



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ESTUDO DE REVESTIMENTO ASPERGIDO POR HVOF
CONTRA O DESGASTE EM HASTES DE VÁLVULAS
DE TURBINAS TERMELÉTRICAS**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

FRANCO WRONSKI COMELI

Florianópolis, dezembro de 2006.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ESTUDO DE REVESTIMENTO ASPERGIDO POR HVOF
CONTRA O DESGASTE EM HASTES DE VÁLVULAS
DE TURBINAS TERMELÉTRICAS**

FRANCO WRONSKI COMELI

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA DE MATERIAIS
sendo aprovada em sua forma final.**

Professor Doutor Augusto José de Almeida Buschinelli – Orientador

Professora Doutora Ana Maria Maliska – Coordenadora do Curso

BANCA EXAMINADORA

Professor Doutor Carlos Augusto Silva de Oliveira – Presidente

Professor Doutor Carlos Henrique Niño Bohorquez

Professor Doutor Ossimar Maranhão

“Pensando bem, que mais poderia alguém no mundo desejar do que olhar nos olhos das baleias, conversar com as gaivotas sobre os azimutes da vida, procurando durante cem dias cem noites um único objetivo e, subitamente, tê-lo diante dos olhos ao alcance dos pés numa tranqüila tarde de terça feira?”.

“Na quietude daquela noite, a última ancorado no infinito sossego da Praia da Espera, sonhando com os olhos abertos e ouvindo outros barcos que também dormiam, descobri que a maior felicidade que existe é a silenciosa certeza de que vale a pena viver”.

“E dormi. A lâmpada ficou acesa”.

Amyr Klink

*À minha esposa Simone
e meus filhos Henrique e Nívea*

AGRADECIMENTOS

- Aos companheiros e primeiros incentivadores, Cândido Volnei Pagnussatt e Luis Antônio Mileo Baptista. Ao amigo Sérgio Placidino Eleutério um agradecimento especial àquele que participou ativamente na formulação do tema, discussões e apoio constante.
- A Tractebel Energia SA seus colaboradores e aos Gerentes de Manutenção da TMS Elias Rogério Gomes, Linomar Osil Ferreira e Isac Paulo Teixeira pelo apoio dispensado.
- Ao meu orientador Professor Augusto José Almeida Buschinelli pela dedicação, paciência e apoio científico para a concretização deste trabalho.
- Aos meus pais José Grasso Comeli e Terezinha Wronski Comeli na confiança de que o mundo será melhor quanto mais sólida for a instituição da família.
- Aos colegas de trabalho Amilton Luz, Rodrigo Masiozek, Pedro Paulo de Souza, Dílson Costa, Márcio Medeiros Zamparetti e Haroldo L. de Oliveira Júnior. Aos companheiros de viagem e mestrado Anselmo Marcelino, Almir Turazzi e João Batista Alves companheiros de conversas e sono ao longo de 300 quilômetros.
- Aos colegas Vilmar dos Santos, Ricardo Mazzuco, Luciano dos Santos Neto, Paulo Gustavo Battistela, Francisco Menegaz, Max Fabiano Joaquim, Anderson Calegari, Wagner Vargas e Patrick Calegari e Glauco Marcon, pelo precioso auxílio no projeto e execução dos corpos de prova e dispositivos utilizados neste trabalho.
- A UFSC e seus colaboradores e em especial ao Rogério Antônio Campos, Secretário do PGMAT. Ao Professor Henrich Kreye (Uni Bw HH) e o Engenheiro Rodrigo Marge Pagnozzi (Uni Bw HH) pela cooperação e ensinamentos nas análises micrográficas dos corpos de prova aspergidos. Ao Professor José Divo Bressan (UDESC) e ao Professor Ossimar Maranhão (UTFPr) pelo importante auxílio nos ensaios de desgaste e aderência.
- A todos os meus alunos, fonte de inspiração para desafios de pesquisa e ensino, bem como a minha primeira professora Maria Luisa Pereira Godinho. Ao Colégio Estadual Antônio Knabben (Gravatal), CEDUP – Centro Profissionalizante Diomício Freitas (Tubarão), SENAI – Unidade de Tubarão, UNISUL – Universidade do Sul de Santa Catarina (Tubarão).
- Às empresas que participaram diretamente neste trabalho: REVESTEEL Metalização Ltda., BRASIMET Tratamentos Térmicos, RIJEZA Metalurgia Ltda., UDESC – Unidade de Joinville, SENAI – Unidade de Criciúma, USIPE Fundação e Usinagem Ltda.

SUMÁRIO

<u>LISTA DE FIGURAS.....</u>	<u>VIII</u>
<u>LISTA DE TABELAS.....</u>	<u>X</u>
<u>LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....</u>	<u>XI</u>
<u>RESUMO.....</u>	<u>XIII</u>
<u>ABSTRACT</u>	<u>XIV</u>
<u>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....</u>	<u>1</u>
1.1 CONDIÇÕES OPERACIONAIS E SISTEMA DE SELAGEM.....	3
1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	5
1.2.1 Objetivos e Contribuições	8
<u>2 CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</u>	<u>9</u>
2.1 FLUXO DE VAPOR NA TURBINA	9
2.2 VÁLVULAS EM TURBINAS TERMELÉTRICAS À CARVÃO	11
2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS.....	14
2.4 DESGASTE.....	16
2.4.1 Mecanismos de Desgaste.....	18
2.4.2 Ensaio de Desgaste	25
2.5 NITRETAÇÃO	26
2.6 ASPERSÃO TÉRMICA	27
2.6.1 Aplicações de Revestimentos por Aspersão Térmica.....	31
2.6.2 Preparação da Superfície	32
2.6.3 Análise da Camada Aspergida	33
2.6.4 Processos de Aspersão Térmica.....	37
2.6.5 Características dos Sistemas e Revestimentos Aspergidos com HVOF.....	43
2.6.6 Materiais de Adição para Aspersão Térmica	47
2.6.7 Aplicações Específicas para Revestimentos de Hastes	53

<u>3</u>	<u>CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS</u>	<u>61</u>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA HASTE ORIGINAL	61
3.2	CORPOS DE PROVA – ENSAIOS DE DESGASTE, ADERÊNCIA E METALOGRAFIA	62
3.3	ASPERSÃO TÉRMICA	64
3.3.1	Preparação da Superfície	64
3.3.2	HVOF – Parâmetros e Equipamentos	65
3.3.3	Pó para Aspersão	67
3.4	TRATAMENTO TÉRMICO – SIMULAÇÃO DE SERVIÇO A 540°C	69
3.5	ANÁLISE DA CAMADA ASPERGIDA COM Cr ₃ C ₂ -NiCr – HVOF	69
3.5.1	Microdureza	69
3.5.2	Metalografia	69
3.5.3	Ensaio de Aderência	72
3.5.4	Ensaio de Desgaste	74
<u>4</u>	<u>CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	<u>78</u>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS HASTES ORIGINAIS	78
4.2	TRATAMENTOS TÉRMICO E TERMOQUÍMICO (NITRETAÇÃO A PLASMA)	80
4.3	ANÁLISE DA CAMADA DE Cr ₃ C ₂ -NiCr ASPERGIDA PELO POR HVOF	82
4.3.1	Microdureza	82
4.3.2	Microestrutura dos Revestimentos Aspergidos	83
4.3.3	Ensaio de Aderência	90
4.3.4	Ensaio de Desgaste	92
	<u>CAPÍTULO V – CONCLUSÕES</u>	<u>101</u>
	<u>CAPÍTULO VI – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</u>	<u>103</u>
	<u>REFERÊNCIA DE LITERATURA</u>	<u>104</u>
	<u>APÊNDICE</u>	<u>109</u>

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Desenho esquemático de uma válvula de turbina termelétrica	2
Figura 02 – Desenho esquemático de uma válvula parcializadora. Unidade 5 e 6 UTLB....	4
Figura 03 – Desenho esquemático do sistema de selagem.....	4
Figura 04 – Imagem das aparências de desgastes das hastes de válvulas	7
Figura 05 – Desenho esquemático do ciclo de vapor da caldeira até a turbina.....	10
Figura 06 – Imagem do ciclo de vapor até o interior da turbina	10
Figura 07 – Desenho esquemático do fluxo de vapor no interior da turbina	11
Figura 08 – Desenho esquemático da localização das válvulas na turbina	12
Figura 09 – Imagem da válvula de bloqueio	13
Figura 10 – Imagem da válvula parcializadora	13
Figura 11 – Constituintes da película de oxidação do ferro aquecido a 700°C	22
Figura 12 – Desenho esquemático do processo de aspersão térmica	28
Figura 13 – Características da formação da camada depositada por aspersão térmica	28
Figura 14 – Classificação dos principais processos de aspersão térmica.....	30
Figura 15 – Imagem do processo de aspersão térmica – HVOF	41
Figura 16 – Correlação entre temperaturas e velocidades das partículas aspergidas	42
Figura 17 – Esquema construtivo da pistola DJ 2700 – Sulzer Metco	45
Figura 18 – Esquema construtivo da pistola JP 5000 – Tafa.....	46
Figura 19 – Imagem MEV da morfologia dos diferentes tipos de fabricação dos pós	49
Figura 20 – Imagem do sistema de aquecimento de um tribômetro.....	54
Figura 21 – Desenho da trilha de desgaste a 500°C do revestimento Cr ₃ C ₂ -NiCr.....	55
Figura 22 – Gráfico taxas de desgaste.....	56
Figura 23 – Gráfico da dureza dos anéis	59
Figura 24 – Gráfico da perda de massa de anéis e blocos (stellit) do teste de desgaste.....	60
Figura 25 – Imagem dos corpos de prova	63
Figura 26 – Imagem jateamento dos corpos de prova.....	64
Figura 27 – Imagem dos equipamentos e dispositivos utilizados na aspersão térmica.....	66
Figura 28 – Sistema de controle do processo de aspersão.....	67
Figura 29 – Imagem da aspersão térmica dos corpos de prova	68

Figura 30 – Desenho esquemático da colagem para o ensaio de aderência	73
Figura 31 – Imagem máquina e dispositivo de tração durante ensaio de aderência	73
Figura 32 – Imagem do tribômetro pino sobre disco – FITEJ de Joinville	74
Figura 33 – Imagem do detalhe do tribômetro para o ensaio de desgaste.....	75
Figura 34 – Imagem MO haste válvula parcializadora – unidade 5 – UTLB	79
Figura 35 – Imagem MO AISI 422 em seu estado de fornecimento	80
Figura 36 – Imagem MO do AISI 422 temperado e revenido	81
Figura 37 – Imagem MO do AISI 422 temperado, revenido e nitretado.....	81
Figura 38 – Imagem MO da indentação da camada aspergida por $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – HVOF...	83
Figura 39 – Imagem MO das camadas aspergidas por $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – HVOF	86
Figura 40 – Imagem MO das camadas aspergidas por $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – HVOF	87
Figura 41 – Imagem MO das camadas aspergidas por $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – HVOF	88
Figura 42 – Imagem MO das camadas aspergidas por $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – HVOF	89
Figura 43 – Gráfico dos resultados do ensaio de aderência	92
Figura 44 – Gráfico do taxa de desgaste em mm^3/m	95
Figura 45 – Gráfico do taxa de desgaste em g/m	95
Figura 46 – Gráfico ensaio de desgaste – perda de volume acumulativo	96
Figura 47 – Imagem MEV dos corpos de prova no ensaio de desgaste	98
Figura 48 – Imagem MEV dos corpos de prova no ensaio de desgaste	98
Figura 49 – Imagem MEV dos corpos de prova no ensaio de desgaste	99
Figura 50 – Imagem MEV dos corpos de prova no ensaio de desgaste	99
Figura 51 – Imagem MEV dos corpos de prova no ensaio de desgaste	100
Figura 52 – Imagem MEV dos corpos de prova no ensaio de desgaste	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Composição aços inoxidáveis martensíticos	15
Tabela 02 – Aparência das principais formas de desgaste	24
Tabela 03 – Comparação das características entre os processos de aspersão térmica	38
Tabela 04 – Materiais de adição em forma de pó	48
Tabela 05 – Características dos pós em função do processo de fabricação	50
Tabela 06 – Características dos revestimentos em função do processo de aspersão	52
Tabela 07 – Parâmetros de aspersão do processo HVOF – Valentinelli (2002)	54
Tabela 08 – Composição química dos materiais de aspersão – Mann e Prakash (2002).....	56
Tabela 09 – Propriedades dos revestimentos – Mann e Prakash (2002).....	57
Tabela 10 – Ensaio de desgaste pino sobre disco a 550°C – Mann e Prakash (2002)	57
Tabela 11 – Composição química dos corpos de prova	62
Tabela 12 – Identificação dos corpos de prova.....	63
Tabela 13 – Parâmetros de aspersão para sistema HVOF – DJ 2600	66
Tabela 14 – Composição química da haste da válvula parcializadora.....	78
Tabela 15 – Composição química DIN X20CrMoV 12-1	78
Tabela 16 – Dureza dos corpos de prova aspergidos com Cr ₃ C ₂ -NiCr – HVOF.....	82
Tabela 17 – Resistência à adesão do primeiro série dos corpos de prova	91
Tabela 18 – Resistência à adesão do segundo série dos corpos de prova.....	91
Tabela 19 – Dureza e rugosidade dos corpos de prova para ensaio de desgaste	92
Tabela 20 – Taxa média de desgaste (mm ³ /m)	94
Tabela 21 – Taxa média de desgaste (g/m)	94
Tabela 22 – Coeficiente de desgaste (k) e Resistência ao desgaste (1/k)	94

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

- AISI – American Iron Steel Institute (Instituto Americano de Ferros e Aços)
- ASTM – American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Ensaaios e Materiais)
- ASTM C633-79 – Norma que Padroniza Ensaio de Aderência
- ASTM G-99 – Norma que padroniza o Ensaio de Desgaste Pino Sobre Disco.
- bar – Unidade de Pressão
- CP – Corpo de Prova
- Cr₃C₂-NiCr – Carboneto (carbeto) de Cromo em Matriz Níquel/Cromo
- °C – Unidade de Temperatura (Graus Celsius)
- Diamalloy 3007 – Pó para Aspersão HVOF – Cr₃C₂-NiCr – Fabricante Sulzer Metco – “*The Coatings Company*”
- DIN – Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão para Normalização)
- DJ – Grupo de Pistolas de Aspersão – Diamond Jet
- DJ F 2600 – Pistola de Aspersão Térmica HVOF – Fabricante Sulzer Metco
- FMR – Flow Meter Reader (Leitura no Fluxômetro)
- H₂ – Gás Hidrogênio
- H 13 – Aço Para Trabalho a Quente (Norma AISI)
- HV_{0,3} – Unidade de Dureza Vickers (Carga de 2,94N)
- HVOF – High Velocity Oxy-Fuel Flame Spraying (aspersão óxi-combustível de alta velocidade)
- HRc – Unidade de Dureza Rockwell C
- HSU – Helmut Schmidt Universität (Universidade Helmut Schmidt)
- kg/cm² – Unidade de Tensão (Quilograma por Centímetro Quadrado)
- kV – Unidade de Tensão (Quilo Volt)
- l/min – Unidade de Vazão (Litros por Minuto)
- mg – Unidade de Massa (Miligrama)
- mbar – Unidade de Pressão (Milibar)
- m³/h – Unidade de Vazão (Metros Cúbicos por Hora)

- m/s – Unidade de Velocidade (Metros por Segundo)
- mm – Unidade de Distância (Milímetro)
- MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura
- MW – Unidade de Potência (Mega Watt)
- MPa – Unidade de Pressão (Mega Pascal)
- N – Unidade de Tensão (Newton)
- N₂ – Gás Nitrogênio
- O₂ – Gás Oxigênio
- OM – Optical Microscope (Microscópio Óptico)
- rpm – Unidade de Frequência de Rotação (Rotação por Minuto)
- RH – Reheated (Denominação de Vapor Reaquecido)
- Ra – Unidade de Rugosidade (Média Aritmética da Rugosidade)
- Ry – Unidade de Rugosidade (Maior Valor de Rugosidade no Percorso)
- SEM – Scanning Electron Microscope (Microscópio Eletrônico de Varredura)
- SH – Superheated (Denominação de Vapor Superaquecido)
- TMS – Tractebel Manutenção e Serviços
- Uni Bw HH – Universität der Bundeswehr Hamburg (Universidade das Forças Armadas Federais em Hamburgo, Alemanha).
- UTLB – Unidade Geradora B do Complexo Jorge Lacerda – SC
- UTLA – Unidade Geradora A do Complexo Jorge Lacerda – SC
- UDESC – Universidade para o Desenvolvimento do Estado de Santa Catarina
- USP – Universidade do Estado de São Paulo
- UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
- X40CrMoV 5-1 – Aço para Trabalho a Quente (Norma DIN)
- X20CrMoV 12-1 – Aço Inoxidável Martensítico (Norma DIN)
- X22CrMoV 12 -1 – Aço Inoxidável Martensítico (Norma DIN)
- WC – Carboneto (carbeto) de Tungstênio
- μ – Coeficiente de Atrito
- μm – Unidade de Distância (Mícron Metro)

RESUMO

As hastes de turbinas termelétricas a carvão são componentes de válvulas com a finalidade de inserir e posicionar um obturador em uma sede de vedação, regulando e ou obstruindo o fluxo de vapor de acordo com a carga necessária para manter a tensão de rede. As condições operacionais em que estão expostas as hastes podem resultar em aumento ou redução do diâmetro externo causados pela oxidação ou desgaste. O objetivo deste trabalho é o estudo da aspersão térmica como revestimento das hastes das válvulas de turbinas termelétricas a carvão, utilizadas no controle e bloqueio de vapor (válvulas parcializadora, combinada, bloqueio) do Complexo Jorge Lacerda – Capivari de Baixo – Santa Catarina. Foram efetuadas as caracterizações da microestrutura, composição química e propriedades mecânicas de uma haste da válvula parcializadora da Unidade 6 – UTLB – com 20.000 horas de operação. Isso forneceu informações que permitiram o estudo da viabilidade para a confecção das hastes no Brasil, bem como da possibilidade de emprego do processo de aspersão térmica como revestimento contra o desgaste em substituição a nitretação utilizada atualmente. Na revisão bibliográfica realizaram-se pesquisas e consultas sobre aspersão térmica e suas variáveis, tais como: equipamentos, materiais, análises dos revestimentos aspergidos e mecanismos de desgaste, bem como a definição de processos, parâmetros e tipos de revestimentos que atendessem as necessidades operacionais a que estão submetidas às hastes. Foi definido como processo de aspersão o HVOF utilizando-se o $\text{Cr}_2\text{C}_3\text{-NiCr}$ como material de aspersão, este revestimento carbídico (carbeto de cromo em matriz níquel cromo) possui propriedades que possibilita o seu emprego em situações que necessitem resistência ao desgaste e resistência à corrosão a quente. Ainda foi avaliada a influência da temperatura sobre o revestimento aspergido por meio de ciclagem térmica nos corpos de prova. Os corpos de prova foram aspergidos na REVESTEEL Revestimentos Ltda. – Pinhais – PR e RIJEZA Metalurgia Ltda. – São Leopoldo – RS. Os revestimentos aspergidos foram avaliados por meio de exames metalográficos (micrografia), ensaios mecânicos (aderência e microdureza) e ensaio de desgaste (pino sobre disco). A qualidade das hastes fabricadas com equipamentos e materiais disponíveis no mercado nacional sustenta a proposta de considerar a alternativa da aspersão térmica técnica e economicamente viável e interessante

Palavras-chave: Hastes de Válvulas, Aspersão Térmica, HVOF, Revestimentos Carbídicos.

ABSTRACT

The throttles valves spindles of steam turbines in the Coal-fired Power Plants are critical components with the purpose to insert and positioning a disk in a valve seat, regulating and/or obstructing the steam flow according to the electric output needs to keep the voltage tension in a reliable condition. The operational conditions to which the valve spindle is exposed can result in increasing or reducing of the external diameter caused due to the oxidation or wear. The main objective of this work is to investigate the application of thermal sprayed coatings on the steam turbine valve spindle used for the control and steam lock-out at the Jorge Lacerda Power Plant's in Capivari de Baixo, state of Santa Catarina (south Brazil). The characterizations of the microstructure, chemical composition and mechanical properties of a valve spindle of the control valve of the Unit 6 - UTLB - with 20.000 operating hours were elaborated to provide information which allowed the study of the viability of the manufacturing of these valves spindles in Brazil as well as of the possibility of using the thermal sprayed coatings against the wear replacing the nitriding up till the present moment. In the bibliographical revision were made researches and consulting about thermal spraying process and their variables as: equipments, materials, analyses of the sprayed coatings and wear defects mechanisms as well as the definition of processes, parameters and types of coatings in order to supply the operational needs that are submitted the valves spindles. It was been defined as spraying's process the HVOF and used $\text{Cr}_2\text{C}_3\text{-NiCr}$ as material specification. This coating (chromium carbide in matrix nickel chrome), contain properties that makes it possible to apply in situations where the resistance to wear and hot corrosion are required. Besides of the proceedings above the influence of the temperature on the thermal sprayed coating was evaluated through heat treatment 540°C simulating operational conditions. The sprayed coating were analyzed through metallographic examination (micrography), mechanical tests (adhesion and micro hardness) and wear test (pin on disk). The quality of the throttles valves spindles manufactured with equipments and available materials in the national market sustain the proposal of considering the alternative of the technical and economically viable and interesting thermal spraying.

Key Words: Valves spindles, Thermal Spraying Processes, HVOF, Carbides Coating

¹Tecnólogo em Eletromecânica – Mestrando no PGMAT – UFSC

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

As hastes de turbinas termelétricas a carvão são componentes de válvulas com a finalidade de inserir e posicionar um obturador na sede de vedação (no corpo da válvula) resultando em controle da admissão de vapor de acordo com as necessidades operacionais (carga) e ou bloqueio total do fluxo de vapor, são confeccionadas de aço inoxidável martensítico, temperadas e revenidas sendo posteriormente nitretadas. A Figura 01 mostra o desenho esquemático do conjunto de uma válvula onde podem ser observados os principais aspectos construtivos (localização da haste, obturador e respectiva sede de vedação) e as variações de temperatura durante a operação. As válvulas de turbinas operaram de dois modos:

- Controlador (válvulas parcializadoras), como nos casos de controle do SH (vapor superaquecido), RH (vapor reaquecido) e também no controle do by-pass das turbinas.
- Interceptador (válvula de bloqueio), que tem como finalidade a liberação ou retenção total do fluxo de vapor para o interior da turbina.

As hastes não podem sofrer modificações microestruturais que resultem em perda de resistência mecânica que possa interferir na garantia operacional, pois quando acionadas devem responder às solicitações com eficiência e segurança. Chama-se atenção para o fato destes componentes estarem sujeitos a esforços mecânicos de tração (hastes da válvula by-pass) ou compressão (hastes da válvula de bloqueio ou parcializadoras) quando estiverem em procedimentos operacionais, além da influência exercida pela temperatura de operação do vapor superaquecido em torno de 540°C e pressão em torno de $110 \text{ kg/cm}^2 - 10,78 \text{ MPa}$.

Além disso, O fluxo turbulento de vapor no interior das válvulas causa vibração de todos os seus componentes. O sistema de selagem aliado as condições de alta temperatura e pressão provoca o desgaste gradativo e contínuo da superfície das hastes, ocorrendo assim uma redução do seu diâmetro externo. A tolerância deste desgaste é de aproximadamente 30% da folga nominal que varia de 0,20 a 0,30 mm, ou seja, não deve ultrapassar 0,10 mm para manter condições confiáveis de operação.

As hastes são inspecionadas em revisões parciais de curta duração (após 12.000 horas de operação) ou ainda em revisões gerais em intervalos de 24.000 horas de operação; dependendo das condições dimensionais ou dos aspectos superficiais e internos que as mesmas apresentem, pode ser necessária sua substituição.

Nos procedimentos de manutenção e inspeção das hastes são utilizados instrumentos de medição e técnicas de ensaios não destrutivos (exame visual, partícula magnética e ultra-som) para a avaliação superficial e interna das hastes. Estas, por conseqüência, devem estar livres de defeitos superficiais e internos ou ainda folgas excessivas que comprometam o sistema de selagem do vapor e que possam vir a causar um travamento ou fratura durante manobras operacionais.

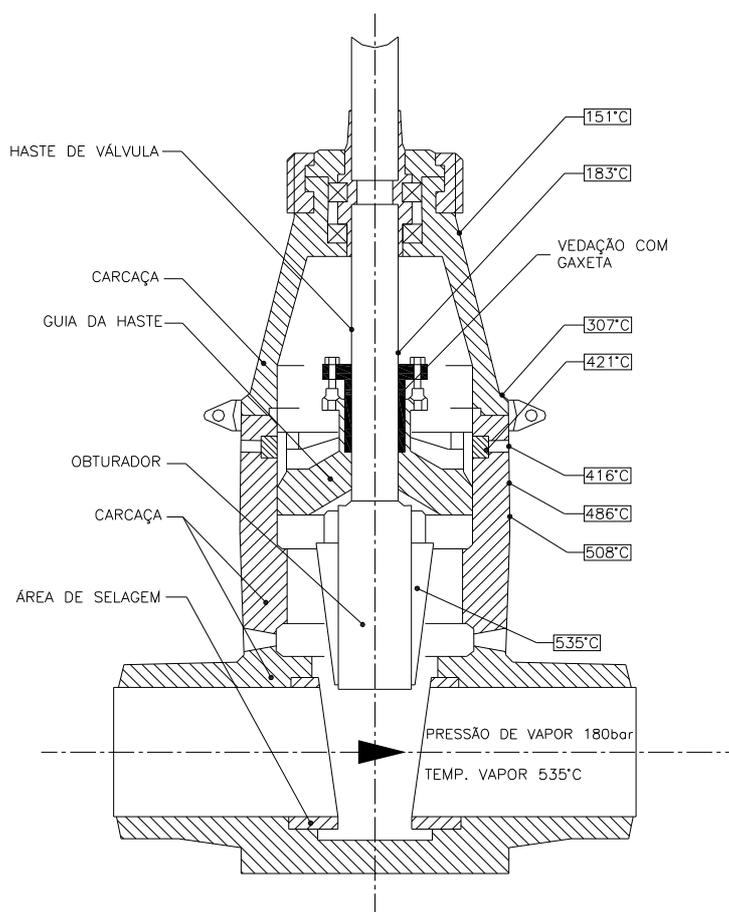


Figura 01 – Desenho esquemático de uma válvula de turbina termelétrica indicando regiões com diferentes temperaturas. Mann, B.S. e Prakash, B. [18].

Necessitando-se substituições das hastes a Tractebel Energia SA recorre a processos de importação que são relativamente onerosos e demorados havendo a necessidade de um estoque regulador, o que incide em despesas com manutenção de estoque. Nesse contexto a caracterização química, mecânica e microestrutural das hastes fornecerão importantes informações sobre a possibilidade da confecção destas na indústria nacional, bem como, o estudo da viabilidade do revestimento ser aplicado pelo processo de aspersão térmica substituindo ao tratamento termoquímico de nitretação empregado atualmente.

1.1 CONDIÇÕES OPERACIONAIS E SISTEMA DE SELAGEM

A Figura 02 mostra o desenho esquemático de uma válvula parcializadora da Usina Termelétrica Jorge Lacerda – UTLB – com capacidade de geração de energia elétrica de 262 MW. No desenho há um detalhe da localização do selo metálico em relação à haste, este elemento tem como finalidade impedir a passagem de vapor para o exterior da válvula. Ele é fabricado de aço AISI H13 (DIN X40CrMoV 5-1) temperado e revenido, apresentando uma dureza em torno de 35 HRc.

As válvulas e seus componentes operam com o vapor a uma temperatura em torno de 540°C e pressão de aproximadamente 140 kgf/cm² – 13,7MPa, condições que podem variar de acordo com a unidade e carga.

Os sistemas de selagem funcionam com base na utilização de uma série de anéis (selos metálicos), os quais restringem a passagem de vapor.

A restrição à passagem de vapor deve-se a diferenças dimensionais e volumétricas entre o selo e a região subsequente, esta diferença de área resulta em aumento de volume de vapor e conseqüente perda de pressão. As restrições à passagem de vapor formam-se nas zonas de alta turbulência entre os selos e a haste, esta turbulência é gerada na transformação da energia cinética (velocidade) do vapor em pressão, que ora é estrangulado (aumenta pressão e diminui velocidade) e ora é expandido (diminui a pressão e aumenta velocidade).

Após passar por sucessivos estágios dos selos metálicos o vapor perde assim a sua energia. A Figura 03 mostra esquematicamente o fluxo de vapor perdendo a sua energia após passar por sucessivos estágios entre o selo e a haste.

Juntamente com o sistema de selos metálicos utiliza-se a injeção de vapor reaquecido em contra corrente com temperatura em torno de 350°C e pressão de 200 mbar

– 0,02 MPa, que nestas condições ajuda a diminuir a pressão por intermédio da condensação do vapor superaquecido auxiliando na selagem do mesmo.

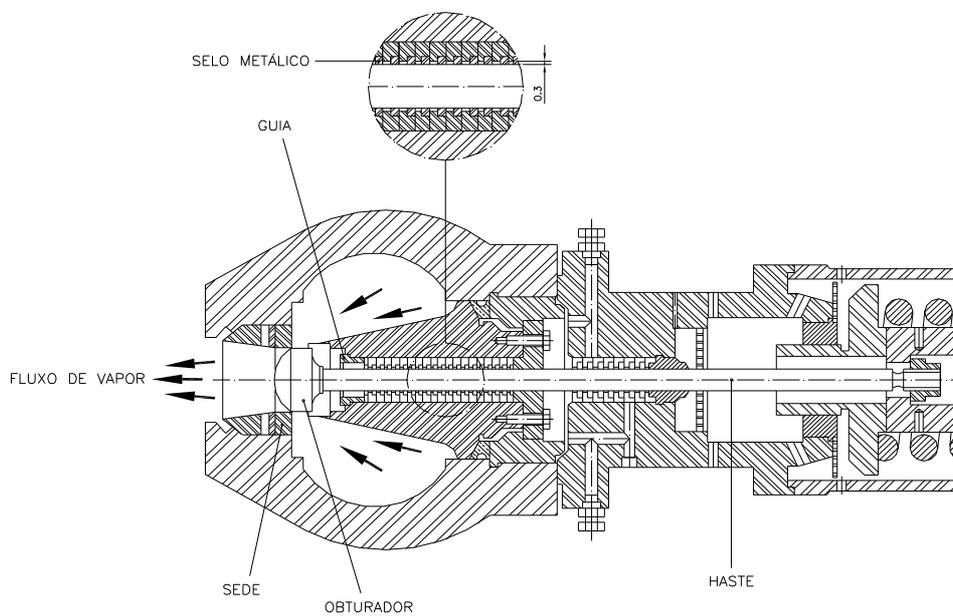


Figura 02 – Desenho esquemático de uma válvula parcializadora adaptado por Franco – Unidade 5 UTLB.

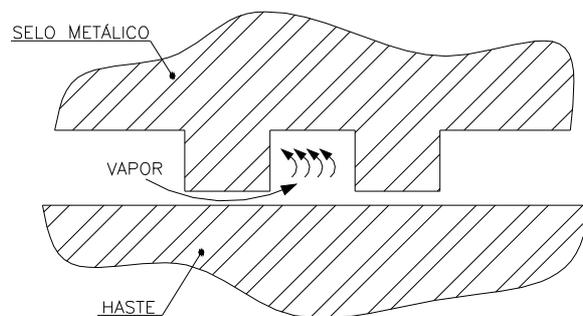


Figura 03 – A força do vapor após passar por sucessivos estágios perde sua energia.

1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

As hastes sofrem desgaste e oxidação causada pelo contato com o guia e ou selos metálicos durante período de operação e condições operacionais de alta temperatura e meio ambiente oxidante (vapor d'água): a Figura 04 mostra os aspectos superficiais mais comumente encontrados em hastes de válvulas retiradas de operação. É possível distinguir as áreas onde houve contato entre os selos metálicos e a haste pela diferença de coloração – cinza escuro fosco e o cinza claro brilhante, bem como formação de magnetita (Fe_3O_4) e erosão superficial.

O fluxo de vapor no interior das válvulas origina uma turbulência que conseqüentemente causa vibração das hastes que por estarem muito próximas do sistema de selagem de vapor (selos metálicos) entram em contato com os mesmos ocorrendo desgaste e conseqüentemente a perda de material. A remoção de material da superfície das hastes aumentará a folga entre a haste e os selos e ou o guia, possibilitando maior passagem de vapor, perda de pressão e conseqüentemente aumento da frequência de vibração. As condições operacionais de alta temperatura e atmosfera do interior das válvulas (vapor d'água) dão início a um processo de desgaste, corrosão e formação de uma camada de óxido, possibilitando riscos operacionais que comprometem a geração de energia elétrica.

Se duas superfícies, em contato e sob carga, das quais pelo menos uma é metálica forem submetidas a pequenos deslizamentos relativos, originados comumente por vibrações, observa-se freqüentemente um tipo de corrosão na interface, denominado corrosão sob atrito, corrosão sob fricção (*fretting corrosion*) ou ainda oxidação por fricção ou corrosão por atrito oscilante. Os danos causados por este tipo de corrosão são caracterizados pela alteração de cor da superfície do metal, com a formação de produtos pulverulentos da corrosão e, em alguns casos, pites. A incidência do fenômeno é muito grande, sendo quase todos os metais suscetíveis ao mesmo. Ocorre em locais de uniões locais onde os metais estão em movimento relativo [7].

Quando dois materiais estão em contato e em movimento relativo entre si, o contato em números limitado de pontos, representando os picos de rugosidade, dependendo da frequência ou carga dos movimentos os pontos de contato são cisalhados, com ou sem ocorrência de soldagem entre os materiais. As superfícies ficam cobertas com oxigênio, ou

outro agente corrosivo ou se oxidam superficialmente. A próxima aspereza retira o óxido ou pode, mecanicamente ativar a reação do oxigênio com o metal para formar um óxido, que por sua vez é arrastado, formando uma superfície metálica limpa. Essa seria a razão da diferença do brilho superficial – Figura 04b.

O alumínio e o aço são suscetíveis à corrosão sob atrito, o que pode ser explicado tanto pela formação de óxidos abrasivos, como pela adsorção do oxigênio por esses materiais, no caso de atrito de aço com aço ocorrem interações químicas entre os metais, sobretudo com o oxigênio do ar e vapor d'água [7, 25].

Para explicar essas observações podem-se admitir duas possibilidades:

- Pequenas partículas metálicas são arrancadas da superfície e a seguir, oxidadas;
- A superfície metálica é oxidada, talvez devido ao calor gerado pelo atrito, e a seguir as partículas de óxidos são removidas [7].

Outra forma de diminuição da camada nitretada seria pela corrosão localizada, devido a condições operacionais. O meio ambiente em que as hastes estão expostas durante a operação faz com que ocorra uma oxidação devido à quantidade de oxigênio presente no vapor. Aproximadamente 0,20-0,25 mg O₂/kg de vapor é arrastado com o mesmo por causa do H₂O ou O₂ acrescentado na água de alimentação na forma de gases a fim de formar filmes novos na haste ou manter obstruído. O excesso de oxigênio que não é convertido em magnetita é arrastado pelo vapor [18]. Essa formação de magnetita aumenta o diâmetro das hastes, podendo ocorrer travamento da válvula durante operação – Figura 04c.

A corrosão em altas temperaturas é controlada a partir do crescimento da película protetora, atuando e dificultando a interação entre o metal e o meio corrosivo. Com este objetivo, pode-se agir na seleção do material metálico, resistente a corrosão pela formação de partículas em altas temperaturas ou utilizando-se revestimentos refratários ou isolantes que separam a superfície metálica do meio [25].

Existe uma outra possibilidade de ocorrer desgaste nas hastes, ainda que remota. Esta ocorre quando o vapor incide diretamente sobre a superfície das hastes, esta situação acontece somente em condições anormais de operação das turbinas. A Figura 04d mostra a

aparência do desgaste causado pelo contato direto do vapor sobre a superfície da haste. O desgaste ou corrosão pode remover total ou parcialmente a camada nitretada. A principal preocupação com a remoção da camada nitretada ou a formação da magnetita é a conseqüente perda de resistência ao desgaste na superfície, redução do diâmetro externo, aumento da taxa de desgaste e possibilidade de travamento da mesma durante uma manobra de operação.

Nesse contexto, esse trabalho se propõe a estudar a eficiência do processo de aspersão térmica como alternativa de proteção contra o desgaste em hastes de válvulas substituindo o tratamento termoquímico de nitretação utilizado atualmente.

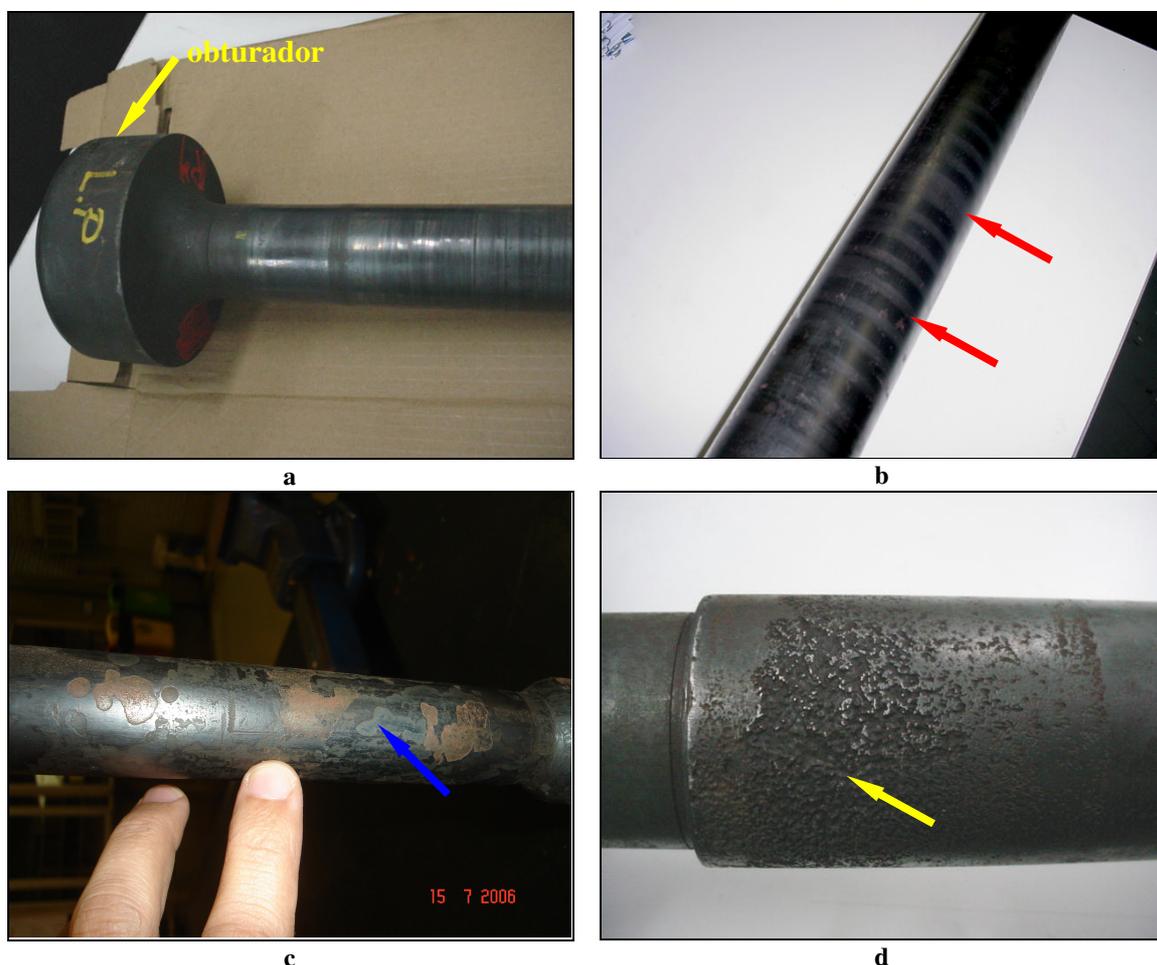


Figura 04 – Formas e aparências dos desgastes das válvulas retiradas de operação.
a – haste da válvula parcializadora com o obturador na extremidade. b – aspecto de desgaste por *fretting* na região de selagem. c – aspecto de desgaste por corrosão e formação de magnetita. d – desgaste erosivo pelo contato do vapor diretamente sobre a haste.

1.2.1 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

Os objetivos mais importantes desta dissertação são os seguintes:

- A. Estudar a eficiência do processo de aspersão térmica como alternativa de proteção contra o desgaste das hastes de válvulas de turbinas termelétricas em substituição ao tratamento termoquímico de nitretação utilizado atualmente.
 - 1. Caracterização de uma haste da válvula parcializadora de uma turbina SKODA – UTLB – com aproximadamente 20.000 horas de operação – determinação da composição química, das propriedades mecânicas, dos tratamentos térmico e termoquímico, bem como a análise dos mecanismos de desgaste atuantes nas condições de serviço.
- B. Estudar a viabilidade de confecção de hastes revestidas por aspersão térmica pelo processo HVOF:
 - 1. Avaliação da camada aspergida por ensaios metalográficos, microdureza, ensaio de resistência à adesão/coesão da camada aspergida;
 - 2. Análise dos resultados e a influência da temperatura de operação (540°C) sobre o comportamento dos revestimentos aspergidos, testando corpos de prova com e sem ciclagem de temperatura;
 - 3. Ensaio de desgaste pino sobre disco, comparando revestimentos nitretados e aspergidos pelo processo HVOF.
- C. Como contribuições, serão determinadas especificações técnicas como: parâmetros operacionais, métodos de deposição, equipamentos, materiais e características dos revestimentos (camadas aspergidas) que atendam às condições operacionais em que estão submetidas às hastes. Desta maneira será possível estabelecer a melhor alternativa das seguintes possibilidades:
 - 1. Importação
 - 2. Confecção de hastes novas por aspersão
 - 3. Confecção de hastes novas por nitretação

2 CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

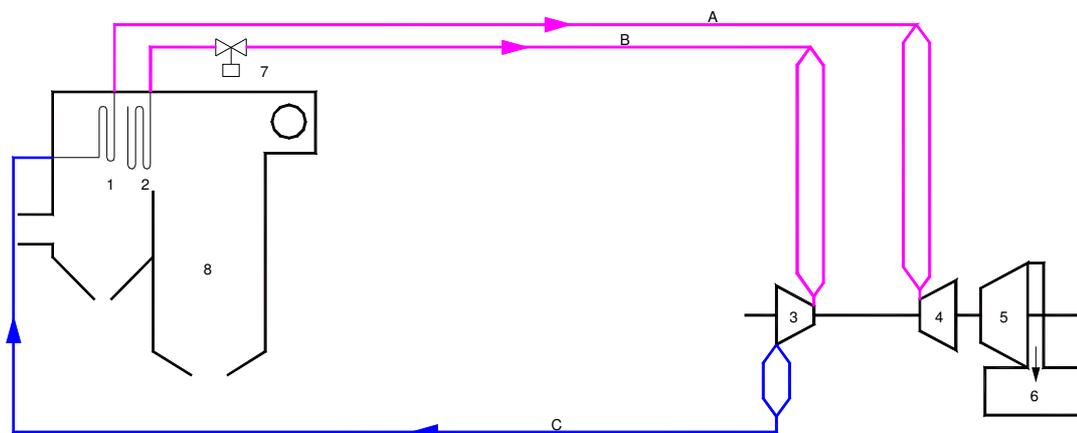
2.1 FLUXO DE VAPOR NA TURBINA

Sabe-se que a função do vapor em usinas termelétricas (a carvão) é transportar a energia calorífica do combustível liberado na caldeira para a turbina, onde por meio do movimento de rotação (energia mecânica) da mesma transmitida ao alternador, se produz energia elétrica. Portanto, após passar pelo último superaquecedor o vapor dirige-se por meio de tubulações adequadas à turbina. O fluxograma simplificado e a imagem das Figuras 05 e 06 mostram o trajeto do vapor da caldeira à turbina.

Pelo esquema percebe-se que o vapor superaquecido (540°C a $140 \text{ Kg/cm}^2 - 13,73 \text{ MPa}$) sai da caldeira pela tubulação B e passa por uma válvula de bloqueio e de segurança localizado na caldeira e dirige-se à turbina de alta pressão, onde é expandido realizando trabalho. Após a turbina de alta pressão, o vapor volta à caldeira pela tubulação C, para ser reaquecido e retorna à turbina de média pressão pela tubulação A. Na entrada da turbina de média pressão, o vapor reaquecido deve ter uma temperatura constante igual ao do vapor superaquecido, ou seja, 540°C . No entanto a pressão para esse vapor varia conforme a carga, e está muito abaixo da pressão do SH (vapor superaquecido), ou seja, aproximadamente $38 \text{ kg/cm}^2 - 3,72 \text{ MPa}$, segundo condições operacionais das unidades 3 e 4 – UTLA. A Figura 07 mostra o trajeto do vapor no interior de uma turbina do complexo Jorge Lacerda unidades 3 e 4 – UTLA.

Na Figura 08 tem-se a disposição das válvulas nas turbinas em referência. O vapor na entrada da turbina de alta pressão passa pelas chamadas válvulas de bloqueio e parcializadoras para então ser expandido. Da turbina de alta pressão o vapor retorna à caldeira para ganhar temperatura e então se dirige às turbinas de média e baixa pressão, passando antes pelas chamadas válvulas combinadas do vapor reaquecido.

Em algumas máquinas existe um outro circuito de vapor externo à turbina, utilizado para absorver por certos períodos especiais de operação (bloqueios, partidas e saídas de máquinas) o fluxo de vapor normalmente direcionado à turbina, de modo a proteger a caldeira contra sobre-pressões, evitando a abertura das válvulas de segurança.



- | | |
|-----------------------------|--|
| A – Vapor Reaquecido Quente | 4 – Turbina de Média Pressão |
| B – Vapor Superaquecido | 5 – Turbina de Baixa Pressão |
| C – Vapor Reaquecido Frio | 6 – Condensador |
| 1 – Reaquecedor | 7 – Válvula Bloqueio/Segurança da Caldeira |
| 2 – Superaquecedor | 8 – Caldeira |
| 3 – Turbina de Alta Pressão | |

Figura 05 – Ciclo do vapor da caldeira até a turbina – Unidades 3 e 4 – UTLA.

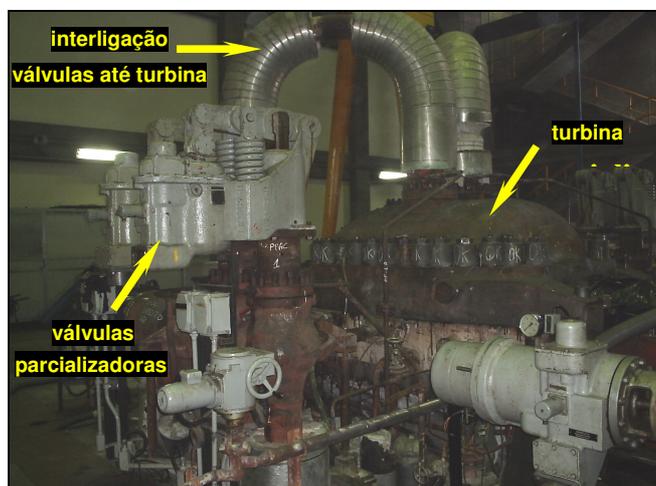
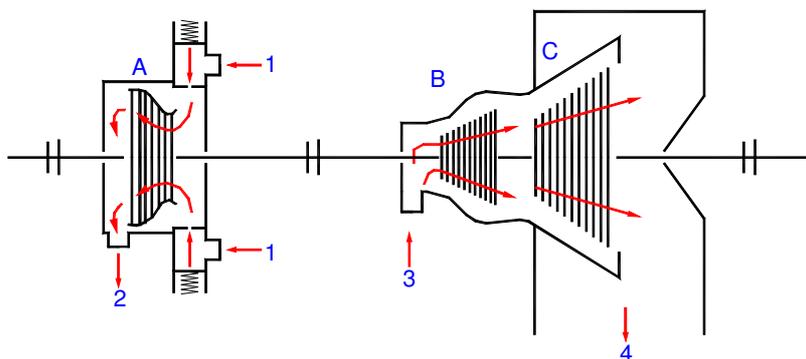


Figura 06 – Ciclo do vapor passando pelas válvulas de bloqueio e parcialização de vapor até o interior da turbina – Unidade 6 – UTLB.



A – Turbina de Alta Pressão ($P = 140 \text{ Kg/cm}^2 - 13,73 \text{ MPa}$)

B – Turbina de Média Pressão ($P = 31 \text{ Kg/cm}^2 - 3,04 \text{ MPa}$)

C – Turbina de Baixa Pressão ($P = 15 \text{ Kg/cm}^2 - 1,47 \text{ MPa}$)

1 – Entrada de Vapor Superaquecido ($T = 540 \text{ }^\circ\text{C}$)

2 – Saída de Vapor – Reaquecido Frio ($T = 380 \text{ }^\circ\text{C}$)

3 – Entrada de Vapor – Reaquecido Quente ($T = 540 \text{ }^\circ\text{C}$)

4 – Condensador

Figura 07 – Fluxo de vapor no interior da turbina – Unidades 3 e 4 – UTLA.

2.2 VÁLVULAS EM TURBINAS TERMELÉTRICAS À CARVÃO

O controle da velocidade/carga das turbinas é feito pela regulação do fluxo de vapor para o seu interior, mais propriamente em direção às palhetas do rotor; dois modos são usados para isso: um deles é pela redução do fluxo total de vapor, impondo-se a todo o fluxo uma perda de energia devido ao estrangulamento, o outro modo é feito pelo controle (parcialização) de apenas parte do fluxo total e neste caso somente esta quantidade fica sujeita a perda de energia. Este último é o modo normalmente usado para controlar o vapor nas turbinas usadas em geração termelétrica. A Figura 08 mostra a posição das válvulas em relação ao ciclo de vapor no interior da turbina.

O vapor entra na turbina de alta pressão passando pela válvula de bloqueio que é mostrada na Figura 09, a qual é responsável pelo corte total do fluxo no caso de atuação de proteções, e dirige-se às válvulas de controle (parcializadoras) representada na Figura 10, sobre as quais atua o sistema de controle da turbina, regulando a quantidade de vapor necessário para manter a velocidade ou a carga. Estas válvulas de controle, normalmente operam de modo a variar o fluxo de vapor, mas em algumas turbinas podem também operar de modo a bloquear totalmente o fluxo de vapor.

Na admissão de vapor reaquecido na turbina de média pressão estão as válvulas combinadas, assim chamadas, pois em um mesmo corpo existe a válvula de bloqueio e a de interceptação. As válvulas de interceptação operam sob a ação do sistema de regulação, mas somente atuam sobre a redução de fluxo quando a velocidade da turbina atinge um valor pré-fixado acima do nominal. No caso de turbinas que operam com “by-pass”, a ação do controle sobre estas válvulas é feito na partida da máquina, ou em situações de bloqueio, atuando assim nas proteções da máquina [38].

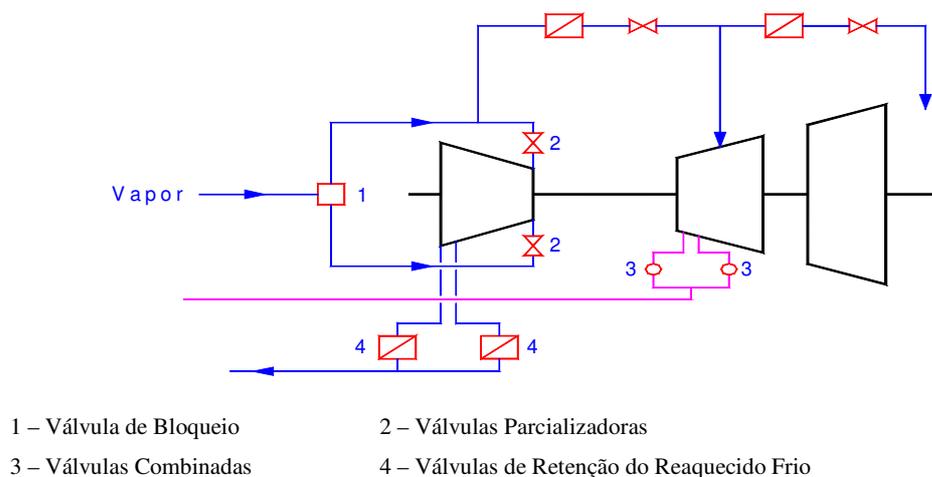


Figura 08 – Localização das válvulas nas turbinas.

As estações de “by-pass” desviam o vapor do corpo de alta pressão para o reaquecedor na caldeira e o vapor do corpo de média pressão para o condensador. Esta transferência ocorre quando as condições operacionais são tais que a quantidade de vapor requerida pela turbina é inferior à gerada pela caldeira. Na operação do by-pass a pressão e temperatura do vapor são reduzidas para valores compatíveis com o projeto do reaquecedor e condensador [38]. A redução da pressão é feita pelas válvulas redutoras e a temperatura através de estações de atemperação com injeção de água.

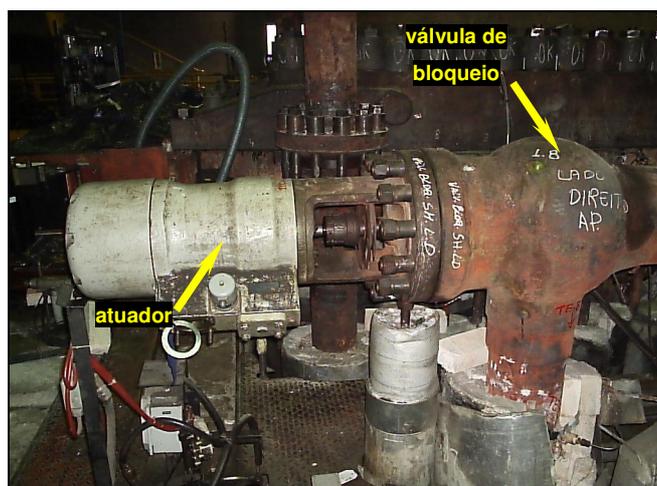


Figura 09 – Válvula de bloqueio do vapor superaquecido. Unidade 6 – UTLB.

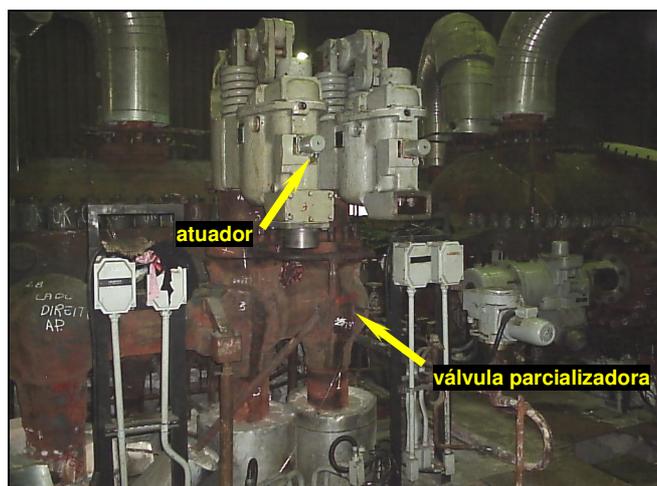


Figura 10 – Válvulas parcializadoras de vapor superaquecido. Unidade 6 – UTLB.

2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS

São essencialmente ligas Fe-Cr-C que contêm entre 12 e 18% de cromo e entre 0,1 e 0,5% de carbono (embora em alguns casos, pode-se chegar a 1,0%) e que podem ser austenitizadas se forem aquecidas a uma temperatura adequada. Devido ao seu elevado teor de liga, estes aços apresentam uma elevada temperabilidade e podem apresentar uma estrutura completamente martensítica em peças de grande espessura mesmo após um resfriamento ao ar calmo. São desta forma ligas facilmente endurecíveis por tratamento térmico, sendo usadas em geral, no estado temperado e revenido. Sua resistência à corrosão tende a ser inferior a dos outros tipos de aços inoxidáveis sendo, contudo, satisfatória para meios mais fracamente corrosivos. São particularmente adequados para aplicações que requerem elevada resistência mecânica, dureza e resistência à abrasão ou erosão em ambiente seco ou úmido como, por exemplo, em componentes de turbina a gás ou vapor e peças para cutelaria [4, 26].

Quando se deseja boa resistência à corrosão aliada a elevada resistência mecânica, prefere-se um aço inoxidável martensítico com 12% a 14% Cr e 0,30% a 0,40% C. Nos aços inoxidáveis martensíticos a passivação causada pelo filme de óxido de cromo na superfície do metal só é obtida completamente com teores de cromo maiores ou igual a 12%.

A Tabela 01 mostra os principais tipos de aços martensíticos e suas composições químicas, classificadas de acordo com as normas SAE e DIN.

Os aços inoxidáveis martensíticos são amplamente utilizados em aplicações de cutelaria, moldes para injeção de polímeros e componentes mecânicos, que combinem elevada resistência mecânica e resistência à corrosão, suas principais características são:

- Podem ser facilmente trabalhados, tanto a frio quanto a quente;
- Apresentam boa resistência à corrosão, quando expostos à ação da água e à ação de certas substâncias químicas;
- Todos os aços inoxidáveis martensíticos são temperáveis;
- A têmpera melhora a resistência à corrosão e a resistência mecânica.

Desse grupo, os aços tipo AISI 410, 420 e 440 são os mais empregados. A grande vantagem desses aços é a possibilidade de ajustar a dureza pelo tratamento térmico de têmpera e revenimento, para uma faixa ampla de dureza (entre 40 HRC e 62 HRC), aliando uma boa resistência à corrosão.

Tabela 01 – Composição química (% em peso) e aplicações de alguns aços inoxidáveis martensíticos – Chave dos Aços 2002.

SAE	DIN	%C máx.	%Mn máx.	%Si máx.	%P máx.	%S máx.	%Cr	%Ni	%Outros Elementos
403	X6Cr13	0,15	1,00	0,50	0,040	0,030	11,50 13,00	-	-
405	X6CrAl13	0,08	1,00	1,00	0,040	0,030	12,00 14,00	-	Mo=1,10
410	X12Cr13	0,15	1,00	1,00	0,040	0,030	11,50 13,50	-	-
414	-	0,15	1,00	1,00	0,040	0,030	11,50 13,50	1,25 2,50	-
416	X12CrS13	0,15	1,25	1,00	0,060	0,015	12,00 14,00	-	Zr ou Mo=0,60 máx
416 Se	-	0,15	1,25	1,00	0,060	0,060	12,00 14,00	-	Se=0,15 mín
420	X20Cr13	0,15 mín	1,00	1,00	0,040	0,030	12,00 14,00	-	-
420F	-	0,15 mín	1,25	1,00	0,060	0,015	12,00 14,00	-	Mo=0,60 máx
420FSe	-	0,30 0,40	1,25	1,00	0,060	0,060	12,00 14,00	-	Se=0,15 mín
	X20CrMoV 12.1	0,20 0,26	0,30 0,80	0,50	0,025	0,025	11,00 12,50	0,30 0,80	Mo=0,80-1,20 V=0,25-0,35
	X22CrMoV 12.1	0,18 0,24	0,40 0,90	0,18 0,24	0,025	0,025	11,00 12,50	0,30 0,80	Mo=0,80-1,20 V=0,25-0,35
422	X20CrMoWV12.1	0,20 0,25	1,00	0,75	0,025	0,025	11,00 13,00	0,50 1,00	Mo=0,75-1,25 V=0,15-0,30 W=0,75-1,25
431	X17CrNi16.2	0,20	1,00	1,00	0,040	0,030	15,00 17,00	1,25 2,50	-
440A	-	0,60 0,75	1,00	1,00	0,040	0,030	16,00 18,00		Mo=0,75máx
440B	X90CrMoV18	0,75 0,95	1,00	1,00	0,040	0,030	16,00 18,00	-	Mo=0,75máx
440C	X105CrMo17	0,95 1,20	1,00 1,00	0,040	0,030	16,00	16,00 18,00	-	Mo=0,75máx
440F	-	0,95 1,20	1,25	1,00	0,060	0,015	16,00 18,00	-	Zr ou Mo=0,75máx
440FSe	-	0,95 1,20	1,25	1,00	0,060	0,015	16,00 18,00	-	Se=0,15 mín
501	X12CrMo5	0,10 mín	1,00	1,00	0,040	0,030	4,00 6,00	-	Mo=0,40-0,65
502	X12CrMo19.5	0,10	1,00	1,00	0,040	0,030	4,00 6,00	-	Mo=0,40-0,65

Apesar da capacidade de endurecimento no tratamento térmico, muitas aplicações exigem muito mais dos aços em relação à resistência ao desgaste. Uma das rotas produtivas que podem ser exploradas para tal é a nitretação. Para o aço tipo AISI 420 e similares, a nitretação é capaz de promover um endurecimento superficial para valores próximos de 1500 HV. Esse endurecimento é causado pela precipitação de nitretos de cromo na zona de difusão [26].

2.4 DESGASTE

O desgaste pode ser definido como a indesejável mudança cumulativa em dimensões, motivada pela remoção gradual de partículas discretas de superfícies em contato e com movimento relativo, devido, predominantemente a ações mecânicas. Na realidade, a corrosão também pode interagir com o processo de desgaste modificando as características das superfícies sob desgaste. Assim, o desgaste deve ser compreendido como um complexo de diferentes processos que podem ocorrer independentemente ou em combinações [33].

Em referência às normas DIN 50320 (1997) e a ASTM (1993) *apud* Metamoros, o desgaste, pode ser descrito como a perda progressiva de massa da superfície de um corpo sólido causada pela ação mecânica, sendo assim os diferentes tipos de desgaste ocorrem pela ação do movimento relativo entre um sólido com outro sólido, líquido ou gás. Estas normas ainda definem quatro mecanismos de desgaste: ***adesão, abrasão, fadiga superficial e reação triboquímica*** [21].

Segundo Peterson (1980) *apud* Metamoros, é possível que no desgaste por deslizamento possam ocorrer os quatro mecanismos, sendo que um valor constante da taxa de desgaste demonstra que um determinado tipo de mecanismo predomina e que, qualquer variação no valor desta taxa, indica a alteração do mecanismo de desgaste predominante. Assim, uma mudança na predominância de atuação de um dos mecanismos de desgastes estaria relacionada a transições nas curvas de perda de massa [21].

Conforme proposição de Kato (1997) *apud* Hesse, uma classificação mais ampla dos tipos de desgaste foi apresentada. Esta, segundo a configuração de contato, pode ser: compressão normal ou inclinada, descolamento, deslizamento e rolamento unidirecional, deslizamento e rolamento alternado. Desgaste nestes modos de contato seriam descritos como: desgaste por impacto, desgaste por deslizamento, desgaste por “*fretting*” ou fadiga

de contato, desgaste por rolamento e desgaste por cavitação. Todas estas descrições de desgaste estão baseadas apenas na aparência do contato. Elas não representam os mecanismos de desgaste envolvidos, visto do ponto de vista científico [9].

Do ponto de vista físico o desgaste recebe classificação de desgaste mecânico e desgaste químico. Como exemplo do desgaste mecânico tem-se:

Desgaste por Fadiga – quando a fratura é originária do mecanismo de fadiga;

Desgaste Adesivo – quando a fratura é originária do resultado das forças adesivas sem particularizar a configuração de contato e o modo da fratura;

Desgaste Abrasivo – quando a fratura é produzida no modo de micro partículas cortadas sendo necessários pontos de contato para o corte;

O desgaste químico ocorre quando produtos de reações químicas, do material das faces em contato com gases e líquidos são removidos mecanicamente; uma das mais conhecidas forma de desgaste de origem química e causado por um meio corrosivo é o ***desgaste por oxidação*** [9].

Segundo Stoterau (2004), alguns especialistas consideram ainda, o desgaste devido ao “*fretting*” e ao impacto, sendo que a erosão e cavitação algumas vezes também são consideradas como categorias de desgaste. Cada uma delas ocorre através de um processo físico diferente e deve ser considerada separadamente, embora as várias subcategorias possam combinar sua influência, ou de uma mudança de um modo para outro durante diferentes épocas da vida operacional da máquina ou pela ação simultânea de dois ou mais diferentes modos de desgaste [33].

2.4.1 MECANISMOS DE DESGASTE

O desgaste não é de fato, um processo simples, mas sim um complexo de diferentes processos que podem ocorrer independentemente ou em combinações. É aceito geralmente que existem cinco subcategorias de desgaste:

- *Desgaste por Adesão*
- *Desgaste por Abrasão*
- *Reações Triboquímicas*
- *Desgaste por Fadiga*
- *Desgaste por Cavitação*

Os mecanismos resultam do efeito das variáveis operacionais sobre os elementos do sistema tribológico, e assumem a forma de energia e interações de materiais entre corpo e contra-corpo, sujeitos à influência do meio interfacial e do meio circundante [22, 33].

Serão descritos a seguir as formas mais comuns de desgaste encontradas na indústria.

Desgaste por Adesão – Segundo Stoterau (2004), o desgaste por adesão é mais freqüente quando as superfícies em contato são removidas por cisalhamento devido ao atrito e os resíduos do desgaste se juntarão ao desgaste [33]. Esses resíduos formam uma fina camada que endurece durante o atrito, um exemplo simples para se compreender o mecanismo de desgaste adesivo é que devido ao contato entre duas superfícies contínuas que conduzem a transferência de material entre as duas ou a perda de material de uma ou de outra – por exemplo, desgaste por roçamento [22, 33, 40].

De acordo com Rabinowicz (1995) *apud* Stoterau, o desgaste por adesão é a mais comum forma de desgaste encontrada, sendo que sua teoria tem as mesmas bases da teoria do atrito por adesão. Segundo a teoria do atrito por adesão, fortes soldagens a frio são formadas em alguns pontos de contato entre picos das superfícies, e essas soldagens devem ser rompidas para permitir a continuidade do escorregamento. O rompimento das asperezas soldadas provoca severo dano a superfície, em geral sob a forma de crateras visíveis. Este tipo de desgaste pode ser um problema quando se tem dois materiais da mesma natureza em

contato, como por exemplo, aços e suas ligas, ou quando ocorre uma lubrificação deficiente ou temperaturas altas, ou velocidades de escorregamento elevadas [22, 33].

Desgaste por Abrasão – É o resultado de uma interface atritando que pode apanhar os restos de desgaste e ou pó do ambiente circunvizinho. Ou seja, ocorre quando o material é removido da superfície do componente pela ação de corte ou pelo rolamento de metal contra metal. Esta é a forma de desgaste que ocorre quando uma superfície rugosa e dura, ou uma superfície mole contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície mais mole, e forma uma série de ranhuras nesta superfície. O material das ranhuras é deslocado na forma de partículas de desgaste, geralmente soltas [22, 33, 40].

O desgaste abrasivo pode ocorrer também em uma situação diferente, quando partículas duras e abrasivas são introduzidas entre as superfícies deslizantes, desgastando-as. O mecanismo desta forma parece ser o seguinte: um grão abrasivo adere temporariamente em uma das superfícies deslizantes, ou mesmo é incrustado nela, e risca uma ranhura na outra [33].

Desgaste por Fadiga Superficial – Ocorre em componentes submetidos a rolamento de contato. Este tipo de desgaste é atribuído a carregamentos cíclicos de duas superfícies em contato mútuo e usualmente ocorre sem perdas progressivas de material. Quando na temperatura ambiente é chamado de fadiga de contato ou de superfície e quando ocorre em temperaturas acima de 100°C é chamado de fadiga térmica [22].

Este tipo de desgaste ocorre quando duas superfícies atuam em contato com rolamento, o fenômeno é diferente do desgaste que ocorre entre superfícies que escorregam. Em superfícies em contato com rolamento surgem tensões de contato, as quais produzem tensões de cisalhamento cujo valor máximo ocorre logo abaixo da superfície. Com o movimento de rolamento, a zona de contato desloca-se, de modo que a tensão de cisalhamento varia de zero a um valor máximo e volta a zero, produzindo tensões cíclicas que podem levar a uma falha por fadiga do material. Abaixo da superfície pode se formar uma trinca que se propaga devido ao carregamento cíclico podendo chegar à superfície lascando-a e fazendo surgir uma partícula superficial macroscópica com a correspondente formação de uma cavidade. Essa ação, chamada de desgaste por fadiga superficial, é um

modo comum de falha de mancais de rolamento, dentes de engrenagem, cames e em partes de máquinas que envolvem superfícies em contato com rolamento [33].

Reações Triboquímicas – Em condições de escorregamento com velocidades elevadas o desgaste por oxidação pode ocorrer. A existência e a extensão deste tipo de desgaste, assim como a taxa de desgaste resultante, depende da capacidade que tem os materiais com movimento relativo em sofrer oxidação, e é claro da presença de uma atmosfera oxidante (presença de oxigênio) nas imediações das superfícies de contato. A presença de um filme de óxido na interface pode ser o suficiente para reduzir o desgaste meramente pelo efeito supressivo de sua presença, ou pelo menos reduzir o grau de interação entre as superfícies.

Contudo os filmes óxidos são finos e apresentam elevada dureza e fragilidade, e o desgaste ocorre principalmente pelo arranque deste material da superfície.

Em elevada velocidade ou elevado carregamento, o filme óxido torna-se mais espesso e contínuo, apesar do calor gerado pelo atrito ser considerável, nas camadas interiores subsequentes de material sofrerem menor condução de calor da camada óxida, ou seja, a camada óxida atua como um isolante térmico para as camadas internas. Contudo o calor gerado pode ser tal que o mesmo pode gerar deformações plásticas e até mesmo fusão. O primeiro regime onde a camada de óxido é fina e frágil é denominado desgaste por oxidação média, e o segundo é denominado de desgaste por oxidação severa [22, 33, 40].

O desgaste por corrosão ocorre quando o ambiente que envolve a superfície de deslizamento interage quimicamente com ela. Se o produto da reação é raspado da superfície, desgaste corrosivo terá ocorrido. O primeiro estágio do desgaste por corrosão é o ataque corrosivo da superfície. Este estágio do processo de desgaste é idêntico ao que ocorre em um processo normal de corrosão. Quando uma superfície nua (por exemplo, um metal) é exposta em um meio com o qual pode reagir, ocorre uma rápida reação inicial, que irá diminuindo com o tempo. Associada a diminuição dessa reação está a formação de um filme coeso na superfície que separa os dois elementos reativos, mais ou menos de modo perfeito [33].

Para este tipo de combinação de materiais e ambientes (por exemplo, alumínio e ar) a reação química cessa completamente após certa profundidade. Em alguns casos, a reação química continua indefinidamente na mesma relação inicial, seja porque não há

formação de filme protetor, seja porque o filme é poroso, frágil ou se estilhaça. O segundo passo no processo de desgaste corrosivo consiste da raspagem do filme de produto da reação, como resultado do escorregamento entre as superfícies do sistema. Quando isto ocorre, a superfície nua é novamente exposta e o ataque corrosivo continua.

O processo de corrosão pode ocorrer simultaneamente às condições de desgaste por adesão ou por abrasão. Se o produto da corrosão é duro e abrasivo, partículas provenientes do processo corrosivo que possam existir entre as superfícies em contato, acelerarão o desgaste abrasivo [33].

Outro fato que influi na resistência ao desgaste e na corrosão é a temperatura do meio, sendo assim, corrosão química é um processo que se realiza na ausência de água, em geral em temperaturas elevadas, devido à interação direta entre o metal e o meio corrosivo. Os processos corrosivos de natureza química ocorrem normalmente em temperaturas elevadas, porque na temperatura ambiente o sistema não possui energia para reação. Pelo fato destes processos serem acompanhados de temperaturas elevadas, são comumente conhecidos por processos de corrosão ou oxidação em altas temperaturas, este tipo de corrosão ocorre em equipamentos que trabalham aquecidos como: fornos, caldeiras, turbinas a vapor, unidades de processo [25]. Gentil (1996), em seus comentários sobre oxidação e corrosão em altas temperaturas, ressalta a importância do emprego de materiais metálicos em equipamentos que operam em altas temperaturas e justifica um desenvolvimento mais detalhado das principais características da oxidação e corrosão em temperaturas elevadas. A quase totalidade dos metais usados industrialmente, bem como suas ligas, são suscetíveis a sofrer corrosão quando expostos a agentes oxidantes como, por exemplo: oxigênio, enxofre, halogênios, dióxido de enxofre e vapor d'água [7].

Pimenta (2006), em sua abordagem sobre corrosão descreve que os principais meios corrosivos a altas temperaturas são:

- ***Oxigênio e gases contendo enxofre*** (presentes em fornos, caldeiras, unidades de processo, nas chamadas atmosferas sulfurosas) o enxofre e o H₂S formam sulfetos de metal que não são protetores e agravam o processo corrosivo.

- **Cinzas** oriundas da queima de combustíveis em fornos, caldeiras, turbinas a gás, etc., estas podem provocar sérios problemas de corrosão devido a cinzas contendo vanádio e sulfato de sódio.
- **Vapor d'água**: em temperaturas elevadas o vapor pode atacar certos metais formando óxido e liberando hidrogênio que pode provocar fragilização pelo hidrogênio [25].

Metais como o ferro, cobalto, cobre e manganês podem formar películas constituídas de camadas de óxidos de diferentes composições. Assim o ferro aquecido a 700°C, em presença de oxigênio sob pressão de uma atmosfera, fica recoberto de uma película de oxidação constituída de três óxidos, na qual a mais espessa é o FeO, sendo a de Fe₂O₃, bem menos espessa que a de Fe₃O₄ como esquematizado na Figura 11. Como os compostos formados podem apresentar instabilidade, segundo as variações de temperatura ou de pressão parcial de oxigênio, pode-se ter uma variação na composição dessas camadas [7].

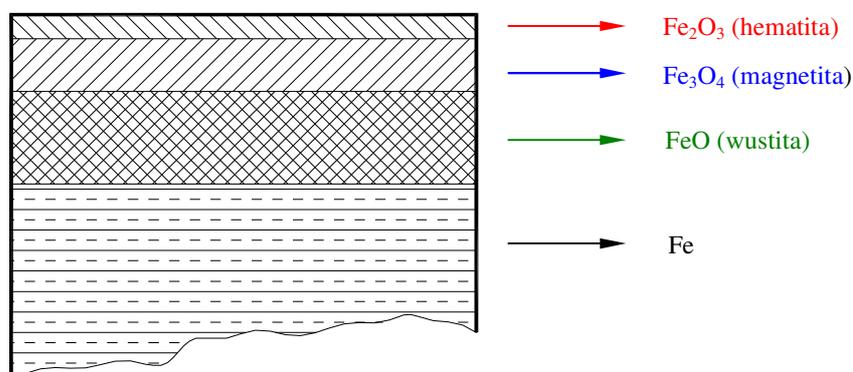


Figura 11 – Constituintes da película de oxidação do ferro aquecido a 700°C. [7]

O ferro, por exemplo, quando aquecido em diferentes temperaturas e em presença de oxigênio sob pressão parcial de uma atmosfera apresenta as seguintes camadas aproximadamente iguais em peso:

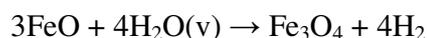
- 600°C (100 minutos), interna FeO, externa Fe₃O₄.
- 1000°C (25 minutos), interna FeO (95%), média Fe₃O₄ (4%), externa Fe₂O₃ (1%).

Com o esfriamento o FeO se decompõe, tendo-se então partículas de ferro na magnetita.



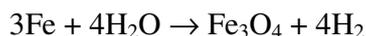
Aquecendo-se a uma temperatura abaixo de 570°C, a camada de FeO pode ficar ausente, formando-se uma dupla camada de Fe₂O₃ e Fe₃O₄. Em temperaturas mais baixas (aproximadamente 400°C) encontra-se principalmente o Fe₃O₄ com muito pouco Fe₂O₃. Os limites entre as diferentes camadas apresentam misturas de óxidos devido à interpenetração das camadas. Sendo esses óxidos instáveis abaixo de 550°C e quando a atmosfera possui oxigênio em excesso, além de vapor d'água e dióxido de carbono, o potencial de oxidação promove a formação de uma carepa no aço. O óxido formado pelo dióxido de carbono e pelo vapor d'água é aderente e não é removido com facilidade [7, 28].

O vapor d'água em temperaturas elevadas ataca certos metais formando óxidos correspondentes e liberando hidrogênio que pode ocasionar os danos vistos anteriormente; para o caso do ferro tem-se:



O vapor d'água aumenta o efeito descarbonetante, porque este dissocia e passa a ser uma fonte de hidrogênio nascente e oxigênio. Também pode ocorrer a reação entre o vapor d'água e monóxido de carbono e hidrocarbonetos com formação de hidrogênio e conseqüentemente ação do mesmo em temperaturas elevadas. Ensaio realizados com diferentes aços evidenciaram que a adição do cromo parece ser o meio mais efetivo para a proteção contra a ação corrosiva do vapor d'água em temperaturas elevadas [7, 28].

O ferro deste material, quando em contato com água em temperaturas acima de 220 °C, na ausência de oxigênio, é termodinamicamente instável, ocorrendo a seguinte reação de corrosão:



Nesta reação, o ferro é oxidado com formação de um filme de magnetita (Fe_3O_4) aderente e altamente protetor à superfície do metal havendo ainda a liberação de hidrogênio que sai junto com o vapor da caldeira.

Desgaste por Cavitação – Este desgaste está associado a forma e explosão de bolhas gasosas em correntes de fluídos, na interface líquida/superfície sólida, devido a variações de pressão. A cavitação surge em zonas de baixa pressão onde o líquido entra em ebulição formando bolhas que ao se chocarem com zonas de pressão mais altas são destruídas instantaneamente criando ondas de choque no líquido. A cavitação da mesma forma que a erosão destrói as películas de produtos da corrosão expondo o material a novo desgaste corrosivo, além de provocar a deformação plástica com encruamento em face da incidência de ondas de choque de alta pressão. Deste modo o desgaste resultante será maior no caso de conjugar os dois fenômenos: corrosão com cavitação [22].

As principais formas de aparência de desgaste em superfície sob tensão estão representadas na Tabela 02.

Tabela 02 – Aparência das principais formas de aparência de desgaste.
Nascimento (2005) [22].

Mecanismo de Desgaste	Forma de Aparência do Desgaste
Adesão	Raspagens, furos, flocos, transferência de material.
Abrasão	Riscos, estrias, sulcos.
Fadiga de Superfície	Trincas, pites.
Reações Triboquímicas	Produtos de reação (camadas, partículas).

2.4.2 ENSAIO DE DESGASTE

Segundo Hesse (2000), em seu trabalho sobre ensaio de desgaste por deslizamento pino sobre disco, o ensaio de laboratório mais comum no sistema de abrasão por dois corpos usa a forma do sistema pino sobre disco. Quando o ensaio destina-se a medir a resistência de um material em condições abrasivas, a contra face pode ser revestida por lixas comerciais com granulações variadas que são fixadas à mesa rotativa mediante adesivo adequado. Porém, se a contra face é formada por materiais metálicos ou cerâmicos usinados é provável que seja bem menos abrasiva e as taxas de desgaste conseqüentemente serão menores e o ensaio bem mais demorado. A perda de material nesta segunda situação não se dá apenas por abrasão, mas poderá envolver outros mecanismos de desgaste [9]. 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. Para os ensaios, este procedimento recomenda o uso de um pino com ponta em forma esférica, com raio da ponta adequado mantido em contato com a face do disco em rotação estável através de pesos, formando assim um caminho circular. A superfície do disco deve ser finamente usinada de modo que fique relativamente lisa. A norma recomenda um valor de rugosidade Ra menor que $0,8\mu\text{m}$ [1].

Os materiais são ensaiados sob condições de desgaste entre o pino e o corpo de prova, sendo o volume ou massa desgastada, ou perdida, calculados pela diferença da massa dos corpos de prova antes e depois do ensaio (ambos os pino e disco devem ser pesados) ou calculados através do volume do perfil do sulco formado no disco [1, 9, 33].

Através deste equipamento é possível a análise de uma grande gama de materiais tanto metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos. Para estes, é possível determinar a influência dos diversos parâmetros nas razões de desgaste para várias combinações de materiais entre pino e disco, ou ainda realizar análises para determinação do lubrificante mais adequado a uma determinada situação de atrito [9].

2.5 NITRETAÇÃO

A nitretação é um tratamento termoquímico, desenvolvido inicialmente para ligas ferrosas, realizado no campo da estabilidade da ferrita comumente entre 500 e 570° C. Considerando o sistema Fe-N simples, a microestrutura típica na superfície nitretada é formada por uma camada de compostos (camada branca) mais externa com espessura de 5µm a 10µm e formada pelos nitretos γ' (Fe_4N) e ou (Fe_{2-3}N). Essa camada é seguida logo abaixo por uma região de maior profundidade denominada zona de difusão, na qual ocorre a precipitação fina e homogênea de nitretos que promovem um forte endurecimento da matriz. Tradicionalmente a nitretação é realizada pelos processos: gasoso (com amônia) e líquido (em banhos de sais) [4, 26].

Na nitretação em meio líquido, os átomos do elemento difusor na peça formam-se como resultado de reações químicas no sal fundido (NaCN por exemplo), enquanto em meio gasoso, o elemento difusor forma-se como resultado das reações de dissociação ($\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}$ (dissolvido) + $3/2\text{H}_2$ por exemplo).

Os avanços tecnológicos, principalmente relacionados à eletrônica, automação e informatização, permitiram o pleno desenvolvimento da tecnologia de plasma a partir do final do século XX. Esse processo é realizado em níveis de vácuo que variam entre 100 Pa e 1.000 Pa. A tensão de operação, da ordem de 0,2 kV a 1 kV, é fornecida ao sistema por uma fonte pulsada, com forma de onda quadrada de duração entre 50 µs e 200 µs e repetição do ciclo entre 50 µs e 2.000 µs. Quando a diferença de potencial é aplicada entre o catodo (peças) e o anodo (carcaça do forno), na presença de uma mistura gasosa composta basicamente de N_2 e H_2 , em condições de temperatura e pressão específicas, ocorre a geração de uma descarga brilhante que determina a ocorrência do plasma [26].

Segundo Pinedo (2004), na nitretação sob plasma o controle sobre a metalurgia da camada nitretada é sem dúvida, a vantagem mais importante, onde as características mais importantes dos componentes tratados e do processo são as seguintes:

- Controle da camada (uniformidade na espessura da camada);
- Tempo de tratamento inferior;
- Obtenção de elevada dureza superficial;

- Aumento da resistência ao desgaste;
- Aumento da resistência à fadiga;
- Melhora da resistência a corrosão;
- Melhora da resistência superficial ao calor;
- Pequena distorção dimensional após tratamento (baixa temperatura de tratamento).

Os parâmetros temperatura, tempo e composição do substrato também são importantes na formação da superfície nitretada. A nitretação sob plasma é o único processo capaz de permitir a difusão de nitrogênio em condições cinéticas aceitáveis para os processos industriais realizados em torno de 400 °C [4, 26].

2.6 ASPERSÃO TÉRMICA

Aspersão térmica é um grupo de processos nos quais materiais metálicos ou não, finamente divididos, são depositados em uma condição fundida ou semifundida 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, químico-metalúrgica e física, dependendo da temperatura da fonte de calor e velocidade imposta às partículas, que pela sobreposição formam camadas de estrutura lamelar com óxidos e poros [2, 20].

A Figura 12 ilustra de forma esquemática o processo de deposição de um revestimento aspergido termicamente. Segundo Pawlowski 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 superficiais entre si.

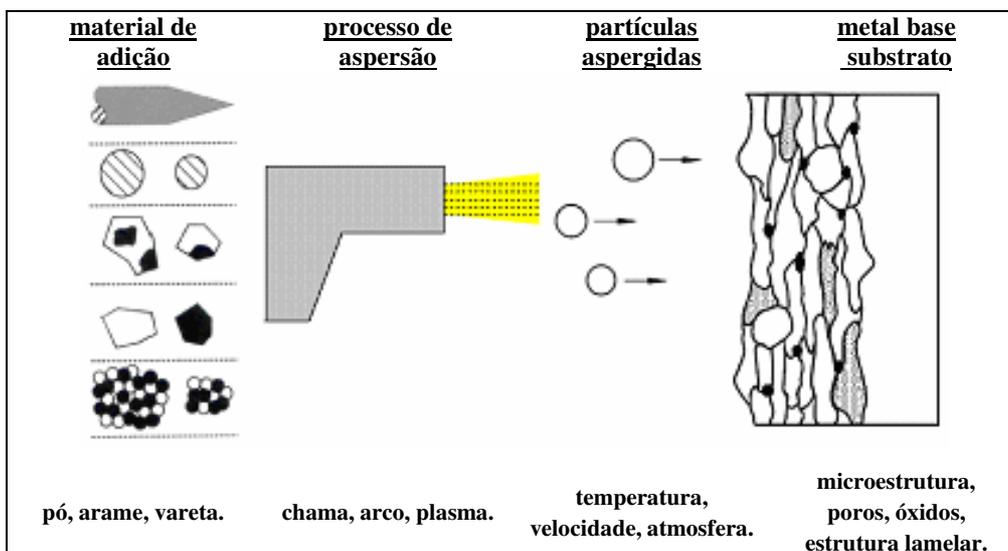


Figura 12 – Representação esquemática do processo de deposição de um revestimento pela técnica de aspersão térmica, adaptada de Zimmermann [29].

Os revestimentos são constituídos de pequenas panquecas achatadas em direção paralela ao substrato com estrutura típica lamelar contendo inclusões de óxidos, vazios e porosidades [23, 29] – Figura 13.

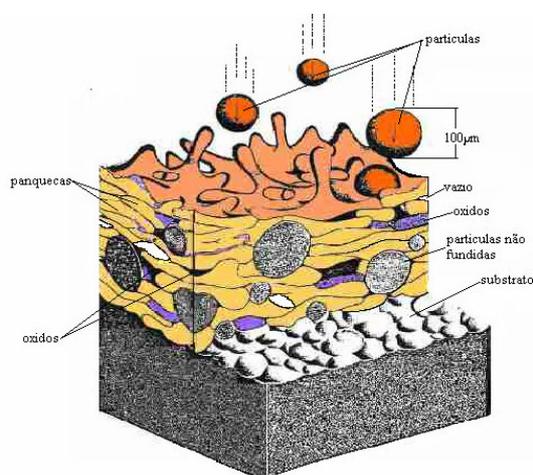


Figura 13 – Características da formação da camada depositada por aspersão térmica.

Gordon [14].

As variações básicas no processo de aspersão térmica referem-se ao material a ser aplicado, ao método de aquecimento e ao método de aceleração das partículas em direção

ao substrato, podendo ser dividida em dois grupos básicos dependendo da fonte de calor: combustão e elétrico [15, 20].

Um fluxograma ilustrativo na Figura 14 apresentado por Schiefler (2004), em seu estudo sobre revestimentos metálicos aplicados por aspersão térmica [29] agrupa os principais processos de acordo com o meio de aquecimento associado à forma de apresentação do material de adição empregado. 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);
- **HVOF** – *High Velocity Oxy-Fuel flame spraying* (aspersão a chama oxigênio-combustível de alta velocidade com material de adição na forma de pó);
- **D-gun** – *Detonation-Gun spraying* (aspersão por detonação);
- **HVCW** – *High Velocity Combustion Wire flame spraying* (aspersão a chama de alta velocidade com material de adição na forma de arame);
- **PS** – *Plasma Spraying* (aspersão a plasma);
- **ASP** – *Arc Spraying* (aspersão a arco elétrico);
- **LS** – *Laser Spraying* (aspersão a laser);
- **CS** – *Cold Spraying* (aspersão a frio).

Segundo *American Welding Society* (1985), o sucesso no uso de revestimentos aspergidos termicamente depende basicamente da aplicação segundo procedimentos bem estabelecidos. Quaisquer desvios destes procedimentos levam, em geral, a resultados não confiáveis [20].

Como regra geral Zimmermann (1997) informa que o revestimento deve ter boa aderência ao substrato, seja através de ancoragem mecânica junto à interface com o substrato ou devido a interações químico-metalúrgicas tais como: processos de difusão e de formação de ligas metálicas. Essa aderência, somada a uma coesão satisfatória entre as partículas depositadas, garante ao revestimento boas propriedades de natureza mecânica, térmica, química e elétrica (por ex., resistência ao deslocamento, desgaste, corrosão, dureza e condutibilidade) [29].

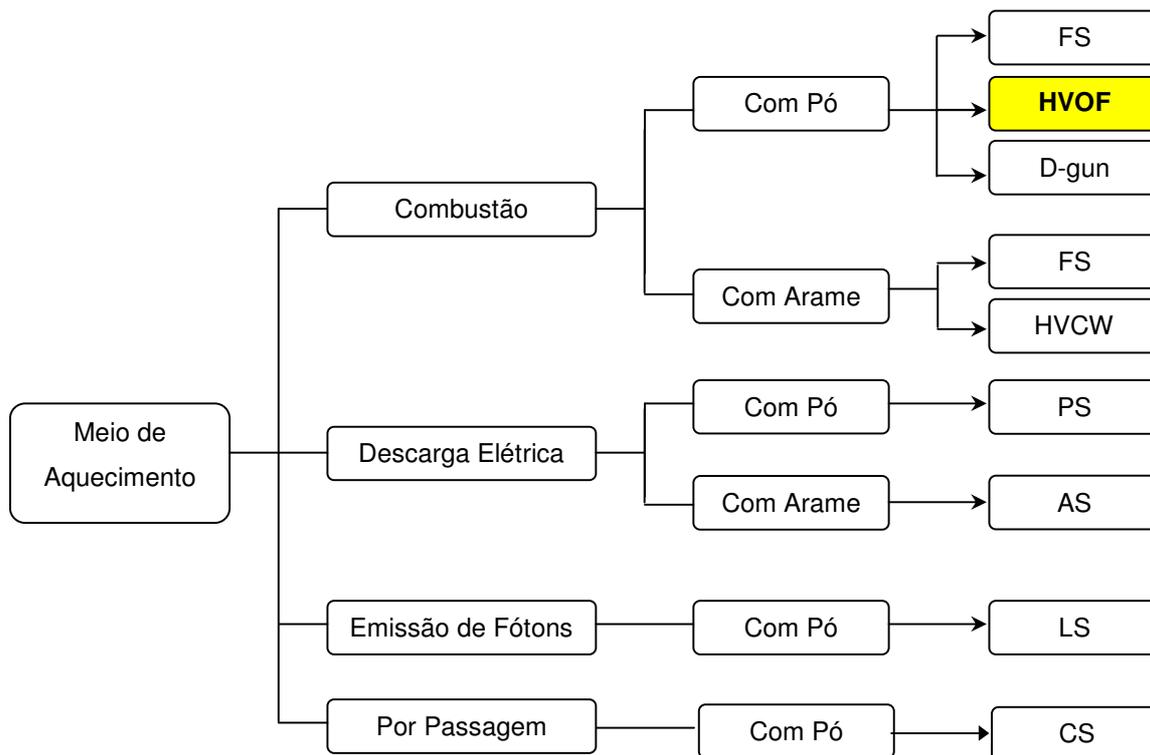


Figura 14 – Classificação dos principais processos de aspersão térmica com relação ao meio de aquecimento, associado ao tipo de material de adição empregado [29].

Segundo Maranhão (1996), a aderência de um revestimento efetuado por aspersão térmica compreende a adesão entre o mesmo e o substrato, bem como a coesão entre as partículas depositadas. A aderência é um requisito essencial para o desempenho do revestimento, pois não adianta o mesmo ter uma espessura adequada e livre de poros se não possuir aderência suficiente [19].

Na análise da aderência do revestimento normalmente consideram-se três mecanismos fundamentais, de acordo com a natureza das forças atuantes: mecânico, químico-metalúrgico e físico. Quando do impacto das partículas aquecidas e aceleradas contra o substrato, essas se achatam numa forma lenticular, resfriam-se rapidamente e ancoram-se mecanicamente nas irregularidades da superfície. Por outro lado, em função da natureza do material e do calor transferido pela partícula para o substrato pode ocorrer uma variação no grau de microssoldagem, podendo haver fusão localizada, difusão atômica com formação de soluções sólidas e inclusive compostos intermetálicos, caracterizando o

que se denomina mecanismo químico-metalúrgico. Os mecanismos físicos acontecem a nível interatômico e ou intermolecular, devido aos dipolos induzidos e polaridades das moléculas, sendo, entretanto classificados como forças fracas e denominadas de “forças de Van der Waals” [19, 20].

2.6.1 APLICAÇÕES DE REVESTIMENTOS POR ASPERSÃO TÉRMICA

Segundo estudos apresentados por Pawlowski atualmente os campos de aplicação industrial de revestimentos aspergidos são bastante abrangentes, conforme indicados na relação a seguir [29].

- *Proteção contra a corrosão* de peças, estruturas e equipamentos fabricados em materiais suscetíveis a diferentes formas de ataque corrosivo, dependendo do meio de exposição. Indústrias químicas e petroquímicas de processamento fazem uso freqüente de revestimentos para esse fim;
- *Proteção contra o desgaste adesivo e por fretting* bem como aumento da resistência contra a abrasão, erosão e cavitação. Praticamente todas as indústrias se beneficiam desse tipo de proteção;
- *Isolamento térmico e elétrico* de componentes. Indústrias usuárias comuns são a eletrônica, automotiva e aeroespacial;
- *Operações de restauração dimensional* em componentes de máquinas (eixos, cilindros, mancais, etc...). Muitas indústrias utilizam a aspersion térmica para recuperar partes desgastadas e danificadas de peças de elevado custo, sem a necessidade de substituí-las;
- *Inserção de propriedades especiais* (por exemplo, transformação de componentes originalmente não magnéticos e não condutores em magnéticos e/ou condutores, após receberem um revestimento com essas propriedades). Indústrias beneficiárias são a eletroeletrônica, de embalagens e de impressão;

2.6.2 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE

A preparação da superfície é uma etapa muito importante durante o processo de aspersão térmica, pois é através dela que se consegue eliminar produtos que impedem o contato total entre o revestimento e substrato, essencial para maior aderência. A qualidade da adesão do revestimento está diretamente relacionada com a limpeza e a rugosidade da superfície do substrato. A obediência a procedimentos padronizados de preparação da superfície é necessária para garantir o sucesso na aplicação dos revestimentos [16, 19, 20]. Os principais parâmetros operacionais de jateamento abrasivo que influenciam diretamente na preparação da superfície são: tipo de máquina, condições do abrasivo, ângulo, distância, pressão e duração do jateamento [15].

Um estudo detalhado da importância da preparação do substrato apresentado por Maranhão (1996), informa que os procedimentos envolvidos nessa operação são os seguintes: a) pré-usinagem da superfície para remover possíveis irregularidades presentes e uniformizar a sua textura; b) limpeza e “*degreasing*” (remoção de gorduras) da superfície; c) jateamento abrasivo da superfície (por exemplo, com partículas de alumina), visando criar uma rugosidade controlada [29].

A obtenção de uma rugosidade adequada é tão importante quanto a limpeza. Durante a aspersão, as partículas fundidas ou semifundidas formam lamelas quando se chocam com a superfície do substrato. Estas, à medida que se esfriam e se contraem, precisam aderir a uma superfície que favoreça o ancoramento mecânico. O jateamento abrasivo é a técnica mais comumente utilizada para se obter uma rugosidade adequada à aspersão térmica. Diversos tipos de abrasivos estão disponíveis comercialmente. Os mais comuns são: óxido de alumínio, carvão de silício e granalha de aço [2, 20, 23]. Segundo Lima e Trevisan de um modo geral, a rugosidade superficial mais adequada para a maioria dos revestimentos é aquela que apresenta Ra numa faixa de 2,5 a 13 μ m. [15].

Segundo Buschinelli *et al* (1999), o ângulo de jateamento exerce uma forte influência na rugosidade (Ra) 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.

Esta observação se torna importante devido à influência que as incrustações exercem na aderência de um revestimento ao substrato bem como entre as partículas depositadas. Deste modo, as partículas quando atingirem uma superfície preparada convenientemente irão tomar a forma da superfície e se conformar de acordo com a rugosidade encontrada no substrato a fim de ocorrer naturalmente o ancoramento mecânico, sendo assim as incrustações presentes podem se tornar barreiras entre o revestimento e o substrato diminuindo a aderência.

A aparência de uma superfície com acabamento adequado à operação de aspersão térmica é de uma cor cinza metálico uniforme, com aparência rugosa, isenta de óleo, graxa, poeira, ferrugem, óxidos ou produtos de corrosão, pintura e qualquer material estranho. Poeira e material abrasivo aderidos à superfície do substrato devem ser removidos por jato de ar antes da aspersão propriamente dita [20].

Segundo Mellali (1996), experiências mostraram que pré aquecer o metal base melhora a adesão do revestimento. Camargo (1999), em seus estudos sobre aquecimento ao substrato informa que em alguns casos o pré-aquecimento previne a condensação do vapor d'água. Em outros casos, ele pode retardar o resfriamento das partículas para melhorar o contato substrato/partícula. Todavia cuidados devem ser tomados, pois altas temperaturas, por longos tempos, podem resultar na produção de espessas camadas de óxidos.

Na prática sugere-se que as superfícies possam ser pré-aquecidas a temperaturas entre 80 e 120°C [15].

2.6.3 ANÁLISE DA CAMADA ASPERGIDA

Conhecer as propriedades da camada segundo Schwetzke (1997), é essencial para controlar sua qualidade. Há uma variedade de métodos para caracterizar essas propriedades como: métodos não destrutivos e destrutivos. A escolha do teste a ser aplicado à camada depende essencialmente do material e das propriedades de interesse [6].

Segundo estudos de Herman e Sampath (2004), os depósitos feitos por aspersão térmica envolvem a contínua e rápida deposição de material e geralmente a solidificação de gotas fundidas ou semi fundidas. Este processo resulta em microestruturas imperfeitas, incluindo porosidade devido à oxidação.

Segundo Pawlowski (1985), normalmente a caracterização da qualidade de um revestimento é o último estágio na produção. As propriedades de um revestimento efetuado por aspersão térmica vão depender diretamente da adesão entre a camada e o substrato, bem como da coesão entre as partículas depositadas. Essas propriedades dependem ainda, da quantidade de defeitos presentes no revestimento, tais como: poros, trincas, óxidos, etc. Entre as propriedades usadas para caracterizar revestimentos aspergidos as mais comuns são: adesão/coesão, dureza, desgaste e micrografia [23].

De acordo com Krepski (1993), *apud* Lima, em seus estudos sobre a aplicação de aspersão na indústria química, é necessário um controle rigoroso das diversas etapas do processo de aspersão térmica, muitas vezes uma simples falha na calibração dos instrumentos é responsável pela má qualidade ou mesmo falta de repetibilidade do revestimento. Antes de iniciar um trabalho de revestimento, é muito importante saber quais são as propriedades necessárias para uma determinada aplicação [15].

Existem padrões industriais que especificam limites para estes defeitos, porém é difícil o controle e a caracterização deles em detalhes que permitam o estabelecimento e especificações de padrões reais. Essas imperfeições são geralmente determinadas por microscopia ótica (MO), apesar do microscópio eletrônico de varredura (MEV) ser ocasionalmente empregado para maiores detalhes. Será mostrada a seguir os métodos empregados para a análise e caracterização dos revestimentos aspergidos [8].

Microestrutura – a preparação metalográfica é o primeiro passo para estudar a microestrutura da camada. Na preparação deve-se ter cuidados especiais, pois tem que ser levada em consideração o material aspergido, cada tipo de material exige uma técnica de preparação especial para não danificar as camadas aspergidas. A primeira etapa está no corte da seção transversal da camada. A amostra deve ser seccionada com uma pequena pressão do disco de corte a fim de não deformar a camada aspergida ou a adesão com o substrato. Outros problemas nesta fase são quando a camada aspergida é removida do substrato devido ao seccionamento da amostra na direção errada ou a alta pressão exercida do disco de corte sobre o substrato ocasionando problemas como trincas [5, 23].

As amostras podem ser embutidas a quente ou a frio. Se as amostras são sensíveis à pressão ou a temperatura é recomendado o processo a frio. Nas etapas de lixamento e

polimento deve-se ter muito cuidado ao se especificar o tempo e a pressão usados para cada tipo de material. A influência destes parâmetros pode modificar as características originais da microestrutura. Tempo excessivo de polimento pode fechar os poros e esconder a verdadeira porosidade. Enquanto pressão excessiva pode soltar e arrancar dos revestimentos alguns carbonetos e assim mascarar a verdadeira microestrutura do revestimento [6]. Existe uma variedade de estratégias para evitar a retirada de partículas em revestimentos cerâmicos que seriam mais suscetíveis a problemas de fragilidade. Um caminho é impregnar no revestimento uma resina epóxi (impregnação a vácuo) que efetivamente reforça os revestimentos e mantém a integridade entre as partículas durante o lixamento e polimento [15].

A análise metalográfica é geralmente efetuada em uma seção transversal do revestimento a fim de avaliar imperfeições estruturais e observar a interface entre o revestimento e o substrato. Ambos o OM (microscópio óptico) e o MEV (microscópio eletrônico de varredura) são usados comumente.

Porosidade, vazios, trincas e falta de adesão do material aspergido ao substrato são geralmente detectados por técnicas metalográficas. Porosidade pode ser vista genericamente como a ausência de material do revestimento. Os poros podem ser observados visualmente geralmente em forma arredondada localizados entre as camadas, existem também trincas verticais que podem se formar durante a solidificação. É importante notar que os revestimentos metálicos contêm em geral menos poros que os cerâmicos [8].

Segundo Herman e Sampath a explicação para a porosidade na aspersão fundamenta-se em um conjunto de fatores como: o meio ambiente, características dos pós, tamanho e distribuição, assim como o nível de energia, fluxo de gás e distância de aspersão. A atmosfera em que a aspersão é efetuada terá uma significativa influência sobre a oxidação dos metais conduzindo a um maior ou menor nível de porosidade. Por esta razão uma atmosfera inerte diminuirá o nível de porosidade na maioria dos revestimentos metálicos. Tanto quanto a pressão ou relação dos combustíveis, a velocidade da chama e das partículas indica uma maior velocidade de impacto das partículas sobre o substrato. Isso resultará em achatamento das camadas em toda a extensão aumentando a densidade e conseqüentemente reduzindo a porosidade [8].

Relacionado aos parâmetros da pistola de aspersão, geralmente pode ser dito que quando aumentamos a velocidade das partículas a porosidade diminui. O mesmo tipo de generalização pode ser feito quanto ao tamanho das partículas: maiores tamanhos de partícula maiores níveis de porosidade [8].

Aderência – a qualidade do processo de aspersão térmica influenciará na formação da microestrutura do revestimento e por esta razão pode influir nas forças de adesão e coesão do material aspergido. Alguns fatores como: tamanho e distribuição da porosidade, tensões residuais, macro ou micro trincas influenciam o desempenho e o sucesso do processo de revestimento [20].

O ensaio de adesão segundo a norma ASTM C633-79 é um dos indicados e mais utilizados para testar a aderência de revestimentos sobre substratos metálicos. O modo de fratura dos revestimentos pode ser adesivo (quando ocorre na interface do revestimento com o substrato) ou coesivo (quando ocorre dentro do adesivo). Se a fratura ocorre no interior do adesivo utilizado o teste não informa com precisão o valor real da resistência. Weiss (1995), *apud* Lima, discute em seu trabalho que os testes de aderência podem ficar limitados pela resistência do adesivo utilizado [17].

Deve-se ressaltar que o valor de adesão é obtido pela carga de ruptura no ensaio dividida pela área da seção transversal.

O teste de aderência é também um teste mecânico, porém camadas depositadas pelo processo HVOF podem atingir tensões acima da resistência dos adesivos (colas) disponíveis no mercado atualmente [5].

Dureza – segundo Freire (2002), as propriedades mecânicas das camadas com carbonetos podem ser avaliadas através de dois métodos: determinação de dureza e resistência ao desgaste. A microdureza Vickers é um teste utilizado para medir todos os tipos de revestimento, tanto que este teste pode ser usado como rotina. A amostra a ser ensaiada deve ser devidamente polida como no caso da preparação metalográfica.

As medições podem ser feitas longitudinalmente ou transversalmente em relação ao revestimento depositado [23].

Segundo Kreye (2000) *apud* Freire o corte transversal das camadas e as etapas de lixamento e polimento são também efetuados durante a preparação das amostras para a medição de dureza. A dureza da seção transversal é medida de acordo com a norma DIN 50133 com um diamante Vickers. As camadas podem mostrar uma distribuição de fases não homogênea, o que influencia na medida da dureza. Se a dispersão nas medidas de uma amostra for maior que 15% isso pode indicar uma distribuição de fases heterogênea ou um alto grau de porosidade [6]. Devido a características anisotrópicas dos revestimentos, os valores de dureza variam consideravelmente em um mesmo revestimento; portanto alguns cuidados devem ser tomados para que o valor encontrado de microdureza seja representativo do revestimento como um todo e não como uma lamela ou de uma única partícula [15].

2.6.4 PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA

Serão descritos brevemente os principais processos utilizados para aspersão térmica, enfatizando o processo HVOF – Aspersão Óxi-Combustível de Alta Velocidade. A Tabela 03 apresenta uma comparação entre as principais características dos processos de aspersão térmica e das camadas aspergidas.

Os processos de aspersão térmica podem ser categorizadas em dois grupos básicos de acordo com o método de geração de calor:

por combustão (FS, HVOF, D-gun, HVCW).

processos elétricos (PS, AS).

Emissão de fótons (LS).

Passagem (CS)

O aquecimento por combustão é um processo que utiliza calor gerado pela queima de gás combustível. Qualquer substância que se funda e não sublima a temperaturas inferiores a 2700°C pode ser aspergido por estes processos. Os materiais aplicados podem ser um metal puro, uma liga metálica, um compósito, um carboneto, um cerâmico, um cermet ou combinações destes [15].

Tabela 03 – Comparação de características de processos de aspersão térmica. [5, 20, 29].

Processos	Características										
	Gases Vazão de gases (m ³ /h)	Temperatura média (°C)	Atmosfera em torno da gotícula	Velocidade de impacto (m/s)	Aderência relativa (1 a 10)	Coesão interlamelar	Teor de óxidos (%)	Custo relativo (1 a 10)	Taxa de deposição máxima (kg/h)	Potência (kW)	Energia para fusão (kW/kg)
Chama (P6) FS	Acetileno, propano, propileno, CO ₂ , H ₂ , O ₂ , ar ≈ 10	≈ 2200	H ₂ O CO – CO ₂	≤ 50	3	Baixa	6	3	7	25 – 75	11 – 22
Chama (Arame) FS	Acetileno, propano, propileno, CO ₂ , H ₂ , O ₂ , ar ≈ 70	≈ 2800	CO ₂ – H ₂ O N ₂ – CO	≤ 200	4	Média	4	3	9	50 – 100	11 – 22
Arco (arame) AS	Ar, N ₂ ≈ 70	≈ 5500	N ₂ – O ₂	150 – 250	6	Alta	0,5 – 3	1	16	4 – 6	0,2 – 0,4
Plasma PS	Ar, He, N ₂ , H ₂ e suas misturas, CO ₂ ≈ 4	≈ 5500	N ₂ – O ₂ H ₂	≤ 400	6	Alta	0,5 – 1	5	5	30 – 80	13 – 22
Detonação D-gun	≈ 10	≈ 3900	CO ₂ – H ₂ O N ₂ – CO	≈ 600	8	Muito Alta	0,1	10	1	100 – 270	220
HVOF	etileno, propano, propileno, acetileno, queresene, H ₂ , O ₂ , CO ₂ , ar 30 – 60	≈ 3100	CO ₂ – H ₂ O N ₂ – CO	≤ 650	8	Muito Alta	0,2	5	14	100 – 270	22 – 200
Plasma de alta energia – PS	Idem PS 15 – 30	≈ 8300	N ₂ – O ₂ H ₂	250 – 1200	8	Muito Alta	0,1	4	23	100 – 250	9 – 13
Plasma a vácuo PS	Idem PS ≈ 8	≈ 8300	Ar – He	250 – 600	9	Muito Alta	ppm	10	10	50 – 100	11 – 22

Aspersão a chama (*FS – flame spraying*) emprega ar comprimido ou oxigênio misturado com uma variedade de gases combustíveis (acetileno, propileno, propano, hidrogênio) utilizados para fundir e impulsionar as partículas fundidas ou semi fundidas em direção ao substrato. Geralmente esse processo produz revestimentos com baixa resistência não sendo empregado onde é desejada alta densidade e excelente aderência ao substrato. As razões dessas deficiências é devido à baixa velocidade atingida, na faixa de 30 a 150m/s e a baixa temperatura encontrada na chama de combustão abaixo de 3000°C. Apesar destas deficiências este processo é utilizado devido a sua versatilidade, baixo custo e alta produtividade [8, 20].

No processo de aspersão a arco elétrico (*ASP – arc spraying*), dois arames eletrodos consumíveis são alimentados de forma a se encontrar em um ponto à frente de um jato de gás, que serve para a atomização. Uma diferença de potencial de 18 a 40V é estabelecida entre os arames produzindo um arco elétrico. O equipamento básico para este processo consiste de uma fonte de corrente contínua tipo tensão constante, alimentadores de arame com velocidade constante, tocha de aspersão e um sistema de fornecimento de gás comprimido controlável. Um fluxo de gás comprimido promove a atomização da porção fundida dos arames, impulsionando as minúsculas partículas formadas em direção ao substrato. As altas temperaturas das partículas produzem, após o impacto com o substrato, interação metalúrgica, zonas de difusão ou ambos. Estas reações localizadas formam pequenas zonas “soldadas” levando a um revestimento com boa aderência. Um efeito negativo do alto estado de energia das partículas atomizadas é a tendência a mudar a composição das ligas aplicadas, devido à oxidação durante a aspersão. Este processo apresenta normalmente, maiores taxas de deposição do que outros processos de aspersão térmica. O aquecimento do substrato é menor que os processos de aspersão por chama principalmente por não haver contato com a chama. [15, 20].

O processo por detonação (*D-gun – detonation-gun spraying*) utiliza a energia da explosão de misturas de oxigênio-acetileno para aquecer e impelir materiais em pó para a superfície do substrato a ser revestido. O depósito resultante é extremamente duro, denso e bem aderente ao substrato. A pistola de detonação é diferente de outros equipamentos por

aspersão por combustão. Ela utiliza a energia das explosões intermitentes de uma mistura oxigênio-acetileno, ao invés de uma chama estacionária, para impulsionar o pó até o substrato. Quando é feita a ignição da mistura uma onda de choque controlada aquece e acelera as partículas de pó, cuja velocidade de saída é em torno de 600m/s. O processo produz um nível de ruído acima de 150 decibéis, o baixo nível de porosidade permite ótimos trabalhos de acabamento pós retificação [20, 23].

A aspersão óxi-combustível de alta velocidade (*HVOF – high velocity oxy-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 [8, 15, 23]. Segundo Irvine *et al* (1993) embora este processo tenha sido desenvolvido como uma alternativa ao processo de aspersão por detonação, está emergindo como competidor do processo de aspersão a plasma em algumas aplicações. Além da qualidade de revestimento e tensões residuais reduzidas, outras vantagens incluem eficiência do depósito, menor sensibilidade ao ângulo de aspersão e menos variáveis críticas de processo [15].

A Figura 15 exibe o processo de deposição de um revestimento aspergido pelo processo HVOF.

Aspersão a chama de alta velocidade com arame (*HVCW – high velocity combustion wire spraying*) é uma variante do processo HVOF, e seus sistemas foram projetados para combinar a qualidade de revestimentos com a conveniência do uso de arame como material de adição. Basicamente o HVCW envolve a combustão contínua de um gás combustível no interior de uma câmara, com bico de aspersão refrigerado a ar sendo o material fundido continuamente atomizado por um compressor de ar [20, 29].



Figura 15 – Sistema de aspersão térmica pelo processo HVOF. Pistola JP 5000. Acervo Franco Wronski Comeli (2006).

O processo de aspersão térmica por plasma (*APS – plasma spraying*) utiliza o calor de um plasma para fundir materiais de revestimento na forma de pó. O termo arco plasma é utilizado para descrever uma família de processos de trabalho em metais que usam um arco elétrico constringido para fornecer energia térmica de alta densidade. O pó é alimentado, fundido e acelerado em direção ao substrato por um jato de alta velocidade. A energia, temperatura e velocidade do jato de plasma são controladas pelo tipo de bocal constritor, intensidade da corrente elétrica e vazão do gás do plasma. Em geral nitrogênio e argônio são utilizados como gás de plasma, podendo conter adições de hidrogênio ou hélio para aumentar a potência e velocidade [8]. As maiores aplicações do processo de aspersão a plasma estão em recuperação dimensional e barreira térmica de componentes. Podem-se conseguir espessuras de 0,5 a 6,00mm e larguras de até 32,00mm em um único passe [15].

Segundo Kreye (1997), um processo recente que vem sendo considerado muito promissor é o da aspersão a frio (*CS – cold spraying*) que se notabiliza pela deposição dos materiais em uma faixa de temperaturas significativamente menor, se comparada àquelas utilizadas nos processos tradicionais de aspersão térmica. Neste caso, a expansão de um gás

em um bico convergente-divergente a partir de pressões da ordem de 15-35 bar (1,5 a 3,5 MPa) até a pressão ambiente resulta em um fluxo de gás supersônico. Este gás é pré aquecido a temperaturas entre 100 e 600°C, visando aumentar a sua velocidade e, conseqüentemente a velocidade das partículas a serem aspergidas [29].

A Figura 16 correlaciona as temperaturas e velocidades atingidas pelas partículas para diferentes processos de aspersão térmica. Segundo Kreye *et al.* (2000), nota-se claramente, ao longo do desenvolvimento de novos processos e sistemas, a tendência em se procurar uma diminuição da temperatura envolvida no processo, compensando-a com um aumento na velocidade de propulsão das partículas aspergidas. A principal justificativa para isso baseia-se no fato de que quanto maior a temperatura, maior é o grau de oxidação do material durante a aspersão e, conseqüentemente, maior o distanciamento de suas propriedades em comparação ao material de adição original. Tal situação, para a maioria das aplicações, é indesejável [29].

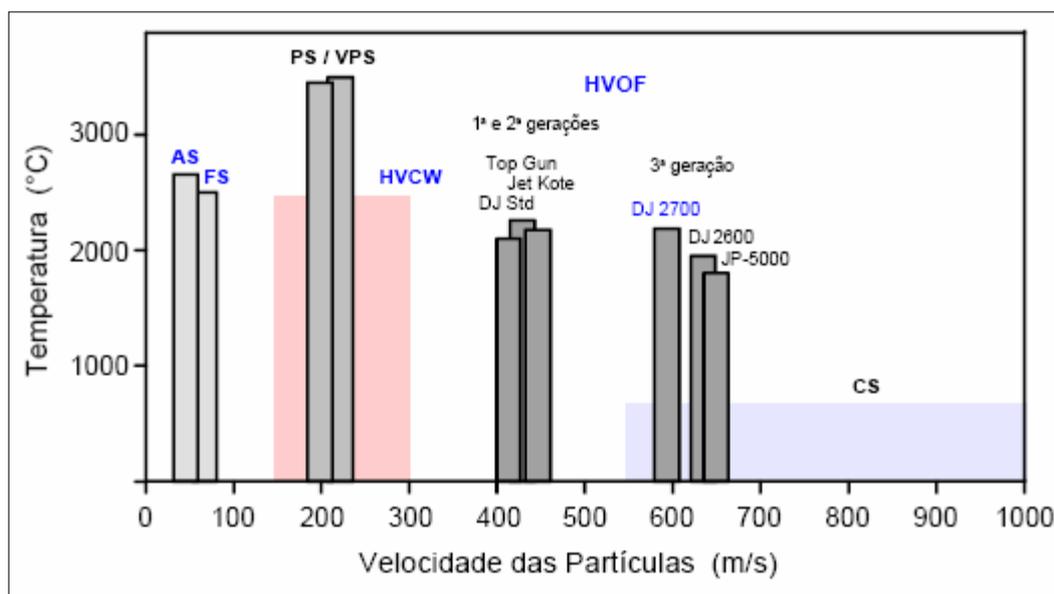


Figura 16 – Correlação entre temperaturas e velocidades atingidas pelas partículas para diferentes processos de aspersão térmica. Adaptado de Kreye [29].

2.6.5 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS E REVESTIMENTOS ASPERGIDOS COM HVOF

Segundo Li *et al.* (1996), em seus estudos sobre o processo HVOF, a velocidade hipersônica da chama aliada à baixa temperatura quando comparada com o processo a plasma (APS) diminui a interação entre a mesma e o material de aspersão, além do mais a alta energia cinética obtida pelas partículas de pó assegura uma boa coesão entre os pós dos revestimentos possibilitando o emprego de revestimentos a base de carbetos [24].

Kawarita *et al.* (2003), em seu artigo sobre o desenvolvimento de revestimentos de alta densidade, resistentes a corrosão pelo processo HVOF, relata que desde 1995 existem pesquisas e desenvolvimentos de revestimentos com resistência a corrosão semelhante a dos aços inoxidáveis e ligas a base de níquel. Estes tipos de revestimentos requerem a maior impermeabilidade possível com o substrato, evitando a possibilidade de ligações ou caminhos em direção ao mesmo. O método de aspersão por HVOF possibilita a formação de um revestimento de alta densidade com pouca mudança da composição durante a aspersão. Isso é possível devido a velocidades das partículas supersônicas acima de 500 m/s e baixas temperaturas até 2000°C. Este processo é frequentemente utilizado para revestimentos duros como os cermets WC-Co, Cr₃C₂-NiCr a fim de aumentar a resistência ao desgaste e ou corrosão [11].

Segundo Guilemany *et al.* (1998), Tani *et al.* (2000), Gu *et al.* (1998), *apud* Sidhu (2005), o processo HVOF é largamente utilizado por muitas indústrias devido à qualidade superior entre os processos de revestimento. Outros estudos concluíram que o HVOF é o melhor processo em relação à resistência a corrosão quando comparados com outros processos como: FS, AS e PS [31].

A aspersão térmica hipersônica produz camadas densas ($\approx 99\%$) com teores de óxidos e valores de adesão significativamente menores que no processo a plasma. Devido a sua alta velocidade e temperatura relativamente baixa, quando comparado com o plasma, o processo HVOF é particularmente adequado para revestimentos contendo carbonetos (como as ligas de carbonetos de tungstênio em matriz de cobalto e carboneto de cromo em matriz níquel-cromo), pois a baixa energia térmica envolvida reduz a transformação de

fases dos carbonetos e a sua dissolução, resultando no favorecimento da dureza da camada, enquanto que a velocidade elevada gera uma menor porosidade [5, 13, 29, 32].

Segundo Irving (1993), os revestimentos obtidos por esta técnica tem sido utilizado em muitas aplicações industriais devido à possibilidade de se aplicar vários tipos de materiais desde polímeros até cerâmicos sem restrições dimensionais. O processo é muito empregado onde há a necessidade de resistência ao desgaste, corrosão e ainda apresentam menor porosidade entre as lamelas, menor teor de óxidos, alta dureza, alta densidade associados a um favorecimento do mecanismo de aderência metalúrgica ao substrato, fatores determinantes para o desempenho de revestimento nos equipamentos sujeitos a problemas de desgaste e corrosão em alta temperatura [29, 31].

Segundo Schwetzke e Krommer (1997), existem três gerações de sistemas dentro do processo HVOF. Em sistemas da *primeira* e *segunda* geração – Jet Kote, Diamond Jet, Top Gun e CDS – a velocidade da chama pode chegar de 1800 a 2000 m/s com uma pressão na câmara de combustão de 3 a 5 bar (0,3 a 0,5 MPa); as partículas projetadas podem alcançar a velocidade de 450 m/s. Entre os gases de combustão incluem-se o propano, propileno, etileno, hidrogênio e no caso da pistola Top Gun, também o acetileno. Estes sistemas trabalham com potências de 80 kW e são capazes de depositar 2 a 3 kg/h de material. Essa potência pode ser atingida pela combustão de 3,0 m³/h de propano, 3,2 m³/h de propileno, 4,7 m³/h de etileno, 25,9 m³/h de hidrogênio ou 4,9 m³/h de acetileno [5, 6].

Já na *terceira* geração – JP 5000, DJ 2600, DJ 2700, OSU Carbide Jet, Top Gun K – a pressão na câmara de combustão chega de 8 a 12 bar (0,8 a 1,2MPa); somado a esta característica, o bico da pistola sofre uma expansão interna através de um “venturi” que provoca uma aceleração adicional do gás a saída do bico, com as partículas alcançando velocidades de 600 a 650 m/s. Com potência maior que a primeira e segunda gerações, 100 a 200 kW, a taxa de deposição aumenta para 10 kg/h. As pistolas JP 5000 e OSU Carbide Jet usam querosene como combustível, ao passo que a pistola DJ 2700 pode operar com vários hidrocarbonetos incluindo propano, propileno e etileno. Ambas DJ 2700 e DJ 2600 podem utilizar como gás de combustão o hidrogênio. Dependendo do sistema, diferentes taxas de oxigênio/combustível são usadas [5].

Segundo Kreye (1997), dentre as características de cada pistola, pode haver diferentes locais para a injeção do material a ser aspergido: na câmara de combustão, no

bico (depois da câmara de combustão), radialmente ou axialmente. As temperaturas mais altas são alcançadas quando o pó é injetado diretamente dentro da câmara de combustão. São alcançadas temperaturas menores quando o pó entra depois da expansão do gás ou depois da câmara de combustão. Temperaturas baixas podem ser atingidas com a injeção radial do pó, pois não cruzará a área mais quente da chama que é o centro [5, 6].

Ainda segundo Kreye *et al.* (1996), a pistola DJ 2700 – Figura 17 – possui uma entrada de pó localizada na câmara de expansão de forma axial/central, enquanto que na JP 5000 – Figura 18 – isso acontece de forma radial após a câmara de combustão no bico da pistola. Assim o pó aspergido pela pistola DJ 2700 tem uma maior probabilidade de sofrer transformações de fases devido a ativação térmica.

O grupo das pistolas DJ (HVOF) produz revestimentos de alta confiabilidade e integridade podendo utilizar-se metais e carbonetos como materiais de adição, produzindo-se revestimentos resistentes ao desgaste com alta adesão, dureza e baixa porosidade.

Outra característica das pistolas é o tipo de combustível, ele determina a quantidade de energia introduzida, influenciando na fusão das partículas durante a aspersão e impondo a temperatura máxima da chama. O propano é aquele que apresenta maior calor de combustão entre os gases, utilizando menor volume para produzir a mesma quantidade de energia, proporcionando maior economia de combustível. As altas velocidades e as baixas temperaturas desenvolvidas com a terceira geração de pistolas trazem a possibilidade de aplicação de revestimentos com alta dureza e resistência ao desgaste [6].

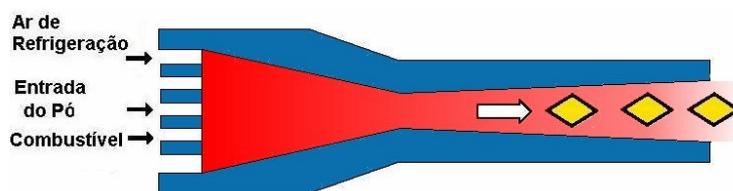


Figura 17 – Esquema construtivo da pistola DJ 2700 – Sulzer Metco. Zimmerman [5]

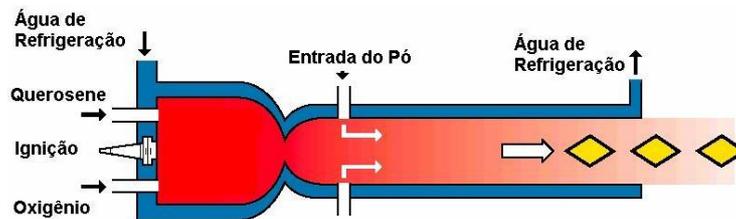


Figura 18 – Esquema construtivo da pistola JP 5000 – Tafa. Zimmerman, S. [5]

O tamanho das partículas de pó empregado no processo HVOF são geralmente na faixa de 5 a 45 μ 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 [15].

Para a obtenção de camadas com as propriedades desejadas Schwetzke e Krommer (1997), informam que é preciso conhecer bem os parâmetros de aspersão, o projeto da pistola e as características do material a ser aspergido, pois existe uma forte dependência entre estes. Para cada camada aplicada com um tipo de aspersão e de pó, existe um ponto ótimo para os parâmetros de aspersão. Os sistemas de aspersão térmica HVOF diferem pelo projeto da pistola, localização da injeção de pó e do tipo de combustível, o que resulta em velocidades de partículas diferentes. Além disso, a pressão na câmara de combustão, fluxo de gases, taxa oxigênio/combustível e taxa de alimentação de pó também influenciam a transferência de calor para as partículas. O material de aspersão determina parte das propriedades da camada pela morfologia do pó, distribuição granulométrica e sua composição, assim como a distância de aspersão [5].

O conhecimento da influência que cada parâmetro tem sobre a velocidade e temperatura ou aquecimento das partículas é a base principal para atingir ótimas condições nos procedimentos de aspersão. Utilizando-se um determinado material ou processo, deve-se analisar parâmetros do sistema como: fluxo de combustível, relação oxigênio/combustível, distância de aspersão [6].

2.6.6 MATERIAIS DE ADIÇÃO PARA ASPERSÃO TÉRMICA

Segundo Kreye (1994), dentre as técnicas de revestimentos mais utilizadas, a aspersão térmica desponta como aquela que apresenta a maior gama de materiais possíveis de serem aplicados. Materiais diversos como: metais e ligas metálicas, polímeros e cerâmicas e/ou uma combinação destes, podem ser transformados em materiais para aspersão. De acordo com Pawlowski (1995), os materiais para aspersão são oferecidos na forma de: pó, vareta ou arame sendo estes puros ou ligados. Materiais mais frágeis como cerâmicos ou alguma misturas destes vêm na forma de pós, com diferentes morfologias e granulometrias que dependem do processo de fabricação [23, 29].

Os *arames* são produzidos a partir de metais ou ligas metálicas e são fornecidos normalmente em bobinas e só podem ser utilizados nos processos FS, ASP, ou HVCW. A elaboração desses materiais exige um mínimo de ductilidade, visando a sua conformação mecânica. Sendo assim a quantidade de aditivos de elevada dureza que pode ser incorporado aos mesmos é bastante limitada, fazendo com que os revestimentos aspergidos a partir de arames maciços apresentem menores propriedades mecânicas e uma resistência ao desgaste relativamente baixa [29].

Segundo Kreye (2001), um novo desenvolvimento na produção de arames tubulares baseia-se em tubos metálicos preenchidos com pó, antes de serem processados na forma de bobinas. Por exemplo, arames deste tipo podem ser fabricados a partir de tubos de ligas ferrosas preenchidos com pós contendo cromo (Cr), boro (B) e silício (Si) [29].

As *varetas* sinterizadas a base de materiais cerâmicos são empregadas em menor escala que os pós cerâmicos. Uma desvantagem do uso de varetas é a forma descontínua com a qual elas são alimentadas, o que inevitavelmente provoca variações microestruturais nas regiões onde o processo foi interrompido e depois reiniciado [15, 29].

Segundo Pawlowski (1995), os métodos industriais de fabricação dos *pós* dependem do tipo de material. Metais e ligas são geralmente preparados por uma das seguintes formas: atomização (“*atomization*”) ou sinterização (“*sintering*”). Óxidos e carbetos cerâmicos são produzidos por sinterização ou fusão (“*fusing or sintering*”) seguida de

trituração. Por sua vez, pós de materiais compostos (compósitos) podem ser obtidos por recobrimento (“*cladding*”). Em termos de processamento desses pós, provavelmente o método mais versátil é o de aglomeração (“*spray-drying*”), o qual permite que qualquer tipo de material finamente particulado se mantenha unido formando um aglomerado esférico com um ligante orgânico. Pós preparados desta maneira podem ser submetidos a processos adicionais de densificação, tais como sinterização. Algumas vezes para que se possa chegar a uma composição específica, pós produzidos por dois ou mais dos métodos descritos acima podem ser combinados em uma mistura homogênea [23, 29].

A Tabela 04 mostra os pós mais comumente usados para aspersão térmica segundo os processos de fabricação.

Tabela 04 – Materiais de aspersão em forma de pós mais comumente utilizados e respectivos métodos de fabricação [29].

Material do pó	Processo de Fabricação
Al e ligas de alumínio (AlMg, AlSi, ...), Cu e ligas de cobre (CuAl, CuSn, CuPbSn, ...), Ligas a base de Co e Ni (Hastelloy, Inconel, Stellite, Tribaloy, ...) Mo e ligas de molibdênio (Mo-MoO ₂ , Mo-Mo ₂ C, ...) Aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, Ligas FeCrAlY, Superligas	Atomizado (gás ou água)
Óxidos (Al ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ -TiO ₂ , Cr ₂ O ₃ , ZrO ₂ -MgO) Cermets (WC-Co, CrC-NiCr).	Sinterizado ou fundido + triturado
Cermets (WC-Co, WC-Co-Cr, WC-CrC-Ni, CrC-NiCr) Óxidos (ZrO ₂ -Y ₂ O ₃)	Aglomerados (sinterizados, ativados, densificados)

Os pós utilizados para aspersão podem ser um metal puro, uma liga metálica, um compósito, um carboneto, um cerâmico, um cermet ou combinação destes. O pó para aspersão é armazenado num recipiente que pode ser parte integrante da tocha ou ser acoplado a ela. Uma pequena quantidade de gás é desviada para arrastar o pó até o jato da mistura oxigênio/combustível em chama, quando ele é fundido e acelerado em direção ao substrato.

Nos sistemas HVOF segundo Beczkowiaki (1998), utiliza-se principalmente uma ampla variedade de carbetos na forma de pós, estes variam pela composição, granulometria e também quanto ao tipo de fabricação: sinterizado, aglomerado, recoberto, esferoidizado, atomizado, britado ou apenas misturado. O modo de fabricação determina a morfologia dos

pós. Essa característica tem grande influência na troca de calor entre as partículas e os gases de combustão, pois diferencia os pós pela área de troca de calor e capacidade de absorver a energia térmica. A morfologia dos pós é determinante também na maneira 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 [5]. Observa-se na Figura 19 as morfologias e seções transversais de alguns tipos de pós (para diferentes materiais) descritos na Tabela 05 de acordo com as características dos pós em relação ao processo de fabricação.

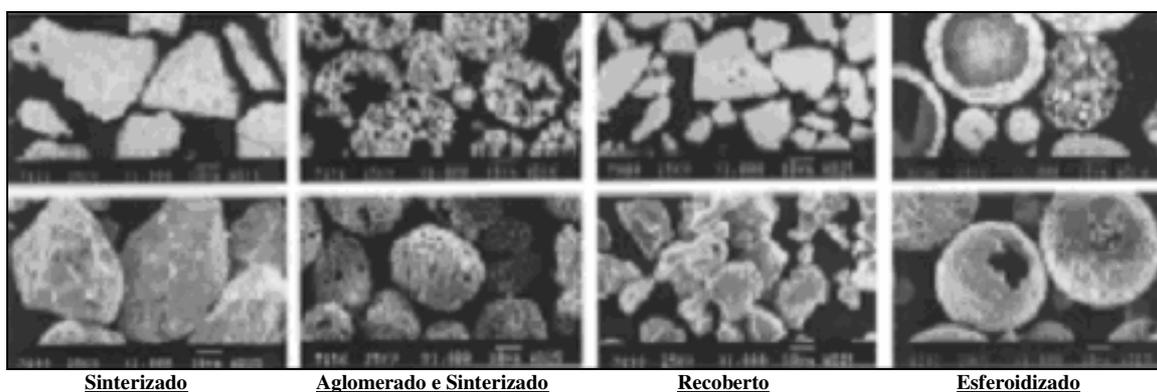


Figura 19 – Seção transversal e morfologia dos diferentes tipos de fabricação dos pós Beczkowiaki [5].

Segundo Schwetzke e Kreye (2000), quanto a 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. Uma granulação dentro de $-45+10\ \mu\text{m}$, mais fina, seria ideal para as propriedades mecânicas das camadas. Os pós mais densos, como o sinterizado e fundido produzem geralmente camadas mais porosas, mesmo para uma granulometria de $-45+15\ \mu\text{m}$, em relação ao aglomerado sinterizado, e especialmente em sistemas que utilizam uma menor energia térmica. Assim deve-se optar sempre que possível por pós aglomerados e sinterizados com granulometria abaixo de $45\ \mu\text{m}$ [5, 7, 32].

Tabela 05 – Características dos pós de acordo com o processo de fabricação.
Beczkiwiaki [5].

<p style="text-align: center;"><u>Sinterizado</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Forma do grão em bloco • Grão denso • Formação de fases dependendo da temperatura de fabricação, geralmente detectável. • Carboneto < 10µm 	<p style="text-align: center;"><u>Aglomerado Sinterizado</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Forma da partícula esférica • Grão poroso • Raramente ou poucas vezes ocorre a formação de ligação entre o carboneto e o metal matriz • Carboneto < 5µm
<p style="text-align: center;"><u>Recoberto</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Forma do grão em bloco • Grão denso • Sem formação de ligação entre o carboneto e o metal matriz, se não é submetido a tratamento térmico posterior. 	<p style="text-align: center;"><u>Esferoidizado</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Forma esférica da partícula • Grãos densos e porosos, esferas ocas, conchas – dependendo da matéria prima há formação de ligação. • Tamanho dos carbonetos dependem do material

Os principais tipos de materiais para revestimentos que possuem alta dureza em temperatura ambiente, alta dureza a quente e ainda condições de resistirem ao desgaste por *fretting* aliando resistência à corrosão citados pela literatura são: WC-Co, WC-Ni, WC-Co-Cr, WC-Cr-Ni e Cr₃C₂-NiCr. Estes materiais têm as características de possuírem carbonetos de alta dureza. Esses carbonetos estão imersos em uma matriz relativamente tenaz/dúctil de Co, Ni, Co-Cr ou Ni-Cr que têm como função a união das partículas, além de possuir resistência a corrosão [6, 37].

Segundo Stein *et al.* (1999), e Somaraju *et al.* (2000), *apud* Picas, existe um considerável interesse em pesquisas e aplicações de revestimentos utilizando-se Cr₃C₂-NiCr [24]. Zimmermann e Kreye (1996), revelam que os revestimentos aspergidos com Cr₃C₂-NiCr são usados para aumentar a resistência ao desgaste e diminuir o coeficiente de fricção entre vários componentes deslizantes na indústria automotiva. Uma alternativa para estes revestimentos seria na substituição do cromo duro utilizado largamente na indústria [24].

De acordo com recomendações de Kreye (2004), a aspersão térmica é uma técnica muito indicada para a produção de revestimento de componentes que necessitem alta resistência à corrosão e ou resistência ao desgaste. Geralmente cermets como o WC-Co ou $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ são utilizados para este fim, enquanto o primeiro possui alta resistência ao desgaste o segundo tem superior resistência à corrosão a quente [12].

As características dos revestimentos com carboneto de cromo são para aplicações em altas temperaturas como os do grupo de carbonetos de tungstênio, sendo recomendado para trabalhar em uma faixa de 540 a 815°C. Materiais com carbonetos de cromo contêm constituintes secundários como níquel e cromo de forma a prevenir a decomposição do carbeto durante a aspersão, e também funcionam para melhorar a integridade da camada aspergida e contribuir para a resistência ao desgaste e a corrosão. Esses revestimentos resistem efetivamente aos mecanismos de desgaste por erosão, desgaste em alta temperatura, *fretting* e corrosão a quente [37].

Segundo referências de Herman e Sampath (2004), os revestimentos por aspersão térmica encontram extensivas aplicações na proteção contra corrosão e desgaste em aços. Alguns dos materiais incluem metais como ligas a base de molibdênio, bronze, alumínio, aços inoxidáveis, cermets como WC-Co e $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ e cerâmicas como $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$. Os revestimentos estão sujeitos a uma variedade de mecanismos de desgaste: abrasivo, adesivo e erosivo, por esta razão uma compreensão do comportamento tribológico dos depósitos em relação às propriedades e avaliação de suas performances devem ser levadas em consideração. A natureza lamelar do depósito resulta em não uniformidade do desgaste. Assim o comportamento tribológico dos revestimentos está intimamente ligado com a microestrutura. Não homogeneidade nas propriedades mecânicas como a dureza e resistência podem conduzir a variação do comportamento do desgaste.

Geralmente, a resistência ao desgaste dos revestimentos aumenta com a sua densidade e com a aderência ao substrato [8, 23, 37].

Um resumo das características dos revestimentos em função dos materiais utilizados e dos processos de aspersão térmica é mostrado na Tabela 06 – Sulzer Metco, *The Coatings Company* [37].

Tabela 06 – Características dos revestimentos em função dos processos e materiais utilizados para aspersão térmica. Sulzer Metco – *The Coatings Company* [37].

<i>Tipo de Revestimento</i>	<i>Processo de Aspersão</i>				
	<i>FS⁽¹⁾</i>	<i>FS⁽²⁾</i>	<i>HVOF</i>	<i>AS⁽¹⁾</i>	<i>PS</i>
<i>Temperatura dos Gases – °C</i>					
Todos os revestimentos	3000	3000	2000 3000	---	12000 16000
<i>Aderência MPa</i>					
Materiais Ferrosos	14 – 28	14 – 21	48 – 62	28 – 41	22 – 34
Materiais Não Ferrosos	7 – 34	7 – 34	48 – 62	14 – 28	14 – 28
Cerâmicos	---	14 – 32	---	---	21 – 41
Cermets	---	34 – 48	83	---	55 – 69
<i>Densidade (%)</i>					
Materiais Ferrosos	85 – 90	85 – 90	95 – 98	85 – 95	90 – 95
Materiais Não Ferrosos	85 – 90	85 – 90	95 – 98	85 – 95	90 – 95
Cerâmicos	---	90 – 95	---	---	90 – 95
Cermets	---	85 – 90	95 – 98	---	90 – 95
<i>Dureza HV₁₀</i>					
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
<i>Porosidade</i>					
Materiais Ferrosos	Alta	Média	Desprezível	Média	Média
Materiais Não Ferrosos	Alta	Média	Desprezível	Média	Média
Cerâmicos	---	Média	---	---	Baixa-Média
Cermets	---	Média	Desprezível	---	Baixa-Média
<i>Faixa Recomendada de Espessura do Revestimento (mm)</i>					
Materiais Ferrosos	0,5 – 2,0	0,5 – 2,0	0,6 – 2,5	0,5 – 2,5	0,4 – 2,5
Materiais Não Ferrosos	0,5 – 2,0	0,5 – 2,0	0,6 – 2,5	0,5 – 2,5	0,4 – 2,5
Cerâmicos	---	0,4 – 0,8	---	---	0,4 – 5,0
Cermets	---	0,4 – 0,8	0,4 – 5,0	---	0,4 – 5,0

⁽¹⁾ Arame - ⁽²⁾ Pó

2.6.7 APLICAÇÕES ESPECÍFICAS PARA REVESTIMENTOS DE HASTES

Valentinelli *et al.* (2002), com base em seus estudos sobre o comportamento tribológico dos revestimentos aplicados pelo processo HVOF relatam informações muito importantes para a utilização dos cermets em altas temperaturas [39]. Dois diferentes tipos de materiais foram selecionados para o teste: WC-Co e Cr₃C₂-NiCr, sendo estes citados em referências bibliográficas como os principais materiais para aplicações onde se faz necessário a combinação de resistência ao desgaste e corrosão, possibilitando a operação em temperaturas ambiente, 500°C até picos de 700°C, aplicados em componentes mecânicos como eixos, componentes hidráulicos e trens de pouso, etc.

Os revestimentos foram aspergidos utilizando uma pistola JP-5000 (Hobart, Tafa, Praxair) com os parâmetros de aspersão – apresentados na Tabela 07 – onde foram variadas: as razões de oxigênio/querosene, a distância de aspersão e a espessura do revestimento.

Os depósitos foram ensaiados ao desgaste (pino sobre anéis) sob diferentes temperaturas em um tribômetro combinado com um sistema de alta frequência capaz de aquecer os corpos de prova (anéis de 60,00mm de diâmetro) acima de 600°C – Figura 20. Os corpos de prova foram testados a temperatura ambiente, 300°C, 400°C, 500°C e 600°C com carga aplicada de 135 N e velocidade de 200 rpm em todos os casos. Os substratos foram construídos de aço carbono com diâmetro de 60,00mm. Como elemento de desgaste, foi utilizado um pino de alumina com diâmetro 6,5mm, escolhido devido a sua dureza a alta temperatura: de fato o Al₂O₃ com 99% de densidade apresenta uma dureza de 1600 HV_{0,5} que é aproximadamente 40% maior que o WC-Co com 17% de cobalto onde se apresenta uma dureza de 1150 HV_{0,5}.

Para o teste em temperatura ambiente foi utilizado um pino de aço para trabalho a frio com uma dureza de 840 HV_{0,5} com diâmetro de 8,00mm. As perdas de massa foram verificadas através das medidas de massa antes e depois do ensaio com uma carga de 135N após uma distância total de 2000m.

Tabela 07 – Parâmetros de aspersão selecionados. Valentinelli, L. [39]

Amostra	Oxigênio / Querosene (razão)	Distância de Aspersão (mm)	Espessura do Revestimento (μm)
WC-Co 1	2000/5.1	380	200
WC-Co 2	2000/6	372	350
WC-Co 3	2000/6	364	350
Cr ₃ C ₂ - NiCr	1850/5,8	380	500

**Figura 20** – Sistema de aquecimento de alta frequência ajustado ao Tribômetro.

Valentinelli, L (2002), [39].

As perdas de massa em volume (mm^3/km) foram determinadas através de um medidor de perfil de contato (Talyscan 150, Tayler Hobson) das áreas (trilhas) formadas durante o desgaste. Esta foi a forma de compensar o aumento de massa devido à oxidação ocorrida sobre a superfície dos discos não protegidos pelo revestimento, que causa um aumento de peso durante os testes em alta temperatura. Com a determinação do perfil da trilha – Figura 21 – em função da densidade dos revestimentos, foram calculadas as perdas de massa.

Conforme mostra a Figura 22, em todos os casos ocorre a redução da taxa de desgaste com aumento de temperatura. Segundo Valentinelli *et al.* esta redução até 400°C é provavelmente devido ao aumento da plasticidade da matriz, sendo mais evidente no revestimento WC-Co devido a mais baixa temperatura de fusão do cobalto se comparado com o níquel. De fato, a rugosidade medida das diferentes morfologias existentes entre as

superfícies desgastadas (trilhas de desgaste) e fora da trilha de desgaste, a redução da rugosidade é mais evidente nos revestimentos WC-Co:

Ra = 162 nm e 780 nm respectivamente, sobre e fora da trilha de desgaste (WC-Co)

Ra = 320 nm 627 nm respectivamente sobre e fora da trilha de desgaste ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$)

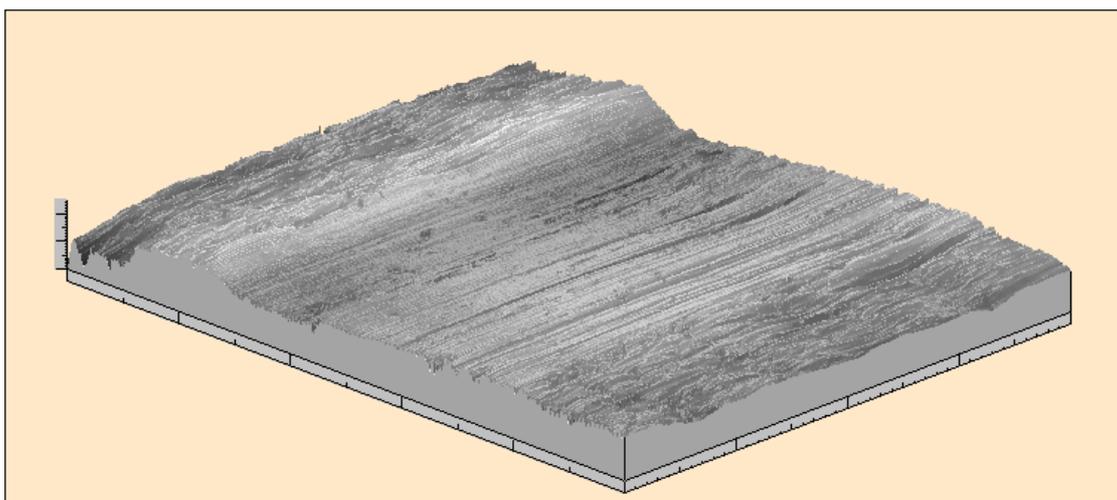


Figura 21 – Reconstituição da trilha de desgaste a 500°C do revestimento $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, determinado pelo medidor de perfil. Valentinelli [39]

A partir de 400°C começa a ocorrer um aumento da taxa de desgaste até 600°C. Segundo Valentinelli *et al.* [39] este aumento se deve provavelmente a um mecanismo oxidante de desgaste, a presença de faixas de oxigênio encontradas por intermédio de espectro EDS sobre as trilhas de desgaste do WC-Co permitem esta hipótese. Os principais mecanismos de desgaste encontrados até 500°C são a abrasão e a oxidação para os revestimentos WC-Co e para os revestimentos $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ a adesão. Deste forma, para aplicações abaixo de 600°C o WC-Co é o mais indicado, porém os revestimentos $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ possuem melhores resistências ao desgaste por impacto (*fretting*) e oxidação acima de 500°C [39].

Outro trabalho interessante apresentado por Mann e Prakash (2000), analisa atrito e as características de desgaste de revestimentos aplicados pelos processos D-gun e Plasma sobre um substrato de X20CrMoV 12-1, o mesmo adotado na metodologia

experimental dessa dissertação. A Tabela 08 apresenta a composição dos revestimentos utilizados na aspensão [18].

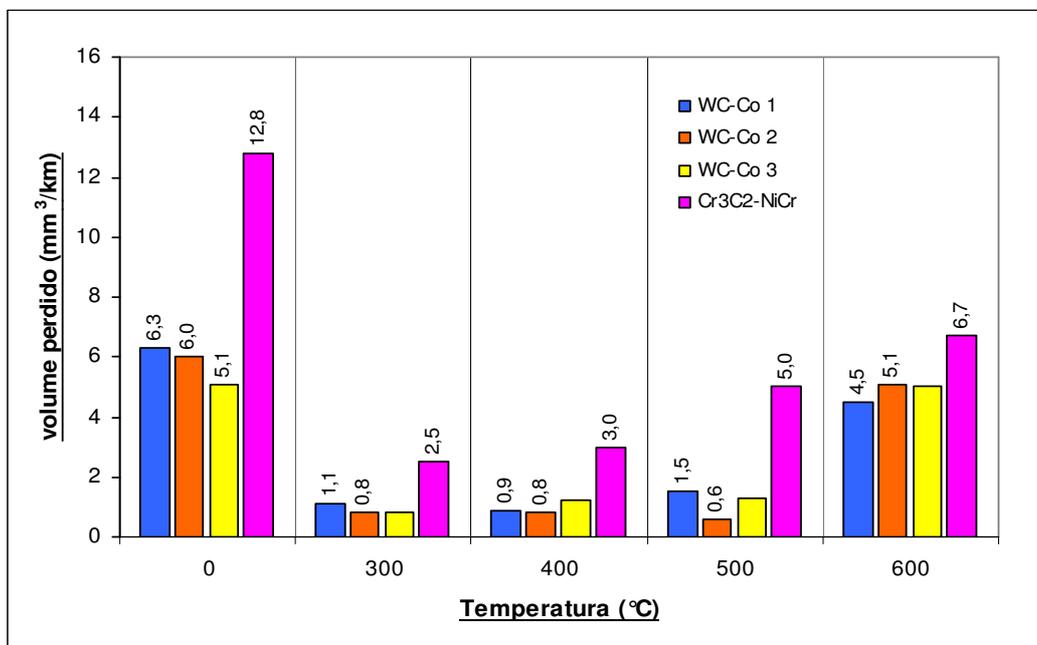


Figura 22 – Ensaio de desgaste pino sobre disco – taxas de desgaste medidas em diferentes temperaturas – carga aplicada 135N. Vallentinelli [39].

Tabela 08 – Composição química dos materiais de aspensão. Mann e Prakash [18]

Materiais para Aspensão	Composição (%)	Tamanho das Partículas (µm)
Cr ₃ C ₂ – NiCr	Cr ₃ C ₂ 75% - Ni 20% - Cr 5%	5 a 45
Cr ₃ C ₂ (1)	Cr ₂ O ₃ 96% - TiO ₂ 3% - Outros 2%	15 a 90
Cr ₃ C ₂ (2)	Cr ₂ O ₃ 92% - TiO ₂ 3% - SiO ₂ 5%	15 a 43
NiCrAlY	Cr 17% - Al 5,5% - Y 0,5% - Ni restante	45 a 150
Al ₂ O ₃ – NiAl	Al ₂ O ₃ 70% - NiAl 30%	15 a 90

Após a aspensão a dureza dos revestimentos foi determinada em um micro durômetro Vickers com carga de 300g. A porosidade foi determinada com a utilização de um microscópio eletrônico de varredura, a resistência à adesão segundo a norma ASTM C 633 o desgaste de acordo com um tribômetro (pino sobre disco) com sistema de aquecimento até 900°C. Foram controlados os seguintes parâmetros de ensaio de desgaste: a temperatura

de realização do teste (550°C) a carga (100N), rotação (25Hz) e o tempo de duração do teste (3 horas).

O pino usado contra os corpos de prova foi confeccionado de aço X20CrMoV12-1 revestido com stellite 6. Todos os corpos de prova foram limpos com ultra-som e álcool durante cinco minutos antes e após os testes. O cálculo da perda de massa dos discos e pino foi executado em uma balança com precisão de 0,01g dividindo a massa perdida pela densidade de cada revestimento. O resultado dos ensaios de aderência, dureza e porosidade estão expressos na Tabela 09. A Tabela 10 mostra os resultados dos testes de desgaste pino sobre disco dos vários revestimentos.

Tabela 09 – Propriedades dos vários revestimentos e outros métodos de endurecimento superficial. Mann e Prakash [18].

Materiais Processos de Aspersão	HV (300g)	Rugosidade Ra (μm)		Porosidade (%)	Adesão MPa
		Após Aspersão	Após Retífica		
Cr ₃ C ₂ - Ni Cr Plasma	550 600	6 – 9	0,4 – 0,6	< 6	35,17
Cr ₃ C ₂ - Ni Cr D-gun	750 900	6 – 8	0,4 – 0,5	< 1	> 71,35
Cr ₂ O ₃ (1) Plasma	1000 1500	7,5 – 10	0,4 – 0,5	< 2	28,0
Cr ₂ O ₃ (2) Plasma	900 1300	6 – 8	0,4 – 0,5	< 2	40,77
NiCrAlY Plasma	90 95	10 – 12	0,1 – 0,2	6 – 8	56,0
Al ₂ O ₃ -NiAl Plasma	600 900	7,5 – 10	0,4 – 0,5	6 – 8	30,58

Tabela 10 – Perda de material dos pinos e discos dos materiais testados a 550°C.

Mann e Prakash [18].

Material do Revestimento Processos de Aspersão	Densidade (g/cm ³)	Mudança de Volume (mm ³ /Nm X 10 ⁻⁷).		
		Disco	Pino	Total
Stellite	7,85	- 4,75	+ 148,40	+ 143,65
Cr ₃ C ₂ - Ni Cr / Plasma	6,20	+ 34,4	+ 58,10	+ 92,50
Cr ₃ C ₂ - NiCr / D-gun	6,30	+ 44,10	+ 83,10	+ 127,20
Cr ₂ O ₃ (1) / Plasma	4,90	- 5,67	+ 61,72	+ 56,05
Cr ₂ O ₃ (2) / Plasma	4,90	- 7,55	+ 115,14	+ 107,60
NiCrAlY / Plasma	6,80	+ 13,60	+ 125,80	+ 139,40
Nitretação	7,85	- 36,70	+ 29,67	- 7,30
Al ₂ O ₃ -NiAl / Plasma	4,5	+ 37,80	+ 214,80	+ 593,44

Segundo Mann e Prakash a camada nitretada do aço cromo-molibdênio-vanádio com dureza de 650 a 720 HV_{0,3} apresenta uma taxa de desgaste negativa e um ganho de peso após o teste de desgaste. Isso, entretanto pode ser devido à oxidação da camada nitretada ou à transferência de stellite (desgaste adesivo) para a mesma.

A taxa de desgaste do Cr₃C₂-NiCr / Plasma é menor que o Cr₃C₂-NiCr / D-gun devido a maior quantidade de porosidade o que permitia que os poros fossem preenchidos com óxidos formados durante o aquecimento e não permitissem o desgaste; resultados similares foram relatados por Smith, R.W. *et al* (1990). Ainda segundo Smith, R.W. os revestimentos aspergidos pelo processo HVOF têm qualidades similares ao processo D-gun e sua utilização está em crescimento [18].

O comportamento ao desgaste do Al₂O₃ - NiAl / Plasma foi o pior apresentado. Isto é devido principalmente a grande dureza das partículas de alumina no interior do revestimento. Essas partículas foram arrancadas para fora da matriz criando fragmentos que tanto desgastaram o disco como o pino.

O NiCrAlY / Plasma possui excelente resistência à corrosão e proteção contra o desgaste em altas temperaturas como uma boa resistência à adesão. Entretanto o estudo demonstrou que as características de desgaste são as piores dentre todos os revestimentos metálicos. A razão desta deficiência pode ser devido à baixa dureza e seu excesso de porosidade.

De acordo com recomendações de Mann e Prakash as hastes de válvulas aspergidas com Cr₃C₂-NiCr estão sendo usadas nos últimos quatro anos e têm apresentado resultados satisfatórios confirmados por testes em laboratório. A substituição do uso de stellite em hastes de válvulas como método de proteção contra o desgaste por aspersão térmica pode ser uma técnica alternativa, devido esta não produzir distorções ou empenamentos [18].

Finalmente, um artigo recente apresentado por Schneider *et al.* (2002) trata especificamente do Cr₃C₂-NiCr como revestimento das hastes de válvulas de turbina termelétricas expostas em temperatura até 600°C. Nesse trabalho foi utilizado o Cr₃C₂-NiCr aspergido pelo processo HVOF sobre um substrato DIN X22CrMoV 12-1 sendo realizado um ensaio de desgaste sob condições de aquecimento nas seguintes faixas de temperaturas: 25, 200, 400 e 600°C.

Em relação à dureza das amostras ocorre aumento conforme acréscimo da temperatura até 600°C, segundo Schneider, P. esse aumento se dá pela oxidação comprovada acima de 450°C. Outros autores ainda levantam a hipótese deste aumento ser devido a formação de uma fase gama – γ' da matriz NiCr [30].

Devido a maior pressão na câmara de combustão e aos aspectos construtivos da pistola Top Gun K (terceira geração) em relação a Jet Kote II (segunda geração) esta apresenta uma maior velocidade de projeção das partículas durante a aspersão. As maiores velocidades e temperaturas desenvolvidas com esta geração de pistolas trazem a possibilidade de aplicação de revestimentos com maior dureza e resistência ao desgaste – Figura 23.

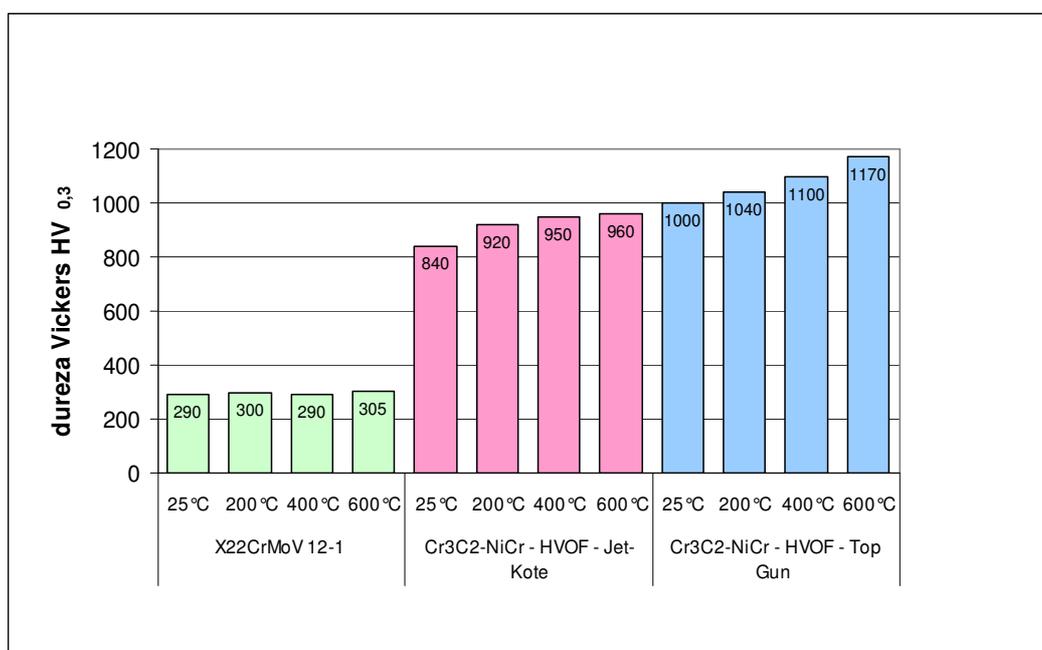


Figura 23 – Dureza Vickers HV_{0,3} dos anéis de desgaste. Schneider *et. al* [30].

Segundo Schneider *et. al* a Figura 24 mostra o resultado dos testes de desgaste a quente de um bloco revestido com stellite 6 contra um grupo de anéis de X22CrMoV 12.1 sem revestimento e dois grupos revestidos com Cr₃C₂-NiCr pelo processo HVOF diferenciando o tipo de pistolas – Jet Kote II e Top Gun.

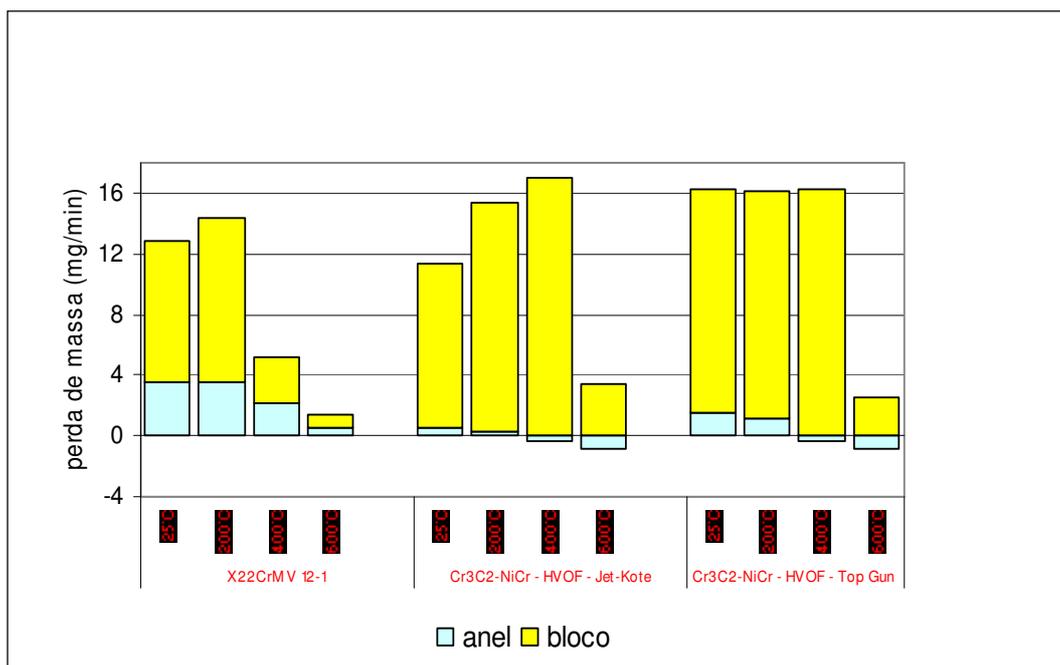


Figura 24 – Perda de massa de anéis e blocos (stellit) do teste de desgaste em diferentes temperaturas. Schneider *et. al* [30].

A maior perda de massa ou maior taxa de desgaste dos anéis testados (em azul) ocorreu naquele sem revestimento. Nos anéis revestidos com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ aplicados com pistolas Jet-Kote II e Top-Gun K, a taxa de desgaste do bloco aumenta até 400°C a partir desta temperatura pode-se perceber claramente um decréscimo da taxa de desgaste tanto do bloco quanto dos anéis, na realidade os anéis chegam a ganhar um pouco de massa o que ocorre devido a uma transferência de material do bloco para o anel.

Segundo Schneider *et. al* a vantagem da aspersão térmica como revestimento de hastes em relação à soldagem com stellit 6 (liga a base de cobalto) é o menor coeficiente de atrito. O coeficiente de atrito (μ) de metais com metais é em torno de 0,46 a 0,56 como no caso das hastes revestidas com stellit, já na aspersão térmica pelo processo HVOF utilizando-se pistolas Jet Kote II e Top Gun K são respectivamente 0,33 e 0,38. Quanto menor o coeficiente de atrito menor será a taxa de desgaste e conseqüente menor a perda de massa. Acima de 400°C o coeficiente de atrito começa a diminuir uma vez que começa a formar tanto no bloco como nos anéis uma camada óxida o que leva a um decréscimo das taxas de desgaste [30].

3 CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo principal testar corpos de prova em condições operacionais o mais próximo possível das hastes de turbinas termelétricas a eficiência de revestimentos aplicados por nitretação a plasma e aspersão térmica pelo processo HVOF de forma a reproduzir os mecanismos de danos (desgaste por *fretting* e oxidação) na superfície dos mesmos.

Uma haste de válvula original foi caracterizada em função da sua composição química, tratamentos térmicos e termoquímicos e a dureza da matriz e da superfície, na seqüência foram confeccionados corpos de provas de aço liga X20CrMoV 12.1 temperados e revenidos. Sobre as superfícies dos corpos de prova foram aplicados revestimentos de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ por HVOF e nitretação a plasma.

Um grupo de corpos de prova fora submetidos a um tratamento térmico de recozimento a 540°C durante 100 horas que simulou a temperatura de operação do vapor superaquecido. No ensaio de desgaste – Pino Sobre Disco (ASTM G99-95) – foi testado comparativamente os revestimentos aspergidos com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ por HVOF (como aspergidos e com aquecimento) e revestimentos nitretados a plasma sendo esta a condição original das hastes.

Para a análise dos revestimentos aspergidos com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ pelo processo HVOF, utilizou-se ensaios de dureza (DIN 50133), resistência de aderência do revestimento ao substrato (ASTM 633-79). As análises microestruturais por microscopia óptica possibilitaram as análises da interface substrato revestimento determinação do nível de porosidade e teor de óxidos.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA HASTE ORIGINAL

A partir de uma amostra seccionada da haste de válvula parcializadora da Unidade 6 – UTLB – com 20.000 horas de operação foram determinados a composição química (espectrometria de absorção atômica), análises metalográficas da matriz e da superfície e as suas respectivas durezas.

3.2 CORPOS DE PROVA – ENSAIOS DE DESGASTE, ADERÊNCIA E METALOGRAFIA

Foram aspergidos corpos de prova para os ensaios de desgaste, aderência e metalografia, tendo sido utilizado como substrato um aço inoxidável martensítico similar ao das hastes de turbinas, ou seja, DIN X20CrMoV 12-1 temperado e revenido, de modo que se reproduzisse o mais próximo possível as condições originais das hastes. A Tabela 11 mostra o resultado da análise química desse material de base, realizada na USIPE – Fundação e Usinagem, Içara – SC, espectrômetro marca SPECTROCAST.

Tabela 11 – Composição química do aço DIN X20CrMoV 12-1 utilizado para confecção dos substratos.

C = 0,25%	Mn = 0,72%	Si = 0,31%
Cr = 11,60%	Ni = 0,71%	P = 0,03%
S = 0,003%	Mo = 0,95%	V = 0,27%
Fe = 85,03%		

A Tabela 12 apresenta a identificação e quantidade dos corpos de prova utilizados nesta dissertação. A Figura 25 mostra os tipos de corpos de prova, suas dimensões estão expostas no Apêndice 01.

Para as análises microestruturais e determinação da microdureza Vickers dos corpos de prova temperado – revenido, nitretado a plasma e dos aspergidos com Cr₃C₂-NiCr foram confeccionadas 4 (quatro) barras retangulares. Para os ensaios de desgaste foram confeccionados 9 (nove) corpos de prova dos quais 6 (seis) aspergidos e 3 (três) nitretados a plasma. As dimensões dos corpos de prova foram determinadas para que o peso dos corpos de prova não ultrapassassem 200g (eficiência da balança). Para o teste de aderência foram aspergidas 8 (oito) amostras de acordo com a norma ASTM C-367- 79.

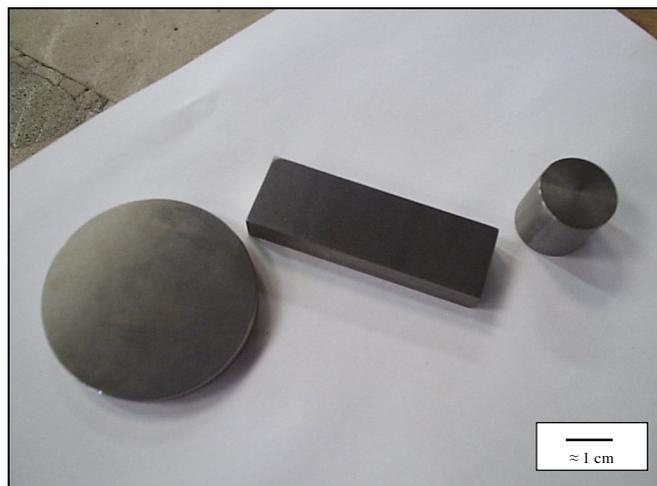


Figura 25 – Corpos de prova para os ensaios de desgaste, adesão e metalografia.

Tabela 12 – Identificação e quantidade de corpos de prova para ensaios de metalografia, dureza, desgaste e aderência.

Identificação dos Corpos de Prova	Estado de Fornecimento	Ensaio
01	Temperado – Revenido	Metalografia – Microdureza
02	Temperado – Revenido – Nitretado	Metalografia – Microdureza
03	Temperado – Revenido – Aspergido	Metalografia – Microdureza
04	Temperado – Revenido – Aspergido – Ciclado	Metalografia – Microdureza
05	Normalizado	Metalografia – Microdureza
06	Nitretado	Desgaste
07	Nitretado	Desgaste
08	Nitretado	Desgaste
09	Temperado – Revenido – Aspergido	Desgaste
10	Temperado – Revenido – Aspergido	Desgaste
11	Temperado – Revenido – Aspergido	Desgaste
12	Temperado – Revenido – Aspergido – Aquecido	Desgaste
13	Temperado – Revenido – Aspergido – Aquecido	Desgaste
14	Temperado – Revenido – Aspergido – Aquecido	Desgaste
15	Temperado – Revenido – Aspergido	Adesão
16	Temperado – Revenido – Aspergido – Aquecido	Adesão

3.3 ASPERSÃO TÉRMICA

As aspersões térmicas foram realizadas na Revesteel Revestimentos Ltda., localizada na cidade de Pinhais – PR e na Rijeza Metalurgia Ltda. na cidade de São Leopoldo – RS. Na Revesteel foram aspergidos os corpos de prova para ensaios de desgaste, metalografia e aderência. Na Rijeza somente foram aspergidos corpos de prova para ensaio de aderência a escolha por esta empresa se deu devido a necessidade do controle da espessura da camada depositada, neste caso a pistola de aspersão fora controlada por CNC.

Tendo em vista as condições operacionais a que estariam submetidas as hastes foi solicitado às equipes envolvidas durante a aspersão maior atenção nas etapas preparação da superfície e aspersão dos corpos de prova destinados a uma avaliação criteriosa da aspersão como método de proteção contra o desgaste.

3.3.1 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE

Os corpos de prova foram jateados com óxido de alumínio (Al_2O_3) granulometria 36 em uma cabine como mostra a Figura 26, conferindo ao substrato uma rugosidade (R_a) de $9,5\mu m$ (R_y $78,9\mu m$) de acordo com medição efetuada com rugosímetro digital SJ-20P – Mitutoyo. Foi utilizado um equipamento de jateamento por sucção em torno de $7,5\text{ kg/cm}^2$ ($\approx 0,75\text{ MPa}$) a uma distância entre o corpo de prova e a pistola de jateamento de aproximadamente 250,00 mm.



Figura 26 – Jateamento com abrasivo óxido de alumínio em cabine de jateamento manual.

3.3.2 HVOF – PARÂMETROS E EQUIPAMENTOS

A seleção do processo para a realização da aspersão térmica orientou-se pela necessidade de se produzir revestimentos que atendessem as exigências operacionais a que estariam submetidas as hastes, ou seja, condições de desgaste e corrosão à alta temperatura. De acordo com a revisão bibliográfica o processo de aspersão óxi-combustível de alta velocidade, conhecido como HVOF, tem atualmente papel relevante, em particular na aplicação de cermets resistentes ao desgaste: os revestimentos produzidos por este processo apresentam maior dureza, densidade, aderência ao substrato.

Os corpos de prova para os ensaios de desgaste, aderência, dureza e exame metalográfico foram fixados na castanha de um torno, conforme mostra a Figura 27a. Desta forma foi possível girar a castanha manualmente posicionando os corpos de prova para aspersão. A forma manual de aspersão não possibilitou a reprodução das mesmas espessuras nos corpos de prova para o ensaio de aderência; as camadas variaram de 270 a 350 μm segundo medidor de espessura ultrassônico.

Foi utilizada uma pistola para aspersão HVOF do tipo DJ (*diamond jet*) – DJ 2600, fabricante Sulzer Metco – Figura 27b. Esta pistola é designada para operações manuais de aspersão possibilitando ao operador a aspersão nas mais variadas posições. Acoplado a mesma, existe um comando para variar a taxa de alimentação de material na própria pistola bem como uma chave de início e ou final da aspersão. Finalmente ela é equipada com um dispositivo de segurança para o controle de fechamento rápido dos fluxos de combustível e oxigênio possibilitando uma operação segura .

Os parâmetros de aspersão expressos na Tabela 13 foram determinados segundo informações do catálogo da Sulzer Metco – *The Coatings Company* e da engenharias de processo da Revesteel Metalização e Rizeja Metalurgia em função do tipo da pistola (DJ 2600) e do pó ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$) utilizados.

O equipamento DJP (*powder feeder*), conforme mostra a Figura 28, é empregado para operar no processo HVOF utilizando-se a pistola do grupo DJ, este também fabricado pela Sulzer Metco, *The Coatings Company*, tem como finalidade o controle da taxa de alimentação do pó durante a aspersão, este equipamento mede com precisão a perda de

massa durante a aspersão e continuamente um dispositivo de controle automático de uma tremonha para a reposição de material de adição.

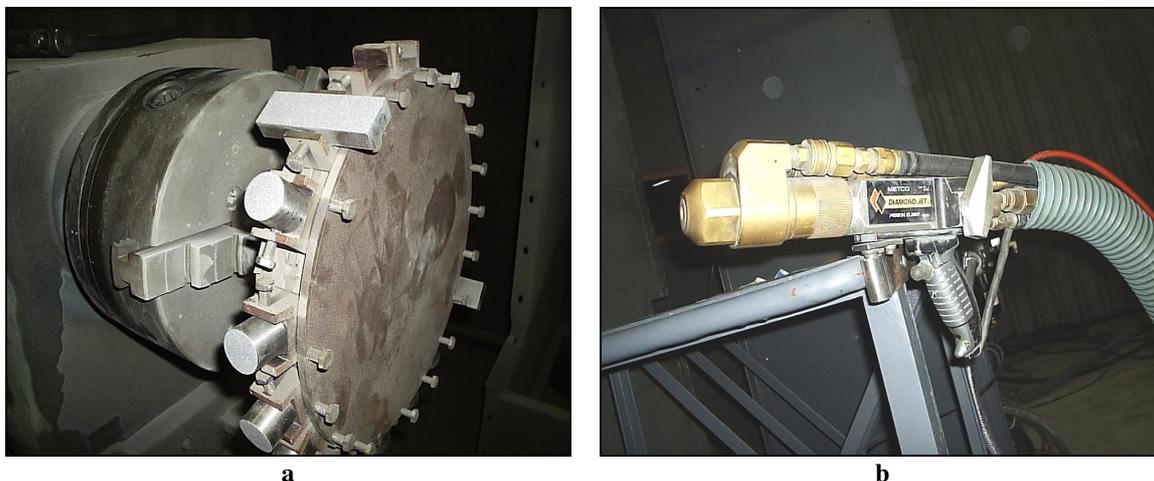


Figura 27 – Equipamentos e dispositivos utilizados durante a aspersão térmica.

a – sistema de fixação dos corpos de prova.

b – pistola Metco Perkin Elmer – *Diamond Jet* – DJF 2600.

Tabela 13 – Parâmetros de aspersão dos corpos de prova para sistema HVOF – DJ 2600, Sulzer Metco, *The Coatings Company* – Revesteel Metalização Ltda.

<u>Fluxo</u>	<i>Propano (l/min.)</i>	68
	O ₂ (l/min.)	240
	Ar (l/min)	375
<u>Pressão</u>	Propano (bar)	6,2
	O ₂ (bar)	10,3
	Ar (bar)	6,9
<u>Taxa de Deposição</u>	g/min.	53
<u>Leitura no Fluxômetro</u>	Propano (FMR)	30
	O ₂ (FMR)	30
	Ar (FMR)	48
<u>Alimentação de Pó</u>	Fluxo de N ₂ (m ³ /h)	12,5
	Fluxo de N ₂ (FMR)	55
	Ar de Vibração (bar)	1,4
<u>Distância de Aspersão</u>	(mm)	250



Figura 28 – Sistema de controle do processo de aspersão.

3.3.3 PÓ PARA ASPERSÃO

Tendo em vista as principais causas de deterioração das hastes de válvulas:

- O desgaste por *fretting* causado pelo contato entre os selos metálicos e a haste em torno de 540°C;
- A oxidação em ambiente de vapor d'água em que está exposta a região da haste acima do sistema de selagem, em uma temperatura da ordem de 200°C.

O material selecionado para aspersão térmica HVOF, que combina excelente resistência a corrosão e desgaste a quente foi o $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$. A escolha deste tipo de pó levou em conta recomendações recentes da literatura, consultas a especialistas, bem como catálogos e informações técnicas das empresas de aspersão (Revesteel Metalização Ltda. e Rijeza Metalurgia Ltda.).

Foi utilizado o material comercialmente denominado Diamalloy 3007, fabricante Sulzer Metco, *The Coatings Company*, que consiste de carbeto de cromo em matriz níquel cromo, com tamanho de partículas entre $-45 + 5,5\mu\text{m}$, granulometria adequada ao sistema HVOF tipo DJ empregado.

São as seguintes a composição química do pó $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ e as propriedades típicas da camada pelo processo HVOF, de acordo com o fabricante [37]:

Composição Química

- Níquel (Ni) – 16 – 18,5%
- Carbono (C) – 10 – 11,5%
- Oxigênio (O) – máx. 0,6%
- Cromo (Cr) – Restante

**Propriedades da
Camada**

- Microdureza – 950 – 1150 HV_{0,3}
- Rugosidade Ra – 2,0 a 4,7 μm (após aspensão)
- Porosidade – menor que 3,0%
- Resistência à adesão – em torno de 70 MPa
- Eficiência de deposição – 45 – 65 %

As Figuras 29 retratam o momento em que os corpos de prova foram aspergidos pelo processo HVOF com pistola DJ 2600.



Figura 29 – Aspensão térmica HVOF dos corpos de prova.

a – Pistola Metco Perkin Elmer – DJ 2600.

b – operação de aspensão dos corpos de prova.

3.4 TRATAMENTO TÉRMICO – SIMULAÇÃO DE SERVIÇO A 540°C

Para análise da influência da temperatura sobre a camada aspergida, os corpos de prova revestidos pelo processo HVOF foram aquecidos a 540°C por 100 horas em um forno mufla, simulando a exposição das hastes à temperatura do vapor (SH) superaquecido.

Os corpos de prova para os ensaios de desgaste, metalografia e aderência foram colocados dentro do forno a temperatura ambiente e em seguida o forno foi programado para que a temperatura na ultrapassasse 540°C. Após 100 horas o forno foi desligado e os corpos de prova esfriados em seu interior.

3.5 ANÁLISE DA CAMADA ASPERGIDA COM Cr₃C₂-NiCr – HVOF

3.5.1 MICRODUREZA

Após os procedimentos de lixamento e polimento dos corpos de prova a dureza dos revestimentos foi determinada por intermédio de ensaios de microdureza Vickers. O equipamento utilizado foi um microdurômetro – HMV – Micro Hardness Tester – Shimadzu. Segundo norma DIN 50133 utilizou-se uma pirâmide de diamante como penetrador e carga de 2,94N (HV_{0,3}) e um tempo de penetração (carga) de 15 segundos. Foram realizadas 20 medições ao longo da seção longitudinal dos revestimentos aspergidos em 5 regiões diferentes a fim de se determinar com maior precisão possível a distribuição das durezas dos corpos com e sem ciclagem térmica.

3.5.2 METALOGRAFIA

A preparação de corpos de prova para análise do revestimento é uma etapa muito importante para a observação da microestrutura do revestimento bem como dos possíveis defeitos que podem ser encontrados. Esta análise possibilita observar e medir a espessura da camada aspergida, determinar níveis de porosidade e óxidos formados durante a aspersão e finalmente a observação da interface entre o revestimento e o substrato.

Nas etapas de preparação dos corpos de prova deve-se tomar muito cuidado para que durante a preparação não se produzam defeitos nas camadas que não sejam verdadeiros,

mas defeitos fabricados durante as etapas de: seccionamento, lixamento ou polimento, enfim defeitos originados durante a preparação metalográfica.

Os corpos de prova foram seccionados transversalmente em um cortadora mecânica (cutt-off) tomando-se muito cuidado nos seguintes pontos:

- Direção do corte – do revestimento ao substrato;
- Pequena aplicação da pressão de corte a fim de não se produzir trincas ou deslocamento do revestimento.

Foi utilizado um disco de corte de 7” de diâmetro, fabricante Metalprisma tipo MPR III indicado para durezas acima de 55 HRC, as amostras seccionadas foram refrigeradas com um fluido de corte e refrigeração durante esta etapa.

Em seguida os corpos de prova foram embutidos a frio para preparação metalográfica e análise da camada em microscópio óptico – MO.

As amostras foram preparadas manualmente utilizando-se uma politriz mecânica modelo APL – 4 fabricante AROTEC, alta rotação. Para as operações de lixamento foram utilizados lixas de papel (SiC) fabricante Metalprisma com granulometrias 120, 220, 320, 400, 600, 800, 1200.

Finalmente a operação de polimento foi efetuada na mesma politriz alternando-se o disco do metal base adaptado para operações de polimento com o pano modelo Metalplan, fabricante Metalprisma sendo utilizado como produto para polimento pasta de alumina N°4. Não houve controle da pressão exercida e o tempo de lixamento e polimento durante as etapas da preparação metalográfica. O exame se deu em um microscópio reflexivo BX60M com câmera digital acoplada.

Foram encaminhados a Universidade Federal das Forças Armadas, Universität der Bundeswehr Hamburg – Alemanha – os seguintes corpos de prova e amostras:

- 2 corpos de prova aspergidos com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-CrNi}$ com e sem aquecimento embutidos e preparados na UFSC para análise metalográfica;
- 2 amostras aspergidas com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-CrNi}$ com e sem aquecimento para seccionamento preparação metalográfica e análise naquela Universidade.

Os procedimentos e materiais utilizados na preparação metalográfica dos corpos de prova adotados na Universität der Bundeswehr Hamburg foram os seguintes:

- Lixamento fino com base metálica (MD Piano – Struers), granulometria 220, força aplicada de 33N – tempo de 2 minutos;
- Pano de polimento diamantado com base metálica (MD Largo – Struers), granulometria 9 μ m, força aplicada de 50N – tempo de 3 minutos;
- Pano de polimento diamantado com base metálica (MD Dac – Struers), granulometria 3 μ m, força aplicada de 50 N – tempo de 3 minutos;
- Pano de polimento com base metálica (MD Rondo – Struers) juntamente com injeção de uma solução de alumina (ALONE AP-A – Struers) suspensão 1 μ m, força aplicada 50 N – tempo de 1 minuto.

Para a preparação de amostras revestidas com o carbeto de cromo o objetivo principal da preparação metalográfica consiste em se obter uma superfície plana com o mínimo de deformações, utilizando-se lixas e panos de polimento com base metálica em um tempo quanto mais rápido possível. O primeiro passo consiste em um lixamento plano, garantindo assim que as superfícies das amostras sejam similares. As lixas do Sistema MD (Struers) reduzem as etapas de preparação da superfície em apenas duas etapas assim reduzindo o tempo de preparação. As lixas e panos adiamantados estão disponíveis para o lixamento plano de cerâmicos e sinterizados. O pano adiamantado pode ser utilizado para o lixamento plano de metais muito duros e ligas ferrosas.

Para remover deformações originadas durante a etapa de lixamento fino e obter uma superfície altamente refletora a amostra deve ser polida antes de ser examinada no microscópio. O polimento é realizado em panos com diferentes resistências e abrasivos, dois processos estão disponíveis: polimento adiamantado e polimento com óxido.

A preparação de amostras geralmente se inicia pelo lixamento fino, este deve remover a deformação realizada pelo corte (seccionamento) e produzir uma superfície pronta para polimento na seqüência do polimento, o abrasivo é aplicado durante processo ou utiliza-se um pano adiamantado conforme granulometria desejada.

3.5.3 ENSAIO DE ADERÊNCIA

Para o ensaio de aderência foram aspergidos oito corpos de prova e confeccionado um dispositivo para permitir a montagem entre o corpo de prova aspergido e um contra corpo durante ensaio de tração – Apêndice 03.

O ensaio de aderência do revestimento ao substrato foi medido de acordo com a norma ASTM C633 – 79 (*adhesion or cohesive strength of flame-sprayed coatings*). Para esse ensaio o corpo de prova é um cilindro de aço (DIN X20CrMoV 12-1) com diâmetro de 25,00mm onde foi aspergido o material (Cr_3C_2-NiCr) que se deseja avaliar a aderência.

O ensaio de adesão/coesão do revestimento prevê a junção de um corpo de prova a um contra corpo de mesmas dimensões por intermédio de um adesivo. Após a cura do adesivo o conjunto montado é tracionado até que ocorra a separação. No ensaio de adesão, o modo de fratura do revestimento teste pode ser *adesivo* (quando ocorre na interface do revestimento com o substrato) ou *coesivo* (quando ocorre dentro do revestimento). Se a fratura ocorrer no interior do adesivo ou no interface adesivo-revestimento utilizado no teste, o referido teste não mostra com exatidão a aderência do revestimento ao substrato.

A resistência à adesão é obtida pela carga de ruptura do ensaio dividida pela área A ($490,62 \text{ mm}^2$) da seção transversal do corpo de prova – Figura 30.

Para a união do corpo de prova aspergido ao contra corpo utilizou-se o produto “*HTK ultra bond 100*”, resina epóxi de alta resistência adequada à determinação da aderência por ensaio de tração de revestimentos aspergidos. Primeiramente as faces a serem coladas foram limpas com acetona afim de remoção de possíveis óleos e poeiras e uma fina camada de resina é aplicada sobre as duas faces. Em seguida com o auxílio de dispositivo de prensagem – Apêndice 02 – corpo de prova e contra corpo são acoplados e levados a um forno mufla à temperatura de 160°C durante 80 minutos. A pressão nos corpos de prova pelo dispositivo de prensagem é mantida após sua retirada do forno e resfriamento até temperatura ambiente.

No ensaio de tração para avaliar a aderência do revestimento é preciso manter perfeito o alinhamento, sendo para tanto o conjunto do corpo de prova aspergido e contra corpo fixado a um dispositivo especialmente construído, conforme mostra a Figura 31a.

De acordo com a norma ASTM C633-79 a máquina de ensaio de tração foi acionada a uma velocidade de avanço de 0,02 mm/s até a separação entre o corpo e o contra corpo.

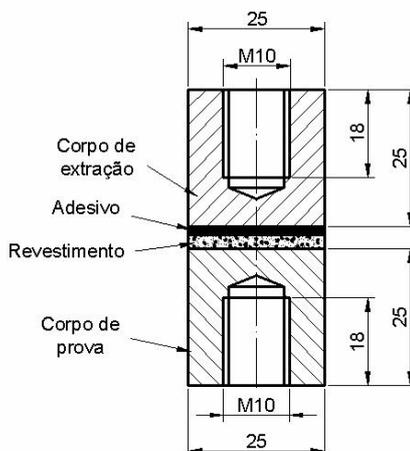


Figura 30 – Esquema de colagem do contra corpo ao corpo de prova aspergido (revestimento) com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – HVOF.

Os testes foram realizados no Centro de Tecnologia em Cerâmica (CTC) no SENAI de Criciúma em uma máquina de ensaio universal, fabricante EMIC, modelo DL60000 conforme mostra a Figura 31b.

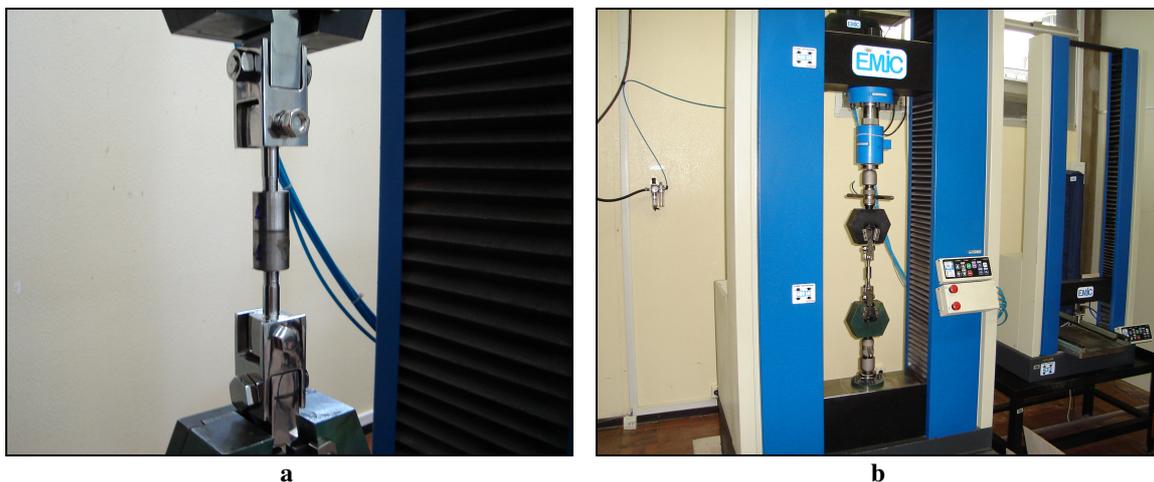


Figura 31 – Ensaio de Aderência .

a – Dispositivo utilizado para a fixação dos corpos de prova junto a máquina.

b – Máquina de ensaios universais EMIC – modelo DL 3000.

3.5.4 ENSAIO DE DESGASTE

A resistência ao desgaste dos materiais é geralmente obtida através da realização de ensaios de desgaste num equipamento de laboratório chamado tribômetro. Um dos ensaios padrão de laboratório que simula as condições severas de desgaste em componentes mecânicos é o ensaio de “pino sobre disco”, de acordo com a norma ASTM G99-95. Neste equipamento, o ensaio é realizado com uma distância total de deslizamento constante, um determinado valor de carga normal sobre o pino, uma velocidade de deslizamento constante e condições de temperatura e umidade controladas.

Um dos objetivos deste trabalho foi estudar as taxas de desgaste por deslizamento de revestimentos nitretados e aspergidos com e sem ciclagem térmica sobre um aço DIN X20CrMoV 12-1 sendo adotado como forma de ensaio o sistema “pino sobre disco”.

Os ensaios foram realizados na FITEJ – Fundação Instituto Tecnológico de Joinville em uma máquina de ensaio pino sobre disco (Tribômetro) conforme Figura 32.

Após a operação de aspersão térmica os corpos de prova foram retificados a fim de produzir uma rugosidade adequada para o ensaio de desgaste pino sobre disco. A rugosidade medida foi determinada por meio de um rugosímetro digital SJ-20P – Mitutoyo. A medição de dureza superficial dos corpos de prova foi executada com um microdurômetro digital com penetrador de diamante, carga de 500 gramas, marca Mitutoyo.



Figura 32 – Tribômetro pino sobre disco da FITEJ de Joinville.

Os discos de aço DIN X20CrMoV 12-1 com diferentes tratamentos superficiais – nitretado, aspergido com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ com e sem aquecimento, foram testados contra um pino cuja ponta é uma esfera de zircônia diâmetro 9,75 mm, microdureza Vickers 1500 $\text{HV}_{0,5}$ a uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s (399 rpm) com uma carga normal no pino de 30N dentro de uma câmara fechada com sílica gel usada para remover a umidade do ar.

Os corpos de prova foram limpos com acetona a fim de eliminar quaisquer vestígios de sujeira ou oxidação. E em seguida, pino e disco foram pesados em uma balança analítica com resolução de 0,1 mg para a determinação de sua massa inicial antes do ensaio.

A distância total percorrida no ensaio para cada disco foi de 2400 metros sendo que a cada intervalo de 200 metros o ensaio era interrompido e realizava-se a medida de temperatura e da umidade relativa do ar através do Termo Higrômetro - Marca Incoterm – POA – RS , em seguida os corpos de prova eram retirados do dispositivo de fixação realizando-se a medição da perda de massa do disco e do pino de esfera de zircônia através da balança analítica.

Foi utilizada uma balança analítica com precisão máxima a 200 gramas, marca KERN 870 para a determinação da perda de massa. Os detalhes da posição do corpo de prova, carga e pino de zircônia podem ser observados na Figura 33.

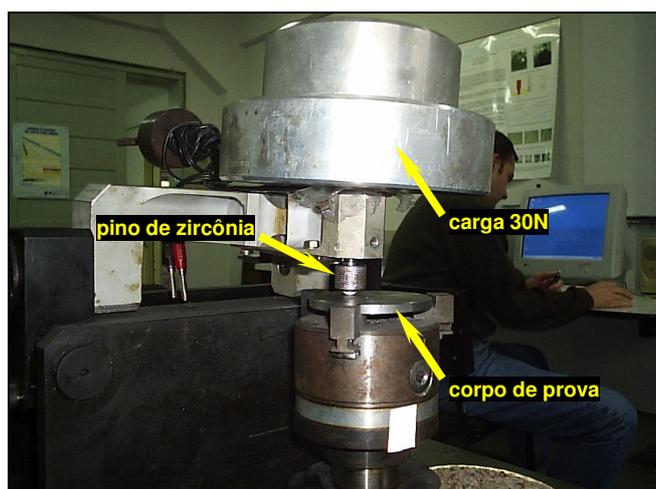


Figura 33 – Detalhe da carga de 30N sobre o corpo de prova para o ensaio de desgaste.

O desgaste pode ser descrito como a perda progressiva de material de um corpo sólido causada por ação mecânica. O ensaio de desgaste pino sobre disco propõe a determinação do valor da perda de massa ou volume ao longo de uma distância percorrida entre o corpo de prova sob diferentes características superficiais e um pino com ponta de zircônia com uma carga de 30N.

Os resultados experimentais dos ensaios de desgaste realizados em laboratório foram determinados através da equação de Archard (equação 1) que avalia a taxa de desgaste e o coeficiente de desgaste (equação 2), relacionando o volume perdido acumulado por unidade de deslizamento.

A equação de Archard é o ponto de partida natural para se iniciar os cálculos das taxas de desgaste dos corpos de prova com diferentes tratamentos superficiais. Essa equação também relaciona o desgaste com o carregamento e a dureza da superfície do material, por meio do coeficiente de desgaste **k**, onde quanto maior for o **k** menor será a resistência ao desgaste [21, 32, 39].

$$Q = V / S = k (F_N / H) \text{ (mm}^3\text{/m)(1)}$$

$$k = (Q \times H) / (F_N \times 1000) \text{ (mm}^3\text{/m x N).....(2)}$$

onde **Q** é o parâmetro que mede a taxa de desgaste ou a taxa de desgaste (volume perdido acumulado) **V** por distância percorrida deslizamento **S**. **F_N** é a carga normal aplicada, **H** é a dureza do material mais mole, no nosso caso a dureza do corpo de prova e **k** é o coeficiente de desgaste .

A constante **k** é largamente aplicado para comparar a resistência ao desgaste dos materiais, o cálculo das perdas individuais de massa individual dos corpos de prova com diferentes condições superficiais é apresentados no Apêndice 04. Em geral a resistência ao desgaste é definida como **1/k**. O volume perdido acumulado (equação 3) é obtido por:

$$V = m / \rho \text{(3)}$$

onde **m** é a massa perdida do corpo de prova e **ρ** é a densidade do material desgastado.

O coeficiente de desgaste k é de importância fundamental para a comparação dos processos de desgaste em diferentes sistemas. Portanto a equação de Archard fornece importantes parâmetros que descrevem o desgaste através do coeficiente k .

Foi utilizado microscópio para identificar os principais mecanismos de desgaste atuantes. As micrografias das pistas de desgastes de alguns corpos de prova foram analisadas por intermédio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca CARL ZEISS modelo 940 para a análise dos principais mecanismos de desgastes ocorridos no ensaio de desgaste pino sobre disco.

4 CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS HASTES ORIGINAIS

De acordo com a análise química (espectrometria de absorção atômica) realizada na USIPE Fundição e Usinagem Ltda. a haste da válvula parcializadora da unidade 6 – UTLB é um aço inoxidável martensítico DIN X20CrMoV 12-1 apresentando a composição de acordo com a Tabela 14. Este material é indicado para aplicações em altas temperaturas, principalmente em componentes de turbina e geradores, a composição química deste material estipulada pela norma é mostrada na Tabela 15.

Tabela 14 – Composição química da haste da válvula parcializadora – Unidade 6 – UTLB. 20.000 horas de operação.

C = 0,22%	Mn = 1,03%	Si = 0,48%
Cr = 11,52%	Ni = 0,49%	P = 0,02%
S = 0,02%	Mo = 1,09%	V = 0,36%
Fe = restante		

Tabela 15 – Composição química (% em peso) DIN X20CrMoV 12-1 Material Number 1.4926. (Stahlschluessel – 2001).

C = 0,20 – 0,26%	Mn = 0,30 – 0,80%	Si = máx. 0,50%
Cr = 11,00 – 12,50%	Ni = 0,30 – 0,80%	P = máx. 0,025%
S = máx. 0,025%	Mo = 0,80 – 1,20%	V = 0,25 – 0,35%
Fe = Restante		

As análises metalográfica das Figuras 34 mostram que a haste possui uma estrutura martensítica confirmando que a mesma foi temperada, revenida e posteriormente recebeu um tratamento termoquímico de nitretação. Essas Figuras mostram a metalografia de uma amostra da válvula parcializadora da UTLB retirada de operação após um período de aproximadamente 20.000 horas. São identificadas uma região com remoção total da camada nitretada e uma região onde se encontra a camada original parcialmente preservada.

A medição de dureza tanto da matriz como da camada nitretada foi determinada por ensaio de microdureza Vickers HV_{0,2} – carga de 1,961N sendo encontrado um valor médio

na matriz de 280 HV_{0,2} e na superfície 1050 HV_{0,2}. A diferença nos valores de dureza entre a matriz e a superfície é visualizada nas Figuras 34a e 34b.

A Figura 34a mostra uma região da haste apresentando remoção total da camada nitretada. Já na Figura 34b pode-se perceber que a estrutura do núcleo é diferente da superfície, evidenciando a presença de uma região com a camada nitretada parcialmente íntegra onde houve um leve desgaste, esta camada apresenta uma espessura de aproximadamente 70µm.

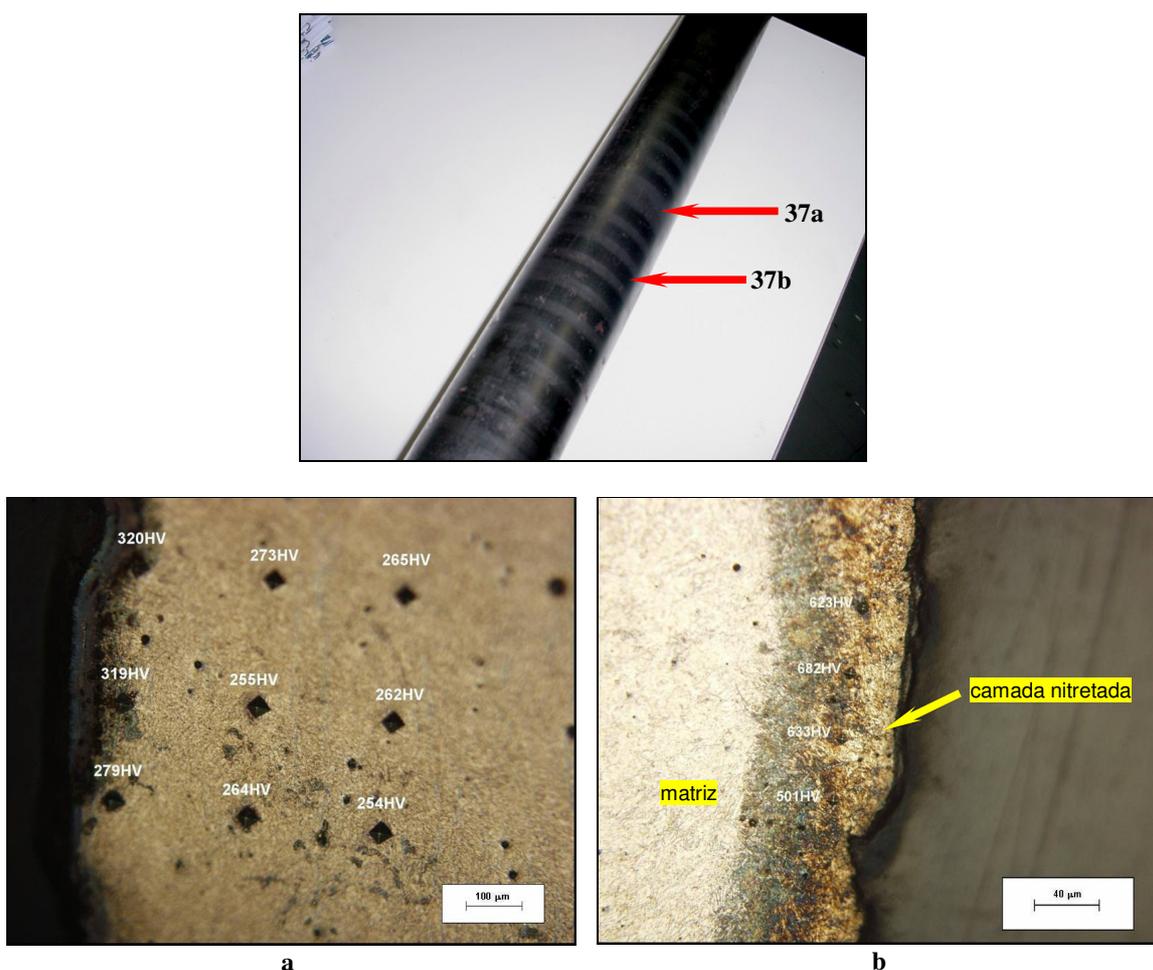


Figura 34 – Haste de válvula parcializadora UTLB – 20.000 horas de operação.

a – Desgaste da camada nitretada (matriz martensítica).

b – Aspecto da camada nitretada. Ataque – (HCl + H₂O + H₂O₂).

4.2 TRATAMENTOS TÉRMICO E TERMOQUÍMICO (NITRETAÇÃO A PLASMA)

Os tratamentos térmicos de têmpera e revenido e o tratamento termoquímico de nitretação a plasma foram realizados na Brasimet – Divisão de Tratamentos Térmicos – Unidade de Santo Amaro – SP. A Figura 35 mostra a estrutura metalográfica do aço DIN X20CrMoV 12-1 em seu estado de fornecimento.

De acordo com a caracterização das hastes originais foi solicitado à Brasimet que a dureza após tratamento térmico de têmpera e revenido ficasse em torno de 280 HV_{0,2} (≈27 HRc). A microestrutura do aço X20CrMoV 12-1 após tratamento térmico pode ser visualizada na Figura 36.

Foram nitretados a plasma três corpos de prova para ensaio de desgaste e temperados e revenidos quatro barras retangulares para aspensão com Cr₃C₂-NiCr. A microestrutura da amostra nitretada a plasma pode ser observada na Figura 37: a espessura e a microdureza da camada nitretada mostraram respectivamente valores em torno de 30 μm e 1027 HV_{0,3}.

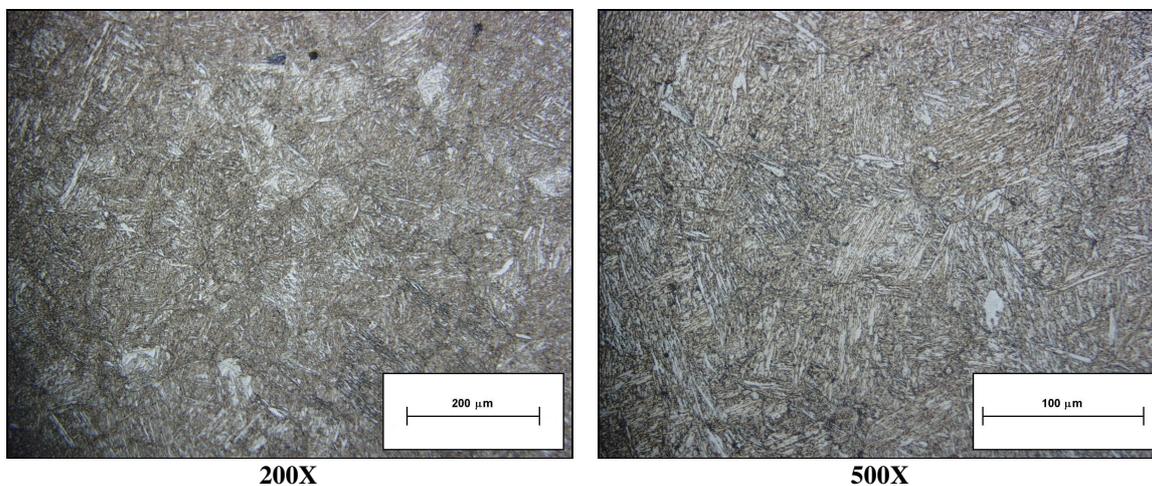
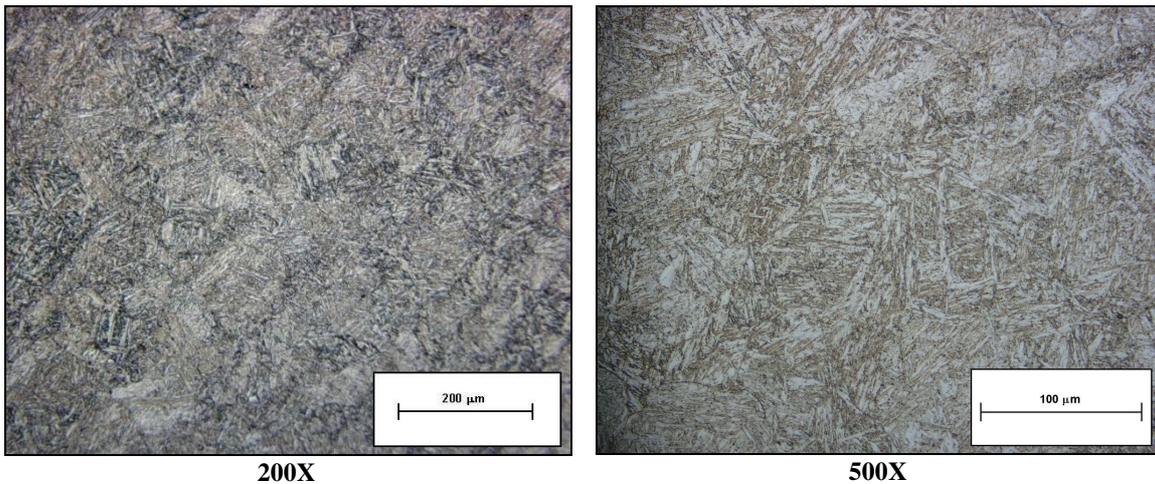
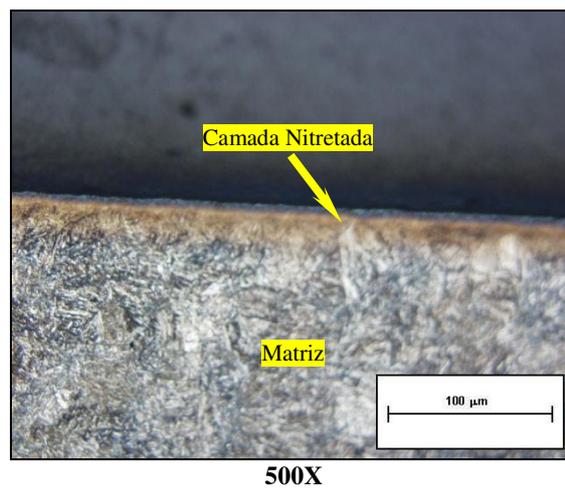


Figura 35 – Micrografia de um aço inoxidável DIN X20CrMoV 12-1 – em seu estado de fornecimento. Ataque PICRAL.



200X **500X**
Figura 36 – Micrografia de um aço inoxidável DIN X20CrMoV 12-1 – após têmpera e revenido. Martensita revenida com dureza de 280 HV_{0,2}. Ataque PICRAL.



500X
Figura 37 – Micrografia do aço inoxidável DIN X20CrMoV 12-1 temperado, revenido e nitretado a plasma. Ataque (HCl + H₂O + H₂O₂).

4.3 ANÁLISE DA CAMADA DE Cr₃C₂-NiCr ASPERGIDA PELO POR HVOF

4.3.1 MICRODUREZA

Os resultados de microdureza das camadas de Cr₃C₂-NiCr como aspergida e após aquecimento a 540°C estão expressas na Tabela 16. Os valores de dureza se apresentaram compatíveis com as literaturas consultadas e dentro da faixa na região inferior de acordo com a especificação do fabricante Sulzer Metco – *The Coatings Company* – (950 a 1150 HV_{0,3}). Os valores encontrados foram menores que os da camada nitretada das hastes de válvulas originais, em torno de 1050 HV_{0,2}. A ciclagem térmica a que foram submetidos os corpos de prova não modificou a dureza. A baixa dispersão encontrada (< 10%) mostrou uma distribuição de fases homogênea, consequência de parâmetros bem determinados e baixo nível de porosidade. A variação de alguns parâmetros de aspersão como: fluxo de combustível ou oxigênio e a utilização de pós com carbetos mais finos na matriz podem contribuir para o aumento da dureza dos revestimentos aspergidos por HVOF. Ainda pode-se levar em consideração a possibilidade do aumento de dureza segundo Schneider *et al* de que acima de 450 °C existe a formação de uma fase gama na matriz o que explica o aumento da dureza.

A Figura 38 mostra a indentação na seção transversal de uma camada de Cr₃C₂-NiCr aspergido pelo processo HVOF.

Tabela 16 – Dureza do revestimento com Cr₃C₂-NiCr aspergido pelo processo HVOF.

Corpos de Prova	Dureza HV _{0,3} – Carga 2,94N		
	Média	Dispersão %	Desvio Padrão
Como aspergido	954	7,60	72,64
Após aquecimento 540°C	968	9,22	89,35

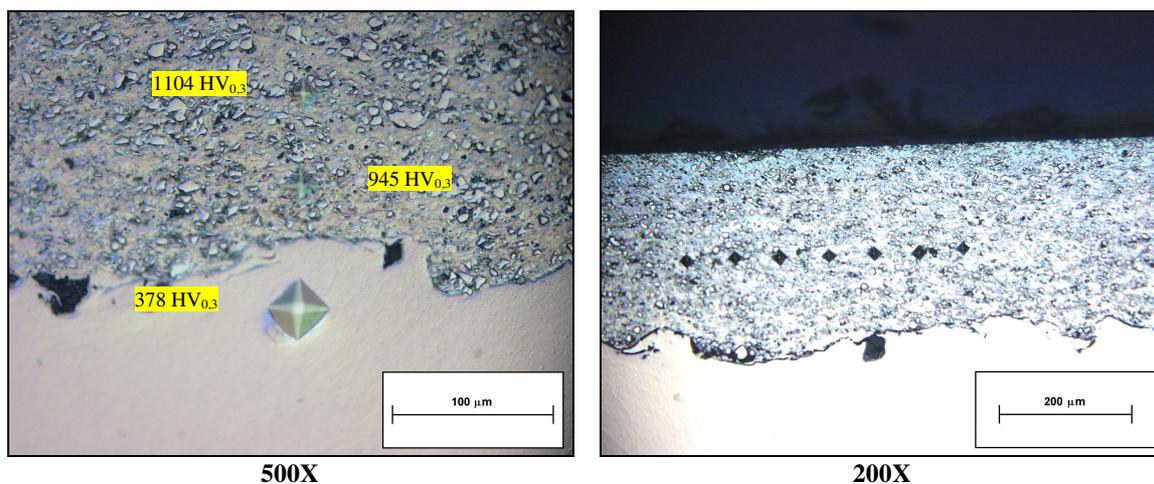


Figura 38 – Seção transversal das camadas aspergidas com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – HVOF. Pistola DJ-2600. Medição de dureza $\text{HV}_{0,3}$.

4.3.2 MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS

As primeiras observações das amostras aspergidas com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ realizadas na UFSC mostraram a presença de algumas trincas perpendiculares em relação à camada aspergida como indicado na Figura 39a, esse defeito foi consequência de procedimentos incorretos durante o seccionamento dos corpos de prova. Para a eliminação desses defeitos foram tomadas as seguintes providências:

- Diminuir o avanço (pressão manual) do disco de corte;
- Substituir o fluido de corte utilizado por um novo a fim de aumentar a refrigeração e diminuir o atrito entre o disco e o revestimento.

Após estas providências foram obtidas amostras sem a presença de trincas. Um outro cuidado durante as etapas de lixamento e polimento foi em evitar o arrancamento dos carbonetos da matriz e ou até o deslocamento do revestimento (Figuras 39c e 39e). Schwetzke e Krommer (1997) *apud* Freire, recomendam que quando ocorrer o surgimento de trincas ou não repetibilidade das amostras ou a não correspondência com revestimentos encontrados conforme literatura deve-se proceder a uma nova preparação e avaliação nos corpos de prova [5].

As amostras preparadas na UFSC e enviadas a Helmut Schmidt Universität (HSU), apresentaram os seguintes defeitos:

- Extremidade dos corpos de prova arredondadas e arrancadas conforme mostra a Figura 40c – setas azuis;
- Desplacamento do revestimento conforme Figura 40e – seta vermelha;
- Alguns carbeto foram arrancados da matriz NiCr ou se posicionaram em uma altura superior a da matriz conforme mostrado nas Figuras 40d – setas pretas.

Estes problemas são típicos de revestimentos $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, preparados com lixa de papel (SiC) e alguns tipos de panos de polimentos utilizados durante a preparação das amostras. Esse tipo de lixa se deforma levemente e desgasta mais a resina do embutimento do que a amostra propriamente, o que também explica o destacamento dos carbonetos e as diferenças de altura entre os mesmos e a matriz.

Outra observação foi em relação ao tempo de lixamento e polimento realizados. Para este tipo de revestimento o tempo e a pressão nas etapas de lixamento e polimento devem ser baixos a fim de evitar o arrancamento dos carbonetos. Para solucionar o problema a indicação de lixas e panos para polimento com base metálica devem ser utilizados, além de tempo e pressão menores durante as etapas de lixamento e polimento.

Nas amostras preparadas e analisadas na Helmut Schmidt Universität (HSU) foram observados os seguintes aspectos:

- As amostras também apresentaram problemas de trincas durante o seccionamento, o que não impediu a análise do restante da camada – Figuras 41c e 42b – setas verdes.
- As camadas aspergidas com e sem ciclagem térmica apresentam integridade e boa adesão em relação ao substrato, não foi evidenciado que a ciclagem térmica imposta às amostras, modificassem a microestrutura ou as propriedades das camadas.
- Houve incrustações de partículas abrasivas na superfície como indicado nas Figuras 40a, 41a, 41d, 42d – setas amarelas. Chama-se a atenção para o fato de que a operação de jateamento durante a preparação da superfície deva ser feito de maneira que a pistola fique mais inclinada evitando estes problemas . Na Figura 29 é

possível observar que o ângulo de jateamento é de aproximadamente 90° em relação à face do corpo de prova.

- Existe uma distribuição homogênea dos carbonetos em toda extensão da matriz com presença de óxidos e poros. Não foram detectadas trincas longitudinais ou outras partículas indesejadas durante a aspersão.
- O nível de porosidade indicado nas Figuras 41 e 42 – setas alaranjadas – foi avaliado segundo um analisador de imagens, programa desenvolvido pela própria Universidade que compara as áreas claras com as escuras estando os revestimentos com uma porosidade em torno de 1,2%, atestando com isso que os parâmetros de aspersão utilizados foram bem determinados e dentro de valores apresentados pelas literaturas consultadas e de acordo com o especificado pelo fabricante Sulzer Metco – *The Coatings Company* – ($< 3,0\%$).

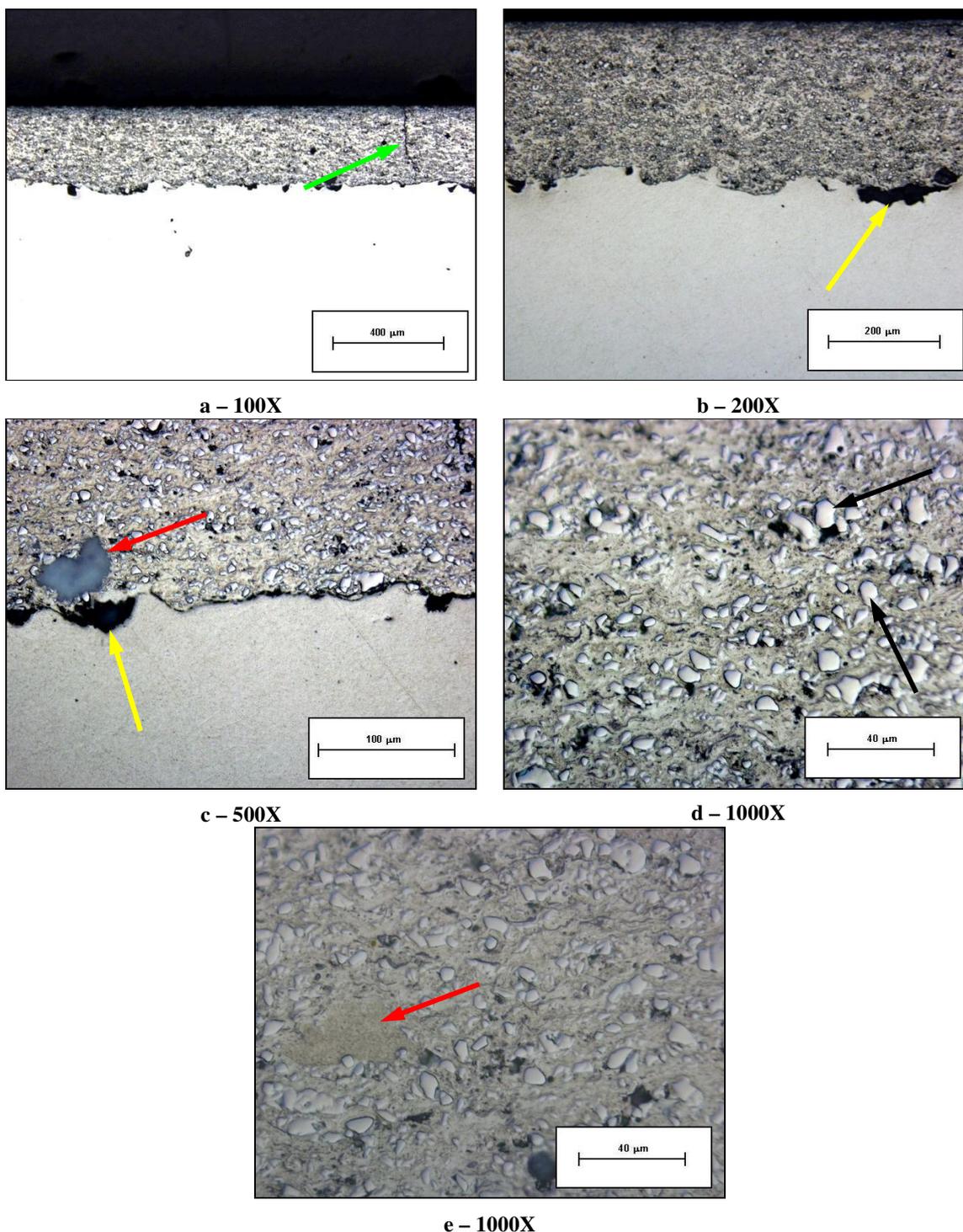


Figura 39 – Microestrutura das seções transversais das camadas de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ aspergidas por HVOF. Pistola DJ-2600 – (aquecidas 540°C). Amostras preparadas e fotografadas na UFSC (MO). Seta Verde – trinca. Seta Amarela – incrustação. Seta vermelha – deslocamento. Seta Preta – carbeto de cromo em alto relevo.

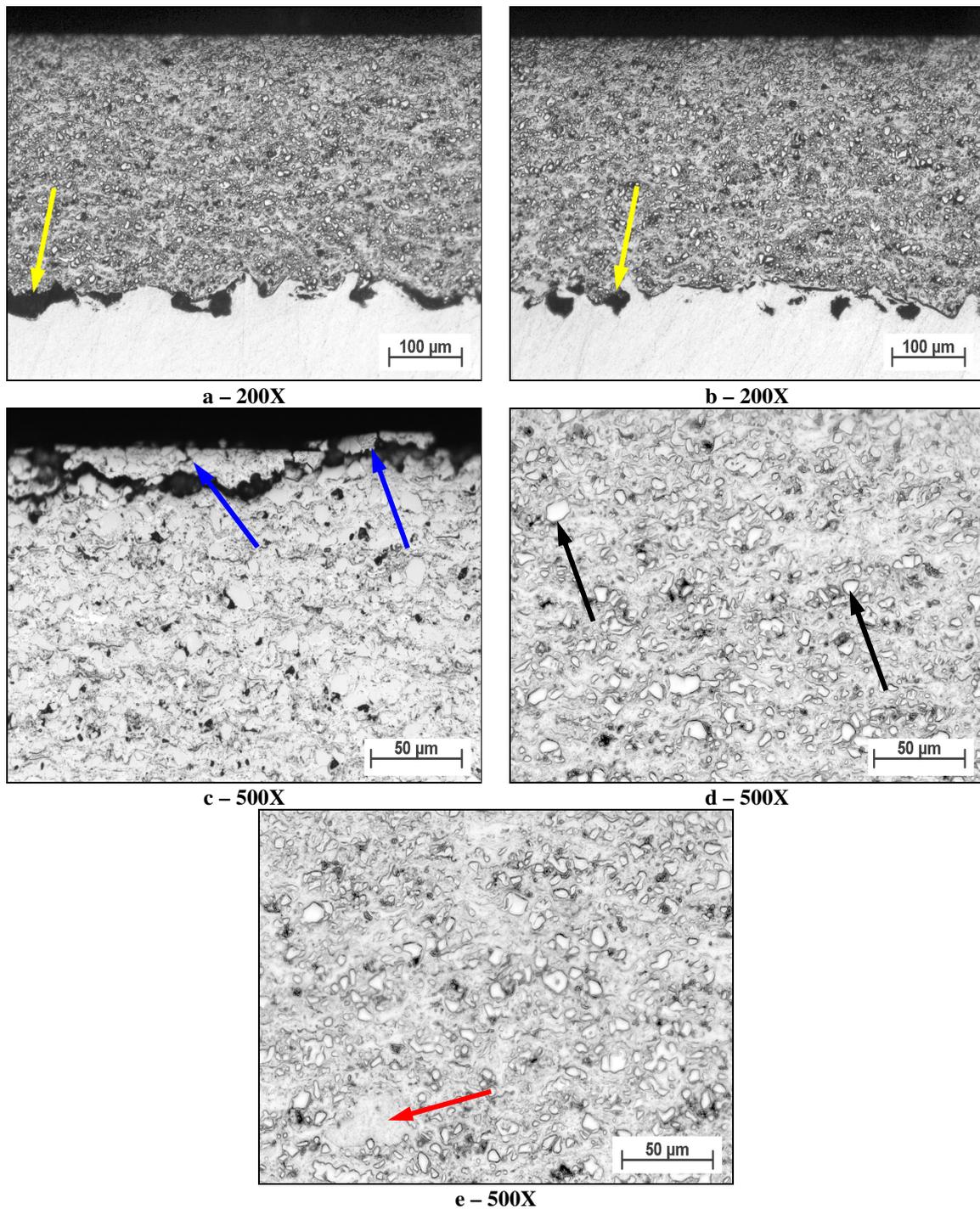


Figura 40 – Microestrutura das seções transversais das camadas de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ aspergidas por HVOF. Pistola DJ-2600. Amostras preparadas na UFSC e fotografadas na HSU (MO).

Seta Amarela – incrustação. Seta Azul – cantos arredondados e quebrados. Seta Preta – carbeto de cromo em alto relevo. Seta vermelha – deslocamento.

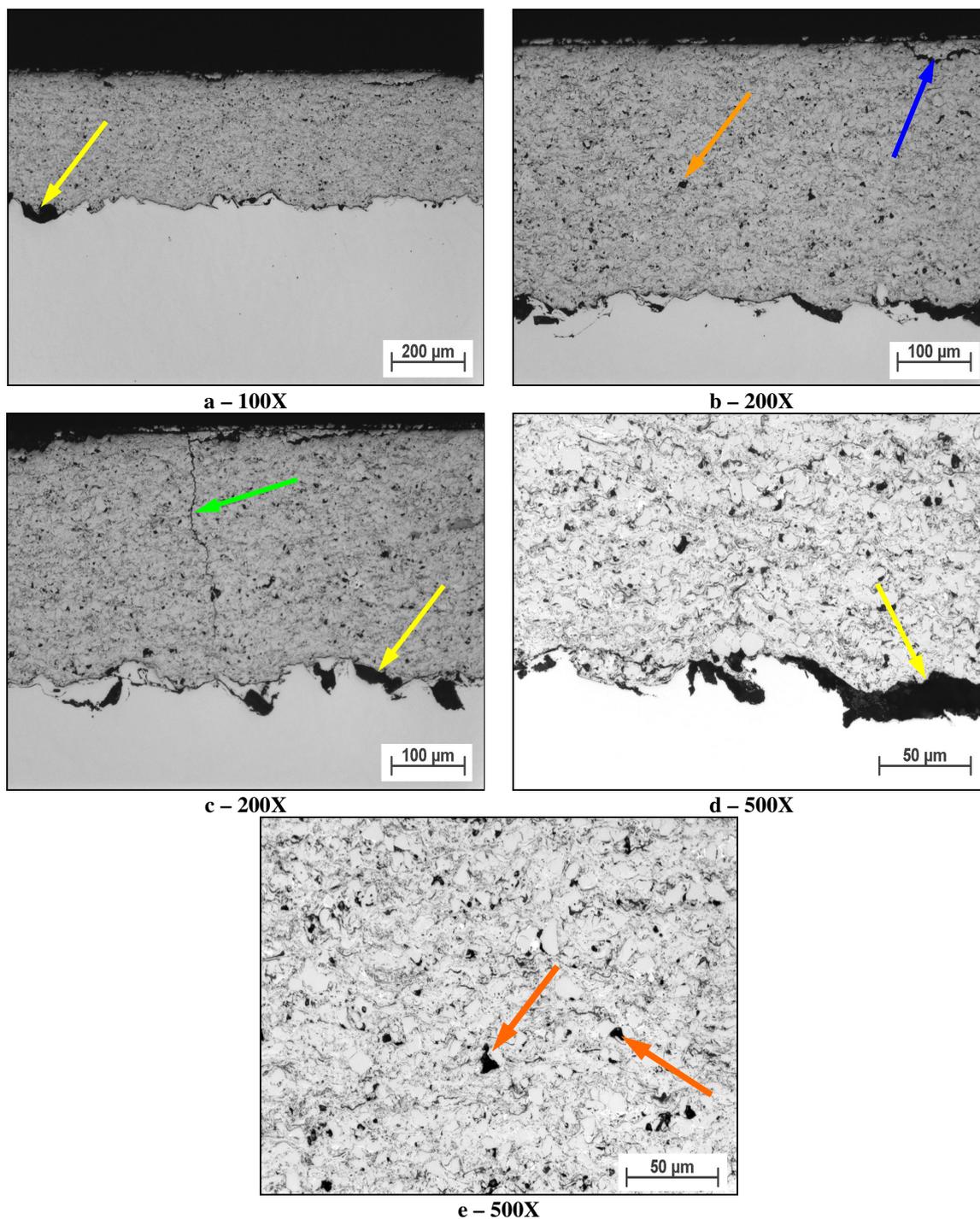


Figura 41 – Microestrutura das seções transversais das camadas de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ aspergidas por HVOF. Pistola DJ-2600. Amostras preparadas e fotografadas na HSU (MO). Seta Amarela – incrustação. Seta alaranjada – óxido e porosidade. Seta Azul – cantos arredondados e quebrados. Seta Verde – trinca.

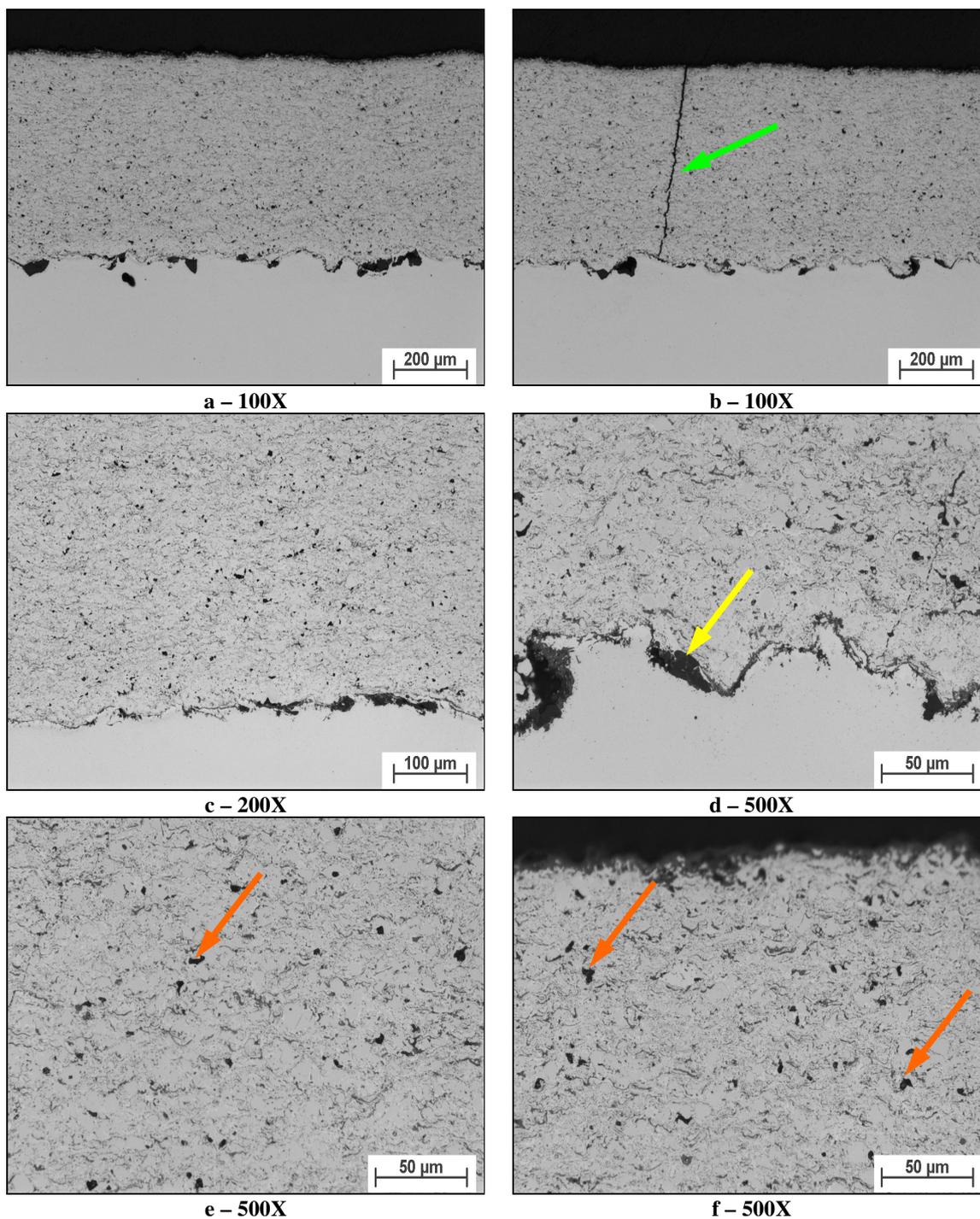


Figura 42 – Microestrutura das seções transversais das camadas de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ aspergidas por HVOF. Pistola DJ-2600 – (aquecidas 540°C). Amostras preparadas e fotografadas na HSU (MO). Seta Verde – trinca. Seta Amarela – incrustação. Seta alaranjada – óxido e porosidade.

4.3.3 ENSAIO DE ADERÊNCIA

Em uma primeira série de ensaios obtiveram-se os resultados de adesão conforme Tabela 17. Os valores de aderência encontrados estavam muito inferiores aos reportados em literatura e o rompimento do adesivo (cola) muito abaixo do citado pelo fabricante – HTK Ultra Bond 100 – onde a resistência deveria estar em torno de 80 MPa.

Uma outra característica observada foi quanto ao modo e a localização da região de ruptura: todas as amostras romperam na interface entre o adesivo (cola) e o contra corpo, atestando falha no adesivo. A primeira constatação foi de que a superfície do contra corpo não apresentava rugosidade suficiente para produzir aderência necessária para o teste.

A alta dispersão encontrada, acima de 10% pode ser resultado da falta de alinhamento entre os corpos de prova e o contra corpo durante a colagem ou a variações na espessura das camadas aspergidas causando uma concentração de tensão e conseqüentemente uma alta variância dos resultados.

Em uma segunda série de ensaios com os corpos de prova aspergidos na RIJEZA Metalurgia Ltda. mantiveram-se os mesmos parâmetros, porém, a espessura da camada depositada foi controlada por computador. Algumas modificações para a segunda série de ensaios foram efetuadas:

- A superfície da face do contra corpo foi jateada com óxido de alumínio para aumentar a rugosidade e conseqüentemente a aderência da cola no mesmo;
- Também se procurou dar uma maior atenção na colagem dos corpos de prova para que o alinhamento fosse o melhor possível, evitando áreas de concentração de tensão.

Após novos procedimentos de aspersão e colagem, os ensaios apresentaram os resultados de acordo com a Tabela 18. As amostras ainda apresentaram rompimento dentro do adesivo, ou seja, não se pode apresentar um valor exato da aderência, mas os valores de aderência aumentaram e se encontram mais próximos das referências literárias.

Uma das dificuldades encontradas seria quanto à resistência das resinas disponíveis no mercado, já que o processo HVOF produz revestimentos com uma resistência a adesão muitas vezes superior ao da resina.

Tabela 17 – Resistência à adesão do primeiro grupo dos corpos de prova aspergidos HVOF – DJ 2600 – Cr₃C₂-NiCr – REVESTEEL Metalização LTDA.

Condição do Revestimento	Nº CP	Adesão (MPa)	Média (MPa)	Dispersão (%)	Desvio Padrão	Tipo de Falha	
<i>Como aspergido</i>	15	01	10,90	15,82	26,54	4,20	Adesivo
		02	14,40				
		03	17,20				
		04	20,80				
<i>Com aquecimento a 540°C</i>	16	01	14,50	21,02	35,59	7,48	Adesivo
		02	18,50				
		03	19,30				
		04	31,80				

Tabela 18 – Resistência à adesão do segundo grupo dos corpos de prova aspergidos HVOF – JP 5000 – Cr₃C₂-NiCr. RIJEZA Metalurgia LTDA.

Condição do Revestimento	Nº CP	Adesão (MPa)	Média (MPa)	Dispersão (%)	Desvio Padrão	Tipo de Falha	
<i>Como aspergido</i>	15	01	67,00	61,57	7,30	4,50	Adesivo
		02	56,00				
		03	62,00				
		04	61,00				
<i>Com aquecimento a 540°C</i>	16	01	57,35	59,55	5,92	3,53	Adesivo
		02	63,75				
		03	56,00				
		04	61,00				

A Figura 43 apresenta os valores encontrados no ensaio de aderência dos corpos de prova aspergidos com Cr₃C₂-NiCr pelo processo HVOF.

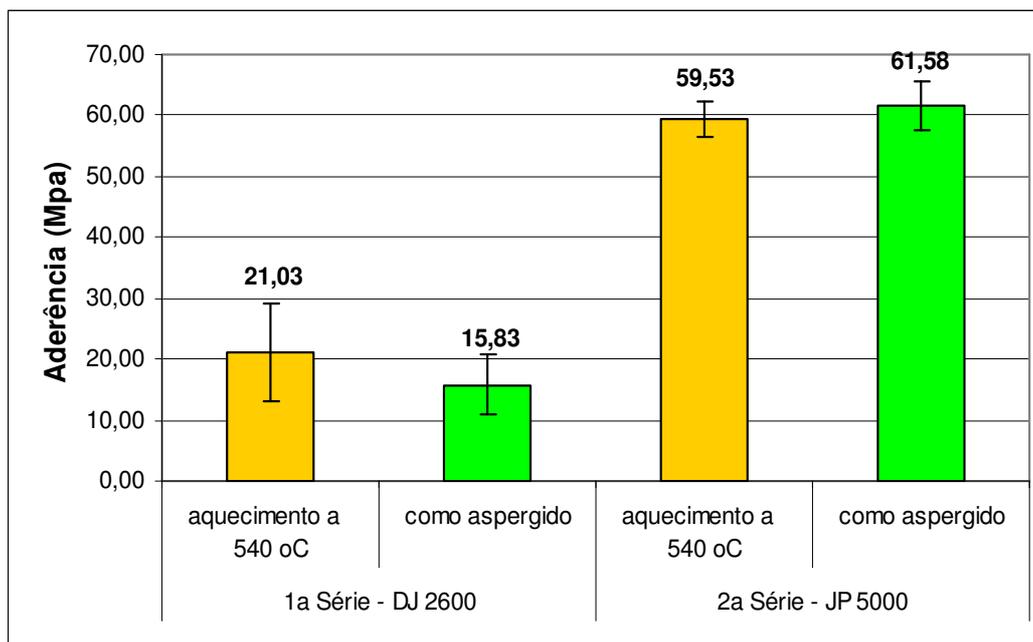


Figura 43 – Resultados de ensaios de aderência de revestimentos aspergidos com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ como aspergidos e após aquecimento de 540°C .

4.3.4 ENSAIO DE DESGASTE

A Tabela 19 apresenta os valores de dureza e rugosidade dos corpos de prova antes do início do ensaio de desgaste pino sobre disco. A dureza superficial dos corpos de prova nitretados é superior aos demais e a rugosidade das amostras apresentam-se de acordo como requisitado segundo a norma ASTM G99-95 – abaixo de 0,8 Ra.

Tabela 19 – Dureza e rugosidade dos corpos de prova para ensaio de desgaste.

N° CP – Condição Superficial	Dureza $HV_{0,5}$	Média $HV_{0,5}$	Rugosidade	
			Ra	Ry
06 – Nitretado	1245	1235	0,16	9,20
07 – Nitretado	1145		0,13	5,00
08 – Nitretado	1315		0,18	6,63
09 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – Aquecido	1105	1106	0,16	6,29
10 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – Aquecido	1125		0,11	4,39
11 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – Aquecido	1088		0,15	4,63
12 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	1090	1110	0,50	17,21
13 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	1085		0,29	7,30
14 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	1157		0,32	5,68

O objetivo do ensaio foi investigar a resistência ao desgaste de amostras de aço X20CrMoV12-1 com diferentes condições superficiais. A partir dos resultados experimentais pode-se fazer uma classificação dos revestimentos quanto à resistência ao desgaste, apesar do teste não representar com exatidão as condições reais de operação das hastes de válvulas.

Nas Tabelas 20, 21 e 22 são apresentados os valores da taxa de desgaste média (Q) em (mm^3/m) e (g/m) bem como os resultados dos coeficientes de desgaste (k) e resistência ao desgaste ($1/k$) dos materiais com diferentes condições superficiais. De acordo com os resultados, os discos de aço nitretados apresentaram os menores coeficientes de desgaste na ordem de $2,18 \times 10^{-5}$ para uma carga de 30N e com isso apresentam a melhor resistência ao desgaste entre as superfícies testadas. Mesmo assim as amostras aspergidas com Cr_3C_2 -NiCr apresentaram coeficiente e taxa de desgaste próximo ao nitretado principalmente quando a unidade em questão foi a perda de massa em g/m – Tabela 21 e Figura 45. A ciclagem térmica (100 horas a 540°C) que foram submetidos os corpos de prova aspergidos não modificou a taxa e o coeficiente de desgaste das amostras durante os testes. As Figuras 44, 45 e 46 apresentam gráficos das taxas de desgaste dos corpos de prova com diferentes condições superficiais.

Segundo Valentinelli *et. al* em seus testes de desgaste a quente com variação de temperatura, todos os revestimentos aspergidos apresentam uma clara redução do coeficiente de atrito com o aumento da temperatura. A redução do coeficiente de atrito influi diretamente na redução das taxas de desgaste, como visto anteriormente esta redução é provavelmente devido a um aumento da plasticidade da matriz. A possibilidade de execução dos ensaios pino sobre disco a quente (Valentinelli *et al* [39] e Schneider *et. al* [30]) representa uma realidade mais próxima das condições operacionais das hastes de válvulas de turbinas termelétricas.

Nesse contexto, haverá um aumento da resistência ao desgaste das hastes aspergidas com Cr_3C_2 -NiCr quando estas entrarem em operação devido ao aumento de dureza (formação da fase γ') e pela redução do coeficiente de atrito (μ).

Tabela 20 – Taxa média de desgaste (mm^3/m) dos corpos de prova após ensaio de desgaste.

N° CP – Condição Superficial	Taxa Média de Desgaste (Q) – (mm^3/m)			
	Valor	Média	Desvio Padrão	Dispersão (%)
06 – Nitretado	$4,91 \times 10^{-4}$	$5,26 \times 10^{-4}$	$7,60 \times 10^{-5}$	14,44
07 – Nitretado	$4,75 \times 10^{-4}$			
08 – Nitretado	$6,14 \times 10^{-4}$			
09 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	$7,95 \times 10^{-4}$	$7,53 \times 10^{-4}$	$5,71 \times 10^{-5}$	7,58
10 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	$7,76 \times 10^{-4}$			
11 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	$6,88 \times 10^{-4}$			
12 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – Aq.	$7,38 \times 10^{-4}$	$7,34 \times 10^{-4}$	$6,92 \times 10^{-6}$	1
13 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – Aq.	$7,38 \times 10^{-4}$			
14 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – Aq.	$7,26 \times 10^{-4}$			

Tabela 21 – Taxa média de desgaste (g/m) dos corpos de prova após ensaio de desgaste.

N° CP – Condição Superficial	Taxa Média de Desgaste (Q) – (g/m)			
	Valor	Média	Desvio Padrão	Dispersão (%)
06 – Nitretado	$3,83 \times 10^{-6}$	$4,11 \times 10^{-6}$	$5,92 \times 10^{-7}$	14,40
07 – Nitretado	$3,71 \times 10^{-6}$			
08 – Nitretado	$4,79 \times 10^{-6}$			
09 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	$4,69 \times 10^{-6}$	$4,79 \times 10^{-6}$	$3,03 \times 10^{-7}$	6,32
10 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	$5,13 \times 10^{-6}$			
11 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	$4,54 \times 10^{-6}$			
12 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – Aq.	$4,88 \times 10^{-6}$	$4,85 \times 10^{-6}$	$4,83 \times 10^{-8}$	0,99
13 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – Aq.	$4,88 \times 10^{-6}$			
14 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – Aq.	$4,79 \times 10^{-6}$			

Tabela 22 – Coeficiente de desgaste (k) e resistência ao desgaste (1/k) dos corpos de prova após ensaio de desgaste.

N° CP – Condição Superficial	Coeficiente de Desgaste (k)		Resistência ao Desgaste 1/k	
	Valor	Média	Valor	Média
06 – Nitretado	$2,03 \times 10^{-4}$	$2,17 \times 10^{-4}$	$0,49 \times 10^4$	$0,47 \times 10^4$
07 – Nitretado	$1,81 \times 10^{-4}$		$0,55 \times 10^4$	
08 – Nitretado	$2,69 \times 10^{-4}$		$0,37 \times 10^4$	
09 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	$2,92 \times 10^{-4}$	$2,77 \times 10^{-4}$	$0,34 \times 10^4$	$0,36 \times 10^4$
10 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	$2,91 \times 10^{-4}$		$0,34 \times 10^4$	
11 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	$2,49 \times 10^{-4}$		$0,40 \times 10^4$	
12 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – Aq.	$2,68 \times 10^{-4}$	$2,71 \times 10^{-4}$	$0,37 \times 10^4$	$0,36 \times 10^4$
13 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – Aq.	$2,66 \times 10^{-4}$		$0,37 \times 10^4$	
14 – Aspergido $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – Aq.	$2,79 \times 10^{-4}$		$0,35 \times 10^4$	

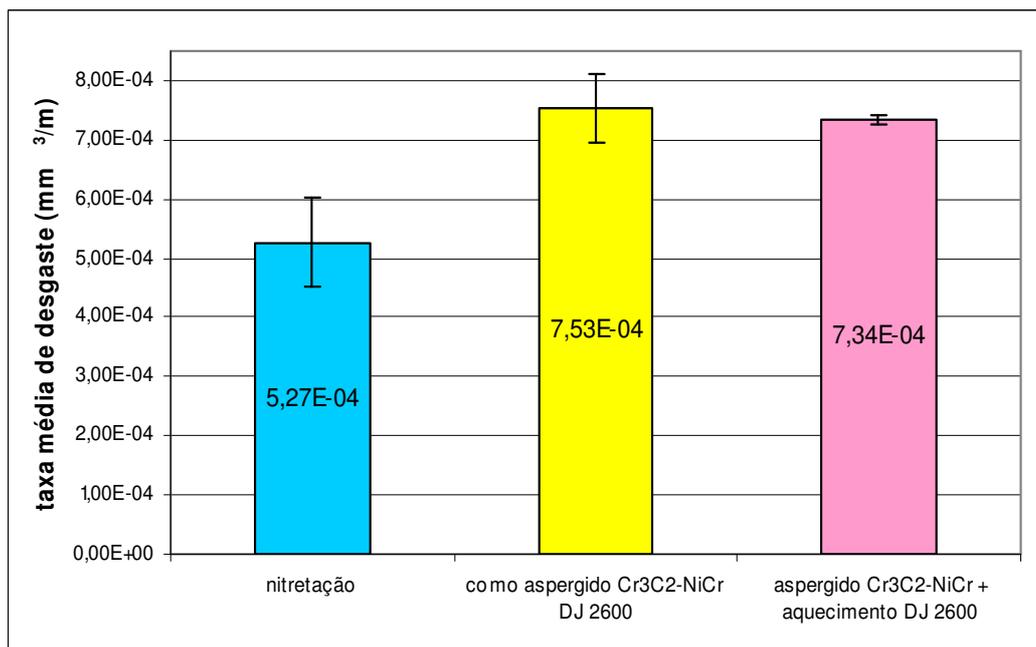


Figura 44 – Resultado do ensaio pino sobre disco dos corpos de prova com superfícies nitretadas e aspergidas relacionando taxa média de desgaste (Q) em mm^3/m – média dos corpos de prova.

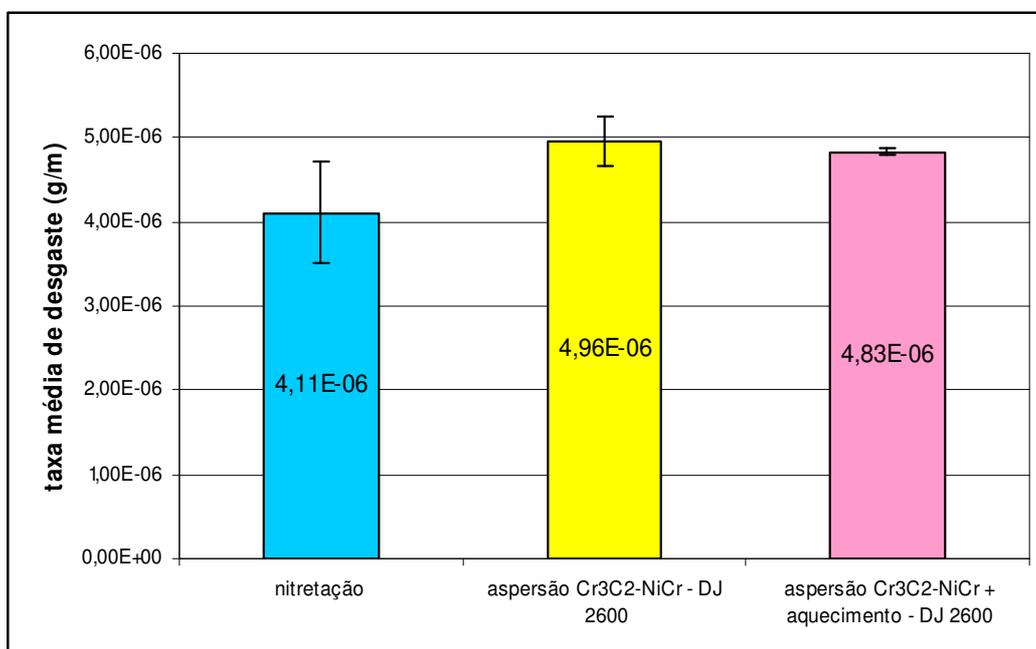


Figura 45 – Resultado do ensaio pino sobre disco dos corpos de prova com superfícies nitretadas e aspergidas relacionando taxa média de desgaste (Q) em g/m – média dos corpos de prova.

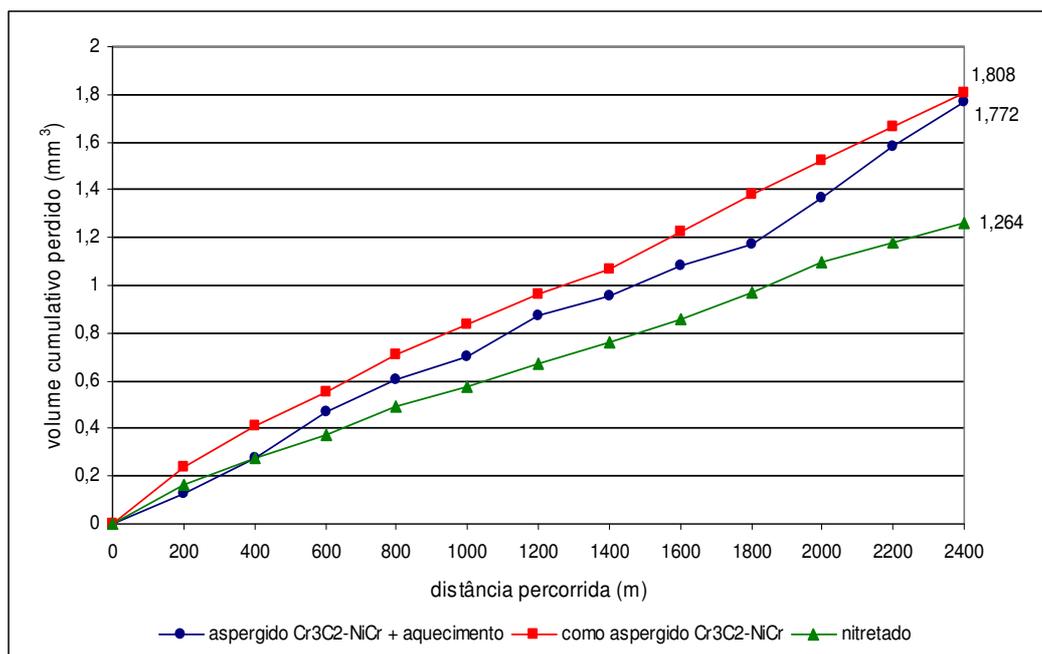


Figura 46 – Ensaio de desgaste pino sobre disco dos corpos de prova com superfícies nitretadas e aspergidas, relacionando a perda de volume acumulativo dos discos versus a distância de deslizamento percorrida – média dos corpos de prova.

As micrografias que seguem foram obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) da superfície dos corpos de prova dentro e fora da trilha de desgaste – Figuras 47 a 53 – Foram constatados os seguintes mecanismos de desgaste por deslizamento nos corpos de prova durante os ensaios de desgaste pino sobre disco:

- micro-riscagem ou microsulcamento
- delaminação de flocos (descamação).

Os corpos de prova aspergidos com Cr₃C₂-NiCr com e sem aquecimento a 540°C apresentaram as mesmas formas de mecanismo de desgaste. Não foi observado desgaste adesivo; isto se deve ao fato da esfera de zircônia ser quimicamente inerte (não metálico) com os materiais das superfícies dos discos. Em uma situação de desgaste contra metal, certamente o desgaste adesivo estará presente aumentando a taxa de desgaste.

Segundo Valentinelli *et. al* o principal mecanismo de desgaste encontrado no ensaio a quente para o Cr₃C₃-NiCr é o adesivo, esse mecanismo pode ser observado devido a

ausência de carboneto. Neste caso durante o ensaio pino sobre disco os carbonetos foram removidos da matriz.

Nas Figuras 47a e 48a nota-se os mecanismos de desgaste abrasivo por micro-riscagem devido a partículas duras provenientes da esfera de zircônia. Os corpos de prova nitretados apresentaram micro-poros fora e dentro da trilha de desgaste – Figuras 47b e 48b.

Nas Figuras 49a e 49b observam-se os mecanismos de desgaste de micro-sulcamento e micro-lascamento de flocos.

Na Figura 50b verifica-se o micro-lascamento da superfície antes do ensaio de desgaste devido ao processo de retífica realizado após aspersão térmica.

Na Figura 51a pode-se observar o aumento do mecanismo de desgaste de micro-lascamento dentro da pista de desgaste do corpo de prova com revestimento aspergido.

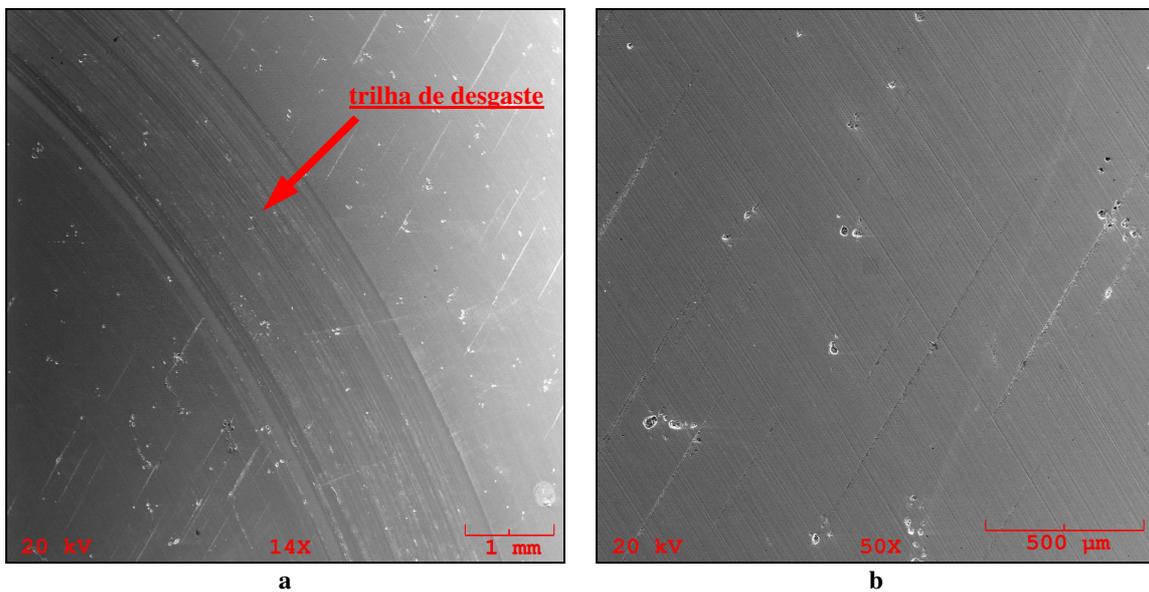


Figura 47 – Aspecto superficial dos corpos de prova nitretados após ensaio de desgaste pino sobre disco (MEV).

a – área da trilha de desgaste e fora da trilha de desgaste.

b – área fora da trilha de desgaste.

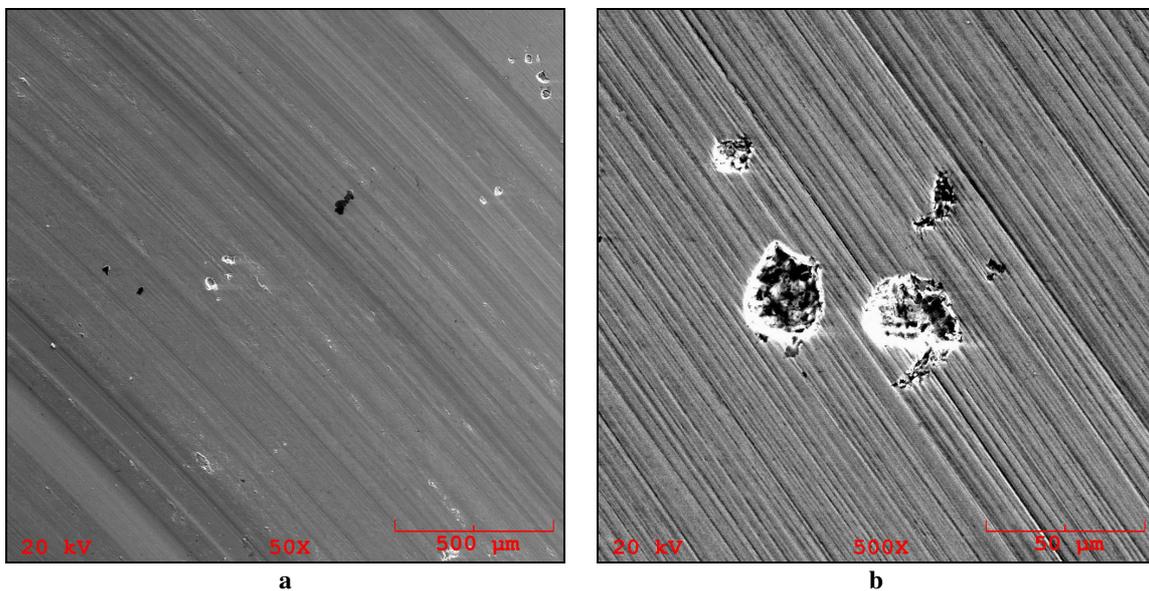


Figura 48 – Aspecto superficial dos corpos de prova nitretados após ensaio de desgaste pino sobre disco (MEV).

a – área da trilha de desgaste, desgaste por abrasão.

b – área fora da trilha de desgaste – porosidade e rugosidade inicial.

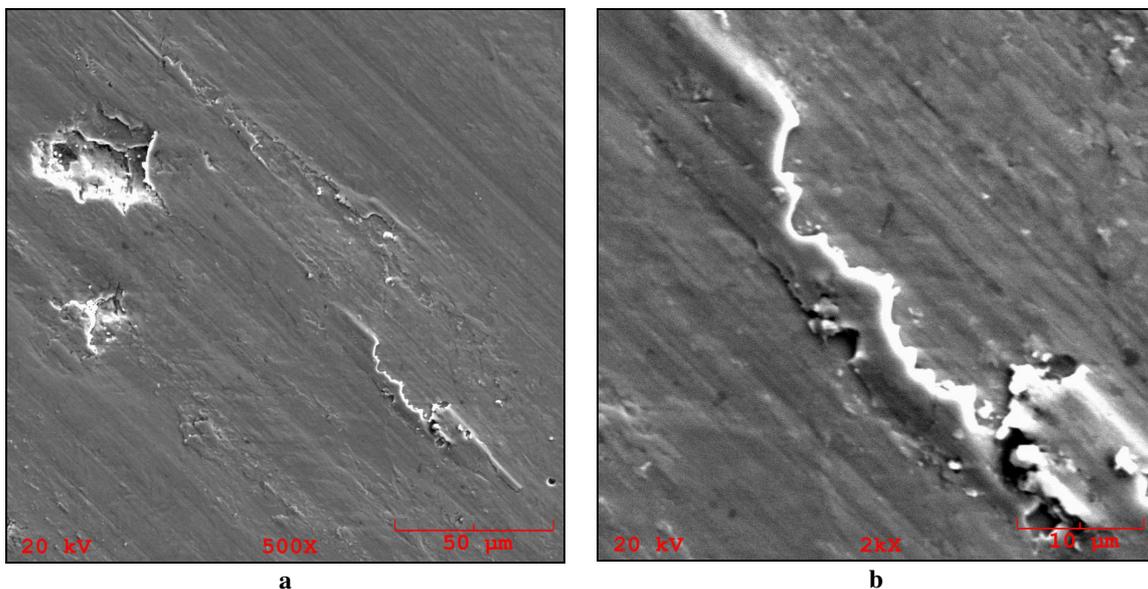


Figura 49 – Aspecto superficial dos corpos de prova nitretados após ensaio de desgaste pino sobre disco (MEV).

a – área da trilha de desgaste – descamação de flocos e micro-riscagem.

b – detalhe do mecanismo de desgaste – área da trilha de desgaste.

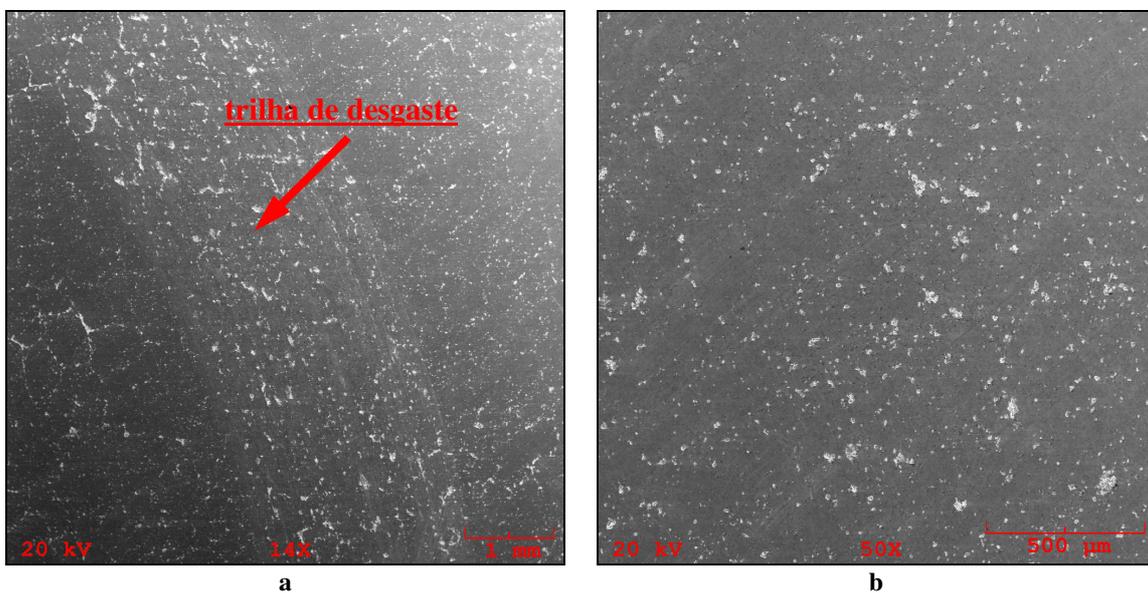


Figura 50 – Aspecto superficial dos corpos de prova aspergidos com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – HVOF após ensaio de desgaste pino sobre disco (MEV).

a – área da trilha de desgaste e fora da trilha de desgaste.

b – área fora da trilha de desgaste.

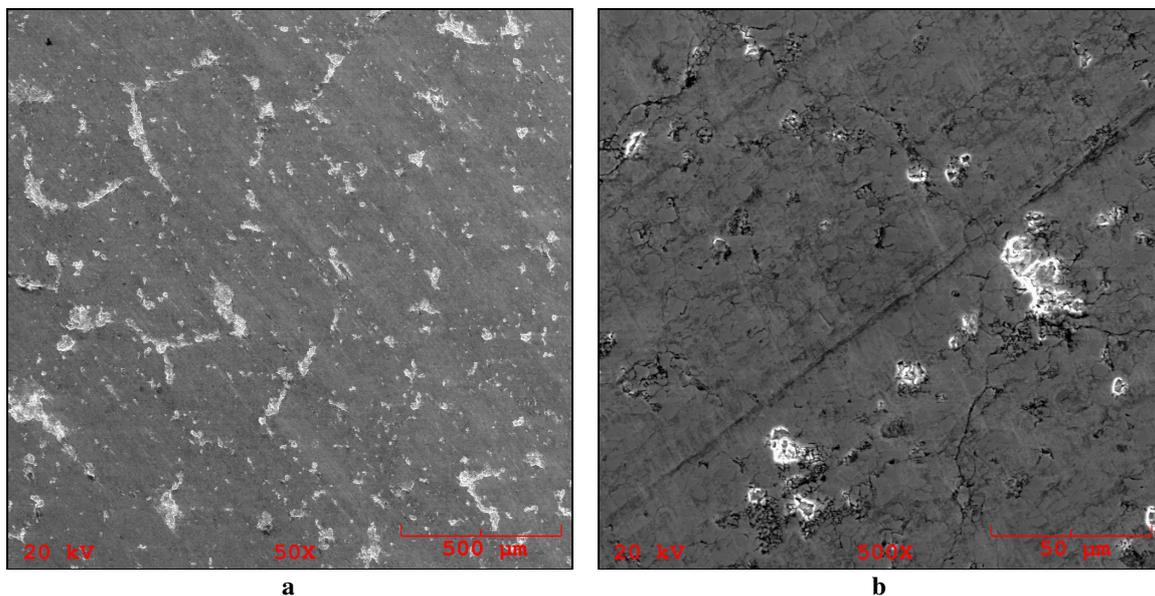


Figura 51 – Aspecto superficial dos corpos de prova aspergidos com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – HVOF após ensaio de desgaste pino sobre disco (MEV).

a – área da trilha de desgaste – descamação de flocos.

b – área fora da trilha de desgaste.

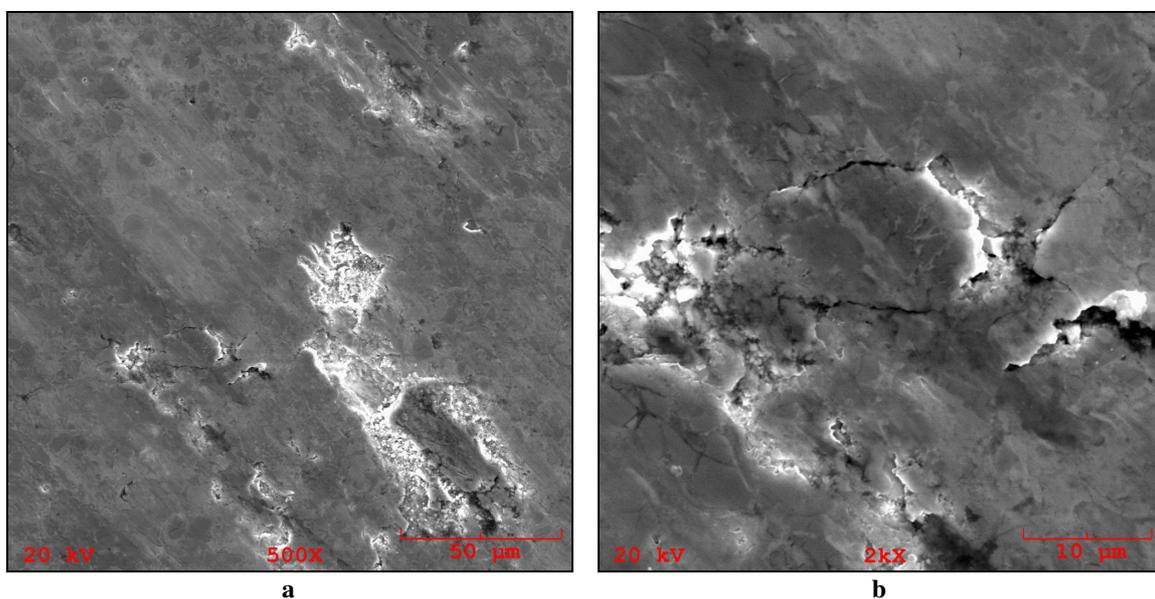


Figura 52 – Aspecto superficial dos corpos de prova aspergidos com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ – HVOF após ensaio de desgaste pino sobre disco (MEV).

a – área da trilha de desgaste – descamação de flocos.

b – área da trilha de desgaste – micro-trincas.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

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

As hastes de válvulas parcializadoras da unidade 6 – UTLB são fabricadas em aço inoxidável DIN X20CrMoV 12.1 temperado e revenido. Seu estado original é protegido por uma camada superficial nitretada com dureza de 1050 HV_{0,2} e espessura em torno de 70µm, em condições operacionais a camada nitretada sofre deterioração por desgaste e corrosão.

Os principais mecanismos de desgaste que ocorrem nas hastes são: o desgaste por “*fretting*” devido ao contato com o sistema de selagem (selos metálicos) e o desgaste causado pela remoção da camada de Fe₃O₄ (magnetita) formada na região acima do sistema de selagem em temperaturas próximas a 300°C. Durante período de operação a espessura de magnetita pode aumentar possibilitando o travamento das hastes durante manobras operacionais ou se desprender das hastes com o tempo, causando desgaste e conseqüente redução do diâmetro externo.

Uma dificuldade encontrada nesse trabalho foi de reproduzir testes de desgaste a quente que apresentassem condições reais de operação das hastes de válvulas, ou seja, temperatura de aproximadamente 540°C em um meio com vapor d’água. Consultou-se Centros de Pesquisa e alguns pesquisadores sobre a possibilidade de encontrar-se as condições mencionadas, porém sem sucesso, o que nos levou a pesquisar em artigos que abordassem ensaios de desgaste a quente ou que testassem a eficiência do carbetto de cromo (Cr₃C₂-NiCr) como revestimento ou ainda o emprego do mesmo como revestimento em hastes de válvulas de turbinas termelétricas.

Em ensaios de desgaste pino sobre disco em temperatura ambiente, conforme metodologia desta dissertação, os revestimentos aspergidos com Cr₃C₂-NiCr mostraram taxas de desgaste maiores que os da camada produzida por nitretação. Entretanto, conforme recente publicação literária esta situação tende a se inverter em temperaturas acima de 400°C, devido à redução do coeficiente de atrito e aumento da dureza desses cermet aspergido. Além disso, nesse atual trabalho, somente foram testadas ao desgaste revestimentos aspergidos pelo sistema HVOF DJ 2600, com nível de dureza menor (dentro

da faixa inferior 950HV_{0,3}) que a da camada nitretada, prevista pelos fabricantes de pós e sistemas para aspersão.

Admite-se que a otimização de parâmetros de processo e a utilização do sistema JP – 5000 possam ser obtidos maiores níveis de dureza e resistência ao desgaste. Mesmo assim a dureza e a resistência ao desgaste destes revestimentos são comparáveis aos produzidos por nitretação. Segundo as literaturas consultadas o carbetto de cromo (Cr₃C₂-NiCr) possui elevada resistência á corrosão e resistência ao desgaste a quente. A aderência deste revestimento aspergido por HVOF acima de 60 MPa é superior quando comparável com outros processos de aspersão.

A simulação de condição de serviço através de tratamento térmico de curta duração (540°C/100hs) não alterou a qualidade dos revestimentos, de forma a modificar ou influenciar a microestrutura e os resultados dos ensaios de dureza, desgaste e aderência.

A qualidade das hastes fabricadas com equipamentos e materiais disponíveis no mercado nacional sustenta a proposta de considerar a alternativa da aspersão térmica técnica e economicamente viável e interessante devido aos seguintes fatores:

- Atende às exigências operacionais das hastes.
- Possibilita recuperação dimensional das hastes aspergidas ou nitretadas.

Finalmente, quanto aos procedimentos experimentais para caracterização das camadas aspergidas caberia destacar que na determinação do ensaio de aderência (ASTM-C-633) todos os detalhes merecem atenção especial. Alinhamento entre os corpos de prova e contra corpos bem como os procedimentos de colagem devem ser rigorosamente obedecidos a fim de determinar realmente a resistência da camada aspergida. Existe a possibilidade da ruptura ocorrer no meio do adesivo não informando com precisão a aderência do revestimento.

A preparação metalográfica para observação das camadas aspergidas necessita de: procedimentos, materiais e equipamentos adequados. A não observância nestes itens pode acarretar em produção de defeitos indesejáveis (mascarar análises).

CAPÍTULO VI – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise de revestimentos aspergidos com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ utilizando-se pistolas do tipo JP 5000 – por meio de ensaios de desgaste pino sobre disco, micrografia, dureza e aderência.
- Construção de um tribômetro pino sobre disco que permita testes de desgaste acima de $500\text{ }^\circ\text{C}$.
- Estudar a viabilidade de utilização do $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ como proteção contra o desgaste de tubos condutores de vapor sujeitos ao ataque erosivo do carvão em sopradores de fuligem (vapor) de usinas termoelétricas.
- Realizar testes que comparem a resistência à corrosão de materiais aspergidos com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ e WC-Co pelo processo HVOF.
- Estudo de material e processos de aspersão térmica que possam substituir a tradicional aplicação de metal patente – fundição por centrifugação – nos mancais radiais. Ênfase nos ensaios de aderência do metal patente ao substrato.
- Realizar testes operacionais (aproximadamente 12.000 horas) em hastes de válvulas aspergidas com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ pelo processo HVOF em turbinas termelétricas a carvão dessa forma avaliando a eficiência desta técnica como método de proteção contra o desgaste em condições de alta temperatura e meio oxidante.

REFERÊNCIA DE LITERATURA

- [1] **ASTM G 99 – 95 a.** Standard Test Method for Wear Testing Whith a Pin on Disc Apparatus. Março, 1997.
- [2] **AMERICAN WELDING SOCIETY** – Thermal spraying – Practice, Theory and Application. AWS. 1985. 170p.
- [3] **BERGMANN, C.P. Avaliação do Desgaste Erosivo à Quente (aproximadamente 300°C) por Cinzas de Carvão Mineral em Revestimentos Obtidos por Aspersão Térmica.** Anais do II CITENEL. pp 325 – 329, 2003.
- [4] **CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos.** ABM – Associação Brasileira de Metais. 1987. 518p.
- [5] **FREIRE, F. Avaliação de Revestimentos Aplicados por Aspersão Térmica para Proteção Contra o Desgaste de Ponteiros de Risers.** Dissertação de Mestrado, UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. Abril, 2002. 64p.
- [6] **FREIRE, F. Revestimentos Duros de WC Aplicados por Aspersão Térmica pelo Sistema HVOF.** Universitat der Bundeswehr Hamburg, Institut fur Wekstofftechnik, Hamburg, Germany, 1999. Relatório de Estágio Curricular, EMC, UFSC. 48p.
- [7] **GENTIL, V. Corrosão.** Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro. 1996. 345p.
- [8] **HERMAN, H. SAMPATH S. Thermal Spray Coating.** Department of Materials Science and Engineering – State University of New York, 2004. www.matscieng.sunysb.edu – acessado em 21 de Novembro de 2005.

- [9] HESSE, R. **Construção e Teste de Validação de um Equipamento de Ensaio de Desgaste do Tipo Pino Sobre Disco**. Dissertação de Mestrado, UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina – Março, 2000.
- [10] **International Thermal Spray Association**. www.thermalspray.org – acessado em 14 de Junho de 2005. Ohio, USA.
- [11] KAWAKITA, J. KURODA, S. FUKUSHIMA, T. KODAMA, T. **Development of Dense Corrosion Resistant Coatings by an Improved HVOF Spraying Process**. Science and Technology of Advanced Materials. Agosto, 2003.
- [12] KREYE, H. **Microstructure and Properties of Nanostructured Thermal Sprayed Coatings Using High-Energy Milled Cermets Powders**. Surface&Coatings Technology. 14p. Junho, 2004.
- [13] KREYE, H. SCHWETZKE, R. ZIMMERMANN, S. **High Velocity Oxy-Fuel Flame Spraying Process and Coating Characteristics**. Thermal Spray Conference, Japan, 1995.
- [14] LIMA, C.R.P; **Aspersão Térmica (Metalização)** – UNICAMP – Depto de Engenharia de Materiais – Março, 2002.
- [15] LIMA, C.R.C; TREVISAN, R.E. **Aspersão térmica – Fundamentos e Aplicações**. Artliber Editora – São Paulo, 2001. 148p.
- [16] LIMA, C.R.C. TREVISAN, R.E. **Análise de Correlação dos Resultados de Ensaios de Adesão em Revestimentos Obtidos por Aspersão Térmica a Plasma**. XXII ENTS – Blumenau SC. Janeiro, 1996.

[17] LIMA, C.R.C. TREVISAN, R.E. **Ensaio de adesão em Revestimentos Metal-Cerâmico Obtidos por Aspersão Térmica a Plasma.** Revista de Ciência & Tecnologia. Junho, 1999.

[18] MANN, B.S. PRAKASH, B. **High Temperature Friction and Wear Characteristics of Various Coating Materials for Steam Valve Spindle Application.** WEAR. Março, 2000.

[19] MARANHO, O. **Influência da Preparação da Superfície na Aderência de Revestimentos de Alumínio Depositados por aspersão Térmica a Chama.** Dissertação de Mestrado, UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. Outubro, 1996. 126p.

[20] MARQUES, P.V. **Aspersão Térmica – INFOSOLDA.** www.infosolda.com.br – acessado em 03 de agosto de 2005.

[21] METAMOROS, P, E. **Modelo de Desgaste Oxidativo Baseado em Parâmetros Termodinâmicos.** Tese de Doutorado, EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

[22] NASCIMENTO, I.A. BAPTISTA, A.L.B. **Desgaste.** Spectru Instrumental Científico LTDA. Divisão Metalurgia/Processos. www.spectru.com.br – acessado em 14 de agosto de 2005.

[23] PAWLOWSKI, L. **Material Used For Spraying.** The science and engineering of thermal spray coatings. England: John Willey&Sons, 1995. 414p.

[24] PICAS, J.A. FORN, A. IGARTUA, A. MENDOZA, G. **Mechanical and Tribological Properties of High Velocity Oxy-Fuel Thermal Sprayed Nanocrystalline CrC-NiCr Coatings.** Surface Coatings & Technology. 2003.

- [25] PIMENTA, S, G. **Corrosão uma Abordagem Geral.** www.iope.com.br – acessado em 20 de março de 2006.
- [26] PINEDO, C.E. **Nitreção por Plasma de Aços Inoxidáveis** – Revista Metalurgia&Materiais – Abril, 2004.
- [27] RADEK. E. **The Influence of Thermally Sprayed Coatings Microstructure on Their Tribological Characteristics.** Skoda Research. Outubro, 2003.
- [28] SANTOS, R, W, F. **Estudo da Interação Aço/Atmosfera em Fornos de Tratamento Térmico.** Trabalho de Diplomação. Engenharia de Materiais. UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Setembro, 2002. 47 p.
- [29] SCHIEFLER, M.O.F. **Estudo Microestrutural e Eletroquímico de Revestimentos Metálicos Depositados por Aspersão Térmica.** Tese de Doutorado, POSMEC – Universidade Federal de Santa Catarina. 313p. 2004.
- [30] SCHNEIDER, P. SIEGMAMANN, HITZEC, R. **High Temperature Wear Behavior of Thermally Sprayed Hard metal Coating for Steam Valve Spindle Application.** International Thermal Spray Conference. 2002.
- [31] SIDHU, T,S. PRAKASH, S. AGRAWAL, R,D. **Hot Corrosion Studies of HVOF sprayed Cr₃C₂-NiCr and Ni-20Cr Coatings on Nickel-Based Superalloy at 900°C.** Surface&Coatings Technology. 20 de Dezembro de 2005.
- [32] SCHWETZKE, R. KREYE, H. **High Velocity Oxy-Fuel of Tungsten Carbide-Based Coatings.** Schweissen & Schneiden. Fevereiro, 2000.
- [33] STOTERAU, R.L. **Tribologia.** UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Mecânica. 2004.

- [34] STRUERS. www.struers.com – acessado em 26 de março de 2006.
- [35] SAHRAOUI, T. FENINECHE, N. MONTAVON, G. CODDET, C. **Structure and Wear Behavior of HVOF Sprayed Cr₃C₂-NiCr and WC-Co Coatings.** Materials&Design. 13 de Março de 2003.
- [36] SUEGAMA, P.H. **Microstructures of Coatings Obtained by High Velocity Oxygen-Fuel Spraying – HVOF.** ACTA Microscópica 159 a 163 – Volume 12 – pp 159 – 163, Dezembro, 2003.
- [37] SULZER METCO, The Coatings Company. www.sulzermetco.com – acessado em 23 de novembro de 2005.
- [38] TRACTEBEL MANUTENÇÃO E SERVIÇOS TMS. **Manual de Operação das Usinas Termoelétricas do Complexo Jorge Lacerda** – Janeiro 2002. 173p.
- [39] VALENTINELLI, L. LORETO, A. VALENTE, T. FEDRIZZI, L. **Tribological Behavior at High Temperature of Cermets Coatings.** Universidade de Udine – Itália, 7 p. Abril, 2002.
- [40] ZUM-GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials.** ELSEVIER, Amsterdam, 1987. 560 p.
- [41] WELLMAN, R.G. NICHOLLS, J. R. **High Temperature Erosion-Oxidation Mechanisms, Maps and Models.** WEAR, 2003.

APÊNDICE

APÊNDICE 04 – ENSAIO DE DESGASTE PINO SOBRE DISCO 06

Esfera de Zircônia – Diâmetro 9,75 mm
 Disco – Aço AISI 422 - Nitretado
 Velocidade – 0,6 m/s
 Carga Aplicada (C) – 30 N
 Raio da Pista – 14,4 mm
 rpm – 399
 Peso Inicial do Disco – 118,7096 g

Distância Total Percorrida (S) – 2400 m
 Distância Entre Leituras – 200 m
 Temperatura – 24°C
 Umidade Relativa – 53%
 Rugosidade – 0,16 Ra
 Densidade do Material (ρ) – 0,0078 g/mm³
 Dureza HV_{0,5} – 1245

PERDA DE MASSA POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Disco (g)</u>	<u>Pino (g)</u>	<u>Distância (m)</u>
118,7096	40,9700	0
118,7087	40,9700	200
118,7070	40,9698	400
118,7065	40,9698	600
118,7057	40,9699	800
118,7052	40,9698	1000
118,7048	40,9698	1200
118,7042	40,9697	1400
118,7036	40,9697	1600
118,7026	40,9698	1800
118,7017	40,9698	2000
118,7011	40,9698	2200
118,7004	40,9699	2400

PERDA DE VOLUME DO DISCO POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Por Distância (g/mm³)</u>	<u>Volume Acumulado (g/mm³)</u>	<u>Distância (m)</u>
0	0	0
0,1153846	0,1153846	200
0,2179487	0,3333333	400
0,0641025	0,3974359	600
0,1025641	0,5000000	800
0,0641025	0,5641026	1000
0,0512820	0,6153846	1200
0,0769230	0,6923077	1400
0,0769230	0,7692308	1600
0,1282051	0,8974359	1800
0,1153846	1,0128205	2000
0,0769230	1,0897436	2200
0,0897435	1,1794872	2400

CÁLCULOS

$$Q = V / S = 1,1794 / 2400 = 4,91 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$$

$$k = Q \times HV / C = (4,91 \times 10^{-4} \times 1245) / 30 = 0,0203$$

$$\text{Volume Acumulado} = (118,7096 - 118,7004) / 0,0078 = 1,1794(\text{g/mm}^3)$$

APÊNDICE 04 – ENSAIO DE DESGASTE PINO SOBRE DISCO 07

Esfera de Zircônia – Diâmetro 9,75 mm
 Disco – Aço AISI 422 – Nitretado
 Velocidade – 0,6 m/s
 Carga Aplicada (C) – 30 N
 Raio da Pista – 14,4 mm
 rpm – 399
 Peso Inicial do Disco – 124,2633 g

Distância Total Percorrida (S) – 2400 m
 Distância Entre Leituras – 200 m
 Temperatura – 24°C
 Umidade Relativa – 53%
 Rugosidade – 0,13 Ra
 Densidade do Material (ρ) – 0,0078 g/mm³
 Dureza HV_{0,5} – 1145

PERDA DE MASSA POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Disco (g)</u>	<u>Pino (g)</u>	<u>Distância (m)</u>
124,2633	40,9678	0
124,2614	40,9677	200
124,2611	40,9678	400
124,2605	40,9677	600
124,2599	40,9677	800
124,2593	40,9677	1000
124,2586	40,9676	1200
124,2580	40,9677	1400
124,2576	40,9677	1600
124,2566	40,9678	1800
124,2557	40,9678	2000
124,2550	40,9678	2200
124,2544	40,9678	2400

PERDA DE VOLUME DO DISCO POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Volume por Distância (g/mm³)</u>	<u>Volume Acumulado (g/mm³)</u>	<u>Distância (m)</u>
0	0	0
0,2435897	0,2435897	200
0,0384615	0,2820512	400
0,0769230	0,3589743	600
0,0769230	0,4358974	800
0,0769230	0,5128205	1000
0,0897435	0,6025641	1200
0,0769230	0,6794871	1400
0,0512820	0,7307692	1600
0,1282051	0,8589743	1800
0,1153846	0,9743589	2000
0,0897435	1,0641025	2200
0,0769230	1,1410256	2400

CÁLCULOS

$$Q = V / S = 1,1410 / 2400 = 4,75 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$$

$$k = Q \times HV / C = (4,75 \times 10^{-4} \times 1145) / 30 = 0,0181$$

$$\text{Volume Acumulado} = (24,2633 - 124,2544) / 0,0078 = 1,1410(\text{g/mm}^3)$$

APÊNDICE 04 – ENSAIO DE DESGASTE PINO SOBRE DISCO 08

Esfera de Zircônia – Diâmetro 9,75 mm
 Disco – Aço AISI 422 – Nitretado
 Velocidade – 0,6 m/s
 Carga Aplicada (C) – 30 N
 Raio da Pista – 14,4 mm
 rpm – 399
 Peso Inicial do Disco – 130,1925 g

Distância Total Percorrida (S) – 2400 m
 Distância Entre Leituras – 200 m
 Temperatura – 24°C
 Umidade Relativa – 53%
 Rugosidade – 0,18 Ra
 Densidade do Material (ρ) – 0,0078 g/mm³
 Dureza HV_{0,5} – 1315

PERDA DE MASSA POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Disco (g)</u>	<u>Pino (g)</u>	<u>Distância (m)</u>
130,1925	40,9665	0
130,1914	40,9666	200
130,1909	40,9666	400
130,1896	40,9665	600
130,1883	40,9666	800
130,1875	40,9665	1000
130,1863	40,9666	1200
130,1854	40,9664	1400
130,1842	40,9665	1600
130,1835	40,9665	1800
130,1824	40,9666	2000
130,1817	40,9665	2200
130,1810	40,9665	2400

PERDA DE VOLUME DO DISCO POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Por Distância (g/mm³)</u>	<u>Volume Acumulado (g/mm³)</u>	<u>Distância (m)</u>
0	0	0
0,1410256	0,1410256	200
0,0641025	0,2051282	400
0,1666666	0,3717948	600
0,1666666	0,5384615	800
0,1025641	0,6410256	1000
0,1538461	0,7948717	1200
0,1153846	0,9102564	1400
0,1538461	1,0641025	1600
0,0897435	1,1538461	1800
0,1410256	1,2948717	2000
0,0897435	1,3846153	2200
0,0897435	1,4743589	2400

CÁLCULOS

$$Q = V / S = 1,4774 / 2400 = 6,14 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$$

$$k = Q \times HV / C = (6,14 \times 10^{-4} \times 1315) / 30 = 0,0269$$

$$\text{Volume Acumulado} = (130,1925 - 130,1810) / 0,0078 = 1,4774 \text{ (g/mm}^3\text{)}$$

APÊNDICE 04 – ENSAIO DE DESGASTE PINO SOBRE DISCO 09

Esfera de Zircônia – Diâmetro 9,75 mm
 Disco – Aço AISI 422 – Aspergido Cr₃C₂-NiCr
 Velocidade – 0,6 m/s
 Carga Aplicada (C) – 30 N
 Raio da Pista – 14,4 mm
 Rpm – 399
 Peso Inicial do Disco – 196,6348 g

Distância Total Percorrida (S) – 2400 m
 Distância Entre Leituras – 200 m
 Temperatura – 24°C
 Umidade Relativa – 53%
 Rugosidade – 0,16 Ra
 Densidade do Material (ρ) – 0,0066 g/mm³
 Dureza HV_{0,5} – 1105

PERDA DE MASSA POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Disco (g)</u>	<u>Pino (g)</u>	<u>Distância (m)</u>
196,6348	40,9344	0
1966330	40,9342	200
196,6322	40,9344	400
196,6313	40,9343	600
196,6303	40,9343	800
196,6294	40,9342	1000
196,6283	40,9343	1200
196,6276	40,9343	1400
196,6268	40,9342	1600
196,6254	40,9343	1800
196,6242	40,9341	2000
196,6233	40,9341	2200
196,6222	40,9340	2400

PERDA DE VOLUME DO DISCO POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Por Distância (g/mm³)</u>	<u>Volume Acumulado (g/mm³)</u>	<u>Distância (m)</u>
0	0	0
0,2727272	0,2727273	200
0,1212121	0,3939394	400
0,1363636	0,5303030	600
0,1515151	0,6818182	800
0,1363636	0,8181818	1000
0,1666666	0,9848485	1200
0,1060606	1,0909091	1400
0,1212121	1,2121212	1600
0,2121212	1,4242424	1800
0,1818181	1,6060606	2000
0,1363636	1,7424242	2200
0,1666666	1,9090909	2400

CÁLCULOS

$$Q = V / S = 1,9090 / 2400 = 7,95 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{m}$$

$$k = Q \times HV / C = (7,95 \times 10^{-4} \times 1105) / 30 = 0,0292$$

$$\text{Volume Acumulado} = (196,6348 - 196,6222) / 0,0066 = 1,9090(\text{g/mm}^3)$$

APÊNDICE 04 – ENSAIO DE DESGASTE PINO SOBRE DISCO 10

Esfera de Zircônia – Diâmetro 9,75 mm
 Disco – Aço AISI 422 – Aspergido Cr₃C₂ - NiCr
 Velocidade – 0,6 m/s
 Carga Aplicada (C) – 30 N
 Raio da Pista – 14,4 mm
 Rpm – 399
 Peso Inicial do Disco – 198,8534 g

Distância Total Percorrida (S) – 2400 m
 Distância Entre Leituras – 200 m
 Temperatura – 24°C
 Umidade Relativa – 53%
 Rugosidade – 0,11 Ra
 Densidade do Material (ρ) – 0,0066 g/mm³
 Dureza HV_{0,5} – 1125

PERDA DE MASSA POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Disco (g)</u>	<u>Pino (g)</u>	<u>Distância (m)</u>
198,8534	40,9380	0
198,8518	40,9378	200
198,8506	40,9378	400
198,8492	40,9377	600
198,8478	40,9378	800
198,8470	40,9377	1000
198,8463	40,9378	1200
198,8456	40,9376	1400
198,8443	40,9377	1600
198,8436	40,9377	1800
198,8427	40,9376	2000
198,8419	40,9379	2200
198,8411	40,9378	2400

PERDA DE VOLUME DO DISCO POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Por Distância (g/mm³)</u>	<u>Volume Acumulado (g/mm³)</u>	<u>Distância (m)</u>
0	0	0
0,2424242	0,2424242	200
0,1818181	0,4242424	400
0,2121212	0,6363636	600
0,2121212	0,8484848	800
0,1212121	0,9969670	1000
0,1060606	1,0757576	1200
0,1060606	1,1818182	1400
0,1969696	1,3787879	1600
0,1060606	1,4848485	1800
0,1363636	1,6212121	2000
0,1212121	1,7424242	2200
0,1212121	1,8636364	2400

CÁLCULOS

$$Q = V / S = 1,8636 / 2400 = 7,76 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{m}$$

$$k = Q \times HV / C = (7,76 \times 10^{-4} \times 1125) / 30 = 0,0291$$

$$\text{Volume Acumulado} = (198,8534 - 198,8411) / 0,0066 = 1,8636(\text{g/mm}^3)$$

APÊNDICE 04 – ENSAIO DE DESGASTE PINO SOBRE DISCO 11

Esfera de Zircônia – Diâmetro 9,75 mm
 Disco – Aço AISI 422 – Aspergido Cr₃C₂ - NiCr
 Velocidade – 0,6 m/s
 Carga Aplicada (C) – 30 N
 Raio da Pista – 14,4 mm
 rpm – 399
 Peso Inicial do Disco – 198,3173 g

Distância Total Percorrida (S) – 2400 m
 Distância Entre Leituras – 200 m
 Temperatura – 24°C
 Umidade Relativa – 53%
 Rugosidade – 0,15 Ra
 Densidade do Material (ρ) – 0,0066 g/mm³
 Dureza HV_{0,5} – 1088

PERDA DE MASSA POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Disco (g)</u>	<u>Pino (g)</u>	<u>Distância (m)</u>
198,3173	40,9439	0
198,3160	40,9438	200
198,3145	40,9438	400
198,3140	40,9437	600
198,3134	40,9438	800
198,3125	40,9437	1000
198,3119	40,9436	1200
198,3112	40,9437	1400
198,3102	40,9436	1600
198,3092	40,9436	1800
198,3084	40,9438	2000
198,3073	40,9437	2200
198,3064	40,9436	2400

PERDA DE VOLUME DO DISCO POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Por Distância (g/mm³)</u>	<u>Volume Acumulado (g/mm³)</u>	<u>Distância (m)</u>
0	0	0
0,1969696	0,1969697	200
0,2272727	0,4242424	400
0,0757575	0,5000000	600
0,0909090	0,5909091	800
0,1363636	0,7272727	1000
0,0909090	0,8181818	1200
0,1060606	0,9242424	1400
0,1515151	1,0757576	1600
0,1515151	1,2272727	1800
0,1212121	1,3484848	2000
0,1666666	1,5151515	2200
0,1363636	1,6515152	2400

CÁLCULOS

$$Q = V / S = 1,6515 / 2400 = \mathbf{6,88 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{m}}$$

$$k = Q \times HV / C = (7,95 \times 10^{-4} \times 1088) / 30 = \mathbf{0,0249}$$

$$\text{Volume Acumulado} = (196,6348 - 196,6222) / 0,0066 = \mathbf{1,6515(\text{g/mm}^3)}$$

APÊNDICE 04 – ENSAIO DE DESGASTE PINO SOBRE DISCO 12

Esfera de Zircônia – Diâmetro 9,75 mm	Distância Total Percorrida (S) – 2400 m
Disco – Aço AISI 422 – Aspergido Cr ₃ C ₂ - NiCr + Aquecido	Distância Entre Leituras – 200 m
Velocidade – 0,6 m/s	Temperatura – 24°C
Carga Aplicada (C) – 30 N	Umidade Relativa – 53%
Raio da Pista – 14,4 mm	Rugosidade – 0,50 Ra
rpm – 399	Densidade do Material (ρ) – 0,0066 g/mm ³
Peso Inicial do Disco – 178,1087 g	Dureza HV _{0,5} – 1090

PERDA DE MASSA POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Disco (g)</u>	<u>Pino (g)</u>	<u>Distância (m)</u>
178,1087	40,8939	0
178,1078	40,8937	200
178,1071	40,8936	400
178,1053	40,8924	600
178,1046	40,8908	800
178,1039	40,8860	1000
178,1030	40,8813	1200
178,1025	40,8789	1400
178,1014	40,8672	1600
178,1008	40,8496	1800
178,1000	40,8270	2000
178,0988	40,8058	2200
178,0970	40,7820	2400

PERDA DE VOLUME DO DISCO POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Por Distância (g/mm³)</u>	<u>Volume Acumulado (g/mm³)</u>	<u>Distância (m)</u>
0	0	0
0,1363636	0,1363636	200
0,1060606	0,2424242	400
0,2727272	0,5151515	600
0,1060606	0,6212121	800
0,1060606	0,7272727	1000
0,1363636	0,8636364	1200
0,0757575	0,9393939	1400
0,1666666	1,1060606	1600
0,0909090	1,1969697	1800
0,1212121	1,3181818	2000
0,1818181	1,5000000	2200
0,2727272	1,7727273	2400

CÁLCULOS

$$Q = V / S = 1,7727 / 2400 = 7,38 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{m}$$

$$k = Q \times HV / C = (7,38 \times 10^{-4} \times 1090) / 30 = 0,0268$$

$$\text{Volume Acumulado} = (178,1087 - 178,0970) / 0,0066 = 1,7727 \text{(g/mm}^3\text{)}$$

APÊNDICE 04 – ENSAIO DE DESGASTE PINO SOBRE DISCO 13

Esfera de Zircônia – Diâmetro 9,75 mm	Distância Total Percorrida (S) – 2400 m
Disco – Aço AISI 422 – Aspergido Cr ₃ C ₂ - NiCr + Aquecido	Distância Entre Leituras – 200 m
Velocidade – 0,6 m/s	Temperatura – 24°C
Carga Aplicada (C) – 30 N	Umidade Relativa – 53%
Raio da Pista – 14,4 mm	Rugosidade – 0,29 Ra
rpm – 399	Densidade do Material (ρ) – 0,0066 g/mm ³
Peso Inicial do Disco – 177,4907 g	Dureza HV _{0,5} – 1085

PERDA DE MASSA POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Disco (g)</u>	<u>Pino (g)</u>	<u>Distância (m)</u>
177,4907	41,2658	0
177,4899	41,2653	200
177,4887	41,2649	400
177,4879	41,2643	600
177,4868	41,2622	800
177,4862	41,2592	1000
177,4849	41,2511	1200
177,4843	41,2373	1400
177,4837	41,2175	1600
177,4831	41,1961	1800
177,4814	41,1724	2000
177,4797	41,1546	2200
177,4790	41,1272	2400

PERDA DE VOLUME DO DISCO POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Por Distância (g/mm³)</u>	<u>Volume Acumulado (g/mm³)</u>	<u>Distância (m)</u>
0	0	0
0,1212121	0,1212121	200
0,1818181	0,3030303	400
0,1212121	0,4242424	600
0,1666666	0,5909091	800
0,0909090	0,6818182	1000
0,1969696	0,8787879	1200
0,0909090	0,9696970	1400
0,0909090	1,0606061	1600
0,0909090	1,1515152	1800
0,2575757	1,4090909	2000
0,2575757	1,6666667	2200
0,1060606	1,7727273	2400

CÁLCULOS

$$Q = V / S = 1,7727 / 2400 = 7,38 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{m}$$

$$k = Q \times HV / C = (7,38 \times 10^{-4} \times 1085) / 30 = 0,0267$$

$$\text{Volume Acumulado} = (177,4907 - 177,4790) / 0,0066 = 1,7727 \text{(g/mm}^3\text{)}$$

APÊNDICE 04 – ENSAIO DE DESGASTE PINO SOBRE DISCO 14

Esfera de Zircônia – Diâmetro 9,75 mm	Distância Total Percorrida (S) – 2400 m
Disco – Aço AISI 422 – Aspergido Cr ₃ C ₂ - NiCr + Aquecido	Distância Entre Leituras – 200 m
Velocidade – 0,6 m/s	Temperatura – 24°C
Carga Aplicada (C) – 30 N	Umidade Relativa – 53%
Raio da Pista – 14,4 mm	Rugosidade – 0,32Ra
rpm – 399	Densidade do Material (ρ) – 0,0066 g/mm ³
Peso Inicial do Disco – 178,5804 g	Dureza HV _{0,5} – 1157

PERDA DE MASSA POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Disco (g)</u>	<u>Pino (g)</u>	<u>Distância (m)</u>
178,5804	41,1270	0
178,5796	41,1268	200
178,5792	41,1254	400
178,5785	41,1255	600
178,5775	41,1243	800
178,5762	41,1240	1000
178,5702	41,1188	1200
178,5698	41,1210	1400
178,5694	41,1192	1600
178,5693	41,1192	1800
178,5691	41,1098	2000
178,5690	41,1096	2200
178,5689	41,1296	2400

PERDA DE VOLUME POR DISTÂNCIA PERCORRIDA

<u>Volume por Distância (g/mm³)</u>	<u>Volume Acumulado (g/mm³)</u>	<u>Distância</u>
0	0	0
0,1212121	0,1212121	200
0,0606060	0,1818182	400
0,1060606	0,2878788	600
0,1515151	0,4393939	800
0,1969969	0,6363636	1000
0,9090909	1,5454545	1200
0,0606060	1,6060606	1400
0,0606060	1,6666667	1600
0,0151515	1,6818182	1800
0,0303030	1,7121212	2000
0,0151515	1,7272727	2200
0,0151515	1,742424	2400

CÁLCULOS

$$Q = V / S = 1,7424 / 2400 = 7,26 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{m}$$

$$k = Q \times HV / C = (7,26 \times 10^{-4} \times 1157) / 30 = 0,0279$$

$$\text{Volume Acumulado} = (178,5804 - 178,5689) / 0,0066 = 1,7424 \text{ (g/mm}^3\text{)}$$

APÊNDICE 05 – CUSTOS DA DISSERTAÇÃO

HISTÓRICO	R\$
Aspersão – REVESTEEL Revestimentos Ltda.	3.200,00
Alimentação / Hospedagem – Pinhais – PR (2 dias)	315,00
Transporte	280,00
Ensaio de desgaste – UDESC	600,00
Alimentação / Hospedagem – Joinville – SC (5 dias)	445,00
Transporte	185,00
Têmpera e Revenido – BRASIMET – São Paulo	170,00
Nitretação – BRASIMET	298,00
Alimentação / Hospedagem – São Paulo – SP (2 dias)	237,00
Transporte	580,00
Material dos corpos de prova – AISI 422	630,00
Material dos corpos de prova – SAE 1045	49,00
Usinagem – torno – 09 horas (máquina + operador)	175,00
Usinagem – fresa – 03 horas (máquina + operador)	58,50
Usinagem – retífica – 05 horas (máquina + operador)	97,00
Material SAE 1045 – Latão – dispositivos tribômetro (Stouterau)	106,00
Usinagem – torno – 04 horas (máquina + operador)	78,00
Usinagem – fresa – 08 horas (máquina + operador)	156,00
Usinagem – plaina – 03 horas (máquina + operador)	58,50
Material SAE 8640 – dispositivo para ensaio de adesão	88,00
Usinagem – torno – 03 horas (máquina + operador)	58,50
Usinagem – fresa – 06 horas (máquina + operador)	117,00
Cromagem do dispositivo	65,00
Aspersão – RIJEZA Metalurgia Ltda.	800,00
Usinagem – torno – 2 horas	39,00
Transporte	95,00
Análises químicas – USIPE – Içara – SC	450,00
Alimentação – 01 dia	23,00
Transporte	55,00
Metalografia UFSC	
Lixas / Panos de Polimento / Reagentes / Resina	2.700,00
Cut-off / Politrizes / (20 horas)	
Microscópio – 15 horas	
Durômetro (microdureza HV) – 5 horas	1.170,00
Metalografia Alemanha – despesas correio	67,00
Ensaio de Tração – Adesão – SENAI – CTC – Criciúma – SP	300,00
Alimentação – 02 dias	56,00
Transporte	140,00
Ciclagem térmica – TRACTEBEL Energia SA – Laboratório	250,00
TOTAL	14.191,50

