos necessários. Embora o objetivo inicial fosse substituir o revestimento de cromo por outro tipo revestimento com desempenho equivalente e custo aceitável, verificou-se que os revestimentos por aspensão térmica geralmente possuem um desempenho melhor e com um custo total inferior de produção. Nessa pesquisa os EUA se concentra no revestimento WC-17Co para o reparo em equipamentos militares. Já o Canadá está se concentrando em WC-10Co4Cr para aplicações de fabricação de peças originais do trem de pouso, peças essas que o Canadá é o principal fornecedor do mundo (LEGG & SARTWELL, 2003).

Diante da preocupação ambiental, da necessidade quanto a melhoria ao desgaste de componentes, e observando-se toda a movimentação realizadas pelos diversos estrategistas mundiais quanto as alternativas do cromo duro, algumas indústrias fabricantes de vedações também buscam novas tecnologias para se estabelecer no mercado e acompanhar o mundo diante a todas essas mudanças. Segundo artigo publicado pela revista ASTN (*Aerospace Sealing Technology News*) no ano de 1999, há alguns anos atrás a indústria Greene, Tweed & Co, apresentou resultados para a força aérea dos EUA sobre alternativas para o cromo duro. O resultado dessa avaliação deixou mais claro o uso do carbetto de tungstênio (WC), como a principal alternativa dos revestimentos utilizados em equipamentos dos sistemas hidráulicos.

De acordo com as pesquisas de Degennaro e Tweed (1999), as três alternativas para a substituição do cromo nas hastes dos cilindros hidráulicos são listados abaixo:

1. WC-Co, 83% carbetto de tungstênio, 17% cobalto;
2. WC-Co-Cr, 86% carbetto de tungstênio, 10% cobalto, 4% cromo;
3. Tribaloy 400, 28% molibidênio, 8% cromo, 2.5% silício, cobalto em equilíbrio.

Nos testes feitos e publicados por Degennaro e Tweed (1999), foi comparado o desgaste das hastes revestidas de cromo duro eletrodepositado, com as ligas citadas anteriormente depositadas via processo de HVOF. Nesses testes foram utilizados dois tipos de vedações fabricados pela Greene Tweed Company, a vedação tipo ACT (*Advanced*

*Concept T-ring*) e Enercap. Essas vedações fabricadas em elastômeros (grande resistência elástica), com anéis de PTFE (Politetrafluoretileno) que é um polímero conhecido mundialmente pelo nome comercial de teflon, marca registrada de propriedade de uma empresa dos EUA. Na Figura 2.3 são mostrados os perfis para as vedações utilizadas durante a execução dos ensaios.

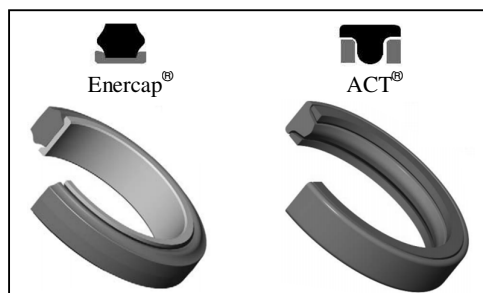


Figura 2.3 Tipos de vedações utilizados como referência para a avaliação dos revestimentos, Degennaro e Tweed (1999).

Nesses testes o desempenho WC-Co-Cr/Enercap e WC-Co/Enercap excede em muito o revestimento padrão de cromo duro em todos os critérios de desempenho medido. Com esses revestimentos citados por Degennaro e Tweed (1999), o vazamento entre haste e vedação foi reduzido, sendo as únicas combinações que em 50 milhões de ciclos não falharam. Após a ciclagem, as hastes e as vedações apresentaram boas condições de superfícies, sendo provável que as vedações pudessem ultrapassar os 100 milhões de ciclos.

Outro fator de importância nesse teste foi à comparação dos valores de rugosidade. Anteriormente aos testes, às hastes revestidas a base de WC tinha o parâmetro  $R_a$  variando de 0,15 e 0,3  $\mu\text{m}$ , as revestidas em cromo com aproximadamente  $R_a$  igual a 0,15  $\mu\text{m}$  e o Tribaloy com  $R_a$  em torno de 0,3  $\mu\text{m}$ . As hastes revestidas de WC-Co e WC-Co-Cr não mostraram evidências da redução de  $R_a$ ,  $R_z$ .

## 2.2 Cilindros hidráulicos

Caracterizados por serem um dos componentes mais utilizados em todas as indústrias, os cilindros podem ser definidos como conversores de energia de uma fonte externa em energia mecânica controlada. Cilindros hidráulicos utilizam a potência hidráulica para prover determinado trabalho mecânico, apresentando as seguintes vantagens: elevadas potências de trabalho (mais do que qualquer outro atuador) e deslocamentos longos quanto necessário (GOMIS-BELLMUNT, 2009).

Segundo Rabie (2009), a pressão do óleo de entrada está convertida em força que age sobre o pistão (Figura 2.4). As Equações 2.1 e 2.2 descrevem o comportamento em estado estacionário, tendo em vista os efeitos dos vazamentos em um cilindro hidráulico. Esses efeitos de vazamentos ficam muito evidentes quando ocorre o desgaste prematuro das hastes e camisas dos cilindros hidráulicos.

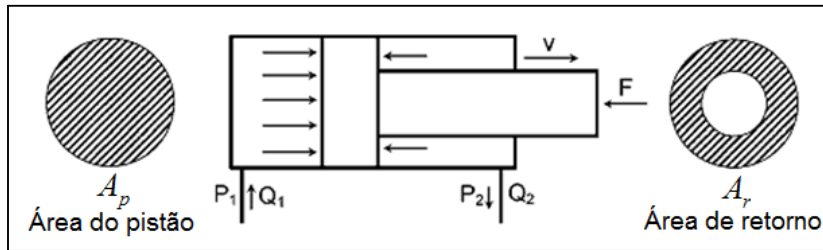


Figura 2.4 Esquema de funcionamento de um cilindro hidráulico, Rabie (2009).

A força ( $F$ ) e a velocidade ( $v$ ) são expressas pelas Equações 2.1 e 2.2:

$$F = P_1 \cdot A_p - P_2 \cdot A_r \quad [N] \quad (2.1)$$

$$v = \frac{Q_1}{A_p} = \frac{Q_2}{A_r} \quad [m/s] \quad (2.2)$$

No caso do estado de equilíbrio de cilindros de operação real, o vazamento interno,  $Q_L$  e forças de atrito,  $F_f$ , devem ser levados em consideração. Portanto, a energia mecânica entregue à carga é menor que a potência hidráulica fornecida ao cilindro, ou seja,  $(Q_1 P_1 - Q_2 P_2)$ . O cilindro é descrito pelas seguintes relações (Equações 2.3 e 2.4)

$$F = P_1 \cdot A_p - P_2 \cdot A_r - F_f \quad [N] \quad (2.3)$$

$$v = \frac{Q_1 - Q_L}{A_p} = \frac{Q_2 - Q_L}{A_r} \quad [m/s] \quad (2.4)$$

Onde:

$A_p$  = Área do pistão [ $m^2$ ]

$v$  = Velocidade do pistão [m/s]

$P_2$  = Pressão de saída [Pa]

$F$  = Força de carregamento [N]

$F_f$  = Força de atrito [N]

$A_r$  = Área da coroa [ $m^2$ ]

$P_1$  = Pressão de entrada [Pa]

$Q_1$  = Vazão de entrada [ $m^3/s$ ]

$Q_2$  = Vazão de saída [ $m^3/s$ ]

$Q_L$  = Vazão de fuga (vazamento) [ $m^3/s$ ]

### 2.2.1 Principais componentes sujeitos ao desgaste

Os principais componentes dos cilindros hidráulicos são: a haste, a camisa (corpo), buchas de apoio e as vedações internas. Todos esses componentes estarão sujeitos ao desgaste, sendo assim é necessário que haja intervenções (manutenção) de acordo com as horas trabalhadas pelo equipamento. Normalmente essa tarefa de identificação é atribuída aos operadores e profissionais da manutenção, que devem ficar atentos normalmente à perda de força do equipamento ou às avarias aparentes nos componentes externos dos cilindros hidráulicos (SANTOS, 2011). Abaixo são citadas e descritas as principais características desses componentes.

Camisa (corpo): são normalmente construídas de tubo de aço sem costura SAE 1020 a SAE 1045, laminado a quente e trefilado a frio. O acabamento interno pode ser providenciado por brunimento, mantendo a rugosidade  $R_a$  da superfície inferior a  $1,0 \mu m$ .

Haste: são fabricadas usualmente em aço SAE 1040 a SAE 1070 com acabamento de rugosidade inferior  $R_a$  igual a  $0,4 \mu m$ , em diâmetro que varia entre 15 a 150 mm. A grande maioria dessas hastes é revestida de cromo duro geralmente com espessuras que variam entre 10 a 20  $\mu m$  e essas hastes são guiadas por buchas de bronze ou PTFE (LINSINGEN, 2008).

Vedações: O sistema de vedação dinâmico de um cilindro hidráulico é constituído por um número de elementos com características elastoméricas. Esses estão incluídos nos alojamentos do êmbolo e haste. Um anel limpador da haste tem a função primária de prevenir a contaminação externa, melhorando as condições de trabalho das vedações da haste e êmbolo (PEPPIATT, 2003). Ao longo do tempo essas vedações também sofrem desgaste, o que pode comprometer a estanqueidade do sistema.

Na Figura 2.5 são identificadas as principais vedações dinâmicas de um cilindro hidráulico que farão parte dos estudos.

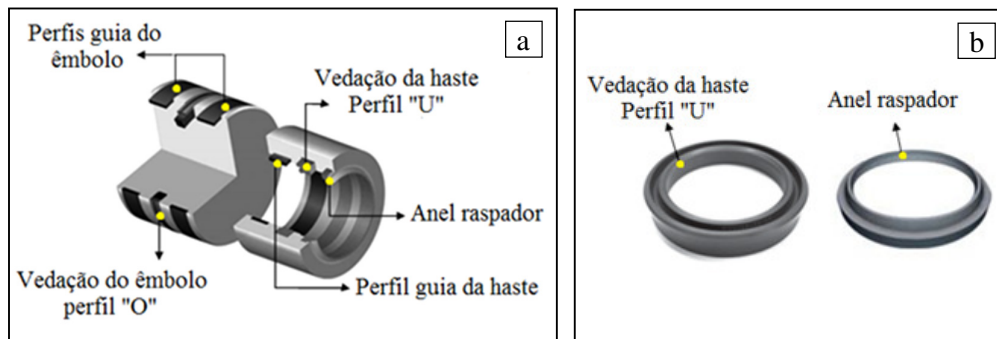


Figura 2.5 Principais componentes e vedações sujeitos ao desgaste. (a) conjunto de vedações do êmbolo e haste e (b) vedações da haste, Papatheorou (2005).

Segundo ainda Peppiatt (2003), o desempenho exigido do sistema de vedação da haste, está se tornando cada vez mais rigoroso, pois as pressões dos sistemas hidráulicos estão cada vez maiores, para atender a necessidade de espaço e aumentar a característica de peso/potência que esses sistemas possuem.

Conforme descrito por Papatheodorou (2005), Steep e Wüstenhagen (2006), os elementos de vedação utilizados nas indústrias são fabricados na grande maioria em PTFE, elastômeros ou poliuretano e geralmente com características de operação de pressão máxima de 400 MPa, velocidades de até 0,5 m/s, utilização com óleo mineral e temperaturas podendo variar de -30 a 80°C. Para essa vedação os parâmetros de rugosidade  $R_{\text{máx}}$  devem ser menores que 2,5  $\mu\text{m}$  e um  $R_a$  podendo variar de 0,05 a 0,3  $\mu\text{m}$ . Esses parâmetros de superfície serão definidos ainda na sequência desse trabalho.

### Hastes hidráulicas

Nas hastes dos cilindros hidráulicos, por exemplo, a ocorrência de pequenas deformações das superfícies significa muitas vezes, no primeiro momento, a necessidade de intervenção por meio de polimento. Dependendo do tipo das deformações, às vezes há necessidade do descarte desse componente ao meio ambiente ou a recuperação com um novo revestimento. O procedimento tanto de polimento, quanto de revestimento deve ser realizado por empresas especializadas, de modo que todas as condições de controle normalizadas quanto à preparação da superfície, espessura de camada, composição química do revestimento e rugosidade possam ser atendidas para cada aplicação.

Outro fator importante segundo artigo publicado por Santos (2011), é que a necessidade de polimento da haste também pode ser identificada visualmente, quando ela se encontra com a aparência fosca (Figura 2.6). O brilho, nesse caso, é sinônimo de

estanqueidade, já que quanto mais lisa for à superfície, menor será a aderência de partículas externas, cujo ingresso no interior do sistema, poderá levar à contaminação do óleo hidráulico provocando um desgaste acentuado dos componentes.

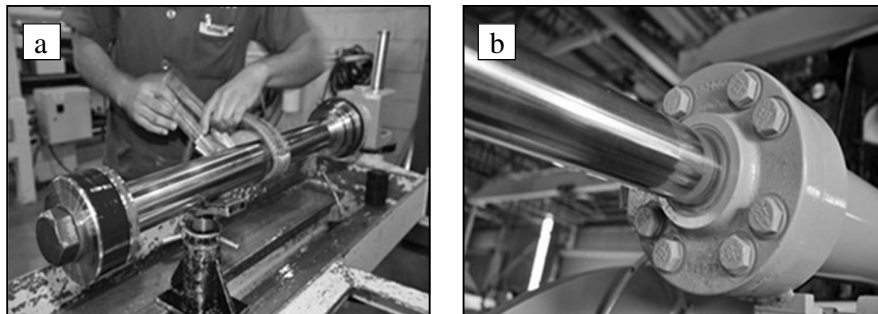


Figura 2.6 Preparação da superfícies das hastes hidráulicas. (a) processo manual de polimento de haste e (b) haste após o processo de polimento e montagem no cilindro hidráulico, Revista M&T (2011).

De acordo com Santos (2011), as espessuras dos revestimentos de cromo duro por eletrodeposição ainda podem variar entre alguns microns e vários milímetros dependendo do local de trabalho. Nas superfícies de cromo duro as durezas adquirem níveis de 600 a 1100 HV. Para o bom desempenho das hastes e vedações dos cilindros hidráulicos, os níveis de dureza normalmente utilizados são de 800 a 950 HV.

A resistência à corrosão de um acabamento da superfície de cromo duro é muitas vezes limitada pela estrutura, que dependendo da qualidade do processo, podem destacar microporosidades e microfissuras, como um exemplo, na Figura 2.7, que no decorrer do trabalho, resultou no vazamento de óleo entre haste e vedações hidráulicas tipo U, (PAPATHEODOROU, 2005).

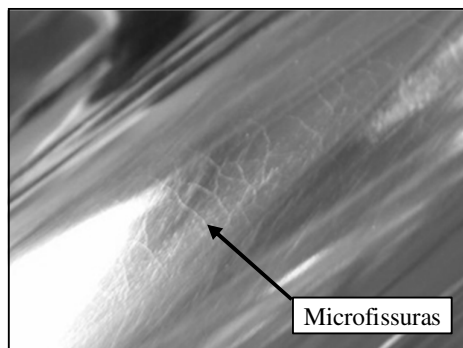


Figura 2.7 Aparências de microfissuras em revestimento de cromo duro em haste hidráulica, Bailey (2011).

Segundo Bailey (2011), essas deformidades são conhecidas também como “*chicken wire*”, e podem acelerar o processo de corrosão e facilitar o deslocamento do revestimento. Este problema provavelmente está relacionado com o pré-tratamento inadequado do material base.

Independente do revestimento utilizado nas hastes dos cilindros hidráulicos, o restabelecimento do diâmetro original no caso de recuperação, o aumento de dureza e a diminuição do coeficiente de atrito, são as características principais no que diz respeito a um revestimento. No caso de cilindros hidráulicos, um bom revestimento dará confiabilidade funcional e vida de serviço de uma vedação, pois ela depende também da qualidade da superfície.

### 2.2.2 Textura superficial

O perfil de uma superfície apresenta características complexas que são uma combinação de erros de forma, rugosidade e ondulações, conforme ilustrado na Figura 2.8. Os erros de forma são variações macro geométricas na superfície em relação à superfície definida em projeto. Enquanto que o a textura de superfície engloba desvios inferiores ao erro de forma, ou seja, inclui a rugosidade, as ondulações, as marcas e as falhas (REZENDE, 2006).

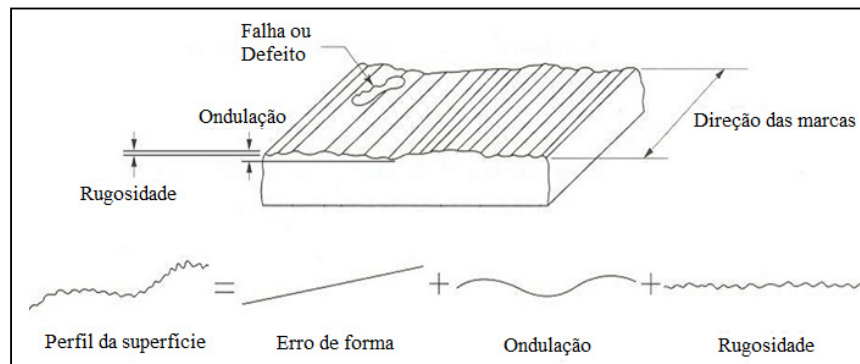


Figura 2.8 Características das superfícies quanto à textura, Rezende (2006).

Por isso, a textura ou acabamento de superfície pode ser definido em termos através dos seguintes termos:

Rugosidade: consiste de finas irregularidades resultantes da ação inerente do processo de produção, semelhante às marcas de avanço produzidas na usinagem;

Ondulações: são irregularidades das superfícies cujos espaçamentos são maiores que o comprimento de amostragem (*cut-off*). Podem ser resultantes de vários fatores como



vibração e deflexões da ferramenta/peça. A altura das ondulações é influenciada pela profundidade de corte;

Marcas: que indicam a direção predominante das irregularidades. Dependem da orientação da peça e da ferramenta de corte na máquina, assim como do movimento relativo entre ambas;

Falhas: são interrupções não intencionais, inesperados e indesejados na topografia de superfície de um componente. Podem ser causadas por defeitos tais como: bolhas, inclusões, trincas, ou mesmo surgir durante o processo de usinagem.

A norma ISO 4288: 1996 apresenta um procedimento para medição de rugosidade, no qual se deve inicialmente avaliar se a superfície é periódica ou aperiódica. A Tabela 2.1 apresenta os valores referenciais do *cut-off*, para cada tipo de perfil. O perfil periódico é caracterizado pela uniformidade do perfil, ao contrário do perfil aperiódico que é caracterizado pela não regularidade do seu perfil.

Tabela 2.1 Comprimento de amostragem (*cut-off*) conforme tipos de perfis.

<b>Perfis periódicos</b>	<b>Perfis aperiódicos</b>		<b><i>Cut-off</i></b>
Distância entre picos [mm]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	$\lambda$ [mm]
> 0,01 até 0,04	Até 0,01	Até 0,02	0,08
> 0,04 até 0,13	> 0,1 até 0,5	> 0,02 até 0,1	0,25
> 0,13 até 0,4	> 0,5 até 10	> 0,1 até 2,0	0,8
> 0,4 até 1,3	> 10 até 50	> 2 até 10	2,5
> 1,3 até 4,0 >	> 50	> 10	8,0

### 2.2.3 Parâmetros de Rugosidade

A avaliação da rugosidade de uma superfície não é a medição do perfil, mas sim a atribuição de um valor numérico, um parâmetro, que irá fornecer uma informação expressiva e aceitável a respeito da superfície. Há uma grande variedade de parâmetros que definem a rugosidade de uma superfície, sendo que cada um descreve melhor uma determinada característica da superfície (REZENDE, 2006).

Como já foi falado anteriormente as características mais utilizadas para descrever o acabamento final da superfície da haste dos cilindros hidráulicos para receber as suas vedações, são os parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_{\text{máx}}$ , e esses estão definidos na norma NBR ISO 4287:2002. De acordo com a Trelleborg (2011), estas características por si só, entretanto, não são suficientes para a adequação em tecnologia da vedação. Além disso, a

área de contato do material, ou seja, o parâmetro ( $R_{mr}$ ) de rugosidade em conformidade com a norma citada deve ser exigido. A importância da presente especificação da superfície é ilustrada na Figura 2.9.

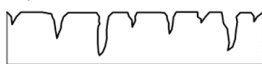

Perfil de superfície	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{mr}$ [%]
Superfície fechada 	0,1	1,0	70
Superfície aberta 	0,2	1,0	15

Figura 2.9 Tipos de perfis das superfícies, Trelleborg (2011).

Na Figura 2.9 dois perfis de superfície são mostrados, ambos os quais exibem o mesmo valor para  $R_z$  no procedimento de ensaio. A diferença torna-se evidente apenas quando a área de contato do material é comparada. Estes mostram que o perfil de rugosidade superior com  $R_{mr} = 70\%$  tem o melhor índice de superfície de vedação.

Conforme Leach (2001), a razão do material do perfil  $R_{mr}$  (c) é a razão do comprimento útil do perfil de rugosidade a um dado nível de corte (c) com o comprimento avaliado, sendo o resultado representado em porcentagem. O comprimento útil, é a soma dos comprimentos das seções, obtidas pelo corte do perfil com a linha paralela a linha média a um nível (c). A razão é assumida em 0% se uma fatia do nível for ao pico mais alto, e 100% se for ao vale mais profundo (Figura 2.10).

A curva de razão material representa a porcentagem de material encontrado no corte em um nível (c) distanciado do ponto mais alto do perfil. Também conhecido como a curva de Abbott-Firestone (BAC). Esta curva é a representação gráfica da variação do parâmetro razão material do perfil  $R_{mr}$ , em função de diferentes níveis “c” do comprimento avaliado (LEACH, 2001).

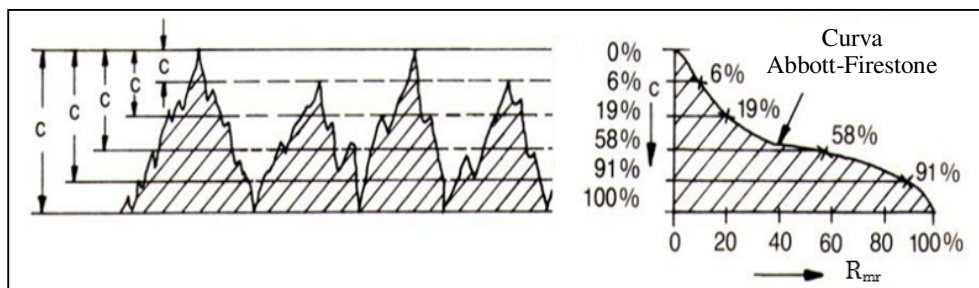


Figura 2.10 Curva referente à proporção de material, NBR ISO 4287 (2002).

Se a curva BAC estiver um pouco inclinada, significa que a superfície não tem mais picos, apresentando, dessa forma, uma boa resistência ao desgaste. Uma curva muito inclinada representa uma superfície pontuda sugerindo que o perfil tem uma baixa resistência ao desgaste (Figura 2.11).

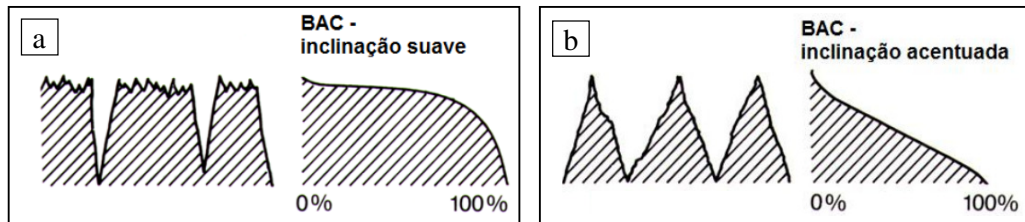


Figura 2.11 Interpretação da curva de Abbott com inclinação. (a) curva suave e (b) curva acentuada, Andretta (2001).

Um dos métodos mais aceitos para caracterizar a superfície produzida por processos lixamento, polimento ou brunimento é o proposto pela norma DIN EN ISO 13565-2.

Esse método consiste em aproximar a curva BAC para três retas e dividir a textura da superfície em três regiões; picos superiores, núcleo do perfil e vales inferiores. A implementação desse modelo é baseada em uma linha de inclinação mínima, obtida para um intervalo de fração de contato igual a 40%. A partir disso, podem-se calcular os parâmetros mostrados na Figura 2.12.

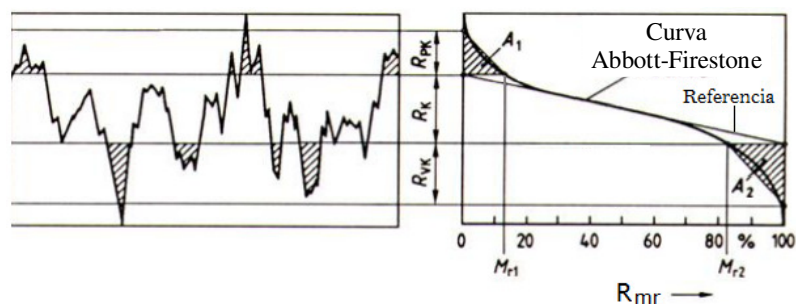


Figura 2.12 Representação gráfica dos parâmetros da DIN EN ISO 13565-2, Andretta (2001).

$A_1$  = Área dos picos superiores em contato com a superfície lisa

$A_2$  = Área dos vales em contato com a superfície lisa

$R_k$ : Rugosidade do núcleo do perfil

$R_{vk}$  = Profundidade reduzida dos vales

$M_{r1}$  = fração de contato relativa aos picos

$M_{r2}$  = fração de contato relativa aos picos

$R_{pk}$  = Altura do pico reduzida

Na Tabela 2.2, são definidos como recomendações, alguns desses parâmetros citados, e bem conhecidos na indústria de componentes hidráulicos por garantir uma eficácia no funcionamento das vedações.

Tabela 2.2 Recomendações para parâmetros de superfície recomendados por fabricantes de vedações, Steep e Wüstenhagen (2006).

Parâmetros	$R_{m\acute{a}x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Proporção de Material ( $R_{mr}$ )
Deslizamento da superfície	$\leq 2,5$	0,05 – 0,3 (Ótimo $R_a = 0,2$ )	$50\% < R_{mr} < 90\%$ para <i>cut-off</i> $c = R_z/2$ e linha de ref. $C_{ref} = 0\%$ (Ótimo $R_{mr} = 80\%$ )
Base do sulco	$\leq 6,3$	$\leq 1,6$	
Lateral do sulco	$\leq 15$	$\leq 3,0$	

### Rugosidade Média ( $R_a$ )

Para Gadelmawla, *et al.* (2002), a média aritmética do perfil, também conhecido como CLA (*Center Line Average*) ou linha média central, é o parâmetro de rugosidade mais usado para controle de qualidade em geral. Esse parâmetro pode ser definido como a média absoluta das alturas das irregularidades ao longo do perfil, e pode ser representado como a linha média de todo o perfil, como mostrado na Figura 2.13.

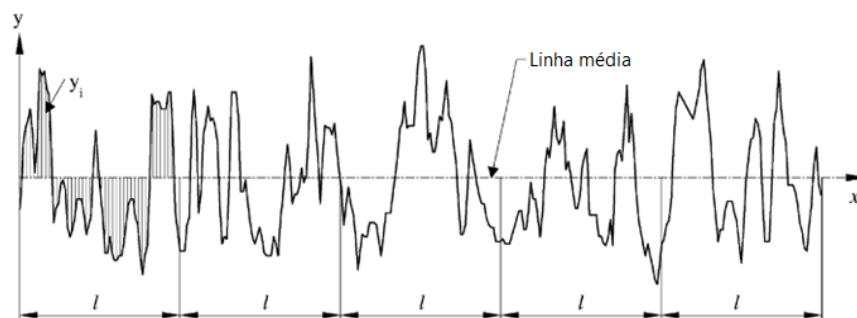


Figura 2.13 Definição da média aritmética do perfil ( $R_a$ ), Gadelmawla, *et al.* (2002).

Esse parâmetro fornece uma boa descrição geral dos valores da altura das irregularidades. Entretanto, esse cálculo não informa sobre o comprimento de onda do perfil, e não é sensível a pequenas variações no perfil. Este parâmetro corresponde à área entre o perfil de rugosidade e a linha média, ou ainda, a integral dos valores absolutos das amplitudes do perfil de rugosidade dentro de um comprimento de amostragem.

Analiticamente, o  $R_a$  pode ser expresso da seguinte maneira conforme Equação 2.5:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad [\mu m] \quad (2.5)$$

Onde:

$l$  = comprimento avaliado [mm]

$y(x)$  = distância de cada ponto até a linha de centro [ $\mu m$ ]

O parâmetro  $R_a$  é usado para monitorar um processo de produção onde mudanças graduais no acabamento superficial podem ocorrer. Por medir uma média de picos e vales, o parâmetro  $R_a$  não é muito sensível a algum defeito individual maior.

### Rugosidade de profundidade média $R_z$

O  $R_z$  é definido como a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo de cada seção de amostragem do perfil de rugosidade (GADELMAWLA, *et al.* 2002). A Figura 2.14 mostra essa definição.

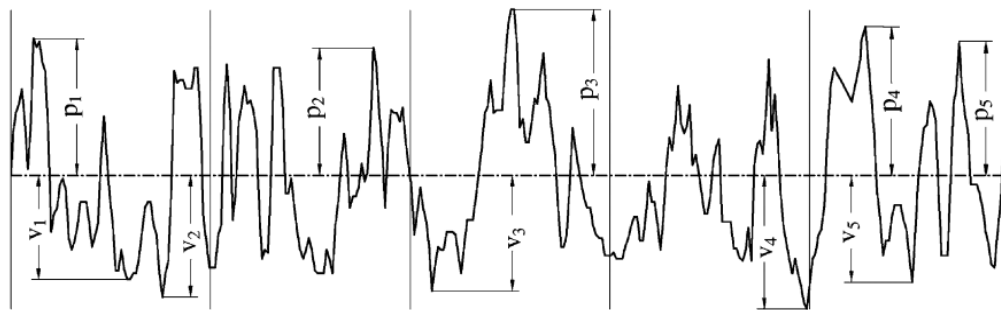


Figura 2.14 Definição do parâmetro distância máxima entre picos e vales ( $R_z$ ), Gadelmawla, *et al.* (2002).

Onde:

$v$  = vale [ $\mu m$ ]    e     $p$  = pico [ $\mu m$ ]

De acordo com a NBR ISO 4287 (2002), o comprimento de amostragem (*cut-off*) padrão para os cálculos dos parâmetros de rugosidade é dividido em cinco seções. Em cada seção é calculada a distância vertical entre o maior pico ( $p$ ) e o vale mais profundo ( $v$ ), compondo cinco valores de distância por comprimento de amostragem. O  $R_z$  é então calculado como a média dessas distâncias adquiridas ao longo do perfil (Equação 2.6).

$$R_z = \frac{(p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) - (v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5)}{5} [\mu m] \quad (2.6)$$

O emprego do parâmetro  $R_z$  pode ser citado para casos em que pontos isolados influenciam a aplicabilidade do produto, como por exemplo, superfícies em contato e com deslizamento (por exemplo: a estampagem). As vantagens deste parâmetro referem-se à facilidade de obtenção através de gráficos e à informação sobre a distribuição dos pontos acentuados. Por outro lado, essa consideração parcial pode fornecer uma pequena parte da superfície total de análise, além de não possibilitar informações sobre a forma e a distância entre as ranhuras (Taylor Hobson Precision, 2003), *apud* (Machado, 2009).

### Rugosidade máxima ( $R_{m\acute{a}x}$ )

É o maior valor das rugosidades parciais  $Z_i$ , que se apresenta no percurso de medição  $L_m$  (Figura 2.15). A norma DIN 4762 indica um parâmetro semelhante ao  $R_{m\acute{a}x}$  para medição de rugosidade da superfície. Na Alemanha é designado por  $R_y$ , enquanto que outros países o denominam de  $R_t$ . Esse parâmetro corresponde à máxima distância pico-vale, dentro do comprimento de avaliação.

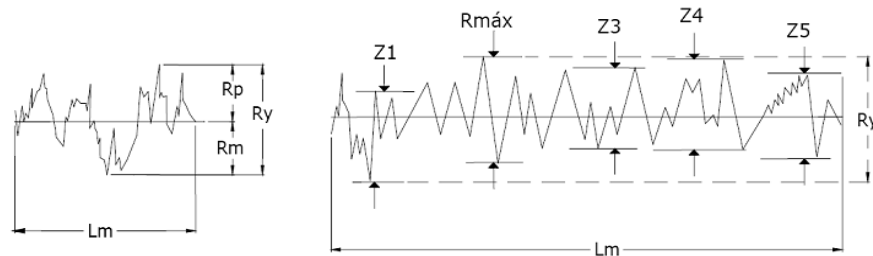


Figura 2.15 Perfil evidenciando  $R_{m\acute{a}x}$  e  $R_y$ , Palmas (2009).

### 2.3 Tribologia

De acordo com Kajdas (1990), *apud* Both (2011), a tribologia é definida como a ciência e a tecnologia da interação entre superfícies com movimento relativo entre si e dos fenômenos que disso decorrem. A tribologia engloba as ciências do atrito, desgaste e lubrificação, e lida com os aspectos físicos, mecânicos, metalúrgicos e químicos do movimento relativo.

O significado econômico da tribologia é tão evidente que mereceria poucos comentários. Basta saber que cerca de metade da energia produzida no mundo é usada para

vencer o atrito, o que permite deduzir que melhores projetos tribológicos têm significado considerável no futuro da própria humanidade. Por esse motivo, os governos das sociedades industrializadas tem dado ênfase crescente nos aspectos econômicos da tribologia (STOETERAU, 2004).

Na Inglaterra, a aceleração recente no campo da tribologia se deve muito ao relatório, publicado em 1965, pelo Departamento de Educação, Ciência e Lubrificação (*Tribology, Education and Research*). Esse relatório, chamado de relatório Jost, sugeriu que esse país poderia economizar 515 milhões de libras por ano com a aplicação de melhores práticas tribológicas e, foi o ponto de partida para a criação de diversos centros de estudos e para o desenvolvimento desta ciência (STOETERAU, *et al.* 2004).

A tribologia é uma ciência multidisciplinar, e atualmente há quatro divisões principais, o que se pode verificar nas instituições acadêmicas, nos livros e artigos publicados sobre o assunto (LUDEMA, 1996 *apud* BOTH, 2011). São elas: mecânica dos sólidos, mecânica dos fluidos, ciência dos materiais e química. A mecânica dos sólidos tem foco na matemática das tensões e temperaturas de contato, frequentemente aborda modelos de atrito e desgaste em componentes mecânicos. A mecânica dos fluidos estuda a matemática e os fenômenos envolvidos no comportamento de lubrificantes líquidos entre superfícies em movimento relativo. A ciência dos materiais se detém mais aos mecanismos atômicos e de microescala que provocam o desgaste ou degradação das superfícies e a química enfatiza na reatividade entre lubrificantes e superfícies sólidas.

#### 2.4 Atrito e desgaste

O atrito e o desgaste partilham uma característica comum, isto é, a complexidade. Conforme Stolarski (2000), na engenharia costuma-se dividir o desgaste em quatro grandes classes: desgaste adesivo, fadiga de superfície, desgaste abrasivo e desgaste químico. Desgaste é geralmente associada com a perda progressiva dos corpos em movimento relativo e ele é dependente das propriedades do material, das condições ambientais e operacionais e da geometria dos corpos em contato. Em quase todas as situações é possível identificar o mecanismo principal de desgaste, que normalmente é determinado pelas propriedades mecânicas e estabilidade química do material, pela temperatura dentro da zona de contato e condições de funcionamento, como por exemplo, a pressão de trabalho em sistemas óleo-hidráulicos.

Praticamente todos os ramos da engenharia enfrentam problemas de desgaste. As perdas econômicas consequentes de desgastes são generalizadas e perversas. Estas não envolvem tão somente os custos de reposição, mas também os custos de depreciação de equipamentos, perdas de produção, de competitividade e de oportunidades de negócios (LEAL, 2004).

De acordo com Gahr (1987), *apud* Leite (2008), estudos realizados nos Estados Unidos pela *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), apontam uma perda econômica de 1% a 2,5% do produto interno bruto devido ao desgaste. Na Alemanha uma pesquisa realizada em 1980 revela que desgaste e corrosão juntos contribuem com a perda de 4,5% do produto interno bruto.

Segundo Rabinowicz (1995), *apud* Leite (2008), para compreender o impacto econômico ocorrido devido a perdas por desgaste, a Figura 2.16 apresenta a importância relativa do desgaste na economia.

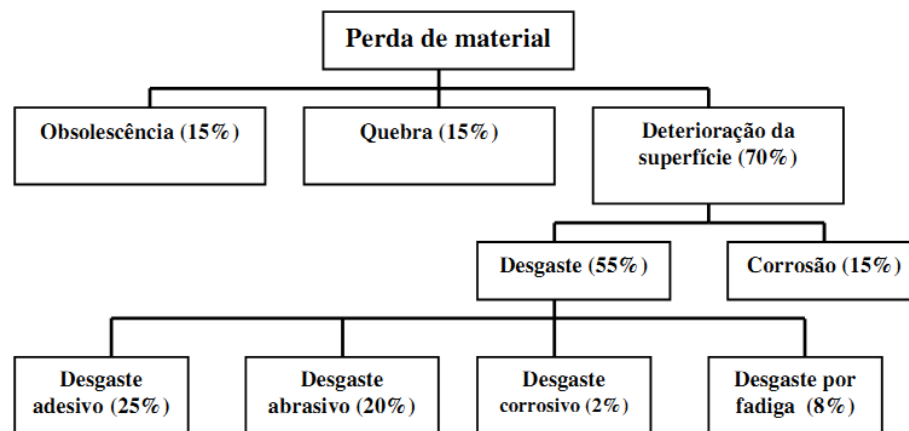


Figura 2.16 Causas de falha e sua perda relativa sobre a economia, Rabinowivz (1995).

Em um componente, o desgaste pode ser ou não catastrófico, mas na maioria das vezes, leva a perda de eficiência, causando vibração e desalinhamento. Em casos extremos, algumas falhas causadas por desgaste podem levar a fratura e os fragmentos formados, normalmente podem danificar o equipamento (LEITE, 2008).

Um dos fatores a ser considerado em fase de projeto para a melhoria dos efeitos do desgaste é a microestrutura do material. Porém, o conhecimento apenas dessa propriedade não é o suficiente para minimizar os efeitos de desgaste. Entretanto um estudo amplo dos fatores que contribuem para o desgaste se faz necessário para prever a ocorrência dos mecanismos de desgaste.



## 2.5 Mecanismos de desgaste

Em referência a norma DIN 50320, *apud* Castro (2010), os mecanismos de desgaste são classificados em quatro principais categorias que são:

Adesão: é um dos tipos de desgaste encontrados em situações de engenharia que mais prevalece, sendo o mecanismo identificado em mais de 15% dos desgastes industriais. Esse desgaste é geralmente identificado pelo cisalhamento superficial ou destacamento de material, com o resultado do movimento relativo entre as duas superfícies, as quais se desgastam pela ação dos fragmentos soltos.

Fadiga de superfície ou contato: ocorre em componentes submetidos a carregamentos cíclicos, onde normalmente não há grandes perdas de material da superfície. Está relacionado ao fenômeno geral da fadiga e similarmente sujeito a um período de incubação antes do aparecimento dos danos. Para Nascimento e Baptista (2005), esse mecanismo pode ser definido pela formação de trincas em regiões das superfícies.

Reações triboquímicas: é a remoção de material ou degradação de propriedades mecânicas de um metal, devida à ação química ou eletroquímica de meios agressivos, ou devido à remoção de material, facilitada por meios mecânicos através da reação química. Pode ser dividida em: corrosão em meio aquoso, oxidação, corrosão em meios orgânicos e corrosão em metais líquidos.

Abrasão: é o fenômeno que ocorre quando partículas duras deslizam ou são forçadas contra uma superfície metálica em relação à qual estão em movimento, provocando por deslocamento ou amassamento a remoção do material. Diferentemente de Rabinowicz (1995), Kassim (2000), *apud* Rubens (2004), descreve que o mecanismo abrasivo corresponde em mais de 50% dos casos, sendo considerado como o mais severo e o mais comumente encontrado na indústria. A Figura 2.17 mostra esquematicamente estes quatro tipos de mecanismos de desgaste citados.

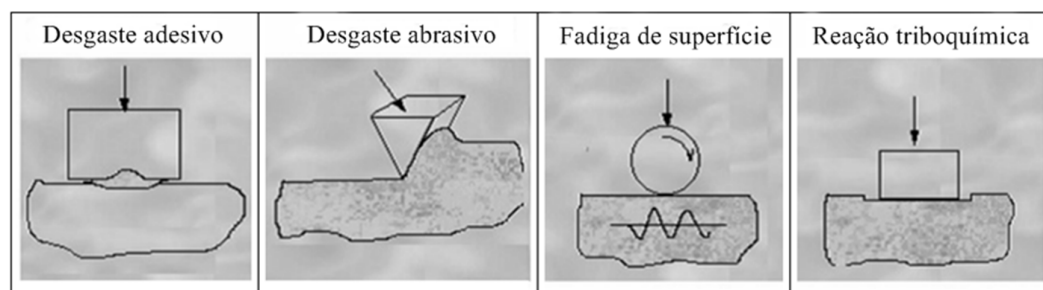


Figura 2.17 Mecanismos de desgaste conforme DIN 50320, Castro (2010), p.18.

Em casos práticos particulares, os mecanismos principais de desgaste poderão ocorrer individualmente, ou alternar-se quando houver mudanças nas variáveis do processo ou na estrutura do sistema tribológico, ou poderão ocorrer simultaneamente. Em casos assim, é geralmente possível prever o comportamento total de desgaste pela superposição dos mecanismos individuais de desgaste conhecidos (NASCIMENTO & BAPTISTA, 2005). As principais formas de aparência de desgaste em superfície sobtensão estão representadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Formas típicas de desgaste para os principais mecanismos, Nascimento e Baptista (2005).

Mecanismo de desgaste	Formas de aparência de desgaste
Adesão	Raspagens, furos, flocos, transferência de material
Abrasão	Riscos, estrias e sulcos
Fadiga de superfície	Trincas e pites
Reações triboquímicas	Produtos de reação (camadas, partículas)

### 2.5.1 Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo ocorre devido às partículas ou protuberâncias duras que são forçadas contra e movem-se ao longo de uma superfície sólida. Por sua vez, é definida como a avaria de uma superfície sólida que envolve geralmente perda progressiva de material e é devido ao movimento relativo entre as superfícies (ASM, 1992).

Segundo Stachowiak e Batchelor (1993), o desgaste abrasivo ocorre sempre que um objeto sólido é carregado contra partículas de um material que tem dureza igual ou superior. Qualquer material, mesmo que a maior parte seja de baixo teor de carbono, pode causar desgaste abrasivo se partículas duras estão presentes. Uma das maiores dificuldades na prevenção e controle de desgaste abrasivo é que o termo desgaste abrasivo não descreve precisamente os mecanismos de desgaste envolvidos. Há de fato, quase sempre diferentes micromecanismos de desgaste atuando em conjunto.

Segundo Castro (2010), os processos de desgaste abrasivo podem ser classificados quanto ao elemento interfacial, podendo ser de dois ou três corpos e podem ocorrer em baixas ou altas tensões.

Abrasão entre dois corpos: as partículas abrasivas ou asperezas são animadas de movimento relativo em relação à superfície do material. Marcas e riscos são formados paralelamente à direção de deslocamento destas partículas.

Abrasão entre três corpos: as partículas abrasivas agem como elementos interfaciais entre duas superfícies em movimento relativo. As partículas estão livres na interface, deformando plasticamente as superfícies de contato. A Figura 2.18 apresenta os dois processos que podem se apresentar em um abrasivo.

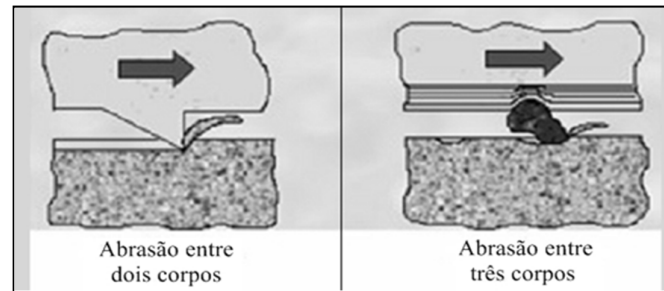


Figura 2.18 Modos de desgaste abrasivo, König (2007) *apud* Castro (2010), p. 20.

De acordo com Stachowiak e Batchelor (1993), o desgaste abrasivo também é classificado quanto ao aspecto da superfície desgastada, chamados de micromecanismos. Entre os principais tipos podem ser classificados em microcorte e microfadiga para materiais dúcteis e microfratura e microlascamento para materiais frágeis (Figura 2.19).

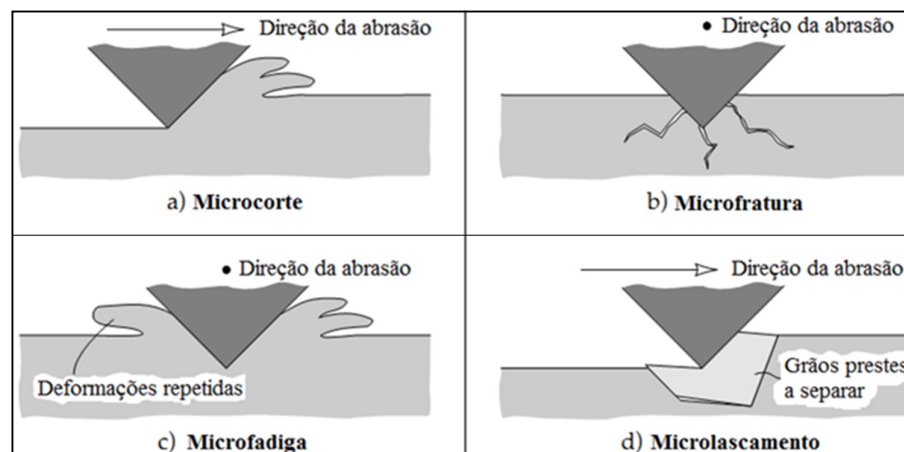


Figura 2.19 Micromecanismos do desgaste abrasivo, Stachowiak e Batchelor (1993).

O primeiro mecanismo ilustrado na Figura 2.17 (a), corte, representa o modelo clássico, onde um grão afiado ou partícula dura corta a superfície mais dúctil. O material que é cortado é removido como detritos de desgaste. Quando o material desgastado é frágil, por exemplo, uma superfície de cerâmica, a fratura pode ocorrer (Figura 2.17b). Quando um material é dúctil, é raspado por um grão não tão afiado, e isso faz com que a

superfície desgastada repetidamente deformada (Figura 2.17c). Neste caso os detritos de desgaste é o resultado de fadiga no material. O último mecanismo ilustrado na Figura 2.17 (d) representa o desprendimento de grãos. Este mecanismo aplica-se principalmente à cerâmica, onde a fronteira entre os grãos é relativamente fraca. No lascamento o grão inteiro é perdido como detritos de desgaste.

Uma interpretação errônea, e amplamente difundida, é a de que o atrito e desgaste devem ser relacionados de alguma maneira, pois ambos provêm da interação de superfícies, e são relacionados de uma maneira simples, ou seja, alto atrito significando desgaste elevado, o que nem sempre é o caso (STOETERAU, 2004). A Tabela 2.4 apresenta valores de desgaste e coeficientes de atrito para diversos pares de materiais. Com base nos valores destacados nessa tabela, pode-se notar que os menores atritos não correspondem os menores desgastes, da mesma forma que materiais que em valores próximos de coeficiente de atrito, apresentam desgastes bastante diferentes.

Tabela 2.4 Comparação de atrito e desgaste de alguns materiais (teste de pino em anéis), Stoeterau (2004).

<b>Materiais</b>	<b>Coefficiente de atrito</b>	<b>Desgaste em <math>\text{cm}^3/\text{cm} \times 10^{-12}</math></b>
Aço doce / Aço doce	0,62	157000
60/40 Bronze / Chumbo	0,24	24000
PTFE (Teflon)	0,18	2000
Aço inox ferrítico	0,53	270
Carboneto de tungstênio	0,35	2
Carga: 400 [g] - Velocidade de deslizamento: 0,18 [m/s]		

De acordo ainda com Segundo Stachowiak e Batchelor (1993), um exemplo da não linearidade (coeficiente de atrito versus desgaste) é um polímero comum chamado politetrafluoroetileno (PTFE), citado antes como elemento de vedação ou guia. Esse pode fornecer um coeficiente de atrito muito baixo como 0,05, na ausência completa de qualquer lubrificante. Diante disso é possível dizer que um estudo cuidadoso da tribologia de materiais não metálicos é um pré-requisito para a sua adaptação bem sucedida aos processos industriais, visando à construção de excelentes materiais resistentes ao desgaste.

## 2.6 Engenharia de superfícies

As características da superfície dos materiais de engenharia têm um efeito significativo na manutenção e na vida de um componente, portanto, não pode ser

negligenciado no seu projeto. Conforme descrito por Halling (1985), *apud* Stokes (2008), Engenharia de superfície pode ser definida como o ramo da ciência que lida com os métodos para atingir os requisitos da superfície desejada e seu comportamento em serviço. Normalmente a superfície de qualquer componente não ligado a engenharia pode ser selecionado com base na textura e cor, mas componentes de engenharia em geral demanda muito mais do que isso. Componentes de engenharia devem executar funções complexas e eficazes, mesmo sob várias condições em ambientes agressivos.

Ambientes de engenharia são normalmente complexos, combinando com carga química e degradação física para a superfície do componente. O desgaste da superfície é um fenômeno que tem efeitos quanto à durabilidade de um componente em serviço. Os revestimentos das superfícies quando bem definidos quanto à aplicação, podem auxiliar aos efeitos do desgaste.

Segundo Henderson (1991), *apud* Leite (2008), existe um termo chamado *Hardfacing* ou revestimento duro que é a aplicação de um material duro e resistente ao desgaste na superfície de um componente através de soldagem, metalização ou associação de processos de soldagem para reduzir a perda de material por abrasão, impacto, erosão, deslizamento superficial e cavitação. Na Figura 2.20 são apresentadas as principais técnicas utilizadas para proteção contra o desgaste.

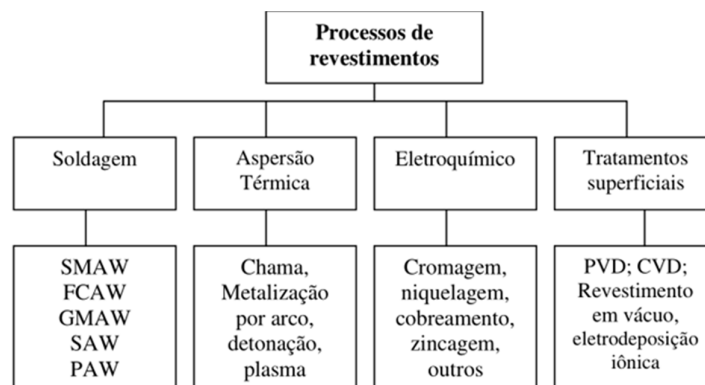


Figura 2.20 Técnicas para proteção contra o desgaste, adaptado de Henderson, (1991), *apud* Leite (2008).

Embora existam várias técnicas de se proteger os materiais contra agentes abrasivos, este estudo direcionará a linha de pesquisa para a deposição eletroquímica (cromo duro) e por aspersão térmica (WC-CoCr), devido às técnicas empregadas para a deposição dos revestimentos aos corpos de prova planos e aos testes em bancada (hastes hidráulicas).

## 2.7 Revestimento por eletrodeposição – Cromo duro

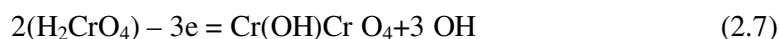
Métodos eletroquímicos são processos bem estabelecidos para a aplicação de revestimentos em materiais metálicos para melhorar as suas propriedades de superfície. A eletrodeposição ou muitas vezes chamada de galvanização é definida como a deposição de um revestimento por *eletrolise*, isto é, deposição de uma substância sobre um eletrodo imerso num eletrólito, passando a corrente elétrica através do eletrólito. O cromo duro a partir de uma solução contendo ácido crômico ( $\text{H}_2\text{CrO}_3$ ) contendo um catalisador com proporções adequadas (ASM, 2001).

Conforme Souza, *et al.* (2000), o revestimento eletrodepositado de cromo duro é muito utilizado para se obter altos níveis de dureza, resistência ao desgaste e corrosão e baixo coeficiente de atrito. Basicamente suas aplicações estão na indústria aeroespacial, automotiva e petroquímica. Isso inclui produtos como anéis de pistão, amortecedores, pistões de freio, hastes de válvula do motor, camisas de cilindro e hastes hidráulicas. Outras aplicações são para engrenagens de pouso de aeronaves, rolos têxteis, rolos de bobinadores plásticos e moldes/matrizas.

Segundo Souza, *et al.* (2003), com o cromo duro industrial é possível obter camadas acima de 5 micrômetros de espessura quando depositadas diretamente no metal base. As características principais do cromo duro depositado por eletrólise são sua dureza entre 800 e 1200 HV (superior à do quartzo), estrutura cristalina cúbica, densidade e 7,2 g/cm<sup>3</sup>, ponto de fusão de 1903 °C e um coeficiente de dilatação térmica parecido ao do aço.

A eletrodeposição do cromo duro se faz da seguinte forma: O banho de cromo é composto de anidrido crômico ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) dissolvido em água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e passa a ser ácido crômico. Na solução é adicionado o catalisador: ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). No polo negativo, catodo, é fixado à peça para ocorrer à deposição do cromo metálico. No polo positivo, fixam-se os anodos, onde acontece a reconstituição do ácido crômico. Devido ao baixo poder de penetração e a grande variação das características físicas do depósito com a densidade da corrente, os anodos devem acompanhar a geometria da superfície a ser cromada, de modo que a distância até a peça seja sempre constante para garantir a uniformidade da deposição.

Este processo de deposição se inicia quando, mediante a passagem de corrente contínua, promove-se a eletrólise da solução. A equação 2.7 representa essa reação:



Sob ação da corrente contínua a molécula de ácido crômico, contendo excesso de três elétrons, fortemente negativa, migra para o anodo. Com isso, forma-se a molécula complexa da segunda parte da equação 2.5, influenciado pelo catalisador na superfície anódica (Souza, *et al.* 2000).

Este complexo tem uma terminação alcalina, que se fixa no cátodo, e uma terminação ácida, que se orienta para o eletrólito, formando uma densa camada catódica. O catalisador de banho  $H_2SO_4$  na proporção de 1:100 penetra na camada catódica pelo seu reduzido tamanho, atingindo a superfície catódica. Em contato com o radical alcalino OH dissolve este, permitindo a redução do íon de cromo para cromo metálico (Figura 2.21).

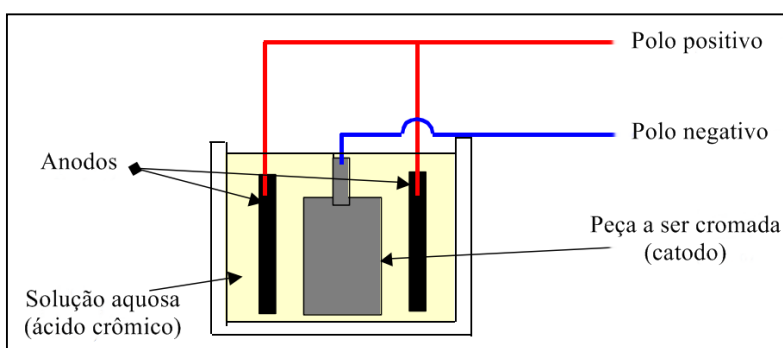


Figura 2.21 Princípio do processo de eletrodeposição do cromo, Souza, *et al.* (2003).

Não só para a aplicação do cromo duro como revestimento, mais para todo o componente que deva ser revestido, um dos pontos mais importantes para esses processos é a preparação rigorosa da superfície. Quaisquer contaminantes de superfície irão afetar significativamente o ancoramento com o revestimento. A qualidade da superfície afeta todos os aspectos do revestimento como a adesão, a aparência, a resistência à corrosão e composição. Normalmente quando se tem uma má preparação, o risco quanto à má aderência, porosidade, ou seja, todas as irregularidades podem levar finalmente o componente à falha (ASM, 2001).

## 2.8 Aspersão térmica

De um modo geral, a aspersão térmica, também conhecida como *spray* térmico (*Thermal Spraying, THSP*) ou metalização, é uma tecnologia na qual os materiais metálicos ou não, finamente divididos, são depositados em uma condição fundida ou semi-fundida sobre um substrato formando um revestimento com características especiais, conferindo proteção de natureza mecânica (desgaste), química (corrosão) e física (calor e

eletricidade). Os materiais sólidos são aquecidos mudando para um estado pastoso ou fundido e acelerados por um gás comprimido em direção ao substrato (metal-base). As partículas aspergidas aderem ao substrato por mecanismos de natureza mecânica, química, metalúrgica e física, dependendo da temperatura da fonte de calor e velocidade imposta às partículas, que pela sobreposição formam camadas de estrutura lamelar (LIMA & TREVISAN, 2002) e (ASM, 2004).

Em consequência desse processo de deposição, o revestimento formado normalmente contém imperfeições tais como poros, óxidos e trincas, cujos tamanhos e distribuições influenciam decisivamente no seu desempenho em serviço (SCHIEFLER, 2004).

O princípio da aspersão térmica é projetar um material, alimentado em forma de arame ou pó contra um substrato ou metal base onde ocorrerá uma solidificação e aderência ao mesmo, o depósito é construído por sucessivas colisões dessas partículas. Ao se chocarem, as partículas se achatam e formam finas lamelas, que se conformam e se aderem às irregularidades das superfícies entre si. A Figura 2.22 ilustra, de forma esquemática, o processo de deposição de um revestimento aspergido termicamente.

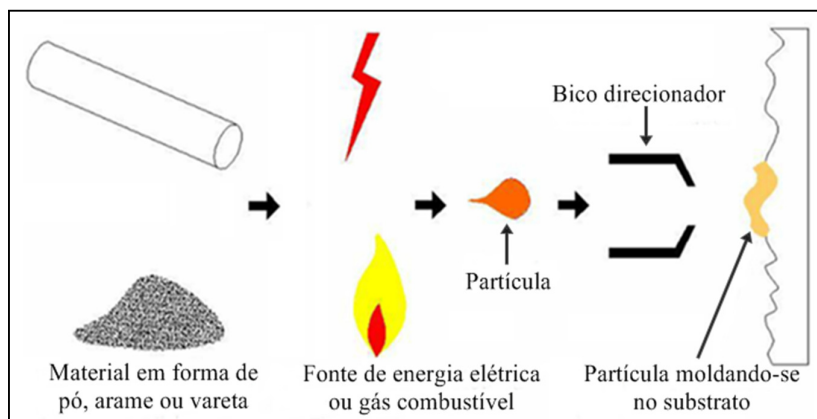


Figura 2.22 Princípio de deposição de um revestimento por aspersão térmica, Paredes (2009).

Uma estrutura típica do revestimento aspergido, constituída por inclusões de óxidos, partículas sólidas e porosidade é ilustrada conforme a Figura 2.23. Apesar da estrutura dos revestimentos aspergidos serem similares na natureza lamelar, exibem características variáveis, dependendo: do processo, da técnica empregada e do tipo de material aplicado. A densidade do depósito aspergido varia de acordo com a velocidade das partículas e com a temperatura da fonte de calor do processo de revestimento. A



velocidade pode variar desde 30 m/s, até perto de 1200 m/s, em função do processo utilizado. A temperatura pode variar de 2000 até 28000°C em função da fonte calor, Paredes (2009).

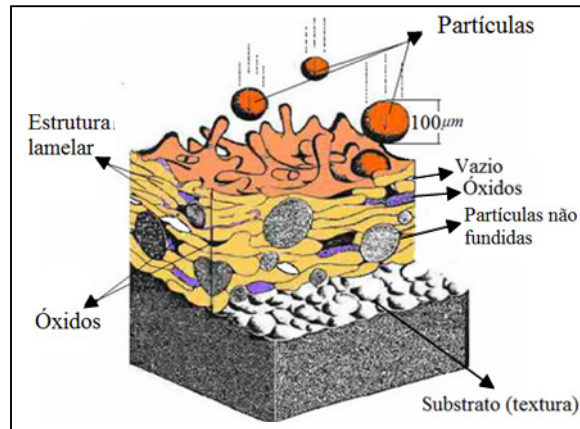


Figura 2.23 Características das camadas depositadas por aspersão térmica, Paredes (2009).

### 2.8.1 Classificação dos processos de aspersão térmica

Segundo Lima e Trevisan (2002), *apud* Schiefler (2004), a classificação dos processos de aspersão térmica distingue-se em dois grupos um que usa a chama e outro que utiliza a energia elétrica como fonte de energia.

Para efeito de simplificação, uma nomenclatura baseada em siglas é comumente usada em substituição às denominações completas dos processos. A identificação de cada uma das siglas é a seguinte:

FS: *Flame Spraying* (aspersão a chama oxi-gás com material de adição na forma de pó ou arame);

ASP: *Arc Spraying* (aspersão a arco elétrico);

HVOF: *High Velocity Oxy-Fuel flame spraying* (aspersão a chama de alta velocidade com material de adição na forma de pó);

HVCW: *High Velocity Combustion Wire flame spraying* (aspersão a chama de alta velocidade com material de adição na forma de arame);

OS: *Plasma Spraying* (aspersão a plasma);

D-gun: *Detonation-Gun spraying* (aspersão por detonação);

LS: *Laser Spraying* (aspersão a laser);

CS: *Cold Spraying* (aspersão a frio).

Os processos de aspersão pelo método HVOF, apesar de terem sido desenvolvidos como uma alternativa ao processo de aspersão D-Gun (Detonação), atualmente emergem como competidores ao processo de aspersão a plasma, possuindo a vantagem do custo inicial de instalação ser bastante inferior a estes dois processos. Além da maior qualidade do revestimento e nível inferior de tensões residuais, as técnicas HVOF possuem eficiência de deposição superior, menores sensibilidades a mudanças no ângulo de aspersão e menos variáveis críticas no processo. Na Tabela 2.5 são representadas algumas características dos principais processos de aspersão térmica.

Tabela 2.5 Características de alguns processos de aspersão térmica, ASM (2004).

Processos	Temp. da chama [°C]	Velocidade da partícula [m/s]	Teor de Óxidos [%]	Custo relativo	Taxa de aspersão [kg/h]	Energia [kW/kg]
Chama	2200 – 2800	30 - 180	4 - 6	3	7	25 - 100
Arco elétrico	5600	240	0,5 - 3	1	16	4 - 6
HVOF	3100	610 -1080	0,2	5	14	100 - 270
D-gun	3900	910	0,1	10	1	100 - 270
Plasma	5600	240	0,5 - 1	5	5	30 - 80

### 2.8.2 Principais aplicações de revestimentos por aspersão térmica

Segundo estudos apresentados por Pawlowski (2008), atualmente os campos de aplicação industrial de revestimentos aspergidos são bastante abrangentes, conforme indicados na relação a seguir:

1. Proteção contra a corrosão de peças, estruturas e equipamentos fabricados em materiais suscetíveis a diferentes formas de ataque corrosivo. Indústrias químicas e petroquímicas de processamento fazem uso frequente de revestimentos para esse fim;
2. Proteção contra o desgaste adesivo e por *fretting* (escorregamento oscilatório de pequena amplitude), bem como aumento da resistência contra a abrasão, erosão e cavitação. Praticamente todas as indústrias se beneficiam desse tipo de proteção;
3. Isolamento térmico e elétrico de componentes. Indústrias usuárias comuns são a eletrônica, automotiva e aeroespacial;
4. Operações de restauração dimensional em componentes de máquinas (eixos, cilindros, mancais, etc.). Muitas indústrias utilizam a aspersão térmica para recuperar partes desgastadas e danificadas de peças de elevado custo, sem a necessidade de substituí-las;

### 2.8.3 Preparação da superfície para deposição do revestimento

A preparação da superfície é a etapa mais crítica da operação de aspersão térmica. A adesão do revestimento está diretamente relacionada com a limpeza e a rugosidade da superfície do substrato. A aplicação rigorosa de procedimentos padronizados de preparação da superfície é necessária para garantir o sucesso na aplicação de revestimentos por aspersão térmica. O tipo de material do revestimento e do substrato é um dos fatores principais na determinação do processo e qualidade da preparação necessária da superfície para se obter adesão satisfatória (BRITO, 2010).

### 2.8.4 Limpeza e obtenção de rugosidade no substrato

De acordo com Lima e Trevisan, *et al.* (2002), o primeiro passo na preparação de um substrato para aspersão térmica é a retirada dos contaminantes das superfícies, tais como ferrugem, películas de óxidos, umidade, poeira, óleo, graxa, tintas e pintura. O calor do processo de aspersão não remove contaminação e esta inibe a adesão do revestimento.

O jateamento abrasivo é a técnica mais utilizada para obtenção de limpeza e rugosidade da superfície, principalmente em peças de grande porte. Essa técnica consiste no choque de partículas abrasivas na direção do substrato a velocidades relativamente altas. Superior aderência é atingida com abrasivos que sem contaminar a superfície, proporcionam rugosidade adequada (ASM, 2004, *apud* BRITO, 2010). Diversos tipos de abrasivos estão disponíveis comercialmente, aqueles que melhor se enquadram são os abrasivos à base de  $Al_2O_3$  (óxido de alumínio), carbetos de silício e granalha de aço (PAWLOWSKI, 2008).

Segundo Buschinelli (1999), *apud* Comeli (2006), o ângulo de jateamento exerce uma forte influência na rugosidade ( $R_a$ ) em substratos moles, porém pouca influência para materiais de alta dureza. Entretanto, o ângulo de jateamento influencia tanto materiais duros quanto materiais de menor resistência no que se refere à quantidade de incrustação, quanto maior o ângulo de jateamento maior será o nível de incrustação como: óxidos e ou partículas não metálicas.

A obtenção de uma rugosidade adequada é tão importante quanto à limpeza, pois auxiliam no ancoramento mecânico do revestimento. De acordo com Lima e Trevisan (2002), de um modo geral, a rugosidade da superfície mais adequada para a maioria dos revestimentos é aquela que apresenta  $R_a$  de 2,5 a 13  $\mu m$ .

### 2.8.5 Pré-aquecimento

Segundo Brasil (2003), outra atividade que deve fazer parte do processo e preparação da superfície para aspersão térmica é o pré-aquecimento do substrato, o qual tem como objetivo proporcionar a queima e volatilização de graxas, óleos e umidade retidos junto à superfície do metal. Este pré-aquecimento pode ser feito por uma chama redutora da própria pistola de aspersão térmica, por um equipamento independente ou ainda por indução quando o tamanho da peça for apropriado.

Segundo Inghan, H. S., Shepard, A. P. (1979), *apud* Brasil (2003), as temperaturas recomendadas para melhorar a limpeza do substrato estão na faixa de 90 °C até 150 °C. As temperaturas dependem ainda das tensões térmicas residuais, da natureza dos materiais da camada e do substrato e de suas propriedades físicas, como condutividade térmica e dilatação.

### 2.9 Aspersão a chama de alta velocidade – HVOF

A aspersão óxi-combustível de alta velocidade (HVOF – *High Velocity Oxi-Fuel*) surgida no início de 1980 como uma variação do processo de aspersão por combustão e exerceu forte influência sobre as possibilidades de aplicação da aspersão térmica. A técnica é baseada em especial no projeto da tocha (pistola) de aspersão em que o combustível, geralmente propano, propileno, metil-acetileno, propadieno ou hidrogênio, querosene, é misturado com oxigênio e queimado em uma câmara de combustão onde a chama é comprimida e em seguida liberada, ocorrendo uma forte aceleração dos gases a uma velocidade de aproximadamente 650 m/s. Portanto, no impacto sobre o substrato as partículas aspergidas são finamente distribuídas, produzindo um revestimento denso e com excelente aderência ao substrato (PAWLOWSKI, 2008). A Figura 2.24 mostra esquematicamente, uma tocha HVOF, modelo JP-5000.

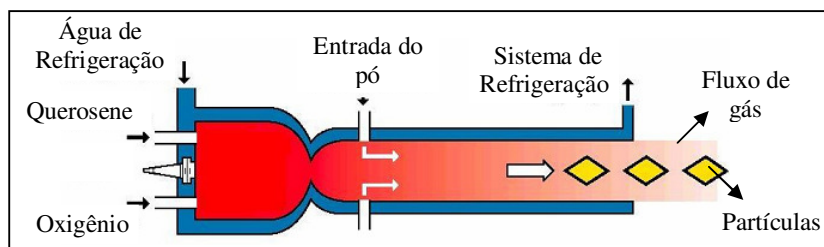


Figura 2.24 Princípio de funcionamento de uma tocha aspersão térmica HVOF tipo convergente divergente, Comeli (2006).

Nesse tipo de tocha, a alimentação do pó é realizada imediatamente após a expansão dos gases que entram em combustão na câmara e saem com elevada energia cinética e térmica e transportam as partículas até o substrato a ser revestido (CORTÉS, 1998), *apud* (PAREDES, 2009). O sistema de saída, convergente/divergente, da câmara de combustão é dimensionado para criar um jato supersônico que mantém a área de baixa pressão onde o pó é radialmente injetado através de múltiplos injetores. A pistola JP-5000 usa a injeção radial de pó no canhão e este sistema traz os seguintes benefícios:

1. Menor pressão de injeção do pó é necessária, uma vez que o pó é injetado em uma área de baixa pressão criada pelo sistema convergente/divergente da saída da câmara de combustão;
2. A velocidade e a temperatura do pó estão melhores distribuídas através do *spray*.

Uma vez injetado, o pó se mistura com o gás e é acelerado até próximo da máxima velocidade, no ponto em que deixa o canhão, e carregado à frente com velocidade constante até seu impacto com o substrato. A saída convergente/divergente no interior da câmara de combustão é projetada para conduzir uma configuração de fluxo que auxilia na distribuição do pó e produz um perfil quase único de velocidade de partícula quando de sua saída do canhão. Isso resulta em um revestimento mais consistente, pois as altas velocidades que as partículas imprimem no momento do impacto sobre o substrato implicam que as partículas podem não estar necessariamente totalmente fundidas para gerar um revestimento de alta qualidade (PAREDES, 2009). Na Figura 2.25 é apresentado o esquema de uma instalação típica de um processo de aspensão térmica pelo método HVOF.

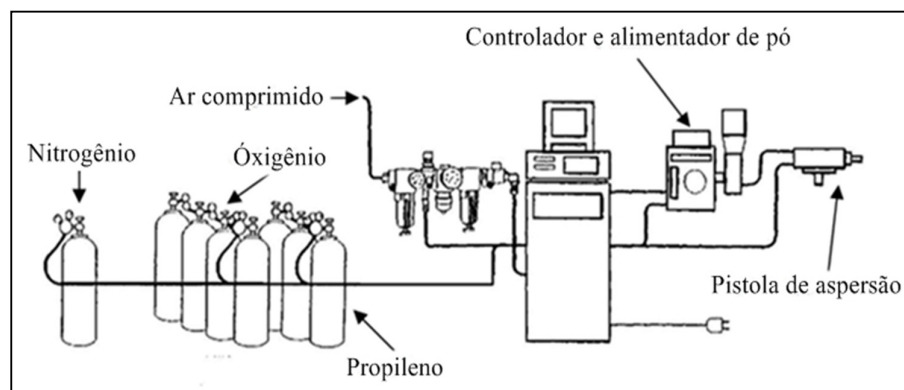


Figura 2.25 Esquema típico das instalações do processo a chama de alta velocidade - HVOF, Paredes (2009).

### 2.9.1 Pós utilizados no processo HVOF

De acordo com Lima e Trevisan (2002), o tamanho das partículas de pó empregado no processo HVOF são geralmente na faixa de 5 a 45  $\mu\text{m}$ . A taxa de alimentação dos pós varia de 20 a 80 g/min. A distância de aspersão varia na faixa de 120 a 300 mm e outros parâmetros de aspersão, como a preparação do substrato são similares aos outros processos de aspersão. As taxas de fluxos de gás combustível estão entre 40 e 60 l/min e o fluxo de oxigênio é correspondentemente bem maior, na faixa de até 430 l/min. A maioria dos pós aspergidos são carbetos, principalmente o de tungstênio e cromo.

Segundo Grasset (2003), *apud* Pawlowski (2008), o processo de aspersão térmica pelo método HVOF tornou-se um padrão na pulverização de carbonetos e com muitas aplicações na indústria aeronáutica, onde se tinha utilização do cromo eletrolítico. Geralmente, os materiais aspergidos como substitutos do cromo são os carbonetos e ligas pulverizadas.

Outra característica importante dos revestimentos aplicados por aspersão térmica, citado por Kreye (1994), *apud* Comeli (2006), é a gama de materiais possíveis de serem trabalhados. Materiais diversos como: metais e ligas metálicas, polímeros e cerâmicas e/ou uma combinação destes, podem ser transformados em materiais para aspersão. Os materiais para aspersão são oferecidos na forma de: pó, vareta ou arame sendo estes puros ou ligados. Abaixo na Tabela 2.6 são apresentados os principais materiais em forma de pó, utilizados no processo de aspersão térmica.

Tabela 2.6 Principais materiais de aspersão em forma de pós mais comumente utilizados e respectivos métodos de fabricação, Paredes (2009).

Material do pó	Processo de fabricação
Al e ligas de alumínio (AlMg, AlSi, ...) Ligas a base de Co e Ni (Hastelloy, Inconel, Stellite, Tribaloy,...) Aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos,	Atomizado (gás ou água)
Óxidos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ , $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , $\text{ZrO}_2\text{-MgO}$ ) Cermets (WC-Co, CrC-NiCr).	Sinterizado ou fundido + triturado
Cermets (WC-Co, WC-CoCr, WC-CrC-Ni, CrC-NiCr) Óxidos ( $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ )	Aglomerados (sinterizados, ativados, densificados)

Como visto na Tabela 2.6, os pós utilizados para aspersão podem ser então de um metal puro, uma liga metálica, um composto, um carboneto, um cerâmico, um cermet ou

combinação destes. Segundo Beczkowiaki (1998), *apud* Comeli (2006), a morfologia dos pós determina a maneira com que as partículas ao se chocarem com o substrato, se deformarão e adaptarão a ele, distribuindo homogeneamente as fases duras, formando a estrutura da camada. A Figura 2.26 mostra a morfologia típica de um revestimento fabricado pelo processo aglomerado sinterizado.

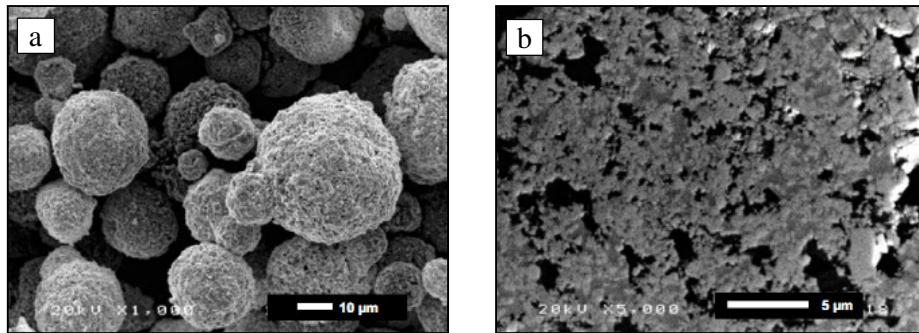


Figura 2.26 Pó de WC-CoCr. (a) morfologia tridimensional. (b) seção transversal, Magnani (2008).

Segundo Schwetzke e Kreye (2000), *apud* Comeli (2006), quanto à granulometria, o pó que possui uma granulação máxima superior a 45  $\mu\text{m}$  produz em todos os sistemas, camadas com maior porosidade e menor dureza. Assim deve-se optar sempre que possível por pós aglomerados e sinterizados com granulometria abaixo de 45  $\mu\text{m}$ , ideal para as melhorar as propriedades mecânicas das camadas. Além da preocupação quanto ao tamanho ideal da partícula, a distribuição granulométrica é outro fator de extrema importância para se obter um bom revestimento, pois caso haja heterogeneidade na distribuição granulométrica, partículas de diferentes morfologias chegarão ao substrato em diferentes estados (fundidos, não fundidos, semi-fundidos, oxidados etc) (MAGNANI, 2008).

As principais propriedades dos revestimentos utilizados com a técnica HVOF, segundo Pawlowski (2008), são: aderência da camada superior a 90 MPa; porosidade inferior a 1% e espessura de material depositado na faixa de 100 a 300  $\mu\text{m}$  (0.1 a 0.3 mm) e durezas até 1245 HV. A Tabela 2.7 mostra as durezas dos revestimentos com relação ao tipo de material utilizado na aspersão.

Tabela 2.7 Comparação das durezas  $HV_{10}$  dos revestimentos com relação ao processo de aspersão, Sulzer METCO (2012).

Tipos de revestimentos	Processos de aspersão				
	FS (arame)	FS (pó)	HVOF	ASP (arame)	PS
Materiais ferrosos	170 - 345	150 - 345	190 - 445	170 - 390	150 - 390
Materiais não ferrosos	70 - 390	70 - 230	90 - 595	70 - 345	70 - 510
Cerâmicos	----	390 - 830	----	----	446 - 832
Cermets	----	445 - 595	595 - 1245	----	510 - 830

### 2.9.2 Porosidade

Como os revestimentos por aspersão térmica são caracterizados por superposição de partículas achatadas, podem apresentar um alto grau de porosidade. Esta porosidade consiste tanto em cavidades isoladas, como em cavidades interconectadas capazes de permitir que líquidos e até gases penetrem até o substrato, tal fato constitui um grave problema, pois a penetração de agentes agressivos irá acelerar o processo de degradação do revestimento (SCHIEFLER, 2004).

A presença de porosidade na superfície é detectada através de uma análise metalográfica de corpos de prova em microscópio ótico, auxiliado por um analisador de imagens que permite quantificar a área da camada examinada, porcentagem de poros, área média de poros e número de poros (PAREDES, 2009). Uma imagem típica, segundo Brito (2010), está apresentada na Figura 2.27.

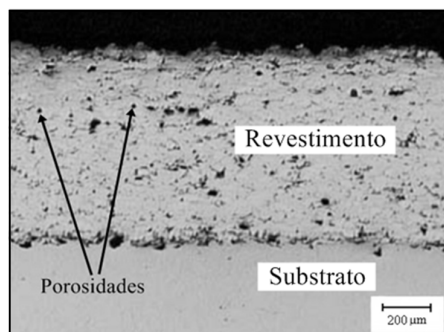


Figura 2.27 Metalografia da aspersão térmica (HVOF), detalhes da porosidade, Brito (2010).

É importante ressaltar que através da aspersão térmica, obtêm-se revestimentos com porosidades variáveis, que estão relacionadas aos parâmetros de cada processo de aspersão térmica como: temperatura da chama ou arco elétrico, gás de transporte, velocidade das partículas, distância pistola/substrato e qualidade do substrato a ser revestido. É importante



salientar que a porosidade afeta diretamente propriedades físicas como condutividades elétrica e térmica, diminui a coesão das camadas e sua aderência ao substrato. Além disso, a porosidade contínua e interconectada ao substrato é indesejável em revestimentos que visam à proteção contra a corrosão (BRASIL, 2003).

### 2.9.3 Acabamento e pós-tratamento dos revestimentos

A necessidade de acabamento superficial depois da aspersão do revestimento irá depender muito da sua finalidade, ou seja, se o uso do revestimento foi para recuperar ou beneficiar o componente mecânico, para que ele volte a desempenhar sua função. Um trabalho posterior usinagem por retificação será indispensável, pois a superfície aspergida deixa uma rugosidade muito grosseira. Entretanto se aplicação do revestimento foi para proteger contra corrosão não há exigência de acabamento superficial, somente uma selagem (PAREDES, 2009).

Ainda segundo Paredes (2009), as camadas depositadas por aspersão térmica podem ser acabadas de muitas maneiras, como por exemplo, lixamento, polimento, retificação feita em máquina de alta precisão ou a selagem. Os fatores que vão orientar a escolha do método de acabamento são: tipo de material a ser acabado, forma da peça, grau de acabamento (rugosidade) e tolerâncias dimensionais, tipo de equipamento disponível, meio onde será exposta a camada depositada e o custo inerente aos processos.

### 3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo tem como objetivo evidenciar as etapas e a metodologia que foram empregadas para o desenvolvimento desse trabalho. Basicamente o procedimento experimental se dividiu em duas etapas que são: análise dos revestimentos em corpos de prova planos (CPP) e análise dos revestimentos aplicados nas hastes hidráulicas (CPH), após os testes em bancada. A metodologia utilizada para a execução desse trabalho seguiu-se conforme a Figura 3.1 abaixo.

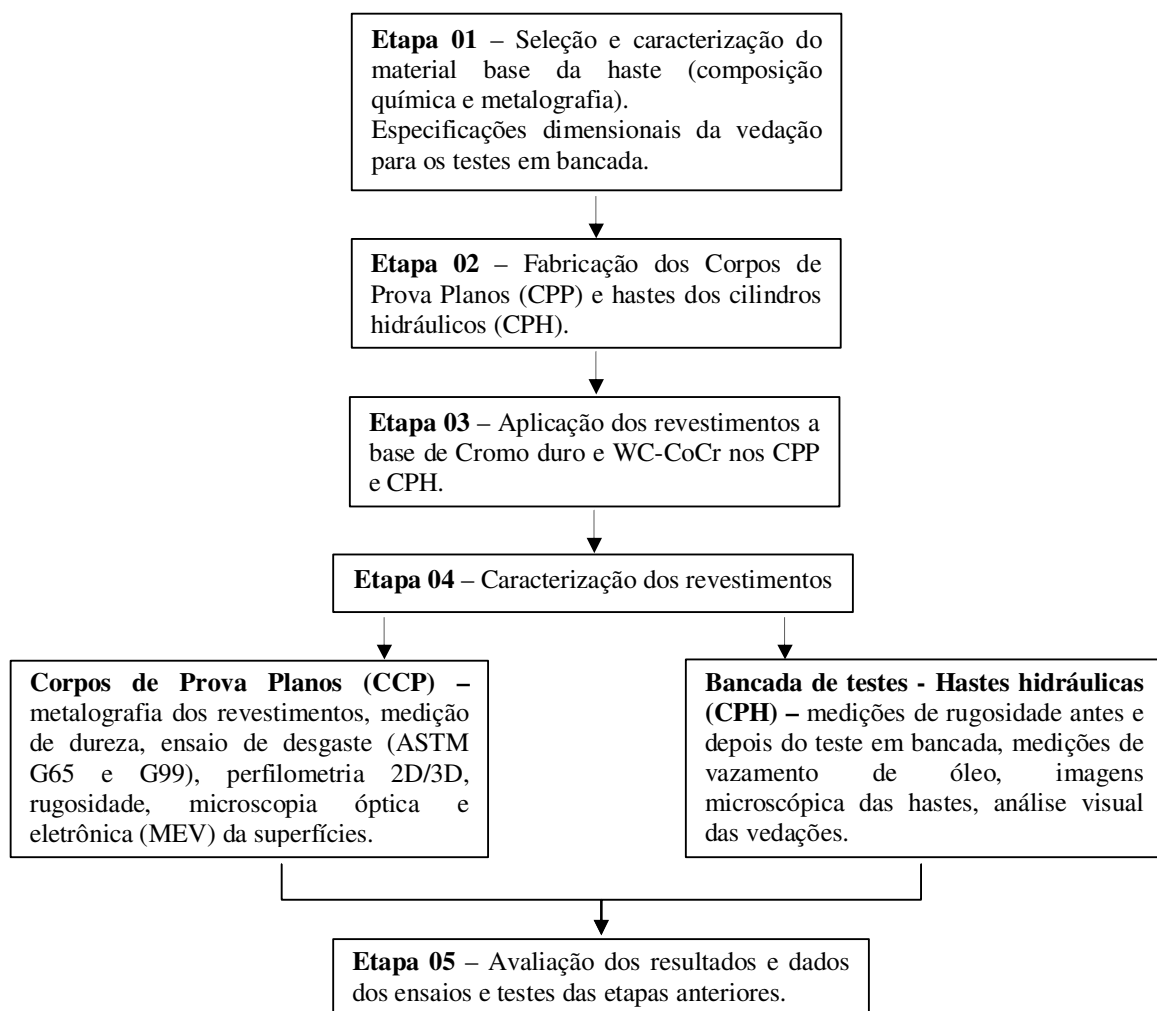


Figura 3.1 Etapas da metodologia utilizada para o desenvolvimento experimental

### 3.1 Seleção do material das hastes

Conforme Linsingen (2008), os principais materiais utilizados para a fabricação das hastes de cilindros hidráulicos são aços com teor de carbono de 0,4 a 0,7%. Visando a representatividade que o aço AISI/SAE 1045 possui na construção de hastes hidráulicas, optou-se pela sua utilização, tanto para os testes experimentais em bancada, quanto para os ensaios preliminares em CPP. Todos os corpos de prova utilizados para a caracterização foram retirados de uma barra trefilada de aço AISI/SAE 1045.

#### 3.1.1 Análise química e metalografia

Tendo referencia do material que comumente é utilizado na fabricação das hastes hidráulicas segundo a literatura técnica, foram realizadas as análises desse material de base, através das técnicas de composição química, metalográfica e medição de dureza do substrato. As análises, tanto de composição química, metalográficas e dureza do substrato foram feitas na Indústria Metalúrgica Spillere SA. Para a análise da composição química do material foi utilizado um espectrômetro modelo SPECTROMAXx, como mostra a Figura 3.1.



Figura 3.1 Espectrômetro utilizado para análise química do material base (substrato).

No primeiro momento foi feita a limpeza da amostra com álcool isopropílico para a retirada de qualquer substância que viesse interferir nos resultados da análise química. Após esse processo foram realizados os procedimentos de regulagem do equipamento e em seguida à análise. A análise revelou os seguintes percentuais dos elementos químicos de composição, Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Composição química do metal base utilizada para a confecção dos corpos de prova e hastes hidráulicas.

Composição Química [% em peso]								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
0,45	0,16	0,70	0,013	0,03	0,11	0,093	0,14	98,2

A caracterização microestrutural das amostras foi desenvolvida com um auxílio da microscopia ótica, e teve os seguintes procedimentos:

1. Usinagem e retífica da amostra para a otimização do tempo de preparação metalográfica;
2. Lixamento e polimento da amostra, obtendo uma superfície com  $R_a$  de 0,3  $\mu\text{m}$ ;
3. Ataque químico da amostra com nital 1%.

Após o ataque químico obteve-se as imagens. As estruturas foram capturadas através de um microscópio ótico, modelo BX 51 M do fabricante Olympus, pertencente ao laboratório de caracterização microestrutural (LACAMI), da Faculdade SATC.

A microestrutura do material no estado de fornecimento, utilizada como base para os revestimentos é apresentada na Figura 3.2.

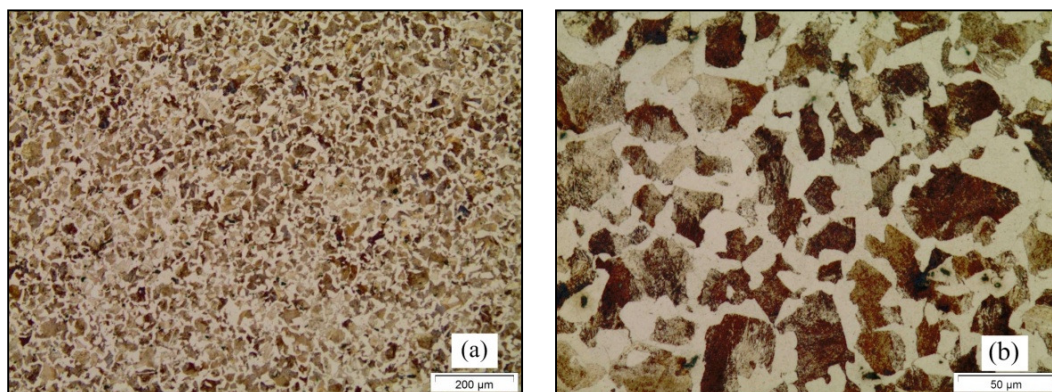


Figura 3.2 Micrografia do aço AISI/SAE 1045. Reagente: Nital 1%

A imagem metalográfica mostra uma estrutura com os grãos de perlita bem uniformes (grãos equiaxiais), caracterizando uma estrutura que não foi deformada nessa região durante o processo de fabricação. Pode-se ver a matriz ferrítica, a parte clara, e os grãos de perlita, a parte escura.

Estima-se pelo tamanho de grão que o aço AISI/SAE 1045 da amostra foi recozido. Percebe-se que os grãos obtidos no recozimento são menores que no estado bruto. Isso se deve à recristalização que acontece ao fim da austenitização do processo de

recozimento. O surgimento de novos e pequenos grãos faz com que se tenham grãos menores que no estado bruto. Um subsequente crescimento de grãos aconteceria caso o tempo de recozimento fosse estendido. Após a metalografia o ensaio de dureza Vickers foi realizado, obtendo-se uma dureza média de 267 HV.

### 3.2 Especificação da vedação para os ensaios em bancada de teste

Para a escolha da geometria do elemento de vedação a ser utilizado e conseqüentemente ao projeto da bancada de teste, foram-se baseados em algumas normas aplicadas aos cilindros hidráulicos, ou equipamentos semelhantes. As normas cobrem as principais categorias de projeto de vedação que são regularmente usados. Existem três normas referentes aos cilindros hidráulicos, cada uma abrange uma das categorias de configuração comuns para vedações.

A norma ISO 5597:1987 determina os detalhes dos alojamentos de vedação para os projetos com elastômeros, com perfil em U. Essa norma é utilizada tanto para o pistão, quanto para a haste do cilindro hidráulico, com diâmetros do pistão de 16 - 500 mm e haste variando de 6 - 360 mm. A norma ISO 6547:1981 especifica os alojamentos das vedações, com perfil em T, que são usadas nas vedações dos pistões dos cilindros. Abrange diâmetros dos cilindros de 25-500 mm. Já a ISO 7425 fornece dados referentes aos alojamentos para vedações de perfilados com elementos plásticos, com um elastômero (anel de borracha nitrílica - NBR) e as variantes que podem ter elastômeros ativadores retangulares. Há duas partes complementares à norma - Parte 1, publicado em 1988, e parte 2, publicada em 1989.

Na Figura 3.3 é definido a configuração dos alojamentos e os modelos da vedação e guias das hastes de cilindros hidráulicos.

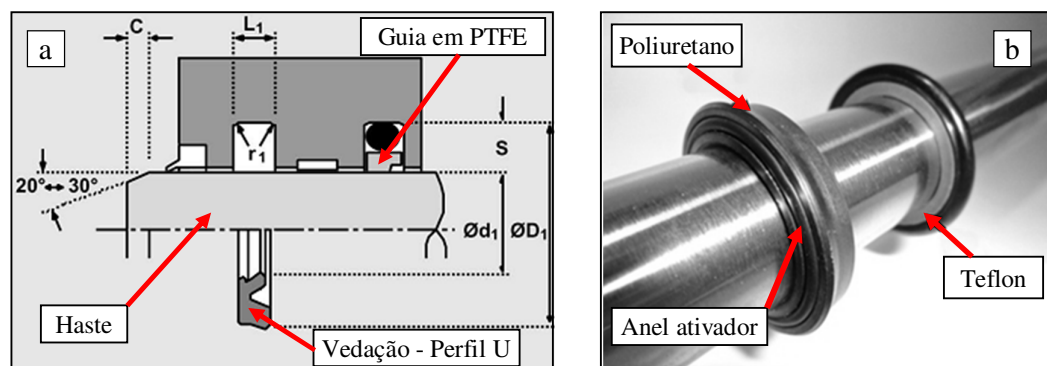


Figura 3.3 Vedações hidráulicas. (a) configuração dos alojamentos para vedações elastoméricas e guias em PTFE e (b) vedações utilizadas nos testes.

Onde:

C = distância do chanfro [mm]

$L_1$  = Largura da vedação [mm]

S = Altura do rebaixo da vedação [mm]

$d_1$  = diâmetro da haste [mm]

$D_1$  = Diâmetro externo da vedação [mm]

$r_1$  = Raio do alojamento da vedação [mm]

$\alpha$  = Ângulo do chanfro da haste [graus]

É importante ressaltar que as pressões que serão utilizadas nos testes, para a avaliação do desgaste das hastes e vedações, estarão de acordo com a pressão máxima determinada para cada material de vedação utilizado (dados de fabricante), e também em concordância com que a norma estabelece para cada projeto de vedação. Segue na Tabela 3.2, as especificações para cada tipo de vedação.

Tabela 3.2 Dados técnicos das vedações e guias utilizados, segundo Parker (2011).

Guia perfil retangular		Vedação perfil em U	
Material padrão	PTFE (40% bronze)	Material padrão	Poliuretano
-----	-----	Material ativador	Nitrílica – 70 shore A
-----	-----	Pressão máx. trabalho	500 bar
Temp. operação	- 40 °C a 121 °C	Temp. operação	- 35 °C a 110 °C
Velocidade máxima	1,5 m/s	Velocidade máxima	0,5 m/s

### 3.3 Preparação dos corpos de prova planos (CPP)

Visando-se estabelecer um comparativo quanto à microestrutura, resistência ao desgaste, coeficiente de atrito, dureza e rugosidade entre os revestimentos, foram necessários à preparação de corpos de prova, onde estes foram retirados de uma barra trefilada de aço AISI/SAE 1045. No primeiro momento foram preparados os CPP (análise em superfície plana) com dimensões de 30x30 mm empregados na caracterização microestrutural e microdureza Vickers (HV) dos revestimentos, conforme Figura 3.4 (a). Todavia para avaliar a resistência ao desgaste abrasivo/adesivo, coeficiente de atrito e medições de rugosidade, foram fabricados corpos de prova, conforme a Figura 3.4 (b) e (c) e Tabela 3.3.

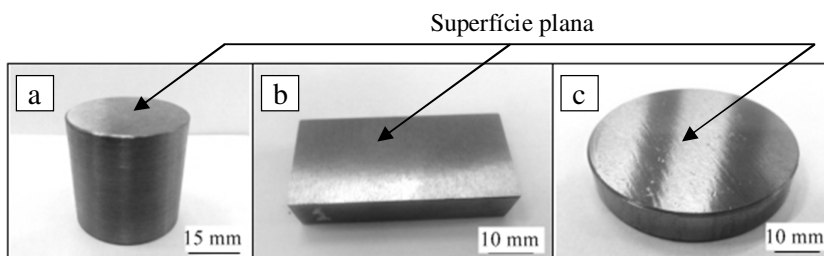


Figura 3.4 CPP utilizados na caracterização dos revestimentos.

Todos os corpos de prova foram retificados a fim de estabelecer uma condição superficial e de planicidade inicial, com o intuito de facilitar o jateamento abrasivo no revestimento aspergido, e diminuir o tempo de preparação da superfície no revestimento eletrodepositado. Para atender essa especificação da rugosidade dos corpos de prova foi utilizada uma retífica plana tangencial modelo P36, fabricado pela indústria MELLFABER – MELLO, aplicando um disco modelo FE 38 a 60 K, fabricado pela NORTON, conferindo após o processo uma rugosidade  $R_a$  de 1,25  $\mu\text{m}$ .

Tabela 3.3 Quantidade dos corpos de prova utilizados nos ensaios de desgaste, metalografia e dureza.

Nº dos CPP	Quant.	Formato dos CPP e revestimentos	Ensaio/medições
01, 02, 03, 04, 05	05	Cilíndrico $\varnothing$ 52 mm x 08 mm (WC10Co4Cr) – Fig. 3.4 (c)	Desgaste (ASTM G99) e Perfilometria
06, 07, 08, 09, 10	05	Cilíndrico $\varnothing$ 52 mm x 08 mm (Cromo duro) – Fig. 3.4 (c)	Desgaste (ASTM G99) e Perfilometria
11,12, 13, 14, 15	05	Retangular 11 x 30 x 52 mm (WC10Co4Cr) – Fig. 3.4 (b)	Desgaste (ASTM G65) e Rugosidade
16, 17, 18, 19, 20	05	Retangular 11 x 30 x 52 mm (Cromo duro) – Fig. 3.4 (b)	Desgaste (ASTM G65) e Rugosidade

### 3.4 Preparação das hastes dos cilindros hidráulicos (CPH)

Com base nas pesquisas realizadas pelos autores Degennaro e Tweed (1999), pesquisas em campo com fornecedores de hastes e, direcionando o custo total para o projeto da bancada de testes e deposição dos revestimentos, entre outros fatores, foram empregados corpos de prova (CPH) com diâmetro de 25 x 400 mm de comprimento, conforme Figura 3.5. De acordo com os parâmetros a serem avaliados na etapa 4 como: quantificação da fuga de óleo, perfis de rugosidade e análise macroscópica das hastes, essas medidas serão suficientemente adequadas.

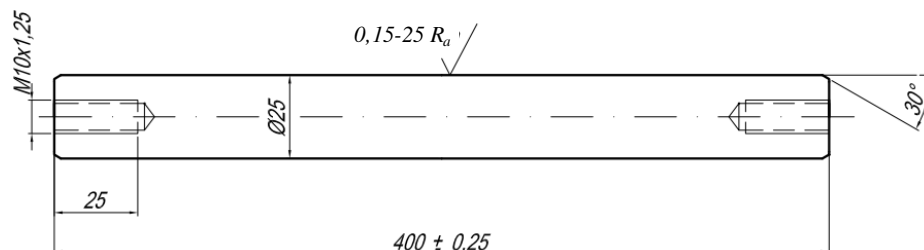


Figura 3.5 Haste dos cilindros hidráulicos

De acordo com os processos de revestimentos estudados, foram confeccionadas hastes com diâmetro nominal de 24,8 mm, uma vez que a deposição via por aspersão térmica HVOF, devem compreender espessuras da ordem de 0,05 a 0,2 mm, devido às tensões compressivas que favorece o deslocamento. Entretanto, para a deposição do cromo duro foram fabricadas CPH com diâmetro nominal de 24,6 mm, sabendo que os revestimentos de cromo duro não podem ser superiores a 20  $\mu\text{m}$ . Os parâmetros de rugosidade identificados na Figura 3.5 representam o acabamento final da haste.

Com objetivo de conseguir uma resposta representativa frente aos parâmetros definidos na Etapa 4, a organização dos testes em bancada seguiu-se conforme a Tab. 3.4.

Tabela 3.4 Quantidade de hastes utilizadas nos testes em bancada

Nº CPH	Quant.	Revestimentos
08	01	Teste preliminar - Cromo duro
15	01	Teste preliminar - WC-CoCr
01, 02, 03	03	Cromo duro
11, 12, 13	03	WC-CoCr

Para a definição e ajustes de parâmetros de bancada como, velocidade, pressão de trabalho e distância deslocada, foram confeccionados as hastes adicionais (08 e 15).

### 3.5 Aplicação dos revestimentos nos CPP e CPH

O revestimento em cromo duro industrial foi depositado pela empresa Cromocil – Cromo Duro Equipamentos Hidráulicos LTDA. Todavia, o revestimento com material de adição a base de carboneto de tungstênio (WC-CoCr) foi depositado pela empresa Rijeza – Indústria Metalúrgica LTDA.

Como o objetivo desse trabalho é estabelecer um comparativo quanto as principais propriedades físico-mecânicas do revestimento aspergido em relação ao eletrodepositado, será descrito apenas o processo via aspersão térmica com foco na técnica de alta velocidade (HVOF).

#### 3.5.1 Deposição do WC-CrCr pelo processo HVOF

O processo de aspersão térmica por HVOF possui alguns procedimentos que devem ser cuidadosamente executados, a fim de se obter um bom revestimento. Um dos procedimentos que retrata diretamente a qualidade da adesão do revestimento ao material base é a preparação da superfície, que em seguida é descrito.



### Preparação da superfície

Para atender as especificações quanto à deposição do revestimento aspergido (ancoramento mecânico e limpeza), os corpos de prova foram jateados com óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) granulometria 24 (mesh), fornecido pelo fabricante ELFUSA. O jateamento foi feito em uma cabine, com umidade relativa controlada (aprox. 59%), como mostra a Figura 3.6 (a) e (b).

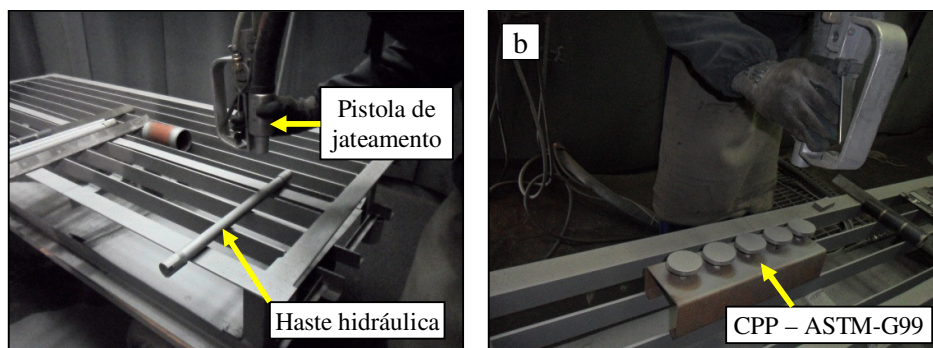


Figura 3.6 Processo de jateamento com óxido de alumínio nos CPP e CPH.

Após o processo de jateamento as medições de rugosidade foram realizadas, conferindo ao substrato um parâmetro médio de rugosidade  $R_a$  de  $6,4 \mu\text{m}$  de acordo com medição efetuada com rugosímetro digital TR 110 – Time Group. Vale lembrar que o controle da rugosidade do substrato é de extrema importância, pois auxilia diretamente no ancoramento mecânico do revestimento.

A fonte de energia utilizada no processo de impulsão das partículas de óxido de alumínio ao substrato foi o ar comprimido. Os parâmetros ajustados no jateamento foram: pressão de 6,2 bar ajustada para o ar comprimido, 250 mm de distância entre pistola e os corpos de prova com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e 59% de umidade relativa.

Após o processo de jateamento, os CPP e os CPH, foram levados para a cabine de aspersão térmica com intuito de fazer o pré-aquecimento e conseqüentemente a deposição do revestimento. Os corpos de prova foram submetidos ao pré-aquecimento com a própria tocha de aspersão térmica, com temperatura máxima de  $120^\circ\text{C}$ , registrada por um termômetro digital a laser, modelo MX-2 16 PT, fabricado pela RAYTEC.

### Equipamentos e parâmetros do processo de HVOF

Para o processo de deposição do revestimento por HVOF, foi empregado um equipamento HP/HVOF JP-5000, fabricado pela Tafa Inc, divisão da Praxair Surface

Technologies Inc. Segundo o fabricante, esse equipamento pode atingir chamas com altíssimas velocidades (1000 a 1200 m/s) e temperatura relativamente baixa até (2800°C), empregando o combustível líquido, diferentemente dos outros processos citados de aspersão, que a chama pode atingir maiores temperaturas.

A seleção dos parâmetros do processo para a realização da aspersão térmica orientou-se pela necessidade de se produzir revestimentos que atendessem algumas exigências operacionais a que estariam submetidas às hastes dos cilindros hidráulicos, alta resistência ao desgaste abrasivo, baixas porosidades e boa adesão.

A metodologia executada para a deposição do revestimento foi orientada de duas maneiras diferentes. A primeira, a deposição dos CPP e a segunda para os CPH.

Na aspersão dos CPP, foi trabalhado com um sistema fixador, conforme como mostra a Figura 3.7 (a) e (b). Já os CPH pela necessidade de ganhar espessura no seu diâmetro, foram fixados em uma placa do torno conforme Figura 3.7 (c).

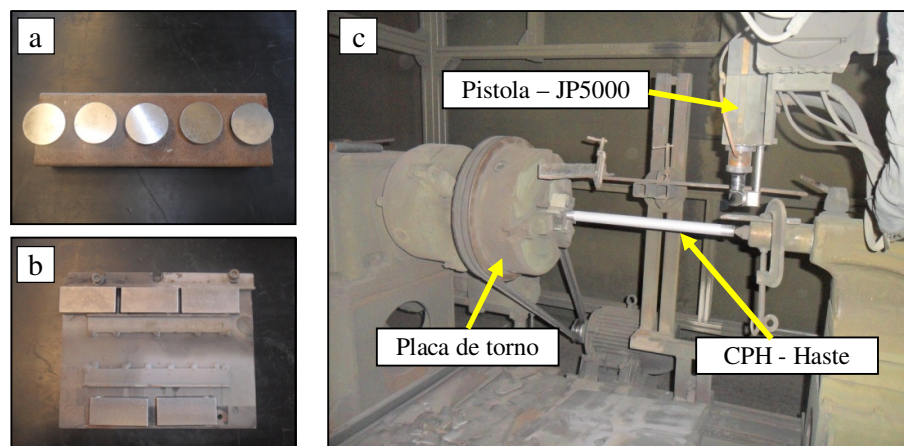


Figura 3.7 Dispositivos utilizados durante a aspersão térmica dos corpos de prova

A pistola para aspersão térmica modelo HP/HVOF JP-5000, é fixada em um braço de um equipamento CNC (*Controle Numérico Computadorizado*), permitindo controlar de forma de linear o deslocamento da tocha nos três eixos (X, Y, Z), através de servomotores e atuadores pneumáticos. É importante lembrar que o controle de velocidade da pistola, distância da pistola em relação ao corpo de prova e ângulo de deposição são parâmetros de extrema importância para a obtenção de um bom revestimento.

Os parâmetros de aspersão expressos na Tabela 3.5 foram determinados segundo informações do catálogo da SULZER METCO e da engenharia de processo da Rijeza – Indústria Metalúrgica LTDA. O pó utilizado no processo de aspersão térmica HVOF, foi o

WOKA 3653 (WC-10Co4Cr), fornecido pela empresa HARRIS BRASTAK SOLDAS ESPECIAIS S.A.

Tabela 3.5 Parâmetros da aspersão utilizados na deposição do WC-CoCr.

Descrição	Unidades	Descrição	Unidades
Tamanho do canhão	152,4 mm	Pressão do oxigênio	9,7 ± 0,3 bar
Distância da pistola ao corpo de prova	305 mm	Vazão do oxigênio	72,59 l/h
Taxa de alimentação	90 g/min	Pressão do querosene	9,1 ± 0,3 bar
Pressão do nitrogênio	15 ± 1 bar	Vazão do querosene	23,2 l/h
Vazão do nitrogênio	311,48 ± 0,3 l/h	Pressão da combustão	7,0 ± 0,3 bar

O equipamento da TAFE/PRAXAIR, conforme mostra a Figura 3.8 é empregado para operar no processo HVOF utilizando-se a pistola do grupo JP, que tem como finalidade o controle da taxa de alimentação do pó durante a aspersão. Esse equipamento indica os principais parâmetros que devem ser controlados nesse processo como: pressão e vazão do oxigênio e combustível, vazão do pó da aspersão, pressão de combustão, entre outros. Além disso, esse equipamento possui um dispositivo de controle/visualização para a reposição de material de adição.

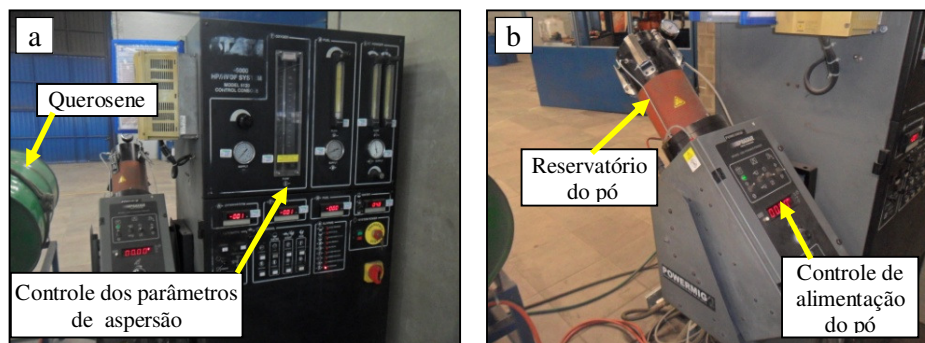


Figura 3.8 Unidade de controle TAFE-HP/HVOF – JP5000. (a) detalhe do controlador dos parâmetros e combustível e (b) reservatório do material de adição.

Na Tabela 3.6 é apresentada a composição química do material de adição utilizado, segundo a certificação do material fornecido pela SUZER METCO (US) Inc. Os tamanhos de partículas para essa composição é de  $45 \pm 11 \mu\text{m}$  e sua densidade varia de 4,6 a 5,2  $\text{g/cm}^3$ .

Tabela 3.6 Composição química do pó utilizado na aspersão

Composição Química [% em peso]					Densidade [ $\text{g/cm}^3$ ]	Tamanho [ $\mu\text{m}$ ]
W	Fe	Cr	Co	C		
80,76	0,12	4,11	9,74	5,27	4,8 a 5,0	45 ± 11

Para a deposição dos revestimentos sobre os corpos de prova, foram ajustados alguns parâmetros no CNC, como a velocidade de deslocamento da tocha, distância da tocha aos corpos de prova, número de passadas sobre os corpos de prova e a rotação da placa do torno para os CPH (Figura 3.9).

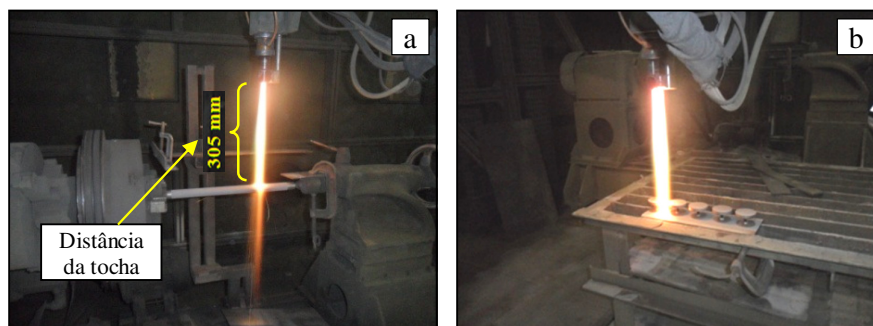


Figura 3.9 Aspersão térmica HVOF, nos corpos de prova. (a) hastes hidráulicas. (b) corpos de prova planos.

Após o processo de deposição do revestimento em WC-CoCr, as rugosidades novamente foram medidas, ficando essas com um  $R_a$  médio de  $4,89 \mu\text{m}$ . O objetivo dessas medições foi confirmar se os parâmetros de interesse a essa característica, como distancia da tocha, pressão de ar comprimido e velocidade de deposição, foram bem ajustados antes e durante o processo. Ao término desse processo os corpos de prova de WC-CoCr receberam também um tratamento final da superfície pelas técnicas de lixamento e polimento, sendo necessários em aplicados de hastes de cilindros hidráulicos. Esse procedimento foi auxiliado por um conjunto polidor, como mostrado na Figura 3.10.

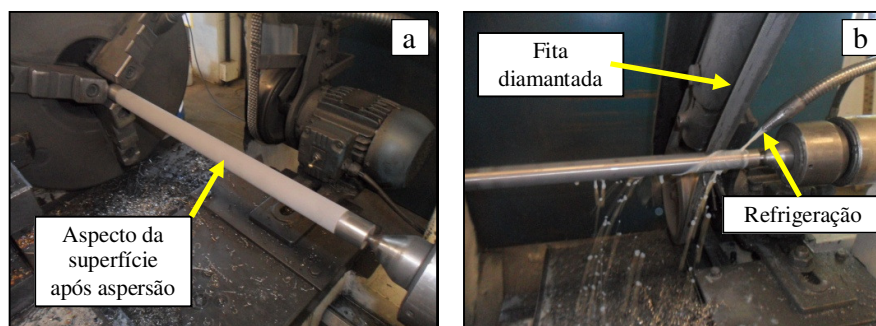


Figura 3.10 Processo de acabamento final do revestimento (polimento). (a) aspecto anterior ao polimento e (b) componentes utilizados no polimento.

Já para os CPP, o polimento foi executado de forma manual. Ao final do processo de polimento os corpos de prova adquiriram uma rugosidade  $R_a$  média de  $0,2 \mu\text{m}$ , ficando essa de acordo com que a literatura aconselha, que é abaixo de  $0,4 \mu\text{m}$ .

### 3.6 Caracterização dos revestimentos para os CPP

Nessa etapa os revestimentos foram caracterizados quanto à microestrutura, medições de dureza Vickers, resistência ao desgaste e análise de superfície feita através de medições de rugosidade e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

#### 3.6.1 Preparação metalográfica

A etapa de preparação para a metalografia dos revestimentos é uma das fases mais importantes, e por isso os cuidados com os equipamentos e procedimentos devem ser bem avaliados. Esse procedimento uma vez bem feito possibilitará a observação da microestrutura do material, bem como os possíveis defeitos que poderão estar presentes.

O procedimento utilizado para a preparação das amostras foi conduzido em duas ou três etapas que são: seccionamento (seção transversal), lixamento e/ou polimento. É muito importante que todos esses procedimentos sejam feitos cuidadosamente para que imperfeições no revestimento possam não ser interpretadas como defeitos nas suas camadas.

#### 3.6.2 Medições de microdureza Vickers

Após a preparação metalográfica, os perfis de microdureza Vickers  $HV_{0.01}$  foram construídos com auxílio de um microdurômetro modelo HMV-02 TADW - Micro Hardness Tester - SHIMADZU, e as imagens foram capturadas com ampliações de 200 e 500x.

Baseado na norma ASTM 384/89 foi utilizado uma pirâmide de diamante como penetrador e carga de 98,07 mN ( $HV_{0.01}$ ) e um tempo de penetração (carga) de 15 segundos. As medidas foram tomadas em uma seção transversal de cada CPP. A primeira medida foi realizada a 4  $\mu\text{m}$  da superfície e a partir daí com um avanço perpendicular ao núcleo com espaçamentos de 12 a 14  $\mu\text{m}$  até a profundidade de 150  $\mu\text{m}$  no caso do revestimento WC-CoCr. O espaçamento lateral a cada perfil de dureza foi de aproximadamente de 200  $\mu\text{m}$ . Esse procedimento repetido por três vezes teve como objetivo determinar com maior precisão a distribuição das durezas dos revestimentos em cada corpo de prova. Em seguida os resultados foram inseridos em um gráfico para a comparação entre os revestimentos por aspersão e eletrodeposição.

### 3.6.3 Microscopia de varredura eletrônica (MEV)

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada no centro de tecnologia cerâmica do SENAI/Criciúma-SC. O objetivo da imagem em MEV foi caracterizar as superfícies das trilhas, não possível com a técnica de microscopia ótica. Com a técnica por MEV, é possível quantificar e qualificar os microdefeitos e os elementos da liga presentes via análise EDS (espectroscopia de energia dispersiva). Na microscopia foi utilizado um microscópio JEOL – modelo JSM – 6390LV. A Figura 3.11 mostra o equipamento utilizado.

Essa primeira análise no MEV tem como objetivo observar os micromecanismos abrasivos, ocorridos após o ensaio de desgaste abrasivo, além disso, características do revestimento aspergido como porosidade, não muito bem definida pela microscopia ótica. O recurso de EDS foi utilizado para obter as espectrografias dos elementos de liga presentes na superfície e defeitos encontrados após o ensaio de desgaste.



Figura 3.11 Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado na caracterização do ensaio de desgaste.

### 3.6.4 Ensaio de desgaste e perfilometria

Com o objetivo de caracterizar as propriedades de resistência ao desgaste foram empregadas duas técnicas distintas: ensaio de desgaste por roda de borracha e areia (ASTM G65-00) e ensaio de desgaste pino sobre disco (ASTM G99-04). Os resultados frente ao ensaio de roda de borracha e areia foram caracterizados pela perda de volume e medições de rugosidade. No ensaio de pino sobre disco a caracterização foi auxiliada pelas medições de perfilometria e medição do coeficiente de atrito.

### Ensaio de roda de borracha e areia “*Rubber Wheel*”

Com o ensaio de abrasão a três corpos definido pela ASTM G65-00, ou borracha e areia, se determina de maneira simples, a resistência ao desgaste abrasivo dos materiais pela medida de perda de massa. O abrasivo normalmente utilizado é areia de quartzo arredondada, conforme especificações de norma.

O princípio de funcionamento deste equipamento consiste em desgastar um corpo de prova padronizado com areia de tamanho de grão e composição controlada. O abrasivo é introduzido entre o corpo de prova e um anel de borracha com dureza conhecida, provocando o riscamento. Neste ensaio o corpo de prova é pressionado contra a roda de borracha que está girando, por meio de um braço de alavanca com peso especificado, enquanto que o fluxo de areia arranca material da superfície do corpo de prova é controlado a uma vazão de 300 a 400 g/min. Na Figura 3.12 é representada a disposição dos componentes utilizados no ensaio e equipamento de forma esquemática.

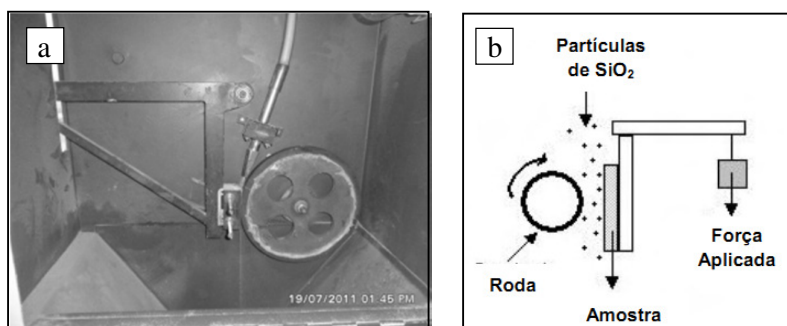


Figura 3.12 Ensaio de desgaste conforme ASTM G65-00. (a) equipamento utilizado no ensaio e (b) forma esquemática do ensaio.

Antes da execução dos ensaios, alguns parâmetros foram ajustados a fim de atender os mínimos requisitos, de acordo com os tipos de revestimentos que seriam ensaiados. Na Tabela 3.7 são representados os valores de cada parâmetro utilizado nesse ensaio, conforme ASTM G65-00.

Tabela 3.7 Parâmetros do ensaio de desgaste (Rubber Wheel)

Dados do ensaio	Valores	Dados do ensaio	Valores
Diâmetro da roda de borracha	228,6 mm	Granulometria da areia	0,212 a 0,300 mm
Tempo do ensaio	30 min	Vazão de areia (SiO <sub>2</sub> )	320 g/min
Rotação da roda de borracha	200 rpm	Carga aplicada	130 N

Para a execução dos ensaios, os corpos de prova foram limpos em álcool 92,8 °GL, utilizando uma lavadora ultrassônica CLEANER modelo USC 750, do fabricante UNIQUE. A cada término do ensaio, os CPP novamente foram limpos e em seguida secos e pesados, em balança semi-analítica com quatro casas de precisão, com capacidade máxima de 200 g. A resposta frente ao desgaste foi obtida a partir de cálculos estabelecidos pela norma, com os respectivos desvios e erros, através das Equações 3.1 e 3.2.

$$\text{Perda de volume (VL)} = \frac{\text{perda de massa (LM)}}{\text{densidade } (\rho)} \times 1000 \left[ \text{mm}^3 \right] \quad (3.1)$$

Onde:

Perda de massa = [g]

Densidade = [g/cm<sup>3</sup>]

Ainda, de acordo com a norma, tendo em vista o desgaste da roda de borracha que ocorre durante os ensaios, é realizado um ajuste no valor calculado pela equação (3.2), como segue:

$$\text{AVL} = \text{medição do volume perdido} \times \frac{228,6 \text{ mm}}{\text{diâmetro da roda após o uso}} \left[ \text{mm}^3 \right] \quad (3.2)$$

Onde:

AVL = ajuste do volume perdido [mm<sup>3</sup>]

Após a quantificação do volume perdido, as regiões das superfícies desgastadas foram também caracterizadas com auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV). Para análise dos defeitos de forma qualitativa e composição química, foi empregada a técnica por espectros de energia dispersiva (EDS).

#### Ensaio de pino sobre disco “Pin on Disc”

A norma que regulamenta este ensaio é designada pela ASTM como G 99 – 95. Esta norma fornece um método padronizado, em nível de laboratório, para a execução dos ensaios de desgaste de materiais, durante o deslizamento, usando a configuração pino sobre disco (Figura 3.13), onde as letras A, B e C representam respectivamente o pino, o corpo de prova e força aplicada. A superfície do disco deve ser finamente usinada de modo que fique relativamente lisa, recomendado um valor de rugosidade R<sub>a</sub> menor que 0,8 µm.



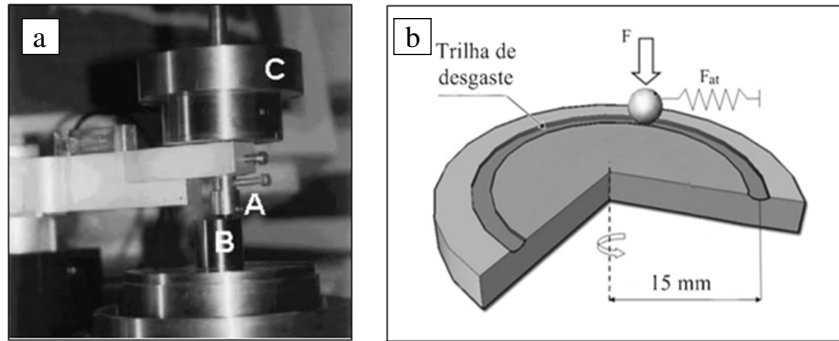


Figura 3.13 Ensaio de desgaste conforme ASTM G99-04. (a) imagem do equipamento de medida de desgaste por deslizamento e (b) forma esquemática do ensaio.

Baseando-se na norma ASTM G99-04, durante a execução desse ensaio foi utilizado um pino de carbeto de tungstênio com dureza média medida de 1528 HV, aplicado a esse uma força normal ( $F_n$ ) de 30N. As dimensões do pino utilizado foram de 3 mm de diâmetro com 15 mm de comprimento. Durante o ensaio a velocidade linear produzida foi de 0,47m/s a um raio de 15 mm, chegando-se a um percurso total de 500 m. As medidas de perda de volume da amostra, largura e profundidade do caminho de desgaste produzido por este ensaio de desgaste por fricção (Ball on Disk) foram obtidas mediante a perfilometria, descritas a seguir.

O ensaio empregado de perfilometria foi no realizado laboratório de Laser e Ótica do IF – Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O equipamento utilizado foi um perfilômetro modelo XP-2 do fabricante Ambios Technology. Esse equipamento possui um software chamado Stylos Profiler que permite a visualização e controle em tempo real de alguns parâmetros como, comprimento de varredura e força aplicada na agulha de medição. Depois de feita a varredura de medição, a área afetada pelo desgaste é calculada de acordo com os pontos fornecidos pelo *software* do perfilômetro (Figura 3.14) e estudados através de um editor gráfico.

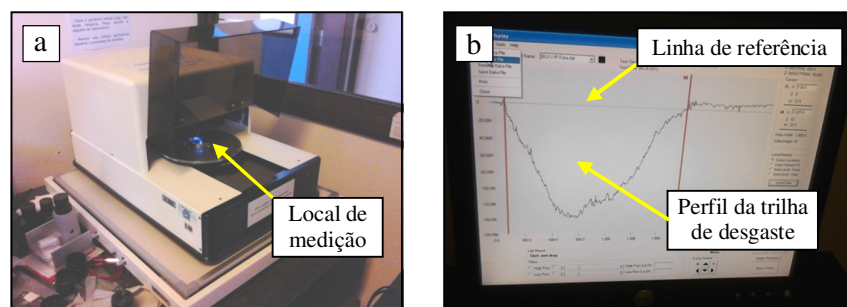


Figura 3.14 Equipamento utilizado para a medição da trilha de desgaste. (a) perfilômetro Ambios Technology XP-2 e (b) software de aquisição dos perfis medidos.

Com auxílio do *software True Surf Workstation*, foi elaborada a metodologia para estimar o volume de desgaste. A metodologia foi composta pelas seguintes etapas: seleção dos parâmetros do perfilômetro: geração da superfície em 2D através do software e seleção da área da trilha de desgaste com o auxílio do *software*, para a obtenção da área desgastada e obtenção do volume, baseado no raio médio e o comprimento total da trilha.

Para os corpos de prova de WC-CoCr, foram utilizados um comprimento de varredura de 2 mm com uma velocidade de 0,5 m/s e carga de 0,1 mg. Já para os corpos de prova de cromo duro, o comprimento de varredura foi de 3 mm devido a maior largura da trilha, percebida através do microscópio ótico do perfilômetro. Para a obtenção do volume médio desgastado de cada corpo de prova, foram executados cinco medições no decorrer do perímetro da trilha, como mostra a Figura 3.15 (a).

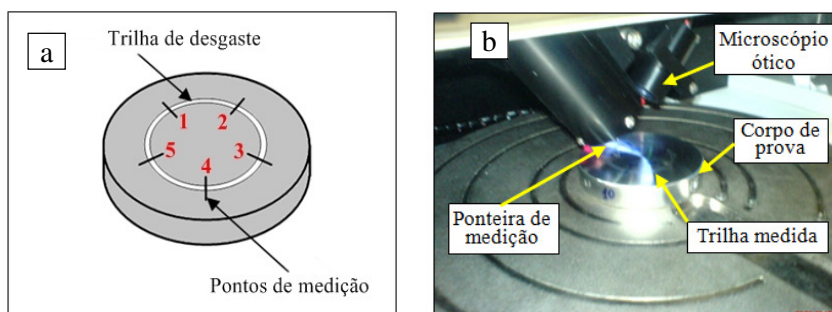


Figura 3.15 Detalhe da medição do perfilômetro. (a) metodologia empregada na medição da trilha e (b) componentes principais de leitura do perfilômetro.

### 3.6.5 Medições de Rugosidade

Para realização da avaliação da superfície dos corpos de prova plano, foi utilizado um rugosímetro modelo SJ-210, fabricado pela Mitutoyo Sul Americana, com os valores registrados em  $\mu\text{m}$ , nos casos do  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_{\text{máx}}$  e % no caso do parâmetro  $R_{\text{mr}}$ . Além de fornecer parâmetros medidos como, rugosidade, área superficial de apoio e volume, esse instrumento tem a vantagem de fornecer os pontos (dados) da medição, através de um *software* específico, dentro de um comprimento de medição selecionado. Na Figura 3.16 é apresentado o rugosímetro utilizado no processo de medição dos CPP e CPH.

Para a seleção do *cut-off* ( $\lambda_c$ ), foi necessário fazer uma medição prévia dos parâmetros de  $R_a$ , visto que inicialmente o perfil de rugosidade (periódico/aperiódico) é desconhecido. Após esse procedimento os valores do  $\lambda_c$  foram alterados para que não ocorresse o mascaramento das medições. O procedimento é simples e está plenamente

descrito na norma ABNT – NBR 6405/88, além de fazer parte do manual de operação da maioria dos equipamentos de medição da textura de superfícies.

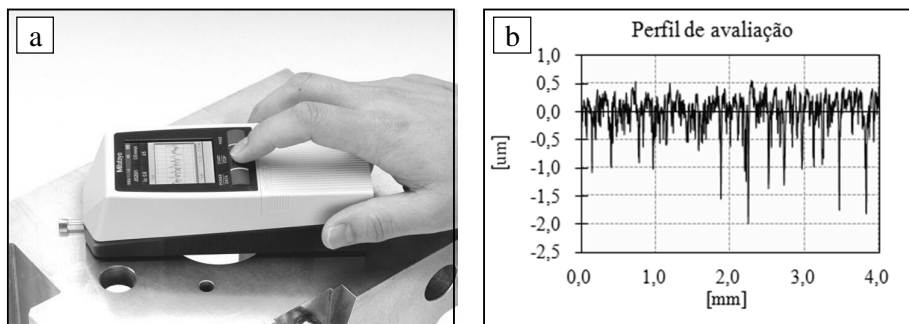


Figura 3.16 Medição de rugosidade. (a) modelo do rugosímetro utilizado nas medições e (b) software de aquisição de dados de rugosidade.

Antes da realização da medição, o rugosímetro foi calibrado usando como base uma textura padrão do próprio instrumento. Todas as medições foram executadas em ambientes que atendessem os requisitos mínimos de temperatura, tanto do aparelho, quanto a padrões gerais metrológicos que em geral é da ordem de 20°C. A cada medição efetuada era feito a limpeza dos corpos de prova, para que outras irregularidades não influenciassem nas medições.

Alguns corpos de prova utilizados nos experimentos deste trabalho se adequaram a um  $\lambda_c$  igual a 0,8mm. A grande maioria utilizou-se do valor de 0,25 mm para a seleção do  $\lambda_c$ , baseado no tipo de superfície adquirido durante o polimento.

### 3.7 Caracterização dos revestimentos para os CPH

Para a execução dos ensaios nas hastas hidráulicas, foi necessário o desenvolvimento de uma bancada de teste que pudesse reproduzir uma condição real de funcionamento das hastas, baseando-se na utilização dos principais parâmetros que estariam envolvidos durante uma condição em serviço. Na sequência serão descritos o funcionamento da bancada e a metodologia utilizada para a execução dos ensaios.

#### 3.7.1 Descrição da bancada de teste

A bancada de teste está inserida no laboratório de sistemas óleo-hidráulicos da Faculdade SATC, que conta com alguns componentes dedicados a pesquisa e também atividades didáticas voltadas à área. Essa bancada foi desenvolvida com intuito de

caracterizar os revestimentos em serviço, quanto aos micromecanismos de desgaste abrasivo e em paralelo a isso, quantificar a fuga de óleo durante os ensaios, a fim de comparar os revestimentos em cromo duro e WC-CoCr. Na Figura 3.17 abaixo é apresentada a bancada utilizada nos ensaios das hastes hidráulicas.

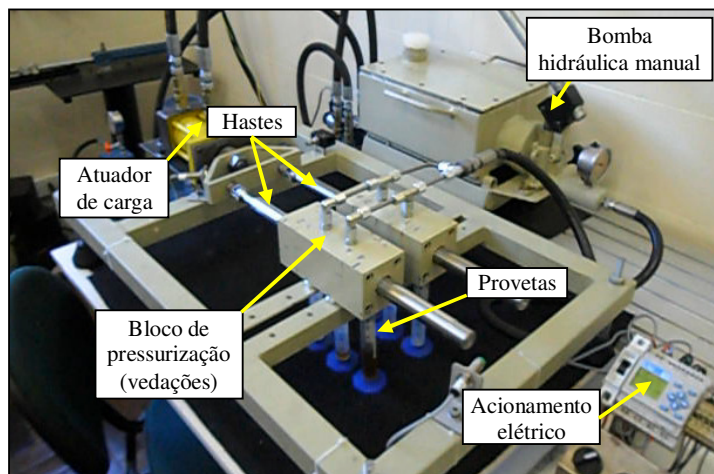


Figura 3.17 Bancada de teste com os seus principais componentes.

A bancada de testes é constituída por um atuador de carga (mestre), que impulsiona simultaneamente duas hastes a cada ensaio, estando essas em condições de extrema pressão hidráulica, ocasionada pelo acionamento da bomba hidráulica manual. A fim de acelerar o processo de desgaste do conjunto haste/vedação, foram empregados blocos com câmeras usinadas, utilizada para amplificar a força da vedação contra a superfície das hastes durante os ensaios.

Para acelerar o processo de modificação de superfície durante os ensaios, ou ainda favorecer o aparecimento dos micromecanismos como microcorte ou microsulcamento nas hastes, o óleo mineral foi contaminado com o mesmo material abrasivo ( $\text{SiO}_2$ ) utilizado nos ensaios de desgaste conforme - ASTM G65-00. Durante os testes foram monitorados de forma manual, as principais condições impostas aos testes, como pressão hidráulica de trabalho, velocidade linear das hastes e temperatura do óleo mineral.

#### Condições e parâmetros para o teste em bancada

Antes da realização dos testes em bancada, foram determinados os valores médios pontuais de rugosidade das hastes, onde aconteceria o deslizamento das vedações, a fim de obter a cada final de testes, as comparações das superfícies. Além disso, antes dos ensaios

houve também a necessidade das medições do diâmetro das vedações, para tentar-se fazer um comparativo quanto às deformações dos perfis de cada elemento de vedação. No item 3.7.2 é detalhado o procedimento utilizado para a medição da rugosidade das hastes.

As condições e parâmetros definidos tiveram base nas especificações dos principais componentes envolvidos, já citados anteriormente. Os principais parâmetros controlados para a realização dos testes em bancada estão informados na Tabela 3.9.

Tabela 3.8 Parâmetros utilizados nos testes das hastes em bancada

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
Pressão de trabalho	75 bar	Número de ciclos	60.000
Velocidade das hastes	40 mm.s <sup>-1</sup>	Viscosidade média do óleo mineral	68 mm <sup>2</sup> /s
Curso deslocado da haste	50 mm	Diâmetro das hastes	25 mm
Temperatura de trabalho	25 a 62 °C	Rugosidade R <sub>a</sub>	0,14 a 0,21 μm

Para o ajuste final desses parâmetros mencionados na Tabela 3.9, foram necessários à fabricação de dois corpos de prova adicionais (CPH) para a realização dos testes chamados preliminares, onde os ajustes de alguns parâmetros, por questões de adaptação da bancada tiveram que ser alterados principalmente o que se refere à pressão hidráulica e a velocidade de deslocamento das hastes.

A configuração das hastes e vedações utilizadas nos testes é representada na Figura 3.18. Para cada bloco, foram utilizados seis vedações do mesmo perfil, definidos anteriormente, Figura 3.18 (b).

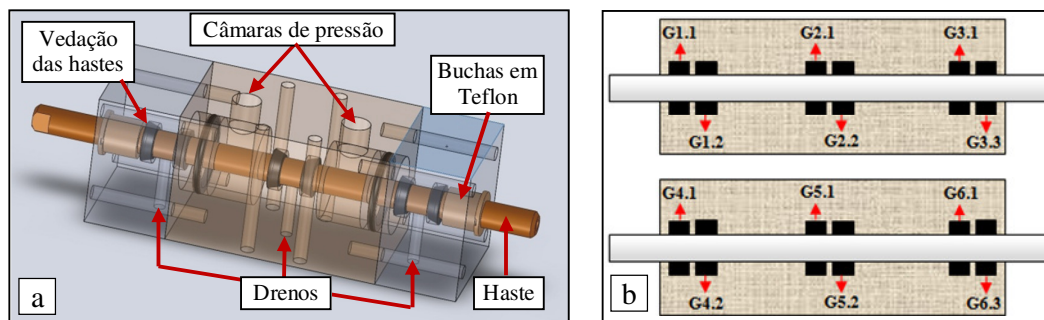


Figura 3.18 Desenho esquemático do bloco condicionador das hastes. (a) vista 3D do bloco e (b) nomenclatura dos elementos de vedação.

Para que o tempo e o deslocamento total das hastes fossem iguais para todos os ensaios, fornecendo resultados confiáveis, foi necessária a elaboração de um pequeno

sistema elétrico de comando, onde a totalização do número de ciclos a cada etapa era definida de forma automática, através do valor ajustado em um contador. Os componentes elétricos utilizados nos testes foram: dois sensores indutivos para a detecção de posição das hastes (um ciclo), uma eletroválvula hidráulica para a movimentação do atuador de carga, um micro controlador programável para o desenvolvimento da lógica de funcionamento, Figura 3.17.

### 3.7.2 Obtenção dos parâmetros de rugosidade

As medições de rugosidade nas hastes também foram realizadas, mediante o auxílio de um rugosímetro como definido no item 3.6.5, executando três medições com defasagem de  $120^\circ$  ao longo do diâmetro das hastes, nas seções visualmente modificadas (sentido de deslizamento. De modo a obter os parâmetros de rugosidade citados anteriormente de forma confiável, foi necessário também iniciar pelo processo de calibração do instrumento e em seguida a seleção do *cut-off*. Em seguida foi necessário elaborar uma base para sustentar as hastes, de forma que durante as medições não houvesse nenhuma interferência externa na medição, como por exemplo, vibração, deslocamento, entre outras. A cada medição, o processo de limpeza da superfície era necessário para minimizar os erros de medição. A Figura 3.19 apresenta o procedimento utilizado para a medição de rugosidade da superfície das hastes hidráulicas.

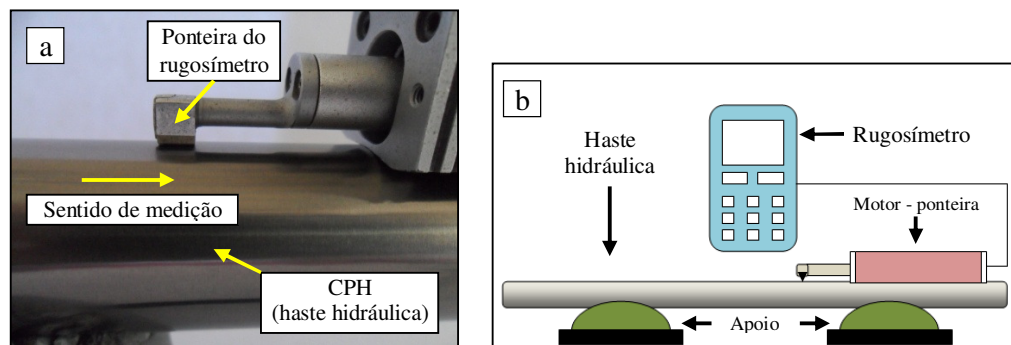


Figura 3.19 Representação da medição de rugosidade dos CPH. (a) detalhe da medição na haste e (b) aparatos de medição

É importante ressaltar que como se trata de superfícies polidas, o *cut-off* ( $\lambda_c$ ) utilizado para avaliar os parâmetros de superfície foi de 0,8 mm, como é determinado ABTN-NBR 6405.

### 3.7.3 Medições de vazamento de óleo

No item 2.2 deste trabalho (Equação 2.2), foi observado que a vazão de fuga (vazamento), possui influência direta na capacidade de carga e alterações de velocidade em um cilindro hidráulico. Esse efeito de vazamento pode ser externo ou interno, e sendo interno é de difícil detecção. No caso dessa medição realizada, o objetivo foi quantificar o vazamento externo de óleo, a fim de caracterizar ainda mais as superfícies onde houve o deslizamento dos elementos de vedação e guias. O objetivo foi verificar se realmente as alterações sugeridas (novo revestimento) puderam contribuir na redução do efeito de vazamento nos cilindros hidráulicos.

O volume de óleo perdido (vazamento) em função das modificações de superfícies de hastes e vedações foi quantificado com auxílio de provetas plásticas com base sextavada, tendo essas capacidades volumétricas e resoluções de 25 e 0,5 ml, respectivamente. Essas provetas foram conectadas nas regiões de dreno da bancada de teste, como mostrado nas Figuras 3.17 e 3.18. As medições do vazamento foram adquiridas ao longo dos 60.000 ciclos, totalizando 6 medições a cada conjunto de hastes, com as paradas a cada 10.000 ciclos.

## 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados adquiridos mediante a utilização da metodologia descrita no capítulo “Procedimento Experimental”, serão apresentados a seguir. Inicialmente são mostrados os resultados experimentais obtidos para os corpos de prova planos (CPP), item 4.1 ao 4.4, e em seguida os dos corpos de prova cilíndricos (CPH), item 4.5 ao 4.6.

### 4.1 Microscopia ótica – microestrutura dos revestimentos

A seguir observa-se uma sequência de micrografias obtidas após a análise por microscopia ótica dos dois revestimentos, Figuras 4.1 e 4.2.

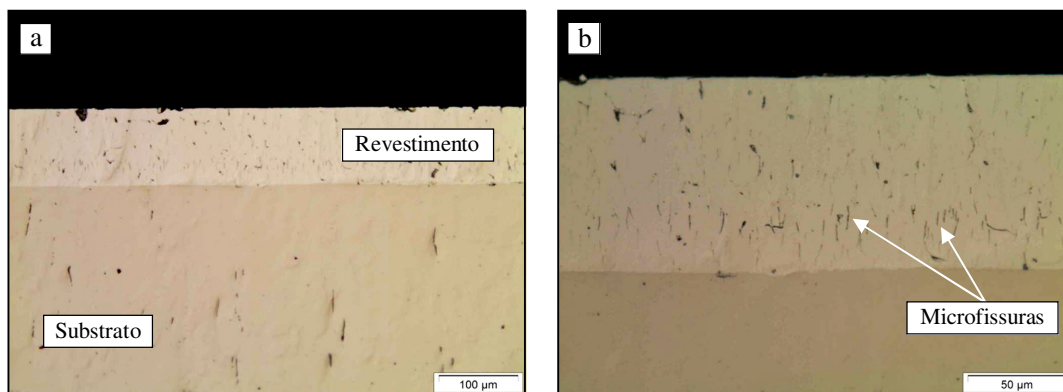


Figura 4.1 Micrografias da camada de cromo duro eletrodepositado. (a) ampliação de 200x e (b) ampliação de 500x.

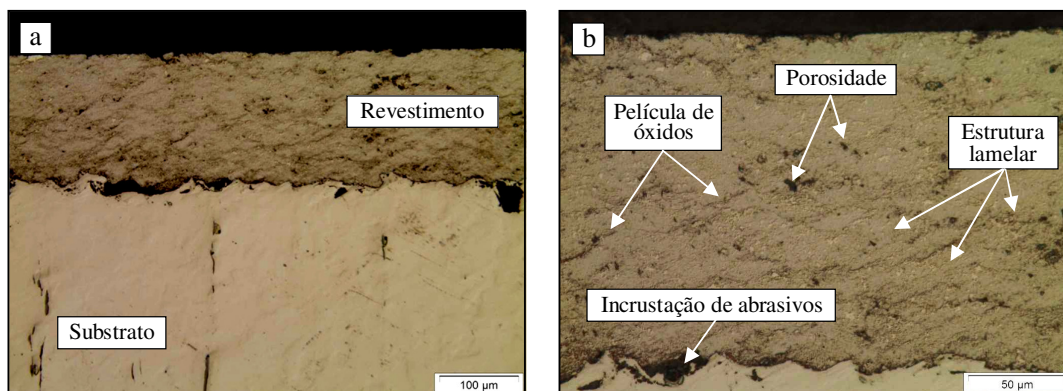


Figura 4.2 Micrografias da camada aspergida com WC-CoCr por HVOF. (a) ampliação de 200x e (b) ampliação de 500x.



Em relação às microestruturas encontradas para o revestimento depositadas por HVOF, foi possível observar a característica lamelar típica de revestimentos aspergidos, contendo em seu contorno uma discreta película de óxidos. Observa-se também que houve incrustações de partículas abrasivas, provavelmente oriundas do processo de jateamento. O nível de porosidade indicado na Figura 4.2 (b) foi avaliado segundo um *software* de análise de imagem (*Image-Tool*). Os revestimentos a base de carboneto de tungstênio apresentaram-se com uma porosidade média de 1,0 % com um desvio padrão de 0,26 %, atestando com isso que os parâmetros de aspensão utilizados foram bem determinados, estando de acordo com os valores apresentados por Pawlowski (2008) e pelo fabricante SULZER METCO – The Coatings Company (porosidade média menor que 1,0%).

Na Figura 4.3 observa-se uma imagem do *software* utilizado para a detecção do nível de porosidade, e seus principais parâmetros ajustados.

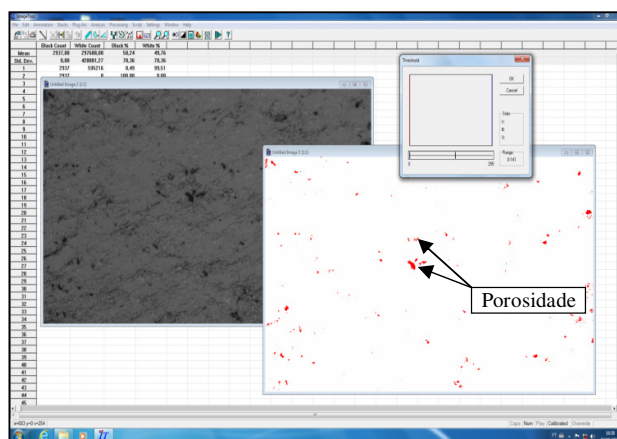


Figura 4.3 Software (*Image-Tool*) utilizado para a quantificação de porosidade.

No revestimento em cromo duro a ocorrência de microfissuras pôde ser observada, como citadas na literatura, e estes defeitos poderão acelerar o processo de oxidação na base do substrato, levando a haste a uma deterioração muito acelerada. Além disso, incrustações no meio do revestimento foram detectadas, porém não foi o objetivo estudar profundamente o processo tradicional de cromo duro, por estar muito difundido. Achou-se melhor tratar dos resultados identificados pelo revestimento alternativo já citado.

Uma das características microestruturais mais importantes de serem analisadas, quando tratamos de revestimentos é a sua espessura. Apesar da uniformidade dos revestimentos estudados neste trabalho, deve-se destacar a desigualdade na espessura entre eles, explicado pela diferença de composição dos materiais e principalmente devido às características intrínsecas de cada processo de deposição utilizado.

Conforme as análises metalográficas, o revestimento de WC-CoCr apresentou espessura média de 167  $\mu\text{m}$ , com desvio padrão de 7,05  $\mu\text{m}$ . Por outro lado, o corpo de prova de cromo duro obteve uma espessura média de 101  $\mu\text{m}$  com um desvio padrão de 3,65  $\mu\text{m}$ , sugerindo que a manutenção da espessura é mais regular no processo de eletrodeposição de cromo duro. Na Figura 4.4 são representadas as medições realizadas na camada do revestimento de cromo duro, com sua média e seu respectivo desvio padrão.

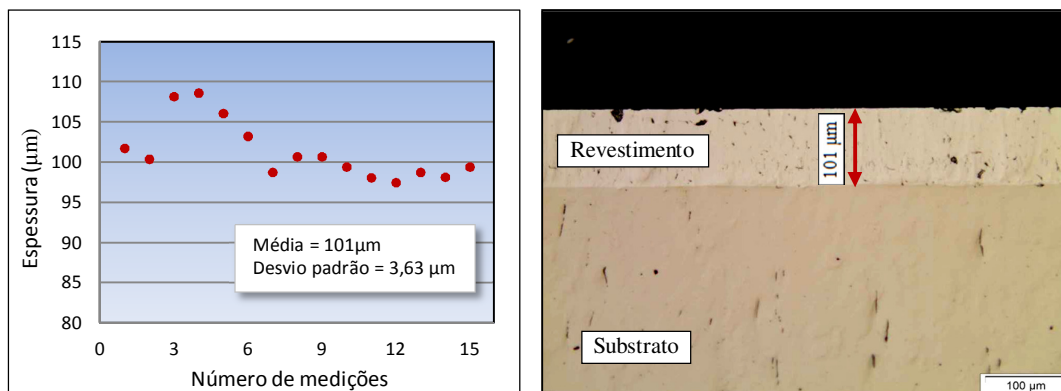


Figura 4.4 Medição de espessura do revestimento de cromo duro. (a) valores das medições de espessura ao longo do CPP e (b) valor médio adquirido.

Segundo Linsingen (2008), as espessuras dos revestimentos de cromo duro aplicados em hastes hidráulicas devem estar compreendidas entre 10 a 20  $\mu\text{m}$ . Neste trabalho, optou-se pela utilização de espessuras de revestimentos da ordem de 100-150  $\mu\text{m}$  com objetivos de atender as condições do ensaio de desgaste, de facilitar a análise da microestrutura e obter melhores resultados quanto à dureza de cada revestimento.

É conhecido que, espessuras relativamente altas podem favorecer o deslocamento do revestimento e por isso o cuidado com esse fator quanto aplicado em condições reais (hastes hidráulicas). O deslocamento pode ocorrer devido à flambagem das hastes em algumas aplicações hidráulicas. Esse efeito pode ocorrer quando os cilindros hidráulicos são submetidos a elevadas solicitações de carga e quando o meio de fixação dos mesmos é ineficiente.

Em relação à microestrutura encontrada nos revestimentos de cromo duro, a uniformidade desse revestimento é maior devido ao processo de fabricação, ou seja, a deposição eletroquímica faz com que, a aderência do revestimento ao substrato ocorra ao mesmo tempo, e não por passes como é o caso da aspersão térmica.

Na Figura 4.5 é possível conhecer os valores das medições de espessuras realizadas para o revestimento de WC-CoCr.

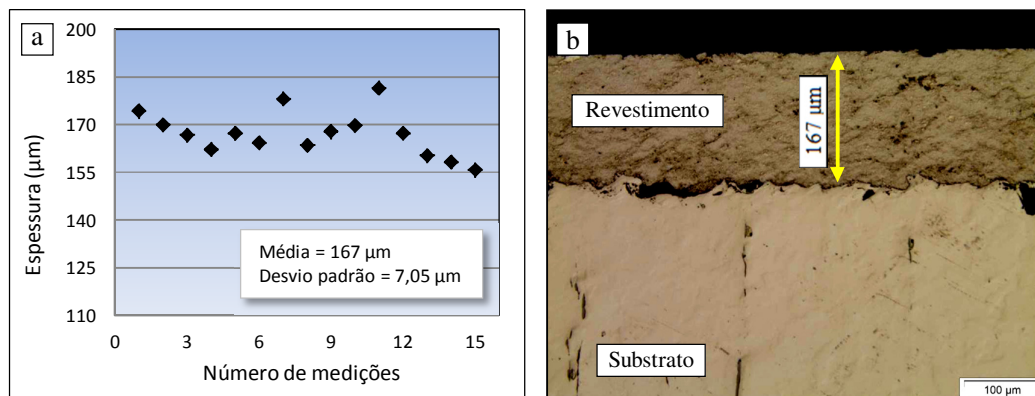


Figura 4.5 Medição de espessura do revestimento de WC-CoCr. (a) valores das medições de espessura ao longo do CPP e (b) valor médio adquirido.

#### 4.2 Microdureza Vickers

Os resultados médios de microdureza Vickers são apresentados na Tabela 4.1 para os revestimentos de WC-CoCr, cromo duro e substrato. Ambos os valores de dureza apresentaram-se compatíveis com as literaturas pesquisadas, de 595 a 1245 HV para o WC-CoCr e 600 a 1100 HV para o cromo duro.

Tabela 4.1 Resultados de medidas de microdureza Vickers ( $HV_{0,01}$ )

	Microdureza – seção transversal [ $HV_{0,01}$ ]			
	Aspersão térmica - HVOF		Eletrodeposição	
	WC-CoCr	Substrato	Cromo duro	Substrato
Média	1256	316	952	275
Desvio padrão	154	74	66	54

As Figuras 4.6 e 4.7 exibem respectivamente, as indentações da seção transversal das camadas de WC-CoCr aspergido pelo processo HVOF e de cromo eletrodepositado.

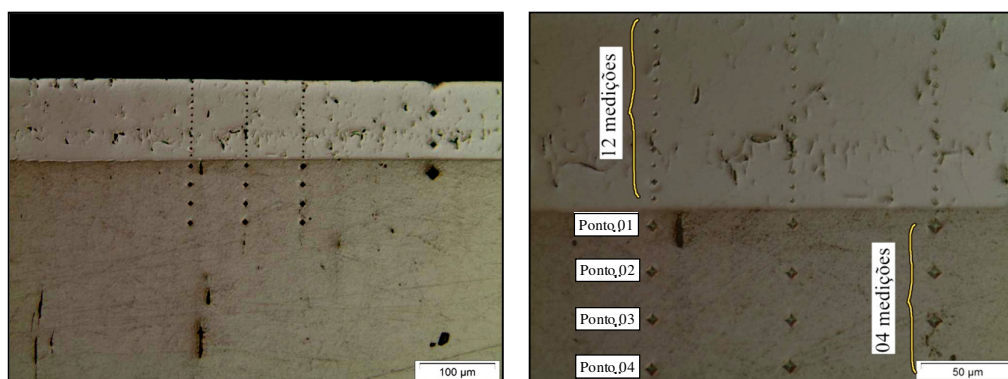


Figura 4.6 Impressão do penetrador Vickers ( $HV_{0,01}$ ) nos corpos de prova de cromo duro em diferentes ampliações.

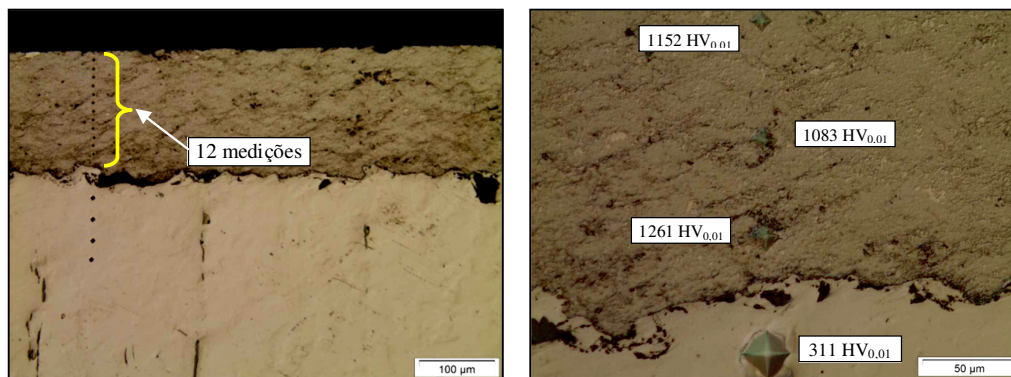


Figura 4.7 Impressão do penetrador Vickers ( $HV_{0.01}$ ) nos corpos de prova de WC-CoCr em diferentes ampliações.

De acordo com os valores de microdureza ao longo da seção transversal do revestimento aspergido, verificou-se que houve variações devido a não uniformidade das fases, enquanto no cromo duro, por se tratar de um revestimento mais homogêneo, obteve-se um menor desvio padrão. É possível observar que quando se trabalha com subcamadas (revestimentos aspergidos), ocorre a não linearidade dos valores de microdureza, pois, cada ponto da indentação pode estar localizado em microestruturas diferentes, nesse caso, carbonetos, óxidos, inclusões e a própria matriz (Figura 4.8). Segundo Nucci (2005), os revestimentos aspergidos com materiais a base de WC apresentam-se como compósitos metais-cerâmicos, sendo que os valores de microdureza encontrados estão associados a cada microconstituente. Com isso é possível também entender que o desvio padrão, representado na Tabela 4.1 foi maior para o material WC-CoCr.

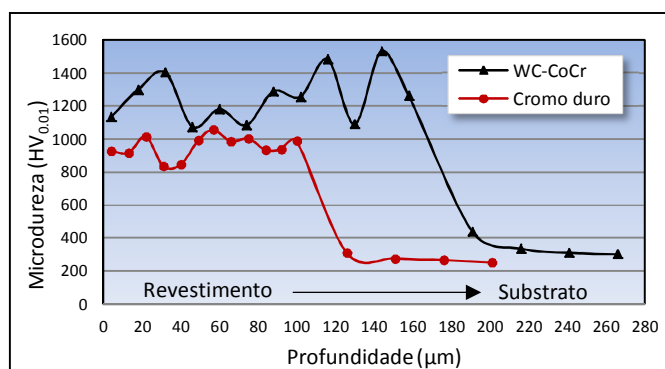


Figura 4.8 Perfis de microdureza ( $HV_{0.01}$ ) nos CPP de WC-CoCr e cromo duro.

Verifica-se ainda na Figura 4.8 que os valores de dureza do substrato são menores nos revestimentos eletrodepositados com cromo duro (266 HV) em relação aos revestimentos de WC depositados por HVOF (292 HV). Na Tabela 4.2 é possível

identificar individualmente as medições de microdureza realizadas no substrato, com o intuito de analisar a influencia do método de deposição aplicado. Através das medições foi possível identificar que não ocorreu diferença significativa entre os substratos. Apenas observa-se uma discreta alteração nas primeiras medições de cada perfil (sublinhado). Acredita-se essa alteração na superfície está relacionado com a temperatura ocasionada pelo encruamento, ocorrido no processo de trefilação.

Tabela 4.2 Resultados de medidas de microdureza Vickers ( $HV_{0,01}$ ) da seção transversal do substrato dos corpo de prova.

Medição	Substrato A (WC-CoCr)				Substrato B (Cromo Duro)			
Ponto 1	345	265	321	266	395	223	320	231
Ponto 2	311	243	242	305	305	278	219	216
Ponto 3	364	298	265	278	254	259	265	223
Média	292				266			
Desvio padrão	39				53			

#### 4.3 Ensaio de Desgaste Abrasivo em Roda de borracha e areia

O objetivo desse ensaio foi comparar a resistência ao desgaste dos revestimentos de carbeto de tungstênio, com o cromo duro, sob condições de superfícies conhecidas, como  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{máx}$  e  $R_{mr}$ . A norma apenas determina que a condição inicial do ensaio, o  $R_a$  deva ser limitado em  $0,8 \mu\text{m}$ .

Na Figura 4.9 é apresentado um dos corpos de prova de cada revestimento com marcas características típicas de desgaste em abrasômetro do tipo roda de borracha, os quais foram submetidos.

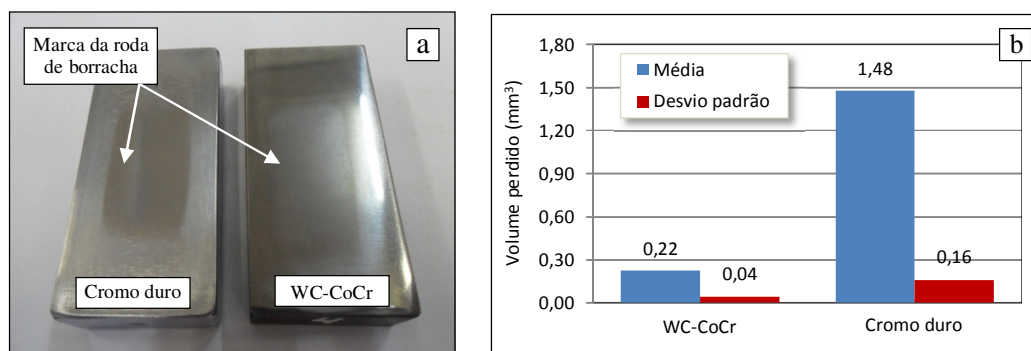


Figura 4.9 Resultados do ensaio de desgaste conforme ASTM G65-00. (a) marcas carecterísticas do ensaio e (b) média da perda de volume.

Observa-se que o corpo de prova revestido com cromo duro, Figura 4.9 (a) apresenta uma condição visual de desgaste abrasivo mais acentuada em relação ao

revestimento com WC-CoCr, depositado por HVOF. Verifica-se através da Figura 4.9 (b) que o revestimento aspergido apresentou-se com desempenho muito superior comparado ao cromo duro, resultando numa perda de volume de  $0,22 \text{ mm}^3$  contra  $1,48 \text{ mm}^3$ . Na Figura 4.10 os resultados individuais de volume perdido de cada CPP são apresentados.

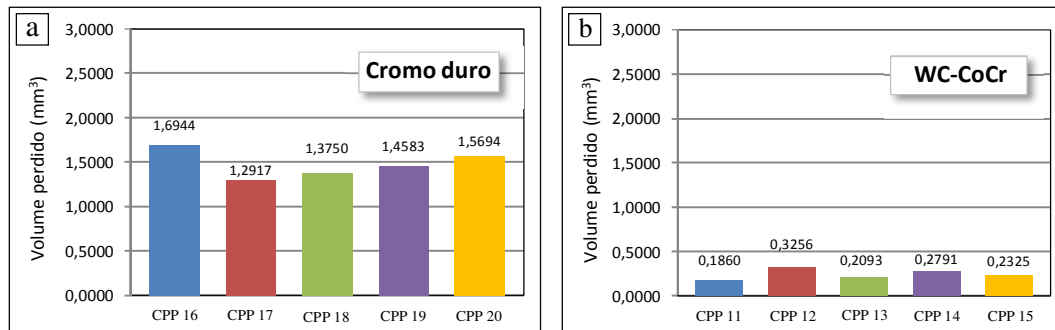


Figura 4.10 Perda de volume obtida a cada CPP após 30 minutos. (a) revestimento cromo e (b) WC-CoCr.

Segundo Fervel (1999), *apud* Magnani (2008), a diferença dos volumes perdidos entre os revestimentos pode ser explicada pela diferença de dureza entre o material abrasivo ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{HV} \approx 1100$ ) e o cromo duro, ( $\text{HVN} \approx 950$ ), resultando numa maior perda de material devido a facilidade de deformação plástica. De acordo com as medições de dureza obtidas para o revestimento a base de WC, identificou-se uma maior dureza (1256 HV) do que o próprio material abrasivo.

#### 4.3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As Figuras 4.11 a 4.12 apresentam as imagens em microscopia MEV da superfície do cromo e WC-CoCr após ensaio de desgaste de roda de borracha e areia.

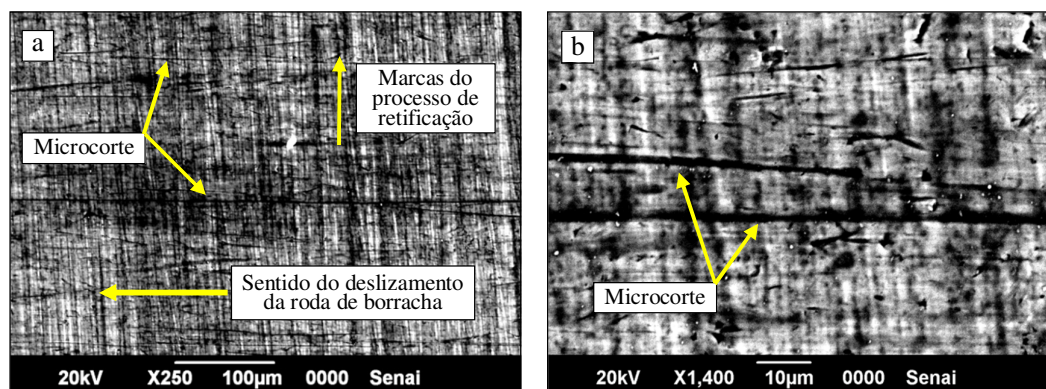


Figura 4.11 Micrografia após o ensaio das superfícies de cromo. (a) 250x e (b) 1400x.

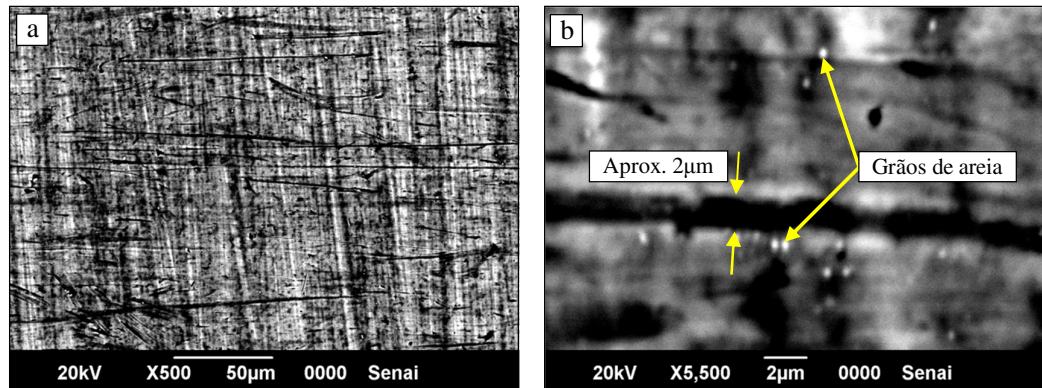


Figura 4.12 Micrografia após o ensaio das superfícies de cromo. (a) 500x e (b) 5500x.

A Figura 4.11 (b) destaca-se pelo mecanismo microcorte produzida na superfície do cromo duro. Destaca-se também a concentração de grãos de areia incrustada sob a superfície ensaiada e ainda uma largura de 2 μm aproximada do mecanismo atuante, conforme Figura 4.12 (b). Como citado no item 3.6.3, as imagens em microscopia ótica não destacaram de forma qualitativa e muito menos quantitativa, o mecanismo observado após o ensaio de desgaste para o revestimento WC-CoCr, existindo a necessidade de outra técnica como a do MEV, junto ao EDS. A Figura 4.13 apresenta imagens iniciais em microscopia ótica do WC-CoCr, das regiões marcadas pelo ensaio abrasivo.

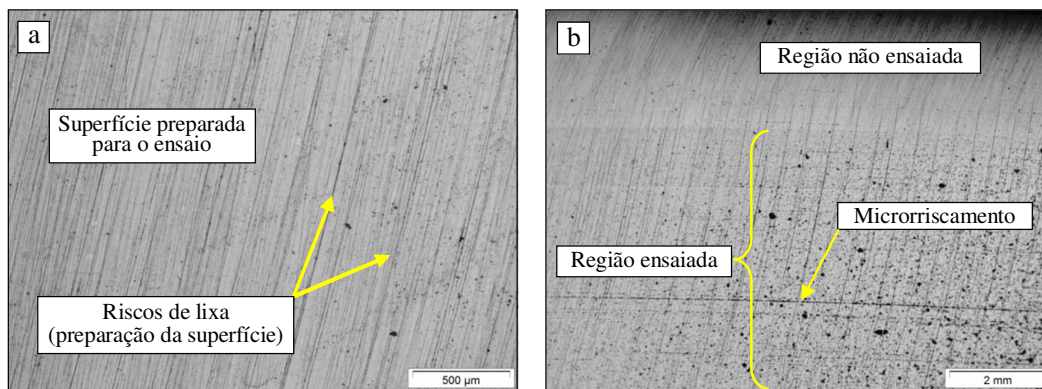


Figura 4.13 Análise microestrutural da superfície de WC-CoCr em diferentes ampliações.

A princípio o revestimento a base de WC apresenta-se com um aparecimento de porosidade logo após o ensaio, ficando confirmada pelas ampliações de rugosidade  $R_a$  e pelas imagens produzidas com MEV junto à análise por EDS. Além disso, a Figura 4.13 (b) apresenta-se com algumas microrriscagens oriundas do processo de ensaio, porém com dimensões extremamente reduzidas da largura da trilha (aproximadamente de 0,033 μm), quando comparadas com cromo duro.

A Figura 4.14 apresenta as imagens obtidas pela técnica de microscopia eletrônica, para a melhor caracterização das regiões da trilha de desgaste.

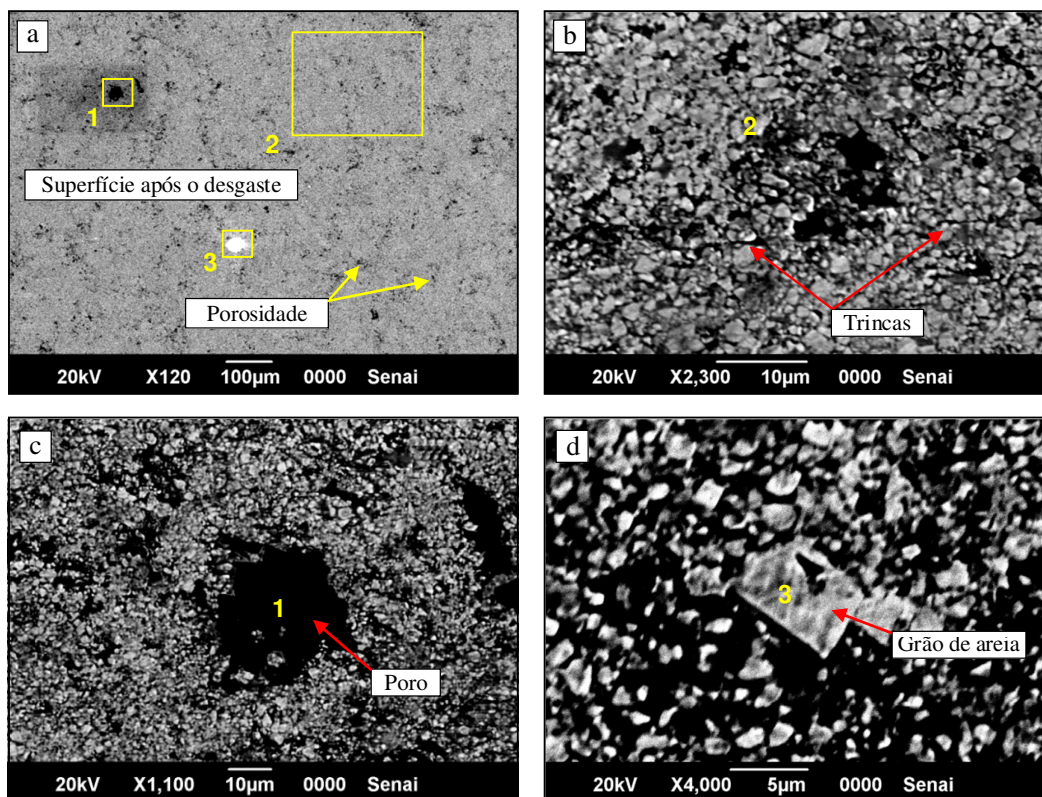


Figura 4.14 Regiões do desgaste produzido pelo ensaio ASTM G65-00 analisada via MEV para o WC-CoCr.

As primeiras observações das amostras aspergidas com WC-CoCr mostraram aparentemente a presença de algumas trincas no sentido longitudinal da camada aspergida como indicado na Figura 4.14 (b). Provavelmente esse defeito está relacionado com procedimentos incorretos na preparação da superfície para o ensaio de desgaste, como alta velocidade e força utilizada no lixamento e polimento das amostras. A imagem representada na Figura 4.14 (d) apresenta um grão de areia preso à superfície, utilizado como terceiro corpo no ensaio abrasivo e, a qualificação desse material é apresentada logo a seguir nos ensaios junto ao EDS. Além dessa imagem a Figura 4.14 (c) apresenta uma porosidade já indicada nesse trabalho, como característica dos processos de aspersão térmica HVOF, destacando-se um maior desgaste da matriz metálica, evidenciado pelos sulcos entre as partículas de carboneto e pelos resultados de EDS. Desta forma, além do desgaste da matriz de cobalto, parece haver um desprendimento de algumas partículas da ordem de 1 a 5  $\mu\text{m}$ .



Ainda são apresentadas as imagens orientada pela análise de espectro EDS (Figura 4.15), a fim de qualificar os defeitos produzidos pelo ensaio no revestimento de WC-CoCr, nos pontos demarcados 1 e 2 das amostras 2, 3 e 4 da microestrutura.

O ponto 1 da amostra 2 em destaque na imagem, o espectro do EDS identificou partículas que contém carboneto e cromo, que é a composição do revestimento aspergido utilizado, identificando que realmente a região analisada é apenas porosidade do processo de aspersão, e o cromo pode ser um indicativo de oxidação. O ponto 2 para a mesma amostra identifica uma região do revestimento contendo também em maior concentração, os materiais da liga WC-CoCr. O ponto 1 da amostra 3 indicou a presença em grande parte de cromo. Estima-se que essa concentração possa estar associada à oxidação do cromo ocorrida durante o processo de deposição a altas temperaturas. O ponto 1 da amostra 4 revelou através do espectro do EDS a presença do elemento silício, presente no material abrasivo ( $\text{SiO}_2$ ), isso significa que algumas amostras o material abrasivo, ficou incrustado em algumas regiões da superfície desgastada.

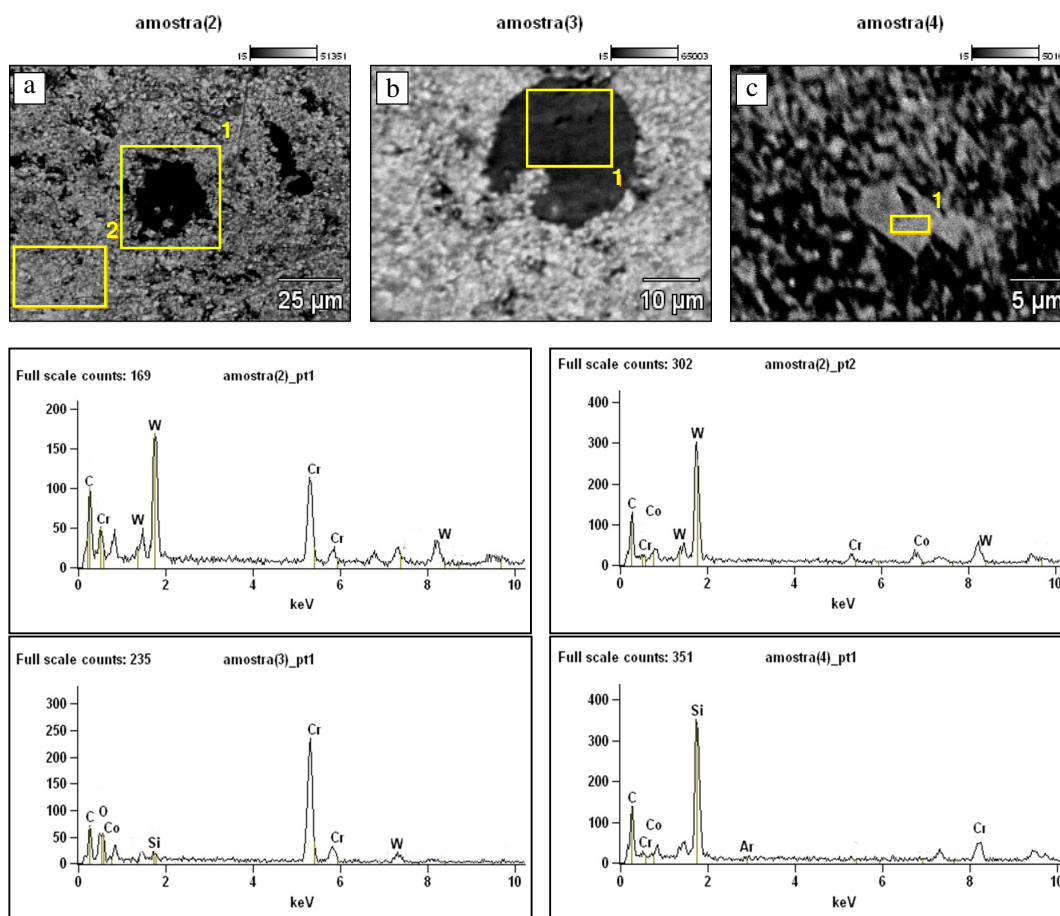


Figura 4.15 Análise microestrutural da superfície após o ensaio de desgaste do revestimento de WC-CoCr e EDS dos três pontos representados.

#### 4.3.2 Medições de rugosidade

Em paralelo a caracterização dos mecanismos de desgaste realizados através do MEV, as marcas correspondentes da região ensaiada também foram submetidas às medições de rugosidade, a fim de compará-las com as superfícies não ensaiadas, constatando qual dessas superfícies ainda resultará em um mínimo acabamento exigido a superfície de vedação. Os resultados são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Comparações dos parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{máx}$  e  $R_{mr}$  antes e após o ensaio de desgaste.

Revestimentos	Medição de rugosidade – CPP							
	Média - antes do ensaio				Média - após o ensaio			
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{máx}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{mr}$ [%]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{máx}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{mr}$ [%]
Cromo duro	0,26	1,79	2,49	61,68	0,11	0,83	1,07	93,01
WC-CoCr	0,12	1,08	1,68	90,57	0,17	1,25	1,42	80,29

Com os valores apresentados na Tabela 4.3, é possível afirmar que após os ensaios, o revestimento em WC-CoCr apresentou um melhor desempenho com relação aos principais parâmetros,  $R_a$  e  $R_{mr}$ , pois atenderam os melhores índices aplicados a superfícies de vedação, conforme descrito por Flitney, 2007. Provavelmente o acréscimo dos valores de  $R_a$  deve-se ao arrancamento de carbonetos (aparecimento de poros), visto através das imagens em MEV. Já a média dos CPP de cromo duro, não obtiveram bons resultados, quanto aos valores do parâmetro  $R_{mr}$ , lembrando que uma superfície que gradualmente tende a um processo de polimento, observado pela queda de  $R_a$  e a ultrapassagem de  $R_{mr}$  em relação aos valores recomendados pela literatura, ocasionará a deformação do elemento de vedação, pela dificuldade de lubrificação em virtude dos baixos níveis de vales na superfície. Entretanto, para o parâmetro  $R_a$ , o revestimento em cromo ainda apresenta-se dentro dos valores considerados limitantes para superfícies de vedação.

É importante ressaltar que apenas esses resultados não definem por si só uma condição ideal de superfícies aplicadas a vedações hidráulicas, entretanto indicam resultados preliminares com relação a essas aplicações. Outros fatores em condição reais de trabalho para as hastes hidráulicas também serão importantes para se determinar um novo revestimento, existindo a necessidade de obter outras fontes de resultados, como os da bancada de testes em hastes, discutidos posteriormente.

#### 4.4 Pino sobre disco (*Pin on Disk*)

A Tabela 4.4 apresenta os valores de dureza e rugosidade dos corpos de prova antes do ensaio. Para essa condição de ensaio, os corpos de prova apresentam rugosidade ( $R_a$ ), de acordo com a norma ASTM G99-04, que determina um valor máximo de  $0,8 \mu\text{m}$ .

Tabela 4.4 Condições das superfícies dos corpos de prova revestidos.

Revestimento	Microdureza Média [HV <sub>0.01</sub> ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]		$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	
		Média	Desv. Pad	Média	Desv. Pad
WC-CoCr	1256	0,11	0,03	1,23	0,10
Cromo duro	952	0,21	0,05	1,68	0,19

Durante esse ensaio observou-se também a evolução dos coeficientes de atrito para os dois revestimentos, Figura 4.16. O revestimento em cromo duro apresentou um coeficiente de atrito estável a partir de aproximadamente 50 segundos de ensaio, entretanto com um aumento discreto no decorrer do ensaio. No revestimento em WC-CoCr constatou-se uma tendência de estabilidade a partir de 200 segundos, com uma redução discreta no coeficiente de atrito.

A diferença do cromo duro em relação ao WC-CoCr pode estar relacionada com os seus maiores valores de rugosidade dos corpos de prova, associado aos mecanismos de desgaste como, deformação plástica (efeito da baixa dureza em relação ao pino) e possivelmente um indicativo de adesão do material da superfície e o pino. Segundo Fang (2009), é possível talvez explicar o decréscimo do coeficiente de atrito no revestimento de WC-CoCr pela formação de óxidos, que desempenham a função de lubrificantes durante o deslizamento na superfície.

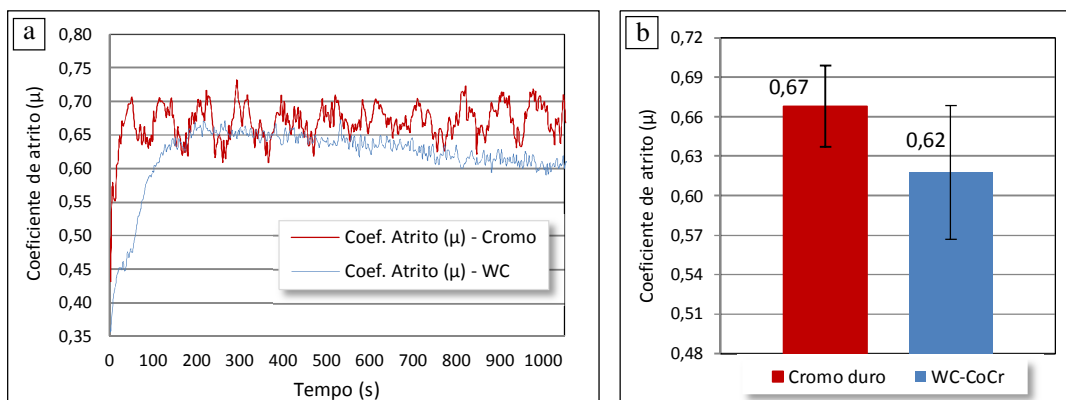


Figura 4.16 Ensaio de desgaste conforme ASTM G99-00. (a) evolução dos coeficientes de atrito e (b) média dos coeficientes de atritos.

Em ambos os revestimentos na zona de instabilidade (início do ensaio), o mecanismo de atrito é originado basicamente pelo fenômeno de adesão, a força de atrito resultante do movimento relativo entre o pino e o disco deve ser aproximadamente igual à força necessária para romper as ligações resultantes da elevada pressão local, que atua entre os picos da rugosidade (CANGUNDO, 2009).

A observação através da microscopia ótica das trilhas de desgaste após o ensaio (Figura 4.17) também fornece algumas informações importantes nessa investigação. A primeira observação é que para o mesmo diâmetro do pino, as larguras das trilhas tiveram medidas diferentes. Esse fato, provavelmente pode estar associado à dureza que o revestimento aspergido possui com relação ao cromo e pelas propriedades lubrificantes desempenhadas pelos óxidos no revestimento aspergido.

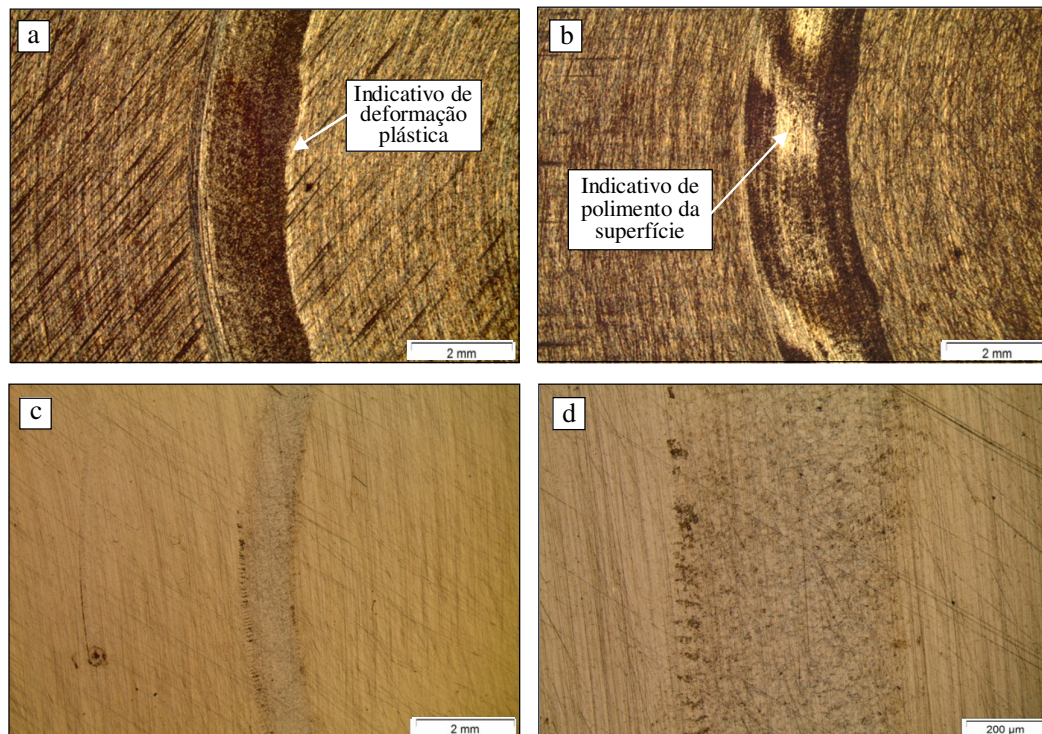


Figura 4.17 Trilhas de desgaste dos revestimentos de cromo duro e WC-CoCr. (a) e (b) cromo duro (12,5x) e (c) e (d) WC-CoCr (12x e 100x) respectivamente.

Outro fato que não foi perceptível no WC-CoCr trata-se dos mecanismos abrasivos, justificado pelo aumento de dureza, que inibe a deformação plástica e o arrancamento de material da superfície. Nesse revestimento observou-se apenas uma trilha suave de desgaste, resultando em um baixo coeficiente de atrito. Entretanto para o cromo duro, os mecanismos de desgaste como microcorte e microfadiga, são confirmados pelas linhas

claras representadas ao redor da trilha (Figura 4.17a) e através das medições de perfilometria. Na Figura 4.17 (b), a região clara da trilha mostrou-se um aspecto de polimento, característica do cromo quando submetido ao movimento de deslizamento.

#### 4.4.1 Ensaio de perfilometria

Com o objetivo de quantificar a perda do material após o ensaio de desgaste, de acordo com ASTM G99-04, foram realizadas medidas perfilométricas do caminho do desgaste e os resultados quantitativos são revelados conforme a Tabela 4.5 e os qualitativos encontram-se na Figura 4.18 e 4.19. Os resultados apresentados foram adquiridos com auxílio do perfilômetro AMBIUS e representados com o software *True Surf*.

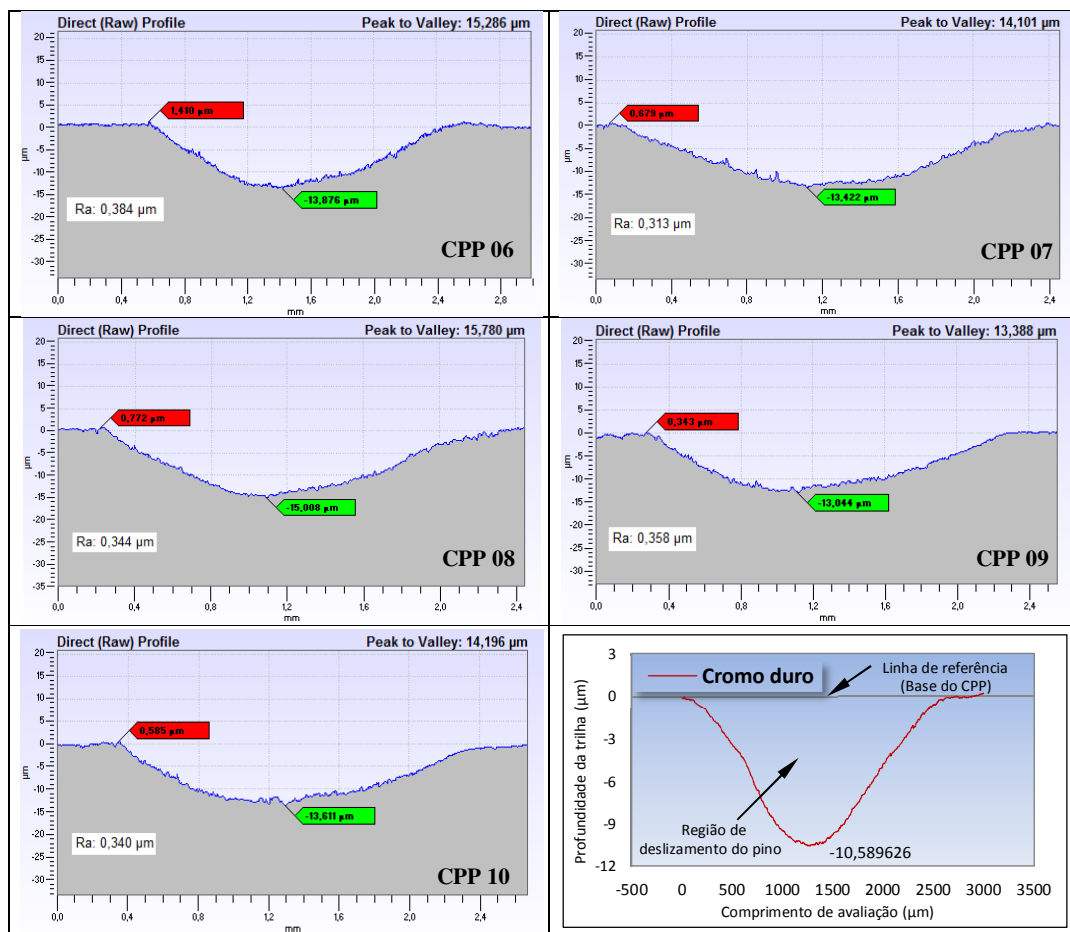


Figura 4.18 Imagens dos perfis de desgaste produzidas através dos softwares 2D - True Map dos CPP (06 à 10) de cromo duro e média dos perfis de desgaste.

Adotando como referência as imagens produzidas nos corpos de prova revestidos com cromo duro, observa-se que os valores de profundidade da trilha tiveram um aumento

significativo, comparados ao WC da Figura 4.19, e dessa forma pode-se afirmar que a perda de volume do cromo foi muito superior do que os resultados para o revestimento aspergido. O valor máximo de pico nesse revestimento ficou em torno de 1,410  $\mu\text{m}$  no CPP 06 e o menor de -15,008  $\mu\text{m}$  no CPP 08. No entanto o CPP que teve uma maior distancia entre picos e vales foi o CPP 08, totalizando uma profundidade de 15,780  $\mu\text{m}$ . Na Figura 4.20 complementam-se os resultados, obtidos para a liga WC-CoCr.

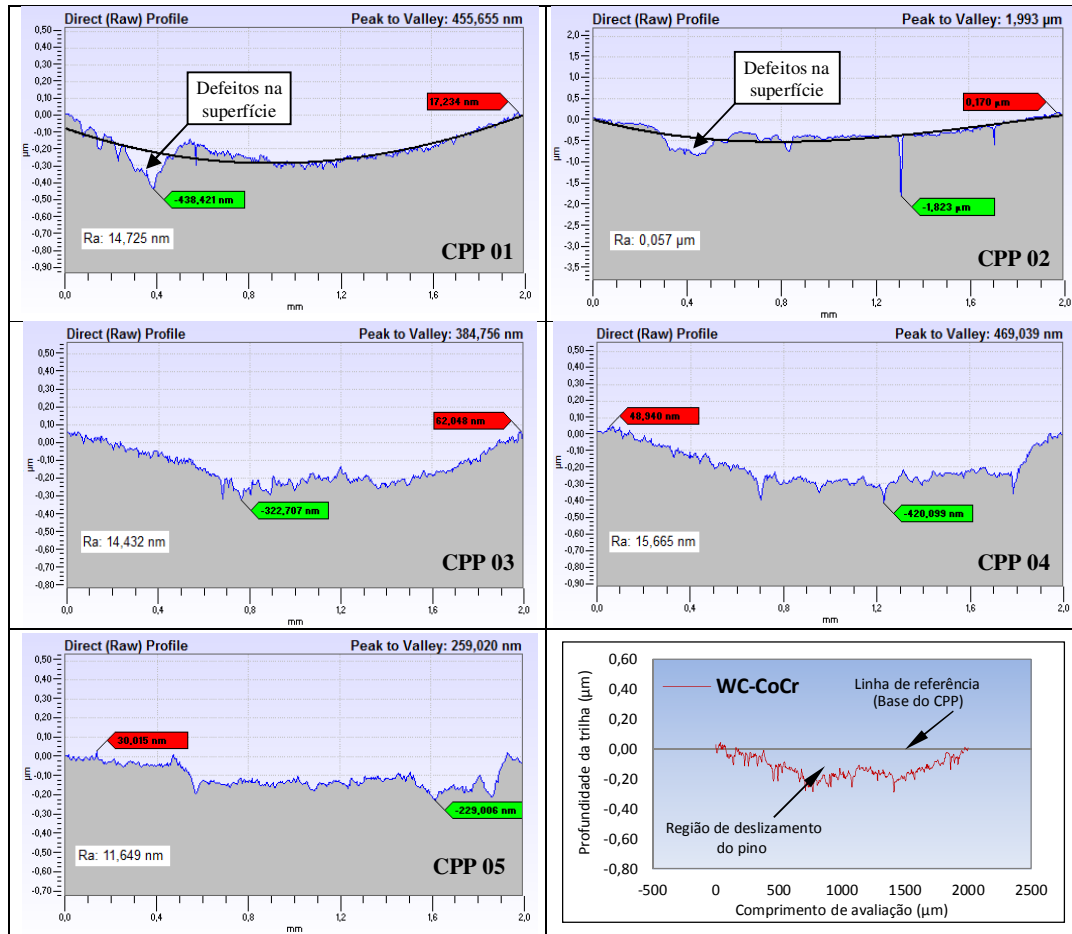


Figura 4.19 Imagens dos perfis de desgaste produzidas através dos softwares 2D - True Map dos CPP (01 à 05) de WC-CoCr e média dos perfis de desgaste.

Em relação a varredura feita para o revestimento aspergido, é possível já verificar que, pelo fato da trilha produzida pelo ensaio apresentarem-se com um valor muito reduzido, as profundidades identificadas pelo *software* tiveram suas escalas mencionadas em nanômetros (nm), identificadas pelas bandeirinhas, justificando os baixos índices de desgaste. O maior valor obtido significativo entre picos e vales foi o do CPP 04, que teve como resultado 48,940 á - 420,099 nm, totalizando 469,039 nm. Os valores encontrados

entre picos e vales do CPP 02 poderão ser desconsiderados, pois se trata de um único ponto isolado detectado pelo perfilômetro.

Ainda durante a varredura do CPP 01 e 02, foram observados através do microscópico ótico do perfilômetro, alguns defeitos sobre a superfície do revestimento, interferindo nas medições, isso mostra a não linearidade do perfil medido.

Das cinco varreduras realizadas em cada corpo de prova do revestimento em cromo duro, não foi possível observar nenhum ponto de imperfeições, como ocorreu no revestimento aspergido (WC). Através da análise feita por perfilometria conclui-se também que o revestimento em cromo duro possui sua camada mais uniforme do que o WC-CoCr. Na Figura 4.20 é relacionada às médias das trilhas de desgaste dos dois revestimentos para a melhor visualização.

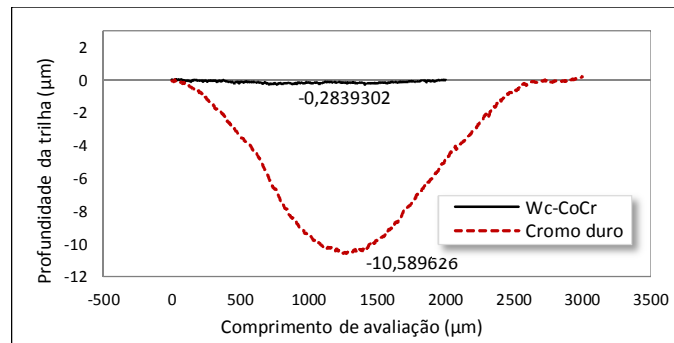


Figura 4.20 Média dos perfis de desgaste dos CPP para os revestimentos em cromo duro e WC-CoCr após a execução do ensaio de pino sobre disco.

Observa-se que o substrato com revestimento em WC possui uma trilha média variando sua profundidade de 0 á -0,28  $\mu\text{m}$ . Já para o revestimento em cromo duro a média da trilha é significadamente maior, variando da linha de referência 0 á -10,5896  $\mu\text{m}$ . Considerando uma largura da trilha de 1,8 a 2 mm para o WC-CoCr, 2,8 a 3 mm para o cromo e suas profundidades citadas, verifica-se que o valor de perda de volume do cromo duro em relação ao WC-CoCr é bastante superior.

Tabela 4.5 Volume perdido do WC-CoCr quantificados por perfilometria

Revestimento e nº dos CPP	Volume perdido-[mm <sup>3</sup> ]			Revestimento e nº dos CPP	Volume perdido-[mm <sup>3</sup> ]		
	Valor	Média	Desvio		Valor	Média	Desvio
WC-CoCr - 01	0,0039	0,0041	0,0011	Cromo - 06	0,621	0,853	0,303
WC-CoCr - 02	0,0036			Cromo - 07	0,606		
WC-CoCr - 03	0,0044			Cromo - 08	1,060		
WC-CoCr - 04	0,0028			Cromo - 09	1,284		
WC-CoCr - 05	0,0057			Cromo - 10	0,692		

Em números o cromo duro teve aproximadamente 212 vezes a mais de perda de material, quantificado pela seleção da largura da trilha e o seu raio médio.

De acordo com a Tabela 4.5, percebe-se que nos CPP aspergidos, há uma maior regularidade nos seus valores. É importante salientar que não foi contabilizado o efeito de deformação plástica, visto através do ensaio de perfilometria em dois pontos dos CPP de cromo duro. Conforme os resultados expressos na Tabela 4.5 para os dois revestimentos, o efeito de escorregamento observado pela perfilometria no revestimento em cromo duro, pode ter interferido com uma pequena parcela no resultado final da perda de volume (média). Porém, como esse efeito foi observado em apenas dois pontos isolados dos 25 analisados, achou-se melhor desconsiderá-los.

Na Figura 4.21 (a) fica evidente que o revestimento em cromo duro perdeu uma quantidade muito maior de material do que o revestimento aspergido (Figura 4.21b). Os caminhos de desgaste para todas as amostras de WC-CoCr apresentaram dimensões de mesma ordem de magnitude. Então, é visto que a perda do material para o revestimento aspergido termicamente é extremamente pequena comparada com o revestimento eletrodepositado com cromo.

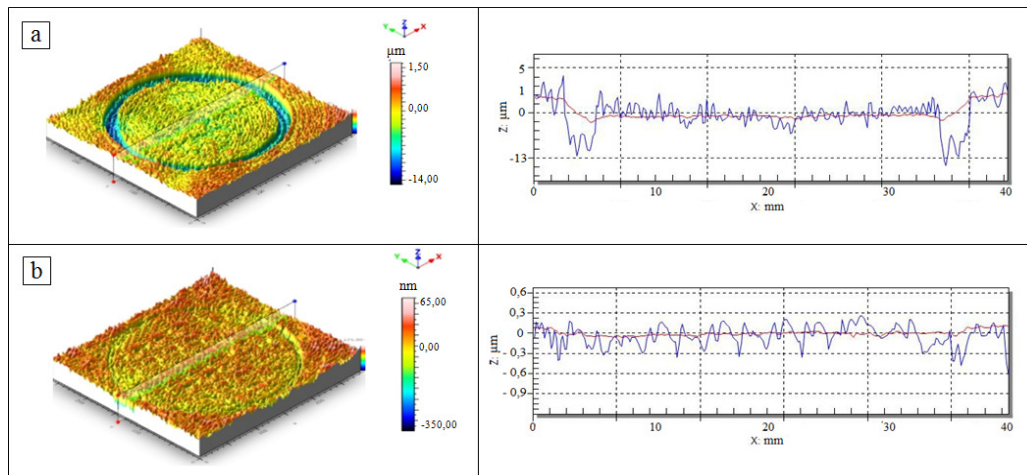


Figura 4.21 Topografia 3D da superfície adquirida através do software *True Map*. (a) CPP revestidos em cromo duro (b) CPP revestidos em WC-CoCr.

#### 4.5 Resultados dos CPH (hastes hidráulicas)

Nessa etapa serão apresentados os resultados adquiridos durante e após os ensaios realizados com as hastes hidráulicas, através da bancada de testes. Os resultados foram divididos em: comparações de rugosidade, análise dos danos visuais do conjunto hastes/vedações e medições de vazamento.



#### 4.5.1 Comparativos de rugosidade

Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados de rugosidade média antes e após os testes, realizados nas regiões onde ocorreu o deslizamento da superfície das hastes. Pode ser visto que o revestimento em cromo duro apresentou-se com uma diminuição significativa dos valores médios de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_{máx}$ . Isto indica que a ação de deslizamento das vedações e guias para esse revestimento, diminuíram os picos no perfil de superfície, evidenciando o desgaste e o seu polimento. Ainda sobre o cromo duro, foram observados grosseiros arranhões (microcorte) de forma linear, provavelmente originado pela areia ( $SiO_2$ ), utilizada na contaminação proposital do óleo hidráulico (Figura 4.28).

Tabela 4.6 Informação dos parâmetros e medições de rugosidade realizadas durante o ensaio das hastes de cromo duro e WC-CoCr .

<b>Parâmetros de teste</b>	<b>Média antes do ensaio</b>	<b>Média – após o ensaio</b>
Rugosímetro Mítutoyo mod. SJ-210 <i>Cut Off</i> – 0,8 $\mu m$ Cromo duro – (polido) $R_a$ de 0,14 a 0,20 $\mu m$	$R_a = 0,16 \mu m$ $R_z = 1,39 \mu m$ $R_{máx} = 1,91 \mu m$ $R_{mr} = 75,1\%$	$R_a = 0,12 \mu m$ $R_z = 1,23 \mu m$ $R_{máx} = 1,89 \mu m$ $R_{mr} = 83,7\%$
<b>Parâmetros de teste</b>	<b>Média – antes do ensaio</b>	<b>Média – após o ensaio</b>
Rugosímetro Mítutoyo mod. SJ-210 <i>Cut Off</i> – 0,8 $\mu m$ WC-CoCr – polido $R_a$ de 0,20 a 0,28 $\mu m$	$R_a = 0,21 \mu m$ $R_z = 1,78 \mu m$ $R_{máx} = 2,09 \mu m$ $R_{mr} = 79,9\%$	$R_a = 0,23 \mu m$ $R_z = 1,91 \mu m$ $R_{máx} = 2,32 \mu m$ $R_{mr} = 78,3\%$

Considerando os valores obtidos do parâmetro  $R_{mr}$  para as hastes revestidas em cromo duro, identifica-se que houve um aumento de 9,2% ao longo de 60.000 ciclos, significando que há uma tendência de falha no elemento de vedação, se o ensaio fosse levado a uma ciclagem ainda maior, como os testes de 50 milhões de ciclos publicados por Degennaro e Tweed no ano de 1999. O motivo da falha na vedação é claramente justificado pela falta de lubrificação mínima que ocorreria entre as superfícies deslizantes, pois os picos e vales em proporções corretas favorecem esse efeito. Na Figura 4.22 fica evidente que as curvas referentes aos perfis de sustentação (área de apoio da vedação), antes e após os ensaios mostram exatamente esse aumento de superfície plana, justificados pela inclinação da curva de *Abbott*. Do mesmo modo, é possível avaliar a diminuição da curva inicial, área definida pelos picos da superfície. Além disso, é possível avaliar também a diminuição da rugosidade pelos perfis da Figura 4.23.

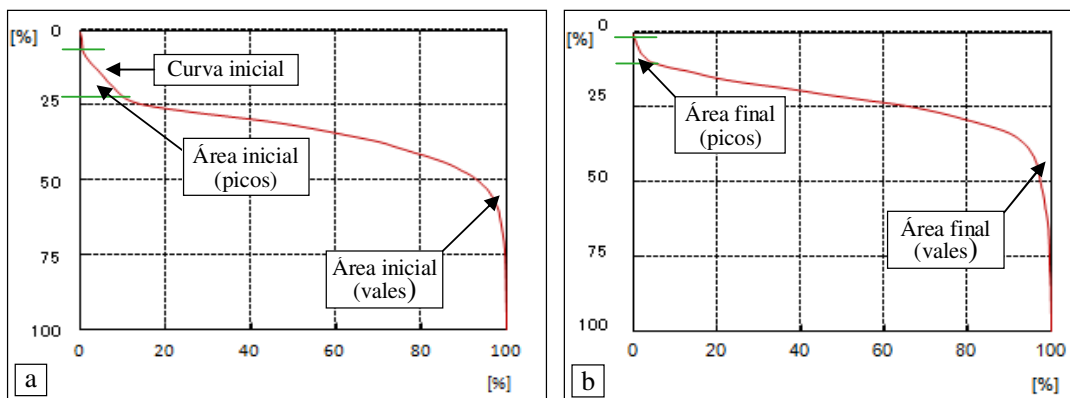


Figura 4.22 Curva de sustentação de material (*Abbott-Firestone*). (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio – cromo duro.

Considerando-se que a ação de polimento da superfície é mais significativa que a ação de criação de novas irregularidades para o cromo duro, é possível acompanhar a ação desse polimento com a redução dos valores de  $R_{pk}$  no eixo y, de 18% na Figura 4.22 (a) para 8% na Figura 4.22 (b). Além da redução da região de picos do perfil, ocorre um discreto aumento também na região dos vales, provavelmente associado aos micromecanismos de desgaste, representados na Figura 4.28 (b).

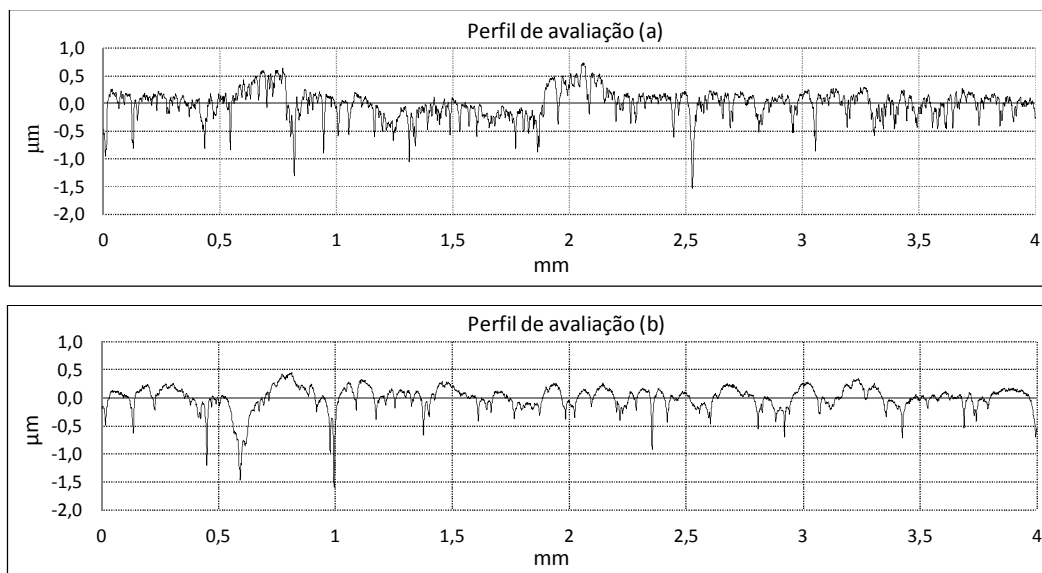


Figura 4.23 Perfil de avaliação das superfícies das hastas cromadas. (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio.

Com os valores também adquiridos nas superfícies das hastas revestidas de WC-CoCr, verifica-se que não há evidência de modificação significativa dos parâmetros  $R_a$  e  $R_z$ , ou ainda algum incremento significativo de área de sustentação (parâmetro  $R_{mr}$ ), o que

caracteriza o não polimento da superfície. Isso é visualmente confirmado pela aparência das hastes (Figura 4.28). Pode-se também explicar essa pequena redução no parâmetro  $R_{nr}$ , devido o aparecimento de porosidade, característico do processo HVOF. Na Figura 4.25 observam-se os resultados obtidos do perfil para o WC-CoCr.

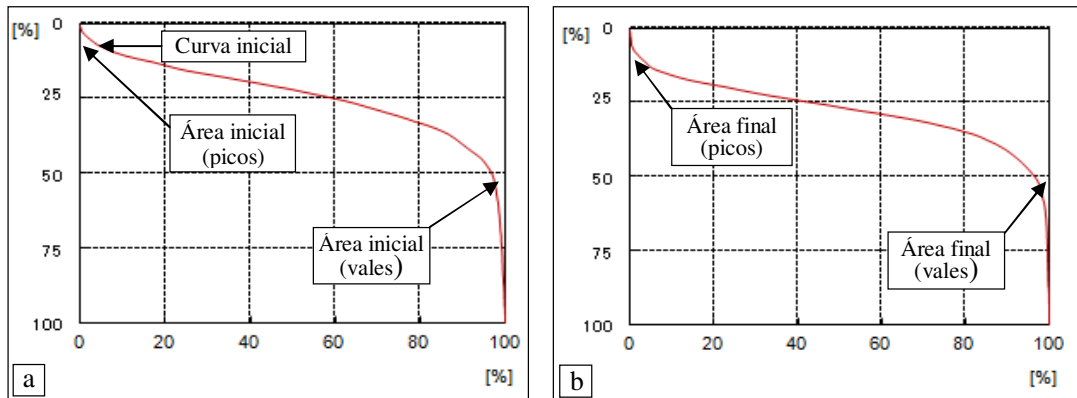


Figura 4.24 Curva de sustentação de material (*Abbott-Firestone*). (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio – WC-CoCr.

Ao contrário do cromo duro, possivelmente a Figura 4.24 (b) possa justificar o aumento dos parâmetros de  $R_a$  e  $R_z$  do revestimento a base de WC-CoCr, pela pequena alteração da área na região dos vales, e por consequência o mantimento da curva inicial, justificado essa pela baixa taxa de desgaste apresentada de forma visual.

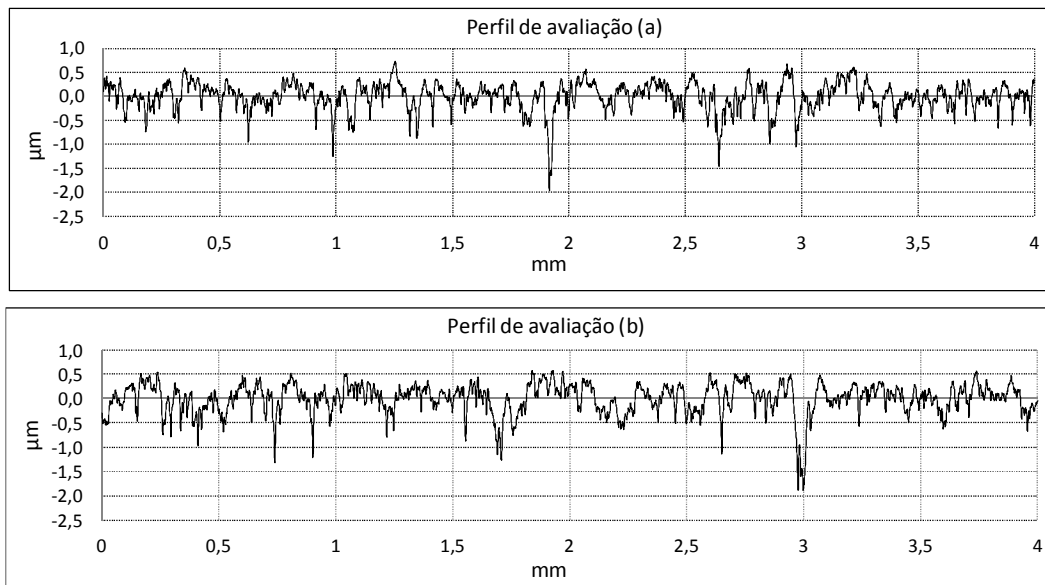


Figura 4.25 Perfil de avaliação das superfícies das hastes de WC-CrCo. (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio.

Na Figura 4.26 são apresentados os parâmetros médios de rugosidade antes e após o ensaio para o revestimento cromo duro.

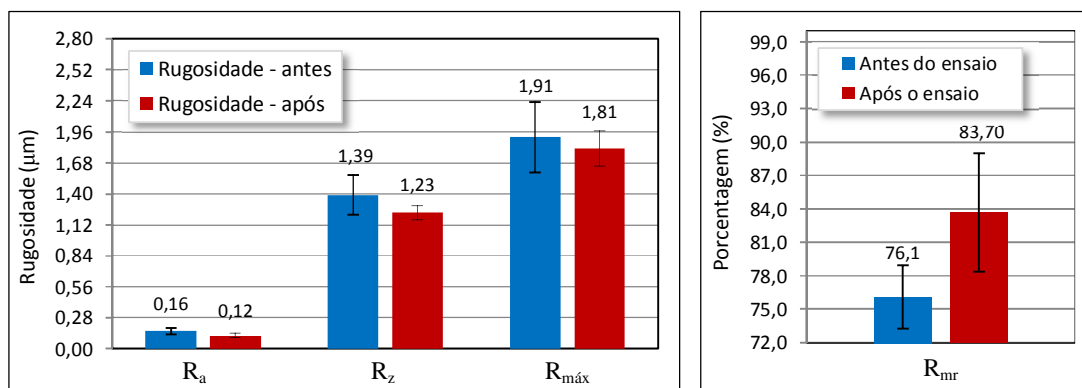


Figura 4.26 Parâmetros de rugosidade médio antes e após o ensaio do cromo duro

Observando-se os parâmetros de rugosidade médios para o cromo duro antes e após o ensaio, pode-se verificar que  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_{\text{máx}}$  reduziram após o ensaio e o parâmetro  $R_{\text{mr}}$  teve um acréscimo de aproximadamente 4,5%. Este comportamento sugere que após o ensaio com óleo contaminado com  $\text{SiO}_2$ , os picos foram quebrados reduzindo-se a distância entre eles, porém ao mesmo tempo, na mesma haste, regiões apresentaram modificações das superfícies como microriscamentos e microcortes, e isso influenciou na permanência dos valores, pois se trata de uma média. O aumento do parâmetro  $R_{\text{mr}}$  indica que a taxa do comprimento de sustentação aumentou e, tornou o componente mais estável, mas se deve lembrar que, valores altos de  $R_{\text{mr}}$  ( $> 90\%$ ), contribuem para a deformação dos elementos de vedação, uma vez que a lubrificação se torna ineficiente.

Na Figura 4.27 são apresentados os parâmetros de rugosidade médios antes e após o ensaio para o revestimento WC-CoCr.

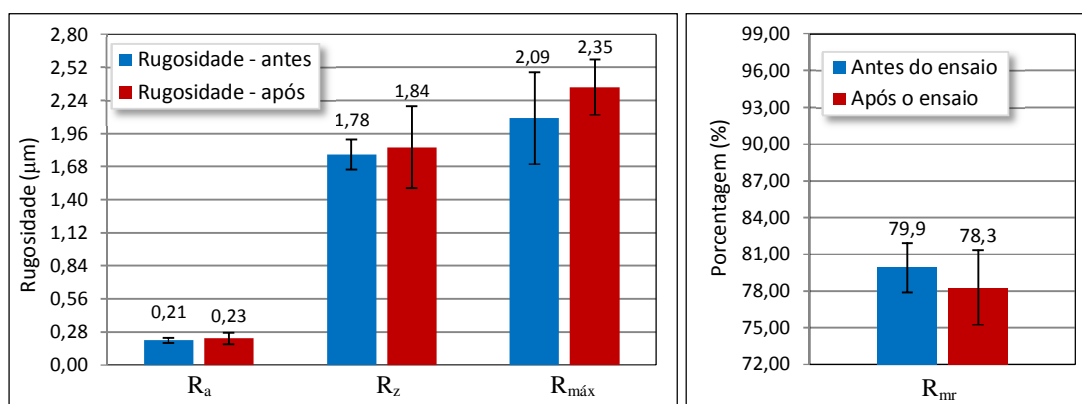


Figura 4.27 Parâmetros de rugosidade médio antes e após o ensaio do WC-CoCr

Observando-se os parâmetros médios de rugosidade para o revestimento WC-CoCr antes e após o ensaio, pode-se verificar em oposição ao cromo duro que  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_{máx}$  tiveram seus valores ampliados, no entanto o parâmetro  $R_{mr}$  reduziu. Esta tendência sugere que o material não sofreu desgaste significativo durante o ensaio. Em compensação com a redução do  $R_{mr}$ , o comprimento de sustentação da superfície diminuiu, estimando-se que o componente fica com uma pequena instabilização.

Em ambos os revestimentos, antes e após o ensaio, o valor do parâmetro de  $R_a$  encontra-se na faixa sugerida pelos pesquisadores Steep e Wüstenhagen, 2006, que é de 0,05 a 0,3  $\mu\text{m}$ . Entretanto, nas mesmas condições para os parâmetros  $R_{máx}$  os valores ficaram bem próximos ao limite ( $R_{máx} < 2,5 \mu\text{m}$ ), especialmente o revestimento WC-CoCr após o ensaio.

O revestimento de cromo duro alcançou a maior diferença para o parâmetro  $R_{mr}$ , considerando o mesmo tempo de ensaio em relação ao revestimento WC-CoCr, enquanto que o cromo teve uma modificação da área e sustentação de 4,5%, o WC-CoCr teve apenas 1,5%, lembrando que a faixa sugerida por Steep e Wüstenhagen (2006) é  $50\% < R_{mr} < 90\%$ , com valor ótimo de 80%.

A Tabela 4.7 mostra a diferença percentual entre os parâmetros de rugosidade médios antes e após o ensaio para os revestimentos cromo duro e WC-CoCr.

Tabela 4.7 Diferença percentual (%) entre a média dos parâmetros de rugosidade antes e após o ensaio.

Revestimentos	$R_a$	$R_z$	$R_{máx}$	$R_{mr}$
Cromo duro	25,00	11,51	5,20	11,27
WC-CoCr	8,45	3,22	11,06	2,01

De um modo geral, a Tabela 4.7 sugere que as maiores diferenças entre antes e após o ensaio são para o revestimento em cromo duro, o que comprova a inferioridade deste, em relação ao WC-CoCr. Também se pode destacar a diferença percentual de 11,06% no parâmetro  $R_{máx}$  para o revestimento aspergido. Novamente esse fato pode ser esclarecido pelo aparecimento de porosidades vistas através de microscopia.

#### 4.5.2 Desgaste das hastes e vedações

Na Figura 4.28 são apresentadas as imagens adquiridas das hastes revestidas com cromo duro, com auxílio de um microscópio digital USB. A Figura 4.28 (a) revela as

imagens para que possa servir no processo de qualificação/identificação da superfície com características iniciais aos testes.

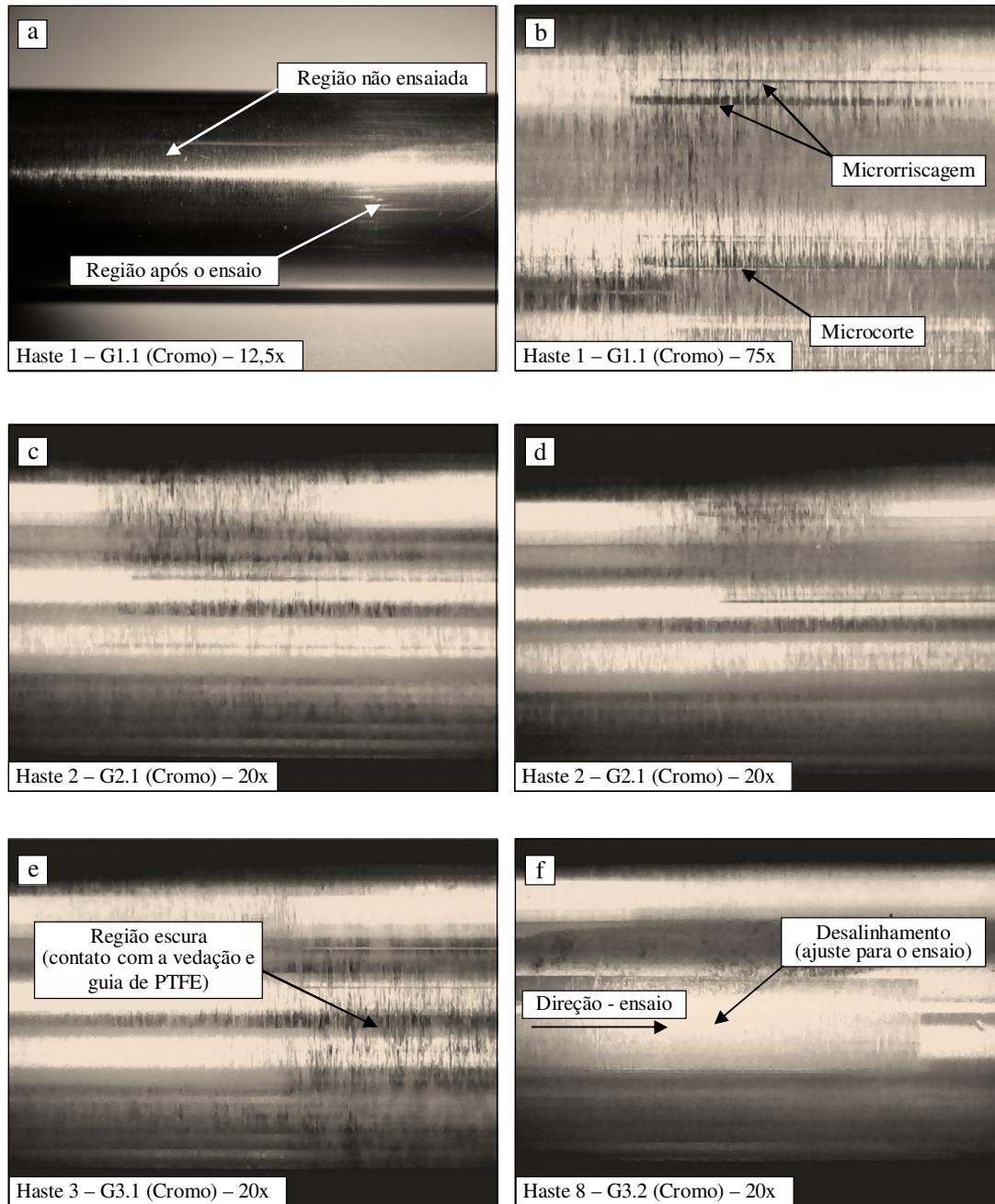


Figura 4.28 Superfícies das hastes revestidas com cromo duro após o teste em bancada correspondente a 60.000 ciclos.

Aproximadamente 70% das superfícies ensaiadas de cromo duro apresentaram-se, com algum tipo de micromecanismos de desgaste, agindo como impulsionadores no processo de fuga de óleo, resultado mostrado logo a seguir nas Figuras 4.32 e 4.33. Na

Figura 4.28 (b), observa-se a ocorrência de dois tipos de mecanismos abrasivos, chamados de microrrisagem e microcorte. A microrrisagem é caracterizada pela baixa profundidade de sulcamento, todavia essa característica não deixa de ser importante para o estudo, pois ela fornece indícios de que a superfície se tornou vulnerável na presença de um material abrasivo. Já o processo de microcorte é caracterizado por uma maior profundidade, é esse efeito pode ser catastrófico, considerando superfícies que necessitam de estanqueamento de fluido. Nas Figuras 4.28 (c) e (d), os mecanismos de desgaste também atuam, porém de forma um pouco menos severa. Esses fatos levam a um indicativo de que, a vida útil dos elementos de vedação poderá ser diminuída.

Verifica-se também outra característica importantíssima na mudança de superfície das hastes de cromo duro, Figura 4.28 (e). Após as medições realizadas de rugosidade foi constatado que a superfície de apoio (sustentação- $R_{mr}$ ) teve um acréscimo de 9%, partindo para uma condição não ideal diante das superfícies de utilizadas para o deslizamento de vedação, em referência a Trelleborg, (2011). Justifica-se a ação do polimento pelas curvas de *Abbott-Firestone*, mostradas na Figura 4.22. Esse valor medido de 83% para o parâmetro  $R_{mr}$  pode modificar a vazão necessária de lubrificação das superfícies, ocasionando deformações do elemento de vedação ao longo do tempo, ficando inevitável o aparecimento de vazamento.

A região destacada pela Figura 4.28 (f) exhibe o que poderá ocorrer no caso de um pequeno desalinhamento de um componente revestido com cromo duro eletrodepositado. Identifica-se através das medições de rugosidade que houve também um início de polimento da superfície mostrada pela diminuição de  $R_a$  e pelo aumento de  $R_{mr}$ . Na Figura 4.29 são apresentadas discretas deformações encontradas nas regiões dos elementos e vedação utilizados (Figura 3.18), após os testes em bancada.

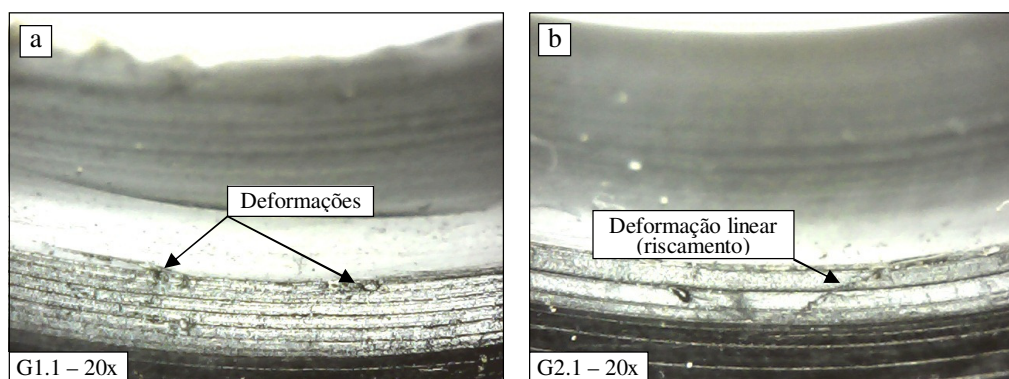


Figura 4.29 Região de contato da vedação com a haste cromada. (a) vedação G1.1 - ampliação de 20x e (b) vedação do ponto G2.1- ampliação de 20x.

As imagens produzidas pela microscopia ótica revelam alguns pequenos mecanismos atuantes nas vedações após os ensaios. Na Figura 4.29 (b), possivelmente as marcações estão associadas há alguma partícula de sílica que esteve presa por algum tempo na região de deslizamento, durante dos ensaios.

Na Figura 4.30 são apresentados os resultados com relação às superfícies de deslizamento para o revestimento a base de WC.

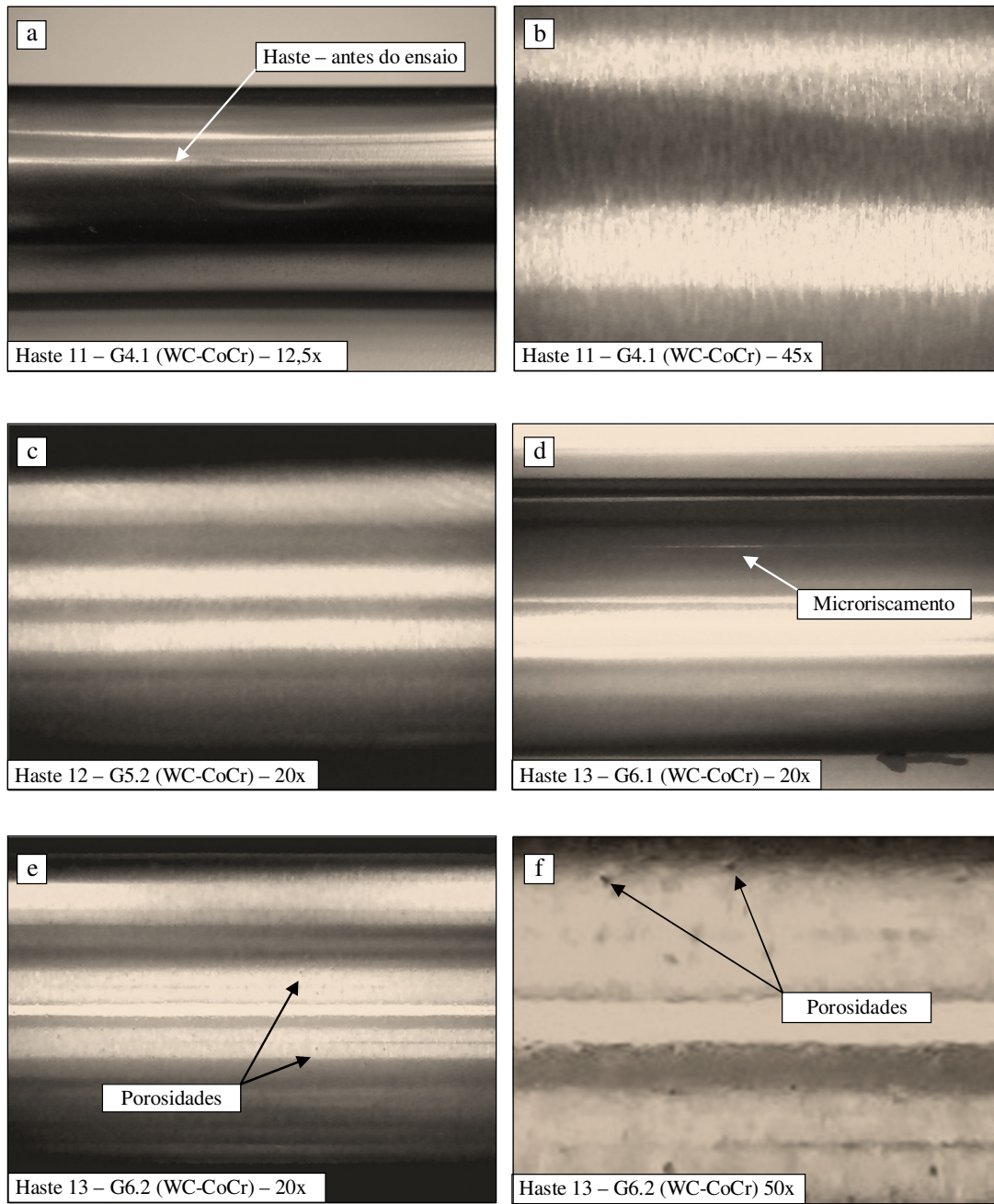


Figura 4.30 Superfícies das hastas revestidas com WC-CoCr após o teste em bancada correspondente a 60.000 ciclos.



Como indicado na Figura 4.30, uma comparação de acabamento da superfície antes e após os ensaios são mostrados para as hastes 11, 12 e 13, referente ao revestimento a base de WC. A Figura 4.30 (a) representa uma haste em uma condição superficial adequada para utilização dos testes em bancada. Nas Figuras 4.30 (b) e (c), observa-se que houve mínima alteração da superfície das hastes para 60.000 ciclos de teste, impossibilitando a visualização dos mecanismos de desgaste. Entretanto, as Figuras 4.30 (e) e (f) apresentaram em algumas regiões seção ensaiada, algumas microcavidades lembrando o efeito porosidade.

Com os resultados da Figura 4.25 (a) e (b), identifica-se que os perfis de avaliação das superfícies das hastes WC-CoCr, obtiveram pequenas modificações, e isso sugere boa resposta quanto ao desgaste. A Figura 4.31 apresenta dois perfis de vedação que esteve nos ensaios do revestimento aspergido.

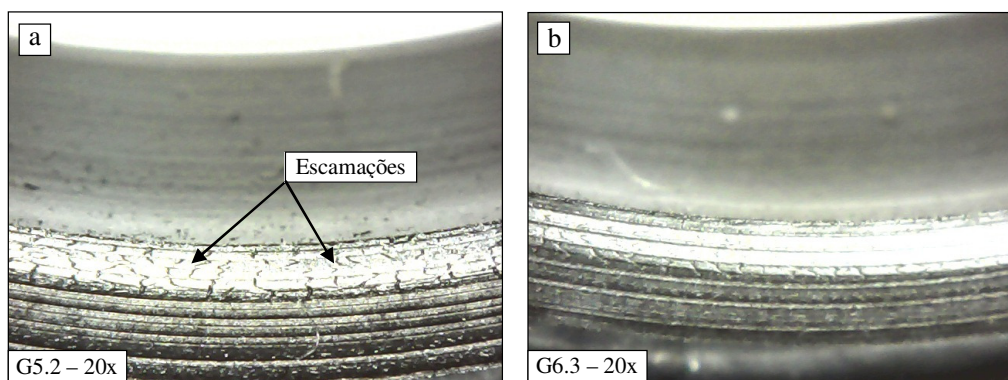


Figura 4.31 Região de contato da vedação com a haste aspergida. (a) vedação G5.2 - ampliação de 20x e (b) vedação do ponto G6.3 - ampliação de 20x.

Observa-se na imagem da vedação G5.2 do teste. Talvez seja um indicativo de deformação da vedação, pelo aumento pontual de temperatura. Salienta-se que foram utilizadas gaxetas perfil U em poliuretano, não devendo ultrapassar a temperatura 80°C. As medições da temperatura eram realizadas através de um pirômetro a laser na região externa do bloco, próximo à haste. Porém não foi possível obter as medições internas pontuais de cada componente e essas escamações da figura citada possam estar associados a elevação das temperaturas.

#### 4.5.3 Vazamento de óleo

O vazamento pelo número de ciclos de forma individual para os três ensaios realizados dos revestimentos são mostrados na Figura 4.32.

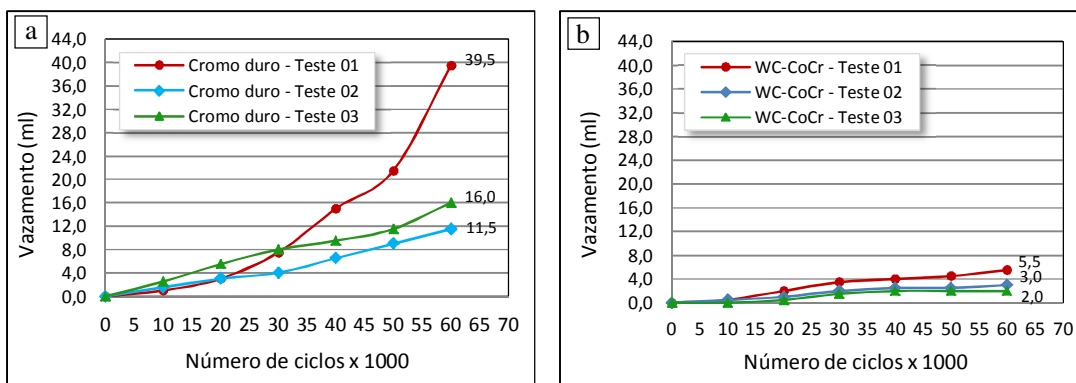


Figura 4.322 Total dos vazamentos em (ml) de cada revestimento para os três ensaios após a finalização dos 60.000 ciclos. (a) cromo duro e (b) WC-CoCr.

Observa-se que o vazamento obtido da superfície em cromo duro, durante os 60.000 ciclos foi sempre maior que no revestimento a base de WC, e é perceptível que esse isso sempre ocorreu de forma gradativa.

Durante todos os testes em bancada a temperatura do óleo foi monitorada de forma a justificar ao longo e ao final do ensaio as fugas de óleo obtidas. Percebe-se que no primeiro teste, tanto para o cromo duro quanto para o WC, as vazões de fuga (vazamentos) foram maiores em relação aos ensaios subsequentes, e esse fato pode ser explicado pelo acréscimo de temperatura (52 a 62°C), percebido principalmente após os 10000 ciclos dessa etapa.

Mesmo com esse fato ocorrido durante o primeiro ensaio, a Figura 4.32 (b) revela que o vazamento ocorrido é quase linear para o revestimento WC-CoCr aspergido, isso indica que as taxas de fuga (ml/ciclos) durante todo o ensaio foi praticamente constante. Logo para o cromo, as taxas de fuga representaram uma função de natureza exponencial, indicando um maior vazamento ao longo do tempo. Esse resultado pode ser explicado também pelas imagens registradas das hastes após os testes e pelas modificações de superfície.

Na Figura 4.33 é apresentada a média dos vazamentos e as comparações das superfícies, obtidas após os testes.

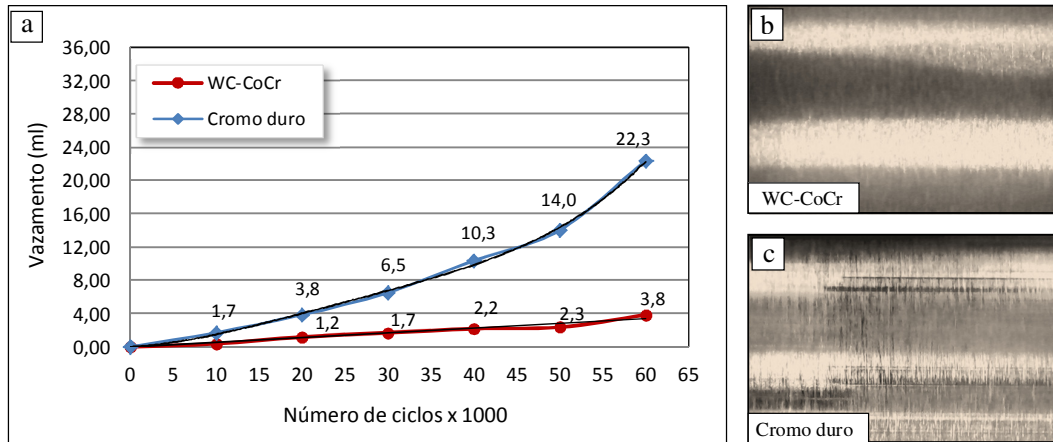


Figura 4.33 Comparação entre superfícies dos revestimentos em relação a média total dos vazamentos em (ml) para todos os ensaios.

Nesse gráfico representam-se as curvas relacionadas ao vazamento médio para os dois revestimentos após os ensaios em bancada. Observa-se que a curva obtida para o revestimento em cromo duro possui um comportamento polinomial, evidenciando que há outros fatores que possam estar interferindo no processo de vazamento dessas hastes, como os mecanismos de desgaste abrasivo, representados através das imagens (b) e (c) da Figura 4.33. Na imagem representada para do revestimento a base de WC, não há evidências significantes de mecanismos atuantes e isso explica com aproximação a forma linear da linha de tendência, mostrada através da equação.

O índice de correlação para o revestimento de cromo duro foi de 0,9987, indicando que o modelo proposto descreve bem o comportamento da variável vazamento em função do número de ciclos.

Inúmeras das aplicações em sistemas hidráulicos estão em grupo chamado de hidráulica estacionária, que são os equipamentos como prensas, extrusoras, etc. O efeito de desgaste dos componentes nesse sistema (grupo) acarretará apenas paradas não desejáveis, como é o caso da manutenção corretiva. Essas paradas de certa forma ocasionam perdas consideráveis no processo produtivo, culminando em perdas econômicas como foi citado anteriormente pela ASME, no item 2.4 desse trabalho. Entretanto, quando é direcionada a pesquisa para máquinas/equipamentos hidráulicos, destinados ao transporte de pessoas, como é o caso de aeronaves, o conhecimento da falha de um componente tem outro significado, ou seja, deve-se trabalhar sempre com sistemas que permitem monitorar essa falha, fazendo com que os riscos acidentais possam ser minimizados.

Com as curvas da Figura 4.33 é possível de certa forma, prevê uma falha do conjunto de haste e vedação utilizado, a fim de minimizar/eliminar esses riscos funcionais ou acidentais de cada equipamento em serviço.

Uma simples indicação do desempenho dos revestimentos utilizados quanto ao vazamento de óleo são mostrados de forma individual nas Figuras 4.34 (a) e (b).

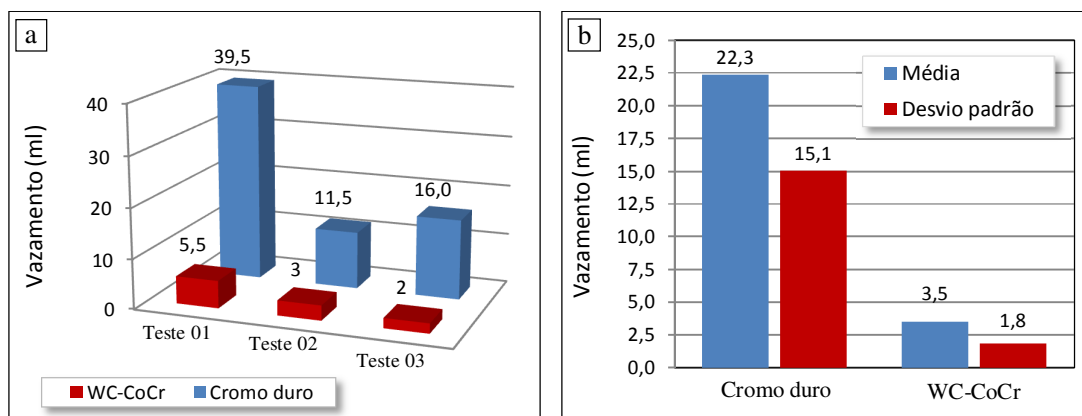


Figura 4.334 Vazamentos de óleo ao longo do ensaio. (a) comparação dos vazamentos individuais a cada ensaio e (b) média dos vazamentos e desvio padrão dos ensaios.

A Figura 4.34 (a) apresenta os vazamentos obtidos a cada teste realizado. Entretanto o gráfico de barras, Figura 4.34 (b) indica o vazamento médio e o desvio padrão para cada revestimento. Observou-se um baixo vazamento para as hastes revestidas de WC-CoCr, com menor desvio padrão. Isto é um indicativo de melhor desempenho com relação à consistência na fuga de óleo.

De um modo geral para todos os testes realizados, o revestimento em cromo duro apresentou-se com maior vazamento. No teste 01, observa-se o vazamento produzido pela haste de em cromo duro foi 7 vezes maior do que a haste revestida em WC-CoCr. No segundo teste também houve superioridade de vazamento para o cromo duro, quase 4 vezes a mais. E no terceiro teste, também confirmou uma superioridade do revestimento aspergido, onde o cromo duro indicou 8 vezes a mais de vazamento de óleo contabilizado em ml.

Embora os testes terem fornecido um desvio padrão elevado, não dá para negligenciar a superioridade do revestimento aspergido por HVOF quanto ao efeito de vazamento, e todos esses resultados mostram que é possível a substituição do cromo eletrolítico em hastes de cilindros hidráulicos.

## 5.0 CONCLUSÕES

### 5.1 Corpos de prova planos (CPP)

Os resultados experimentais e a análise da literatura permitem formular as seguintes conclusões:

- A microestrutura do cromo duro apresentou-se com microfissuras, mostrando que o processo eletrodepositado pode contribuir e acelerar o efeito de oxidação do material base;
- No processo de aspersão por HVOF, foram obtidas camadas com baixos níveis de porosidade (< 1,0%), com microdurezas elevadas, da ordem de 1250 HV<sub>0,01</sub>, demonstrando parâmetros adequados durante aspersão térmica e o controle otimizado do processo;
- Em particular, no ensaio de desgaste realizado conforme ASTM G65-00 (utilizando roda de borracha), os corpos de prova revestidos por HVOF, superaram os revestimentos por eletrodeposição. Os ensaios executados nas mesmas condições tiveram volumes perdidos de 0,22 mm<sup>3</sup> e 1,47 mm<sup>3</sup>, para o WC-CoCr e o cromo duro respectivamente;
- Imagens produzidas pela técnica de microscopia eletrônica após o ensaio de desgaste revelaram a presença de dois mecanismos abrasivos: o microcorte e/ou microrriscação devido às partículas abrasivas formadas ao longo do ensaio, onde o cromo duro apresentou-se com larguras de 2 µm, contra 0,03 µm do WC-CoCr e o lascamento de micropartículas de carbonetos, ocasionado pela retirada da matriz de cobalto;
- No ensaio executado conforme ASTM G99-04 (pino sobre disco), o WC-CoCr, apresentou um menor coeficiente de atrito e baixos valores de rugosidade, o resultado disso foi à produção de trilhas com menor largura utilizando-se o mesmo diâmetro do pino, em comparação ao cromo duro, vistas através da técnica por perfilometria.

### 5.2 Corpos de prova – hastes dos cilíndricos hidráulicos (CPH)

Os resultados experimentais e a análise da literatura permitem formular as seguintes conclusões:

- Estudando os parâmetros de rugosidade empregados na caracterização das hastes de cilindros hidráulicos, observa-se que além do  $R_a$ , outros parâmetros como  $R_z$ ,  $R_{máx}$  e principalmente o  $R_{mr}$  são necessários. No trabalho em questão foi utilizado, o parâmetro  $R_a$  se mostrou eficiente na avaliação prévia da superfície, porém, como fica isolado dos outros parâmetros utilizados na avaliação, não consegue contribuir na determinação da distribuição dos picos nas superfícies, impactando no sistema de vedação.
- Em valores de rugosidade, houve uma redução de 0,16  $\mu\text{m}$  para 0,14  $\mu\text{m}$  no parâmetro médio  $R_a$  das hastes revestidas em cromo duro, indicando que a ação de deslizamento das vedações e guias de PTFE, diminuíram os picos no perfil de superfície, evidenciando o desgaste e o seu polimento. No entanto as hastes revestidas com WC-CoCr mostraram pequenas evidências na modificação de  $R_a$ ,  $R_z$ , ou modificações significativas da área de sustentação  $R_{mr}$ , caracterizando o polimento da superfície, justificados também pelas curvas de Abbott-Firestone e isso é visualmente confirmada pela aparência de haste “sem uso” mesmo após os testes em bancada;
- O desgaste nas hastes foi quantificado através dos mecanismos, vistos através das imagens produzidas por microscopia. Observou-se que as superfícies das hastes revestidas através da eletrodeposição por cromo, apresentaram um número maior de riscos e cortes, fazendo com que alguns pontos de dreno o nível de vazamento crescesse de forma significativa. O revestimento WC-CoCr, mostrou-se visualmente apenas com pequenos riscos, justificando a elevada dureza e um menor coeficiente de atrito;
- Os vazamentos adquiridos foram claramente observados com maior quantidade no revestimento de cromo eletrodepositado. Embora a observação quanto ao número e a severidade dos mecanismos de desgaste pertinente ao cromo duro, não corresponder diretamente a todo vazamento quantificado, nesse trabalho conclui-se que esses mecanismos foram muito significativos para a ampliação do efeito de vazamento;
- Os vazamentos adquiridos para o WC-CoCr foram muito inferiores comparados com os adquiridos para o cromo duro. As hastes e as vedações estavam em bom estado após os 60.000 ciclos. Provavelmente ultrapassariam uma ciclagem de 120.000 de ciclos, sem promover grandes vazamentos. Embora o desvio padrão ter sido elevado para os dois revestimentos, 15% para o cromo e 1,8% para o WC-CoCr, os ensaios mostraram que nas mesmas condições para os três testes, o revestimento aspergido mostrou-se muito superior, do que o tradicional cromo em aplicações em hastes hidráulicas.

## 6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o comportamento quanto ao desgaste abrasivo de outras ligas aspergidas, como WC-Co e Tribaloy e também em outros processos de revestimentos como PVD, CVD;
- Avaliação da resistência à corrosão dos revestimentos WC-CoCr, cromo duro, entre outros, através dos diversos meios;
- Controlar e aquistar os dados durante os ensaios das hastes referentes à pressão, velocidade e temperatura;
- Trabalhar com maior número de ciclos e em condições ambientais adversas, principalmente em temperaturas negativas, visando aplicações aeronáuticas;
- Ensaiai as hastes em condições de carregamento, para que a força máxima de deslocamento possa ser vista através do efeito de flambagem.

## 7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM E 384-89**. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. Philadelphia, PA, 2008 .

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM G 65-00**. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. West Conshohocken, PA, 2001 .

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM G 99-04**. Standard Test Method for Wear Testing Whith a Pin on Disc Apparatus. West Conshohocken, PA, 2000 .

ANDRETTA, C. **Brunimento para Recuperação das Camisas de Pistão dos Motores de Combustão Interna**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas: São Paulo, 2001. 112p.

ASM Internacional. **Handbook of Thermal Spray Technology**. Editora, J. Davis. Detroit, USA, 2004. 329p.

ASM Internacional. **Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance**. Editora, J. Davis. Washington, USA, 2001. 328p.

ASM International. **ASM Handbook. Volume 18 - Friction, Lubrification and Wear Technology**. 4 ed., Vol. 18. Detroit, USA, 1992, 1879p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**. Especificação Geométrica do Produto (GPS) – Rugosidade: Método do Perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, RJ, 2002.

BAILEY, M. **Case Study - Hard Chrome Plating Problems - Crazing and Pin Holes**. Junho, 2011. Acesso em 06 de Março de 2012, disponível em [www.finishing.com](http://www.finishing.com)

BOTH, G. B. **Caracterização e Avaliação Tribológica de Superfícies Resistentes ao Desgaste para Aplicação em Ferramentas de Conformação a Frio**. Dissertação de Mestrado, UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, RS - Dezembro, 2011. 123p.,

BRASIL, F. **Estudo de Corrosão sob Tensão em Tubos de Aço Inoxidável AISI 304 L, Aspergidos Termicamente com Alumínio por Arco Elétrico**. Dissertação de Mestrado, UFPR - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR. Dezembro, 2003. 125p.,

BRITO, V. R. **Caracterização de Revestimentos Metálicos Aspergidos Termicamente por Arco Elétrico**. Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow a Fonseca CEFET. Rio de Janeiro, RJ, Abril, 2010.130p.



CASTRO, C. A. **Resistência ao Desgaste Abrasivo das Sapatas de Trator de Esteira após Processos de Recuperação**. Dissertação de Mestrado, UFPR - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, Maio, 2010. 92p.

COMELI, F. W. **Estudo de Revestimento Aspergido por HVOF Contra o Desgaste em Hastes de Válvulas de Turbinas Termelétricas**. Dissertação de Mestrado, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Dezembro, 2006.137p.

COTELL, C. M., SPRAGUE, J. A. **ASM Handbook - Surface Engineering (Vol. 5)**. ASM Internacional. 1994. 2344p.

DEGENNARO, T., TWEED, G. **Air Force Evaluation of Chrome Rod Alternative Coatings**. ASTN - Aerospace Sealing Technologic News. N° 11, p. 3-4, 1999.

FANG, W. C. **Processing Optimization, Surface Properties and Wear Behavior of HVOF Spraying WC-CrC-Ni Coating**. Journal of Materials Processing Technology , p. 3561-3567, 2009.

FLITNEY, B. **Alternatives to Chrome for Hydraulic Actuators**. Sealing Technology. N° 10, p. 8-12. 2007.

GADELMAWLA, E. S., KOURA, M. M., MAKSOUD, T. M., ELEVA, I. M., SOLIMAN, H. H. **Roughness Parameters**. Journal of Materials Processing Technology. N° 123, p. 123-145, 2002.

GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials**. Tribology series, Elsevier Science Publishers, Vol. 10, 1987. 560p.

GOMIS-BELLMUNT.O. **Design Rules for Actuators in Active Mechanical System**. Ed. Springer, 1° ed., Vol 1, New York, USA, 2009. 205p.

HÖRL, L. **Comparison of Test Methods for Hydraulic Rod Seals**. Sealing Technology. N° 12, p. 8-13, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3274. Geometrical Product Specification (GPS) – Nominal Characteristics of Contact (stylus) Instruments**. Switzerland, IN, 1996.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4288. Geometrical Product Specification – Surface Texture: Profile Method – Rules and Procedures for the Assessment of Surface Texture**. Switzerland, IN, 1996.

LEACH, R. **The Measurement of Surface Texture Using Stylus Instrument**. Measurement Good Practice Guide. N° 37. p. 85. United Kingdom, 2001.

LEAL, L. D. **Tribologia**. Apostila, UFSC, Engenharia Mecânica. Florianópolis, SC, 2004. 172p.

LEGG, K., SARTWELL, B. D. **Hard Chromium Alternatives Team Update-Improving Performance While Reducing Cost**. Rowan Technology Group, Washington. 2003. 07p.

- LEITE, R. V. **Estudo Comparativo entre Ligas Resistentes ao Desgaste Abrasivo, Aplicadas por Soldagem em Chapas Metálicas para Fabricação de Placas Antidesgastes**. Dissertação de Mestrado, UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Uberlândia, MG, Março, 2008. 95p.
- LIMA, C. C., TREVISAN, R. **Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicações**. Ed. ArtLiber, São Paulo, SP, 2002. 152 p.
- LINSINGEN, I. V. **Fundamentos de Sistemas Hidráulicos**. Ed. UFSC, 3ªed., Florianópolis, SC, 2008. 399p.
- MACHADO, A. **Avaliação da Rugosidade em Superfícies Complexas**. Dissertação de Mestrado, Sociedade Educacional de Santa Catarina - SOCIESC, Joinville, SC, 2009. 103p.
- MAGNANI, M. **Estudo da Resistência ao Desgaste e à Corrosão de Revestimentos Metálicos-Cerâmicos Aplicados na Liga AA7050 Mediante Aspersão Térmica Oxidável de Alta Velocidade (HVOF)**. Tese de Doutorado, UNESP - Universidade Estadual Paulista, Araraquara, SP, Janeiro, 2008. 241p.
- NASCIMENTO, I. A., BAPTISTA, A. L. **Desgaste - Divisão Metalurgia / Processos**. Acesso em 29 de Agosto de 2011, disponível em Spectru - Instrumental Científico Ltda: [www.spectru.com.br](http://www.spectru.com.br), 2005.
- NUCCI, R. **Avaliação da Resistência ao Desgaste de Cermets Depositados pelo Processo de HVOF e do Cromo Duro Eletrolítico**. Dissertação de Mestrado, USP - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Maio, 2005. 97p.
- PALMA, E. **Tolerâncias de Acabamento Superficial - Rugosidade**. Apostila de Graduação. Apostila de Graduação, PUC/Minas - Pontifícia Universidade Católica. Minas Gerais, MG, 2009. 19p.
- PAPATHEODOROU, T. **Influence of Hard Chrome Plated Rod Surface Treatments on Sealing Behavior of Hydraulic Rod Seals**. Sealing Technology, p.5-6, 2005.
- PAREDES, R. S. **Aspersão Térmica**. Apostila de Graduação, UFPR - Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Curitiba, PR. 2009. 102p.
- PAWLOWSKI, L. **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings**. Ed. John Wiley & Sons, 2ª ed. England, 2008. 647p.
- PEPPIATT, N. **The Influence of the Rod Wiper on the Leakage from a Hydraulic Cylinder Gland**. Sealing Technology, p. 5-6, 2003.
- PEPPIATT, N., FLITNEY, B. **International Standards for Reciprocating Seals Used in Hydraulic Applications**. Sealing Technology, p. 7-10, 2004.
- RABIE, M. G. **Fluid Power Engineering**. Ed. McGraw-Hill, 1º ed., Vol. 1, New York, USA, 2009. 443p.
- RABINOWICZ, E. **Friction and Wear of Materials**. Ed. John Wiley, 2ª ed., New York, USA, 1995. 315p.

REZENDE, C. R. **Correlação entre Modelagem Numérica e Resultados Experimentais na Análise de Estabilidade Dinâmica do Torneamento de Aços.** Dissertação de Mestrado, PUC/Minas - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Minas Gerais, MG, Fevereiro, 2006.198p.

SANTOS, R. C. **Quando Recuperar os Cilindros Hidráulicos.** Revista M&T - Manutenção e Tecnologia, Nº 143, p.20-27, 2011.

SARTWELL, B. D., LEGG, K. O., ZIMMERMAN, Z., REYNOLDS, M., GRIBRO, J., MASON, R. **Validation of HVOF Thermal Spray Coatings as a Replacement for Hard Chrome Plating on Hydraulic/Pneumatic Actuators.** U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE, Environmental Security Technology Certification Program (ESTCP) , Washington, USA, Julho, 2006. 175p.

SCHIEFLER, M. **Estudo Microestrutural e Eletroquímico de Revestimentos Metálicos Depositados por Aspersão Térmica.** Dissertação de Mestrado, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Dezembro, 2004. 137p.

SOUZA, A., LABONI, A., COUTINHO, I. **Revestimentos Superficiais - Tecnologia de Superfícies – Aplicação de Cromo Duro em Ferramentas, Moldes e Matrizes.** 1º Encontro de Integrantes da Cadeira Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes, p.1-10, 2003.

SOUZA, R., NASCIMENTO, M. d., VOORWALD, H., PIGATIN, W. **Carbeto de Tungstênio - Uma Alternativa ao Cromo Duro Eletrodepositado.** Jornadas SAM 2000 - IV Colóquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga , p.575-576, 2000.

STACHOWIAK, G. W., BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology.** Ed. BH - Butterworth-Heinemann, 3ª ed, Amsterdam, Holanda, 1993. 770p.

STEEP, F., WÜSTENHAGEN, G. **Counter surface hydraulic seals for heavy duty applications.** Sealing Technology, p.8-9, 2006.

STOETERAU, R. L. **Tribologia.** Apostila de Graduação, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC. 2004. 179p.

STOKES, J. **Theory and Application of the High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Thermal Spray Process - Cap. II.** Dublin City University, Dublin, Irlanda. 2008. 14p.

STOLARSKI, T. **Tribology in Machine Design.** Ed. BH - Butterworth-Heinemann Oxford, Grã Bretanha, 2000. 312p.

SULZER METCO - **The Coatings Company.** Acesso em 04 de Abril de 2012, disponível em [www.sulzermetco.com](http://www.sulzermetco.com)

TRELLEBORG SEALING SOLUTION. **Hidraulic Seals / Rod Seals.** Catálogo de Produtos, Suécia, 2011. 149p.