

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS  
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DIÓRGENES RODRIGO FERREIRA RIBEIRO

AVALIAÇÃO DA SUPERFÍCIE E DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE DO DISCO  
DENTADO CONSIDERANDO DIFERENTES REVESTIMENTOS

SÃO LEOPOLDO

2013

Diórgenes Rodrigo Ferreira Ribeiro

AVALIAÇÃO DA SUPERFÍCIE E DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE DO DISCO  
DENTADO CONSIDERANDO DIFERENTES REVESTIMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial para a obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Mecânica na  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -  
UNISINOS.

Orientadora: Prof. Dra. Tatiana Louise Avila  
de Campos Rocha

São Leopoldo

2013

## RESUMO

Nas indústrias de tintas a grande maioria dos processos envolvem tanques de armazenagens, esteiras transportadoras, sistemas de agitações e uma grande quantidade de moinhos e tanques dispersadores munidos de discos dentados, equipamentos essenciais para que o produto final fique dentro das especificações de qualidade. Diante dessa realidade, especificamente nos processos de fabricação de massas lisas e texturizadas, a presença do mineral denominado Dolomita na fórmula, em contato direto com os discos rotativos torna-se um dos pontos cruciais do processo no que diz respeito à vida útil dos discos. O desgaste gerado nos discos acompanhado da diminuição da eficiência do processo produtivo é o fator que causa a maior parte das manutenções e paradas de máquina. A crescente demanda da indústria por redução de custos, aumento da produtividade e melhor qualidade estão entre as justificativas para que se busquem maneiras de melhorar o desempenho dos discos dispersores. Este trabalho contempla métodos práticos e teóricos com o objetivo de avaliar as superfícies dos dentes dos discos, projetadas para resistência ao desgaste. O foco orientado ao estudo do desgaste se deve ao fato que é o principal fator representativo nas falhas e redução da vida útil dos discos. Para isso, fez-se um estudo comparativo de caracterização e comportamento tribológico do disco utilizado na atualidade com duas novas propostas diferentes, uma com tratamento termoquímico de endurecimento superficial e a outra com deposição de revestimentos superficiais. O estudo utilizou o aço inoxidável martensítico AISI 420 aplicado no processo devido às características metalúrgicas particulares de sua família que permitem unir elevada dureza e resistência mecânica. O disco utilizado no processo atual contempla o aço inoxidável AISI 420 no estado recozido, apenas com revestimento superficial de cromo duro catalizado. Como já é sabido que o processo de revestimento com cromo eletrodepositado gera elevados níveis de cromo hexavalente ( $Cr^{+6}$ ), apresentando alto poder cancerígeno e de contaminação ambiental, além de necessitar de tratamento físico-químico antes de seu descarte. Baseou-se no histórico de dados obtidos nestas condições para compará-lo às duas novas propostas, a “Nitretação Gasosa” e o processo de “Aspersão térmica em alta velocidade (HVOF – *High Velocity Oxi-Fuel*) de Carbetto de Tungstênio”, mantendo-se as mesmas características operacionais de processo, visando obter um comparativo de mesma base para a comprovação final da melhor opção quanto à resistência ao desgaste e aumento da vida útil. As técnicas empregadas foram divididas em três etapas, sendo que na primeira foram realizadas pré-avaliações das características do disco antigo, tais

como: perfis de microdurezas, metalografias, obtenção da composição química, perfis de espessura dos filmes e caracterização da rugosidade em corpos de prova retirados nas mesmas condições da situação real e, na segunda etapa, as análises dos revestimentos foram realizadas diretamente nos dentes dos discos colocados no trabalho, onde a caracterização foi obtida através de comparativos de medições específicas dos principais parâmetros envolvidos: rugosidades Ra e Rz, comparativos dos desgastes visuais, tamanho e espessura dos dentes, adesão da camada, tenacidade e microdurezas. No final das avaliações, na terceira etapa realizou-se a avaliação dos resultados, com a qual foi possível perceber que a aplicação do revestimento de carbeto de tungstênio aspergido indica características competitivas de vida útil, em relação ao tratamento de nitretação gasosa e a eletrodeposição de cromo duro, podendo ser aplicado em todos os discos com algumas vantagens, como por exemplo, maior resistência ao desgaste, maior vida útil do disco, menor taxas de falhas em relação às manutenções e maior produtividade operacional.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tribologia. Desgaste Superficial. Aço Inoxidável AISI 420. Nitretação Gasosa. Aspersão Térmica HVOF.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço aos meus pais e irmão, Paulo Jorge Ribeiro, Nilva Cecília Ferreira Ribeiro e Fábio Ricardo Ferreira Ribeiro, que sempre me apoiaram e me deram forças nos momentos difíceis além de me incentivarem a estudar e buscar sempre novos desafios na minha vida profissional;

Agradeço também à minha noiva Ariane de Azevedo Cunha, por ser esta mulher maravilhosa, que teve muita paciência e compreensão durante estes anos de estudos e dedicação;

A todos os professores, pelos ensinamentos passados durante o curso e em especial a professora Dra. Tatiana Louise Avila de Campos Rocha que me orientou com dedicação, paciência e profissionalismo durante a realização deste trabalho;

Ao Sr. Engenheiro José Eduardo Teixeira Collovini, coordenador do departamento de engenharia na empresa que trabalho;

Aos colegas de trabalho, pelas dicas e ajuda na execução dos testes que serviram como base de estudo e coleta de dados deste trabalho;

Ao grande amigo e irmão, Sr Alexandre Muller Leão pelos notáveis serviços de correções ortográficas de todo o trabalho;

Ao proprietário da empresa Rijeza Indústria Metalúrgica LTDA, Sr. Darlan Geremia e o Sr Ismael Prestes, pela colaboração dos materiais e equipamentos cedidos para a aplicação do processo de aspersão térmica no disco em teste;

Aos funcionários da empresa Metaltécnica Metalúrgica LTDA, envolvidos no processo de tratamento térmico de nitretação gasosa realizada no disco dentado utilizado;

Aos amigos e colegas, Jacson de Castro e Éder Fernandes que me ajudaram nas atividades práticas no laboratório de Metalurgia Física e Metalografia, e também ao Guilherme Luís Procksch da Silveira que me auxiliou no laboratório de Metrologia possibilitando a busca dos resultados;

E por fim, agradeço a Universidade do Vale do Rio dos Sinos, por disponibilizar ambientes adequados ao estudo, com qualidade e recursos laboratoriais necessários ao desenvolvimento das atividades.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – “Masseirão”: 2 motores, 1 unidade hidráulica, 1 âncora e 4 discos .....	23
Figura 2 – Teste de consistência da massa lisa.....	24
Figura 3 – Dolomita utilizada em <i>bags</i> 1000Kg e sacarias de 25Kg.....	26
Figura 4 – Dispersador tipo <i>cowles</i> .....	26
Figura 5 – Disco dispersor.....	27
Figura 6 – Posicionamento e velocidade do disco dispersor.....	28
Figura 7 – Padrões de fluxo Laminar e Turbulento .....	29
Figura 8 – Esquema de formação da camada passiva em superfície com arranhão .....	30
Figura 9 – Diagrama de fases binário Fe-Cr .....	31
Figura 10 – Efeito dos teores de Cr sobre o campo austenítico em ligas ferrosas .....	32
Figura 11 – Ilustração da não coincidência de descontinuidades em camadas diferentes ..	36
Figura 12 – Ilustração esquemática de diferentes tipos de poros e trincas .....	37
Figura 13 – Efeito da temperatura do revestimento de cromo eletroliticamente .....	40
Figura 14 – Diagrama de fases ferro-carboneto de ferro simplificado .....	42
Figura 15 – Princípio de deposição de um revestimento por aspersão térmica.....	45
Figura 16 – Características das camadas depositadas por aspersão térmica.....	45
Figura 17 – Classificação dos processos de aspersão térmica.....	47
Figura 18 – Princípio de funcionamento da tocha para HVOF .....	50
Figura 19 – Classificação dos modos de desgaste e suas subdivisões.....	55
Figura 20 – Processo de desgaste: (a) abrasivo; (b) adesivo, (c) erosivo e (d) cavitação...	56
Figura 21 – Ângulo de incidência de partícula sólida sobre a peça.....	58
Figura 22 – Representação da incidência da dolomita sobre o dente do disco .....	58
Figura 23 – Resultados experimentais para a erosão de um metal dúctil (linha contínua) e três mecanismos para remoção de material.....	59
Figura 24 – Mecanismos de desgaste para materiais frágeis.....	59
Figura 25 – Efeito do ângulo de impacto (taxa de desgaste materiais frágeis/dúcteis) .....	60
Figura 26 – Mecanismos básicos de erosão por partículas sólidas.....	61
Figura 27 – Escoamento turbulento de um fluido com partículas sólidas .....	63
Figura 28 – Etapas do desenvolvimento da pesquisa.....	65
Figura 29 – Corte dos corpos de prova avaliados em laboratório .....	66
Figura 30 – Desenho do masseirão onde são fabricadas as massas.....	68
Figura 31 – Desenho esquemático da identificação dos dentes dos discos avaliados.....	68
Figura 32 – Marca de identificação dos discos.....	69
Figura 33 – Amostras 1 e 2 (esquerda) e dentes do disco embutidos A e B(direita), enviadas para análise em laboratório .....	70
Figura 34 – Detalhe da máquina de eletroerosão a fio (A) e fixação do disco para o corte das amostras (B) .....	70
Figura 35 – Amostra do aço inoxidável fornecido pela empresa AÇOBRAS .....	71
Figura 36 – Amostras embutidas para análises metalográficas .....	72
Figura 37 – Lixadeira elétrica (A) e mesa para lixamento (B).....	73

Figura 38 – Máquina Politriz.....	73
Figura 39 – Dente de um disco antigo com revestimento de cromo duro.....	74
Figura 40 – Microscópio óptico utilizado para avaliações das espessuras e ME.....	75
Figura 41 – Microdurômetro Vickers modelo HM-101.....	76
Figura 42 – Durômetro da Unisinos utilizado para medições Rockell “A e B”.....	77
Figura 43 – Parâmetros de rugosidades Ra e Rz .....	77
Figura 44 – Discos utilizados nos testes .....	78
Figura 45 – Procedimento para medição dos dentes dos discos.....	79
Figura 46 – Alinhamento dos discos com o rugosímetro e a mesa .....	79
Figura 47 – Comparativos de qualidade da adesão (Norma VDI 3198/1991).....	80
Figura 48 – Durômetro Vickers HECKERT utilizado nos testes de ruptura .....	81
Figura 49 – Indentador cônico aplicado em revestimento .....	81
Figura 50 – Desenho do disco com as posições medidas.....	82
Figura 51 – Passo a passo das posições medidas do dente .....	83
Figura 52 – Posicionamento da câmera digital para obtenção das imagens dos dentes .....	84
Figura 53 – Imagem obtida do dente novo.....	84
Figura 54 – Imagem obtida do dente já desgastado.....	85
Figura 55 – Medições dos dentes antes do uso (A), e depois do uso (B) .....	85
Figura 56 – Resultados obtidos com o software Image J.....	86
Figura 57 – Identificação do tempo de operação dos discos com cromo duro .....	86
Figura 58 – Disco e corpo de prova utilizado para as análises.....	88
Figura 59 – Etapas da execução da têmpera no Forno Ipsen T8 .....	89
Figura 60 – Forno tipo poço para nitretação gasosa .....	89
Figura 61 – Identificação do tempo de operação do disco com nitretação .....	90
Figura 62 – Processo de jateamento com óxido de alumínio no disco e CP.....	91
Figura 63 – Rugosímetro digital SJ 210 – Mitutoyo .....	92
Figura 64 – Dispositivos utilizados durante a aspersão térmica do disco e CP .....	92
Figura 65 – Aspersão no disco (A) e no Corpo de Prova (B) .....	93
Figura 66 – Unidade de controle TAFA-HP/HVOF – JP5000.....	94
Figura 67 – Identificação do tempo de operação do disco aspergido.....	95
Figura 68 – Microestrutura do corte transversal. Ampliação: 100x (A) e 400x (B), mostrando o material no estado não temperado .....	97
Figura 69 – Microestrutura do corte transversal. Ampliação: 400x (A) e 400x (B), mostrando o material no estado não temperado .....	98
Figura 70 – Medições das camadas do revestimento de cromo duro .....	98
Figura 71 – Espessuras do revestimento de cromo duro (dente do disco antigo) .....	99
Figura 72 – Problemas de qualidade superficial nos discos antigos.....	100
Figura 73 – Indentações Vickers com carga de 0,2Kgf (núcleo e camada).....	101
Figura 74 – Qualidade da adesão cromo duro (Rockwel A - 60kgf).....	104
Figura 75 – Ampliação da figura 74 (C) para visualizar fissuras HF1 e HF2.....	104
Figura 76 – Cargas de ruptura do revestimento de cromo duro .....	105
Figura 77 – Desgastes cromo duro evidenciados nos dentes do disco M1 (direito inferior) .....	110

Figura 78 – Desgastes cromo duro evidenciados nos dentes do disco M2 (esquerdo inferior) .....	111
Figura 79 – Microestruturas (A) aumento de 400x, (B) aumento de 1000x .....	112
Figura 80 – Espessuras nitretação (A), (B), (C) aumento de 200x ataque c/ Nital a 4%; (D) aumento de 400x ataque c/ Nital a 4%.....	113
Figura 81 – Camada branca e precipitados (A) aumento de 400x ataque c/ Nital a 4%; (B) aumento de 1000x ataque c/ Nital a 4%.....	114
Figura 82 – Camada efetiva (A) aumento de 200x ataque c/ Nital a 4%; (B) aumento de 200x.....	116
Figura 83 – Qualidade da adesão da nitretação (Rockwel A - 60kgf) .....	117
Figura 84 – Ampliação da figura 83 (B) para visualizar deslocamentos HF5.....	118
Figura 85 – Cargas de ruptura da camada de nitretação .....	119
Figura 86 – Ampliação da figura 85 (A) e (D) para visualizar rupturas superficiais .....	119
Figura 87 – Desgastes nitretação evidenciados nos dentes do disco M1 (direito inferior) .....	122
Figura 88 – Microestruturas (A) aumento de 100x, (B) aumento de 400x .....	123
Figura 89 – Micrografias da camada aspergida com WC por HVOF – ampliação (100x). .....	124
Figura 90 – CP padrão para testes comparativos (especificação para WC - 0,2mm).....	125
Figura 91 – Espessuras do carbeto de tungstênio (WC) - aumento de (200x) sem ataque. .....	125
Figura 92 – Qualidade da adesão da aspersão térmica (WC) - (Rockwel A - 60kgf) .....	127
Figura 93 – Ampliação da figura 92 (B) para visualizar deslocamentos HF5.....	128
Figura 94 – Cargas de ruptura da camada de carbeto de tungstênio.....	128
Figura 95 – Desgastes aspersão evidenciados nos dentes do disco M2 (esquerdo inferior) .....	132

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparativo dos desgastes das alturas h1 e h2 - (1065 horas) - Disco M1 ....	108
Gráfico 2 – Comparativo dos desgastes das alturas h1 e h2 - (1058 horas) - Disco M2 ....	108
Gráfico 3 – Comparativo dos desgastes das espessuras - (1065 horas) - Disco M1 .....	108
Gráfico 4 – Comparativo dos desgastes das espessuras - (1058 horas) - Disco M2 .....	109
Gráfico 5 – Comparativo dos desgastes da largura - (1065 horas) - Disco M1 .....	109
Gráfico 6 – Comparativo dos desgastes da largura - (1058 horas) - Disco M2 .....	109
Gráfico 7 – Perda de área por desgaste do disco M1 (1065 horas) .....	110
Gráfico 8 – Perda de área por desgaste do disco M2 (1058 horas) .....	111
Gráfico 9 – Curva de dureza na camada nitretada.....	116
Gráfico 10 – Comparativo dos desgastes das alturas h1 e h2 - (423 horas) - Disco M1 ....	121
Gráfico 11 – Comparativo dos desgastes das espessuras - (423 horas) - Disco M1 .....	121
Gráfico 12 – Comparativo dos desgastes da largura - (423 horas) - Disco M1 .....	122
Gráfico 13 – Perda de área por desgaste do disco M1 (423 horas) .....	123
Gráfico 14 – Comparativo dos desgastes das alturas h1 e h2 - (418 horas) - Disco M2 ....	130
Gráfico 15 – Comparativo dos desgastes das espessuras - (418 horas) - Disco M2 .....	131
Gráfico 16 – Comparativo dos desgastes da largura - (418 horas) - Disco M2 .....	131
Gráfico 17 – Perda de área por desgaste do disco M2 (418 horas) .....	132
Gráfico 18 – Durezas médias Vickers entre processos.....	133
Gráfico 19 – Rugosidades médias entre processos.....	134
Gráfico 20 – Desgastes superficiais por processo .....	135

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros da aspersão utilizados na deposição do WC .....	94
Tabela 2 – Análise da composição química do material utilizado nos discos antigos .....	96
Tabela 3 – Comparativo das análises da composição química dos materiais utilizados ....	97
Tabela 4 – Medidas de microdurezas Vickers (núcleo e camada dente superior com desgaste) .....	100
Tabela 5 – Medidas de microdurezas Vickers (camada dente sem desgaste) .....	101
Tabela 6 – HRB (100Kgf): Medidas durezas Rockwell B .....	102
Tabela 7 – Ra e Rz ( $\mu\text{m}$ ): Rugosidade dos dentes (disco direito inox 420 - cromo duro)..	103
Tabela 8 – Ra e Rz ( $\mu\text{m}$ ): Rugosidade dos dentes (disco esquerdo inox 420 - cromo duro) .....	103
Tabela 9 – Medições dos dentes do disco (CROMO DURO NOVO) direito inferior .....	106
Tabela 10 – Medições dos dentes do disco (CROMO DURO NOVO) esquerdo inferior .	106
Tabela 11 – Medições dos dentes do disco (CROMO DURO USADO) direito inferior ...	107
Tabela 12 – Medições dos dentes do disco (CROMO DURO USADO) esquerdo inferior	107
Tabela 13 – HV (0,2Kgf): Microdurezas Vickers na camada com nitretação .....	115
Tabela 14 – HV (0,2Kgf): Microdurezas Vickers na camada com nitretação irregular .....	115
Tabela 15 – Ra e Rz ( $\mu\text{m}$ ): Rugosidade dos dentes do disco nitretado.....	117
Tabela 16 – Medições dos dentes do disco - 19/09/2013 - (NITRETAÇÃO) .....	120
Tabela 17 – Medições dos dentes do disco - 30/10/2013 - (NITRETAÇÃO) .....	120
Tabela 18 – HV (0,2Kgf): Microdurezas Vickers na camada aspergida .....	126
Tabela 19 – Ra e Rz ( $\mu\text{m}$ ): Rugosidade dos dentes do disco aspergido .....	127
Tabela 20 – Medições dos dentes do disco - 19/09/2013 - (ASPERSÃO) .....	129
Tabela 21 – Medições dos dentes do disco - 30/10/2013 - (ASPERSÃO) .....	130

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio
ASM	American Society for Materials
ASTM	American Society for Testing and Materials
Bar	Unidade de pressão
CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Carbonato de Cálcio e Magnésio Natural
cc	Cilindradas
CLP	Controlador lógico programável
CP	Corpo de Prova
E	Taxa de erosão (g/g)
H	Dureza do material erodido (Pa);
Hp	Horse Power
HV	Vickers Hardness
HVOF	High Velocity Oxygen Fuel
Hz	Hertz
K	Constante;
Kw	Kilowatt
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
lc [mm]	Cutt-off
ME	Microestruturas
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscópio óptico
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OP	Ordem de produção
Psi	Pound force per Square Inch.
R	Rugosidade (perfil)
Ra [μm]	Rugosidade média
RPM	Unidade de Velocidade Angular (Rotações por minuto)
Rz [μm]	Amplitude média de rugosidade

SAE	Society of Automotive Engineers
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNISINOS	Universidade de Vale do Rio dos Sinos
v	Velocidade de impacto (m/s);
V	Volts
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WC	Carbeto de tungstênio
$\alpha$	Ângulo de incidência
$\gamma$	Campo de fase simples
$\delta$	Ferrita delta
P	Densidade do material erodido (kg/m <sup>3</sup> ).

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	18
1.2 OBJETIVOS .....	19
<b>1.2.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>19</b>
<b>1.2.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>19</b>
1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO .....	20
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>22</b>
2.1 FABRICAÇÃO DE TINTAS E MASSAS .....	22
<b>2.1.1 Fabricação de tintas arquitetônicas</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1.2 Fabricação de massas</b> .....	<b>23</b>
<b>2.1.3 Características da carga utilizada na massa (Dolomita)</b> .....	<b>25</b>
<b>2.1.4 Considerações gerais sobre Dispersão</b> .....	<b>26</b>
<b>2.1.5 Disco Dispersador</b> .....	<b>27</b>
2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS .....	29
<b>2.2.1 Aço Inoxidável Martensítico AISI 420</b> .....	<b>29</b>
<b>2.2.2 Diagrama de Equilíbrio Fe-Cr</b> .....	<b>31</b>
<b>2.2.3 Diagrama de Equilíbrio Fe-C-Cr</b> .....	<b>31</b>
2.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	32
2.4 TÊMPERA.....	33
2.5 REVENIMENTO.....	34
2.6 ENGENHARIA DE SUPERFÍCIES.....	35
<b>2.6.1 Cromo duro eletrodepositado</b> .....	<b>35</b>
2.6.1.1 Definições do cromo duro.....	37
2.6.1.2 Propriedades do cromo .....	39
2.6.1.3 Resistência ao Desgaste .....	39
<b>2.6.2 Nitretação</b> .....	<b>40</b>
2.6.2.1 Definições da nitretação .....	40
2.6.2.2 Processo de nitretação a gás.....	41
2.6.2.3 Durezas obtidas com a nitretação.....	43
2.6.2.4 Espessura da camada nitretada.....	43
2.6.2.5 Inconvenientes da nitretação.....	43
<b>2.6.3 Aspersão térmica (HVOF)</b> .....	<b>44</b>
2.6.3.1 Classificação dos processos.....	46
2.6.3.2 Principais aplicações .....	47
2.6.3.3 Limpeza e rugosidade do substrato .....	48
2.6.3.4 Preparação da superfície .....	49
2.6.3.5 HVOF - Aspersão a chama de alta velocidade .....	50
2.6.3.6 Pós-utilizados no processo.....	51
2.6.3.7 Porosidade.....	52
2.7 TRIBOLOGIA .....	53
<b>2.7.1 Definição de tribologia</b> .....	<b>53</b>
<b>2.7.2 Mecanismos do desgaste</b> .....	<b>54</b>

2.7.3 Desgaste erosivo.....	56
2.7.4 Erosão por partículas sólidas.....	57
2.7.5 Variáveis relativas ao impacto.....	62
2.7.6 Variáveis relativas à partícula erosiva.....	64
2.7.7 Variáveis do material.....	64
<b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>65</b>
3.1 DISCO ANTIGO (CROMO DURO).....	65
3.1.1 Escolha do material e definições dos métodos aplicados.....	66
3.1.2 Características químicas do aço inoxidável utilizado nos discos antigos.....	69
3.1.3 Comparativo e validação do aço inoxidável utilizado nos testes.....	70
3.1.4 Análise microestrutural do disco antigo.....	71
3.1.5 Comparativo microestrutural (disco antigo X aço inox utilizado nos testes).....	71
3.1.6 Avaliação das espessuras das camadas do disco antigo (com utilização).....	74
3.1.7 Avaliação das espessuras das camadas dos discos.....	74
3.1.8 Avaliação Microdureza Vickers (núcleo/camada do disco antigo com utilização).....	75
3.1.9 Comparativo Microdureza Vickers (disco antigo com utilização X disco antigo sem utilização).....	76
3.1.10 Comparativo e validação da dureza do aço inoxidável utilizado nos testes.....	76
3.1.11 Avaliação dos parâmetros de rugosidades dos discos.....	77
3.1.12 Adesão das camadas dos discos.....	79
3.1.13 Tenacidade das camadas dos discos.....	80
3.1.14 Medição dos dentes dos discos.....	82
3.2 DISCO NOVO 1 (NITRETAÇÃO GASOSA).....	87
3.2.1 Escolha do material e definições dos métodos aplicados.....	87
3.2.2 Descrição do processo realizado.....	88
3.2.3 Medição dos dentes do disco nitretado.....	90
3.3 DISCO NOVO 2 (CARBETO DE TUNGSTÊNIO).....	91
3.3.1 Deposição do Carbetto de Tungstênio pelo processo de HVOF.....	91
3.3.2 Preparação da superfície.....	91
3.3.3 Equipamentos e parâmetros do processo de HVOF.....	93
3.3.4 Medição dos dentes do disco aspergido.....	95
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>96</b>
4.1 DISCO REVESTIDO COM CROMO DURO.....	96
4.1.1 Características químicas do aço inoxidável utilizado nos discos antigos.....	96
4.1.2 Comparativo e validação do aço inoxidável utilizado nos testes.....	96
4.1.3 Análise microestrutural do disco antigo.....	97
4.1.4 Comparativo microestrutural (disco antigo X aço inox utilizado nos testes).....	97
4.1.5 Avaliação das espessuras das camadas do disco antigo (com utilização).....	98
4.1.6 Avaliação das espessuras das camadas do disco antigo (sem utilização).....	99
4.1.7 Avaliação da Microdureza Vickers (núcleo/camada do disco antigo com utilização).....	100
4.1.8 Comparativo Microdureza Vickers (disco antigo com utilização X disco	

antigo sem utilização).....	101
4.1.9 Comparativo e validação da dureza do aço inoxidável utilizado nos testes .....	102
4.1.10 Avaliação dos parâmetros de rugosidades do disco antigo .....	102
4.1.11 Adesão da camada de cromo duro do disco antigo .....	103
4.1.12 Tenacidade da camada de cromo duro do disco antigo .....	104
4.1.13 Medição dos dentes dos discos revestidos com cromo duro.....	105
4.1.14 Avaliação do desgaste.....	110
4.2 DISCO NOVO 1 (NITRETAÇÃO GASOSA).....	112
4.2.1 Comprovação da dureza após a têmpera .....	112
4.2.2 Análise microestrutural do disco nitretado.....	112
4.2.3 Avaliação das espessuras das camadas de nitretação .....	113
4.2.4 Avaliação Microdureza Vickers.....	114
4.2.5 Profundidade da camada efetiva .....	115
4.2.6 Avaliação dos parâmetros de rugosidades do disco nitretado .....	117
4.2.7 Adesão na camada nitretada.....	117
4.2.8 Tenacidade da camada nitretada.....	118
4.2.9 Medição dos dentes do disco nitretado .....	120
4.2.10 Avaliação do desgaste.....	122
4.3 DISCO NOVO 2 (CARBETO DE TUNGSTÊNIO) .....	123
4.3.1 Análise microestrutural do disco aspergido .....	123
4.3.2 Avaliação das espessuras das camadas aspergidas .....	125
4.3.3 Avaliação Microdureza Vickers.....	126
4.3.4 Avaliação dos parâmetros de rugosidades do disco aspergido .....	126
4.3.5 Adesão na camada aspergida .....	127
4.3.6 Tenacidade da camada aspergida.....	128
4.3.7 Medição dos dentes do disco aspergido .....	129
4.3.8 Avaliação do desgaste.....	131
4.4 COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS.....	133
4.4.1 Comparativos entre as microdurezas .....	133
4.4.2 Comparativos entre as rugosidades .....	133
4.4.3 Comparativos entre os desgastes .....	134
5 CONCLUSÕES.....	136
SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	138
REFERÊNCIAS.....	139
ANEXO A – FISPQ DA DOLOMITA .....	144
ANEXO B – RELATÓRIO METALOGRÁFICO 137/13A - (LAMEF-UFRGS).....	149
ANEXO C – CERTIFICADO DE QUALIDADE N° 7567/13- (AÇOBRAS) .....	164
ANEXO D – CERTIFICADO DE QUALIDADE N° 001.12.12 - (TECNOCROMO) 165	
ANEXO E – CERTIFICADO DE QUALIDADE N° 348389 - (METALTÉCNICA). 166	

## 1 INTRODUÇÃO

O trabalho em questão se propõe a estudar a aplicação do tratamento de nitretação gasosa e o revestimento protetor de carbeto de tungstênio (WC), através do processo de aspersão térmica conhecido por HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*) em um substrato de aço inoxidável martensítico AISI 420, em comparação aos discos dispersadores utilizados atualmente nas fábricas de tintas e massas arquitetônicas. O atual processo possui o mesmo substrato na condição sem tratamento térmico, porém com revestimento de cromo duro eletrodepositado.

O processo de fabricação de massas para estruturas arquitetônicas é composto por várias etapas, entre elas destaca-se a mistura, os controles finais de aprovação e a parte do enchimento. O objetivo da mistura é apenas formar a massa, que tem função de preenchimento. O processo básico da fabricação de uma massa consiste em primeiramente misturar a água com os aditivos, posteriormente adicionar o pigmento (quando necessário para os casos de massas coloridas), e adicionar a carga de pó que é o componente principal da fórmula da massa o qual dá a consistência ideal ao produto, especificada na ordem de produção (OP). Finalizando o lote, adiciona-se o espessante e a emulsão de resina.

A adição dos produtos que compõem a fórmula da massa é realizada dentro da masseirona, que é um equipamento de grande porte (lotes de até 320 embalagens), utilizada para fabricação de massas brancas lisas de alto giro em embalagens de 18 litros, conhecida comercialmente pela codificação 25110M.00 - MASSA CORRIDA BRANCA.

A masseirona possui uma unidade hidráulica misturadora, dotada de uma âncora e dois *cowles* com discos duplos. Os três eixos têm a rotação controlada através de inversores de frequência, sendo que os dois eixos menores onde estão fixados os discos dispersadores podem atingir até 1700 RPM. A rotação de trabalho é referenciada para cada caso, mas é definida em 1200 RPM para o tipo de massa referenciada. Por ser uma máquina mais robusta e apresentar maior poder de mistura, os produtos são versados em uma única dose e misturados por 30 minutos.

Ao término da mistura são realizados os controles de qualidade através de testes padrões de pH e consistência, que verifica a “viscosidade” e o peso específico da massa. Outros testes, como cor e propriedades decorativas são feitos particularmente. A finalização do processo se

dá através de um sistema eletrônico de enchimento onde é envasado em latas e o final da linha de produção termina com a paletização.

Como citado anteriormente, o processo de adição da carga de pó dentro da masseirona, é o principal elemento que deve ser considerado quando se associa aos problemas gerados devido a sua abrasividade em contato com as superfícies dos discos em alta rotação. O pó utilizado no processo de fabricação da massa é o carbonato de Cálcio e Magnésio  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , Dolomita, com granulometria de 325 mesh, aproximadamente 0,044mm.

Em função da alta abrasividade da dolomita, a principal propriedade que se espera incrementar ao novo processo é a resistência ao desgaste erosivo criado por partículas sólidas impactantes repetidamente na superfície dos dentes dos discos. Sua ocorrência é esperada quando as partículas duras contidas num meio líquido ou fluido incidem na face do dente de acordo com a velocidade do processo. Com a melhoria das propriedades citadas, visa-se aumentar a vida útil dos discos, e diminuir as paradas de manutenções para troca dos discos, garantindo a eficiência do processo produtivo.

O foco deste trabalho na resistência ao desgaste se deve ao fato de que o desgaste erosivo, neste caso específico, é o fator causador das falhas e redução da vida útil dos discos utilizados. O desgaste dos discos dispersores se dá através de um efeito tribológico que pode ser definido como a perda ou remoção progressiva de material da superfície e também do núcleo do substrato, quando há um nível acentuado do desgaste. De acordo com os níveis destes desgastes, ocorre a mudança dos perfis dos dentes do disco, causando deformações plásticas severas que levam a inutilização dos mesmos necessitando a troca imediata. Desta maneira, o desgaste gera as falhas, pois diminuem a eficiência dos discos aumentando de imediato os tempos produtivos de fabricação. A crescente competitividade entre empresas em busca dos melhores preços e melhores produtos, aumento da produtividade com o mantimento da melhor qualidade estão entre as justificativas para que se busquem maneiras de aumentar o desempenho final do tempo de vida do disco dispersador.

Em função do foco do trabalho ser o desgaste erosivo e a proposta ser uma comparação entre as propriedades e características dos materiais utilizados, procurou-se avaliar o comportamento em desgaste observado nos testes tribológicos após a implantação das propostas de melhoria. Para tanto se traçou a curva do desgaste gerado comparando as três situações referenciadas, ou seja: \* substrato de aço inox AISI 420 com cobertura de cromo duro, substrato de aço inox AISI 420 com tratamento de nitretação gasosa e o substrato de aço inox AISI 420 com revestimento de carbeto de tungstênio (WC).

A necessidade da escolha do material do substrato ser o aço inoxidável martensítico AISI 420, deve-se a premissa de se manter as mesmas características já conhecidas do processo em relação aos históricos dos desgastes e principalmente pelas características metalúrgicas específicas que garantem uma elevada dureza, boa resistência mecânica e resistência à corrosão, apesar de não ser um meio suscetível ao ataque corrosivo e também pela sua capacidade de endurecimento através de tratamento térmico de têmpera e revenimento para corrigir a tenacidade de acordo com a temperatura.

A escolha da proposta de utilização do tratamento superficial de nitretação gasosa ocorreu devido à garantia de um excelente controle da dureza através do controle da adição do nitrogênio (através da amônia), garantindo as condições de alinhamento do disco, sem empenamentos e mantendo as condições do núcleo inalteradas, além também de poder ser utilizada como base para uma deposição posterior de revestimentos, resultando em melhores desempenhos finais.

A outra referência comparativa à eletrodeposição de cromo duro utilizada neste trabalho foi a aplicação de revestimento de carbetos de tungstênio (WC) por aspersão térmica, especialmente aplicados por HVOF, garantindo alguns benefícios em comparação ao processo atual, tais como a redução da relação custo benefício relacionada a vida útil e a maior resistência superficial das peças tendo em vista a fragilização ocorrida no processo de cromo duro.

Em relação às duas propostas sugeridas para o processo aplicado dentro da empresa, o que foi avaliado e levado em consideração é que atualmente há uma intensa aclamação da sociedade e órgãos públicos referentes às questões ambientais e da saúde humana, que nos levam a propor novos processos e formas de tratamento que atendam as mesmas necessidades comparadas à eletrodeposição do cromo duro, porém, sem que haja nenhuma exposição aos riscos conhecidos gerados por ela. Ou seja, apesar do processo de aplicação desse revestimento ser utilizado em grande escala pelas empresas devido a sua aparência e resistência ao desgaste abrasivo e corrosivo, o processo galvânico possui substâncias com características toxicológicas como o cromo hexavalente em seu banho, que é cancerígeno. Por esses motivos, em novos projetos e trabalhos, quando as características do processo assim o admitirem, devem-se propor novas alternativas ao uso do cromo duro.

Os revestimentos produzidos nos dentes do disco e em amostras deste trabalho foram realizados pela empresa Rijeza Indústria Metalúrgica LTDA, e os tratamentos térmicos de têmpera, revenido e nitretação gasosa tanto nos dentes como nos corpos de provas, foram

realizados pela empresa Metaltécnica Metalúrgica LTDA. A avaliação da composição química do substrato que estava em processo, foi realizado no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

A revisão bibliográfica buscou primeiramente no capítulo (2.1) estabelecer um entendimento global dos impactantes do processo e o meio físico aos quais os discos estão sendo expostos, tais como: fabricação das massas, características do abrasivo, entendimentos da dispersão e características dos discos dispersadores. Nos capítulos (2.2 ao 2.5) utilizou-se das especificações e caracterizações técnicas inerentes aos processos de tratamento térmico de têmpera e revenimento, juntamente com a caracterização das propriedades mais importantes do substrato de aço inox AISI 420, com o intuito de dar sustentação e embasamento às novas propostas. No capítulo seguinte (2.6) versando sobre a engenharia de superfícies, tratou-se de falar sobre os conceitos e características referentes às novas propostas testadas (nitretação gasosa e aspersão térmica), e também sobre a situação atual, processo de cromo duro eletrodepositado. Após todo o embasamento técnico transmitido com os capítulos anteriores, entra-se no capítulo sobre a Tribologia (2.7), onde foram apresentados os conceitos da tribologia e todas as definições referentes aos tipos de desgaste, dando ênfase ao desgaste do tipo erosivo, foco principal deste trabalho. No capítulo (3) Procedimento experimental, apresenta-se toda a parte dos métodos e materiais utilizados, onde se verificou como as propriedades do aço inoxidável martensítico AISI 420 (microestrutura, rugosidade, microdureza Vickers, tenacidade e adesão da camada foram alteradas em função da nitretação gasosa e também como ficaram estes parâmetros após a realização da aspersão térmica por HVOF. Nos capítulos (4) e (5) Resultados e conclusões finais, são apresentados os resultados obtidos e realizado uma explanação geral dos quesitos importantes que influenciaram os resultados e finalizado com uma conclusão dos testes realizados.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Com as amplas opções de tipos de materiais e processos a serem aplicados da melhor forma pelos engenheiros, nas mais diversas situações que nos expomos diariamente, é de suma importância que estejamos sempre preparados e buscando melhorias em processos, aumento de vida útil dos componentes, ganho de produção, entre outros exemplos, para que

possamos realizar o desenvolvimento dos processos eficientes, garantindo o atendimento das propriedades mecânicas solicitadas nos projetos.

Diante destas informações, a proposta deste trabalho, surgiu por meio de uma realidade vivida dentro da empresa no que se refere ao término prematuro das condições de uso dos discos dispersores, devido ao desgaste erosivo causado pela massa acrílica em agitação. Para tal processo, até então não tinha sido submetido a nenhuma avaliação ou proposta de melhoria.

Sendo assim, a motivação oportunizada por este trabalho visa aplicar os conhecimentos obtidos durante a formação acadêmica, para definir novas propostas de melhoria de processo, com o intuito de se ter um desenvolvimento de novos métodos teóricos e práticos para confrontar com os dados obtidos com o processo antigo. A partir destes testes, busca-se relacionar tempos de processo, rotação dos discos, material do disco, tratamento térmico aplicado, revestimentos, tipo do abrasivo e estabelecer os parâmetros operacionais ideais para esta atividade, baseando-se nas principais variáveis.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho das características tribológicas, especificamente a resistência ao desgaste erosivo dos discos dentados de aço inoxidável martensítico AISI 420, considerando diferentes revestimentos.

Este procedimento experimental visa melhorar as propriedades de resistência a erosão, aumentar a vida útil dos discos utilizados no processo, otimizar a produção de massa acrílica e diminuir as despesas envolvidas no processo de manutenção corretiva para as trocas dos discos deteriorados.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Como a pesquisa toda é referenciada através da avaliação das propostas de melhoria de processos implantadas na empresa, os objetivos específicos são analisados com ênfase nos resultados obtidos nos respectivos testes, sendo:

- a) Avaliar o comportamento do processo de aspersão térmica para revestir o disco de aço inoxidável martensítico AISI 420, com camada de carbetto de tungstênio;
- b) Avaliar o comportamento do tratamento termoquímico de nitretação gasosa aplicado em aços inoxidáveis martensíticos AISI 420;
- c) Avaliar a resistência ao desgaste erosivo sofrido pelos discos, de acordo com seus respectivos revestimentos protetores e tratamento;
- d) Executar o comparativo entre os resultados práticos obtidos com o esperado pelas referências.

### 1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O monitoramento e atendimento da qualidade final do produto acabado dentro de uma indústria, utilizando-se de acompanhamentos desde a seleção das matérias primas para o desenvolvimento dos projetos, juntamente com o foco à redução de custos tornaram-se fundamental para o atendimento às necessidades dos clientes se mantendo uma empresa competitiva. Diante deste conceito de importância do conhecimento das propriedades das matérias primas, nos estudos de melhorias de processos é de suma importância o conhecimento das características mecânicas que o material deverá apresentar e proporcionar na concepção dos projetos. O conhecimento aprofundado dos diversos tipos de aços, suas características de utilização, sua versatilidade, as características individuais de acordo com suas classes e os tipos de processos ao qual eles possam passar, tipo: usinabilidade, soldabilidade, conformação e possibilidade de ser tratado termicamente entre outros, são itens primordiais no momento da realização de um novo projeto ou melhoria de processo.

Frente ao problema encontrado e utilizado como tema principal deste trabalho, os tratamentos térmicos possibilitam mudanças nas características superficiais alterando as propriedades mecânicas do aço em estudo de acordo com a sua aplicação. A têmpera do aço inoxidável permite aumentar a dureza do disco mantendo-o muito tenaz, propriedade não muito exigida neste caso devido à fragilidade. Sendo assim, deve ser realizado o tratamento de revenido, para equalizarmos as propriedades de dureza e a tenacidade.

Com a realização simples do aumento da dureza do substrato, técnica que não era aplicada nos discos antigos, através da têmpera e revenimento do aço conhecido com martensítico que aceita este tipo de tratamento, já se consegue um ganho adicional nos

quesitos de aumento da vida útil em função da exposição ao desgaste erosivo no meio aos quais os discos trabalham.

Frente às avaliações realizadas, procura-se aplicar os conhecimentos pesquisados para realização deste estudo, e utilizar duas técnicas de melhoria do processo além da têmpera e revenimento, através da aplicação do tratamento de aumento da dureza superficial através da nitretação gasosa e a aplicação de aspensão térmica como deposição de revestimento superficial. Com aplicação do processo de aspensão térmica e nitretação gasosa, deseja-se a diminuição das manutenções corretivas e das paradas de produção desnecessárias, melhoria nos processos de produção, conseguindo com isso o crescimento das vendas da empresa com menores custos finais.

É importante a realização deste trabalho dentro das empresas, uma vez que os conceitos aplicados e princípios básicos estão diretamente ligados a Engenharia Mecânica, dando respostas consistentes através das propostas de melhorias no processo produtivo, gerando um ganho com a diminuição da rotatividade das trocas por peças novas, aumento do tempo de vida útil dos componentes, diminuindo diretamente a necessidade de compra de novas peças de reposição por desgaste.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FABRICAÇÃO DE TINTAS E MASSAS

#### 2.1.1 Fabricação de tintas arquitetônicas

Um dos mais importantes segmentos do mercado de tintas se refere aos produtos utilizados em tintas arquitetônicas, conhecida em alguns locais por linha decorativa, imobiliária, tintas para consumo doméstico ou ainda como tinta para a construção civil. Para esta linha tão conhecida, existem diversas particularidades que afetam a qualidade da tinta, entre elas podem se destacar a aplicação sobre os substratos inertes, que possui uma durabilidade muito superior comparado à aplicação sobre superfícies de alvenaria que são alcalinas. De acordo com a superfície a ser pintada e o método a ser aplicado, existem diversos tipos de produtos a serem utilizados. As tintas hoje em dia, além de serem essenciais aos quesitos decorativos, elas assumem um papel primordial atuando como protetoras das superfícies na construção civil, diante das quais pode-se destacar as seguintes propriedades: \* a permeabilidade, \* a porosidade, \* a resistência às radiações energéticas, \* a plasticidade e fragilidade e a reatividade química. (FAZENDA, 1993).

O processo de fabricação de tintas e massas arquitetônicas é dividido em três grandes grupos distintos: \* a fabricação de tintas a base de água, o segundo grupo que são as \* tintas a base de solventes, conhecidas como tintas-óleo e por terceiro \* a produção de massas.

O foco deste trabalho está na fabricação de tintas e massas a base de água em função da aplicação direta no processo, dos discos dentados.

A produção das tintas em grandes lotes são realizadas em grandes plataformas e passam necessariamente pelas etapas de: **a) Pré-Dispersão**, **b) Dispersão**, que envolve diretamente a aplicação dos discos dispersadores.

**a) Pré-Dispersão:** o processo de pré-dispersão é empregado para promover uma homogeneização entre água, pigmento, carga e aditivos, fazendo com que os pós sejam umectados e evitar a formação de blocos. A operação dura em torno de 15 minutos e ocorre a 1500 RPM. Após esta operação é feito teste de aplicação em vidro para acompanhar o grau de dispersão dos produtos, tendo como tolerância 3 pontos abertos. Estes pontos são grânulos de carga de pós que não dispersaram ainda.

**b) Dispersão:** primeiramente é adicionado metade do espessante da fórmula para promover aumento de consistência da tinta e fazer com que as partículas do pó sofram maior

cisalhamento frente ao disco do *cowles*, que é mantido a 1500 RPM. É importante observar a formação de um vórtex bastante definido, característica básica para ocorrer uma moagem adequada e eficiente. Ao término de 20 minutos é feito novamente o teste de aplicação em vidro para acompanhar a eficiência da operação, que possibilita no máximo 3 pontos de aglomerados de pó que não foram dispersados. Estando satisfatório o teste, é adicionado o restante do espessante e mistura-se a massa por mais 20 minutos. Por fim, é feito o teste de aplicação final em placa de vidro e este deve ser perfeitamente coberto, ou seja, sem pontos.

As principais variáveis da dispersão são: \* Diâmetro do disco, \* Distância do disco ao fundo do tanque, \* Viscosidade do produto, \* Rotação do disco, \* Teor de sólidos e a \* Natureza das partículas (orgânicas ou inorgânicas).

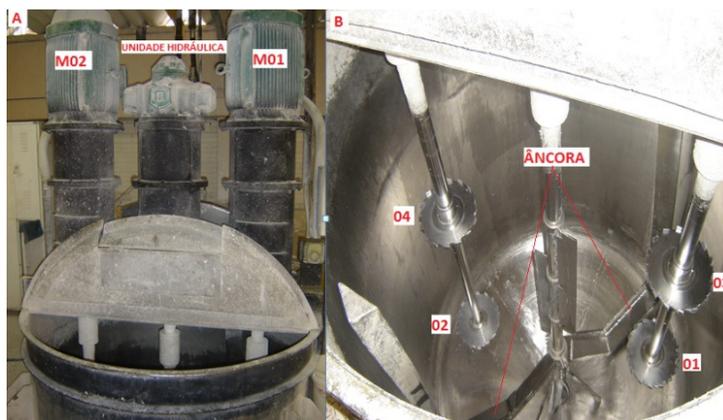
A dispersão é fundamental para satisfazer as especificações de cobertura, brilho e teor de sólidos.

### 2.1.2 Fabricação de massas

A fabricação de massas é subdividida em dois grupos distintos, ou seja: \* as massas lisas e \* as massas texturizadas. Ambas as fabricações passam por processos de: **a)** mistura, **b)** controles, e **c)** enchimento das embalagens.

O trabalho refere-se apenas ao grupo de massas lisas, dando ênfase ao processo de fabricação de massas lisas em grandes lotes através da utilização do equipamento denominado “Masseirão” (Figura 1), devido a sua capacidade de produção e também devido à aplicação dos discos dispersores como componente principal do processo.

Figura 1 – “Masseirão”: 2 motores, 1 unidade hidráulica, 1 âncora e 4 discos



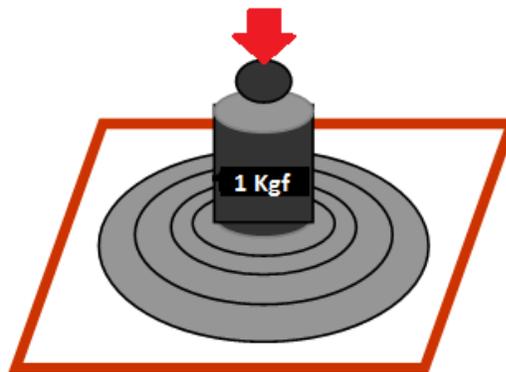
Fonte: Elaborada pelo autor.

**a) Mistura (masseirão):** é um equipamento de grande porte, lotes de até 300 embalagens, usada para fabricação de massas brancas lisas de alto giro em embalagens de 18 litros. O masseirão tem um misturador mais robusto, dotado de uma âncora e dois *cowles* com discos duplos. Os três eixos tem a rotação controlada, sendo que os dois eixos menores podem atingir até 1700 RPM. A rotação de trabalho fica em torno de 1200 RPM. Por ser uma máquina mais robusta e apresentar maior poder de mistura, os produtos são versados em uma única dose e misturados por 30 minutos. Logo, é muito utilizado o sistema de alimentação do pó de dolomita através de *bags*. Possui uma máquina de enchimento e um paletizador específico.

As vantagens do sistema de *bags* é a velocidade com que as cargas são dosadas, pois ao invés de alimentar o equipamento com diversos sacos de 25 kg, a quantidade ideal vai ser dosada com *bags* que têm aproximadamente 1000 kg e isto é muito importante levando em conta que uma batelada de produto pode ter até 6 toneladas de carga. Além da velocidade, pode-se destacar as vantagens na ergonomia para os operadores, ou seja, o sistema de *bags* elimina um processo de dosagem de sacos de 25 kg repetitivo, que pode vir a causar problemas de saúde aos operadores.

**b) Controles:** Ao término da mistura são realizados testes padrões de pH (25°C) e consistência, que verifica a “viscosidade” da massa. Outros testes, como cor e propriedades decorativas são feitos particularmente. A figura 2 representa o teste de consistência de massas lisas. Este teste baseia-se na medição do diâmetro formado por cerca de 5 gramas de amostra, homogeneizada a 25°C, pressionada entre dois vidros sob a ação de um peso de 1kgf, após um tempo de 3 minutos.

Figura 2 – Teste de consistência da massa lisa



Fonte: Elaborada pelo autor.

**c) Enchimento (maseirão):** a massa proveniente da maseirona é embalada apenas em latas de 18 litros. Existe um sistema eletrônico de enchimento e paletização, que possui a capacidade para encher 9 latas por minuto e cada batelada chega a produzir de 280 a 300 latas.

### 2.1.3 Características da carga utilizada na massa (Dolomita)

As cargas minerais são substâncias que servem para melhorar certas características ou simplesmente, baixar o custo por massa ou volume de um determinado tipo de tinta ou massa. (FAZANO, 1995 apud SILVA, G., 2011, p. 16).

A dolomita é denominada desta forma em homenagem ao geólogo francês Déodat de Dolomieu. É uma rocha cuja composição química básica é carbonato de cálcio (CaO) e carbonato de magnésio (CaMg), ou seja, carbonato de cálcio magnésio  $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ . A dolomita, é similar ao carbonato de cálcio natural, é um mineral de constituição inorgânica, quimicamente inerte, extraído de jazidas, é uma carga muito utilizada devido ao seu baixo valor de mercado, e alta demanda e oferta. (CASTRO, 2009).

Dentre tantos componentes utilizados para a fabricação das massas, as cargas minerais possuem grande contribuição, enquadrando-se na classe de pigmentos. Muitos estudos não consideram a carga como pigmentos, uma vez que não conferem cor nem cobertura. Desta forma, seriam mais bem enquadradas na classe dos aditivos ou coadjuvantes da tinta. As fontes mais baratas das cargas é a retirada direta de minerais, tais como o carbonato de cálcio, talco, mica, entre outros. São desta maneira definidos como produtos de baixo custo. (HOCH, 2007, p. 53)

“O Carbonato de Cálcio e Magnésio, Dolomita, é um aditivo mineral muito semelhante à Calcita (Carbonato de Cálcio Natural), porém com diferente teor de magnésio em sua composição, sendo amplamente utilizado devido ao baixo custo no mercado. A dolomita possui algumas características físico-químicas importantes para o processo, tais como: ser comercializada em pó ou em granulado branco, ser totalmente inodoro e insolúvel, inerte e possui baixa absorção à óleo. São vendidas em diversas granulometrias de acordo com as características individuais de cada processo industrial, dentre as quais se destacam as mais usuais que são: #10, #12, #20, #40, #80, #100, #200 e #325 mesh.” (ALTERNATIVA..., 2012).

A massa fabricada na empresa, que é foco deste trabalho, código 25110M.00 - MASSA CORRIDA BRANCA, utiliza a dolomita fornecida em *bags* de 1000Kg e sacarias de 25Kg (Figura 3). O tamanho do particulado utilizado para esta massa é comercializado na granulação de #325 mesh conforme evidenciado na Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ), de acordo com a NBR 14725/2001 (Anexo A).

Figura 3 – Dolomita utilizada em *bags* 1000Kg e sacarias de 25Kg

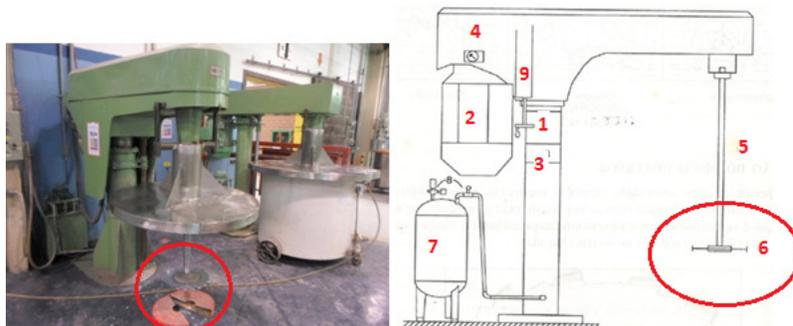


Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 2.1.4 Considerações gerais sobre Dispersão

O dispersador tipo *cowles* (Figura 4) é um equipamento bastante simples, consistindo de um motor que atua em duas velocidades, alta e baixa rotação, e nele está acoplado um eixo com um disco dentado, chamado disco dispersador, além de um pistão que pode ser hidráulico, mecânico ou pneumático para fazer a regulagem da altura do eixo. O disco é plano, com dentes na sua borda e fornece o tipo e a quantidade de agitação que a massa de moagem precisa para dispersar o pó. (SILVA, G., 2011).

Figura 4 – Dispersador tipo *cowles*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Componentes e acessórios que fazem parte de um dispersador tipo *cowles*: 1) Elevação hidropneumática; 2) Motor elétrico; 3) Posicionador para altura; 4) Amperímetro; 5) Eixo principal; 6) Disco dispersor; 7) Reservatório ar/óleo; 8) Válvula de controle ar/óleo e, 9) Regulador de velocidade.

Inicia-se o processo com a velocidade baixa para ocorrer uma mistura dos componentes. Depois, aumenta-se a velocidade, alta, para gerar mais impacto e facilitar a pré-dispersão dos aglomerados maiores. O processo de agitação causa o aquecimento da massa de moagem, provocando efeitos desejáveis e indesejáveis. Para os desejáveis pode-se citar um melhor molhamento e uma melhor mistura. Para os indesejáveis a evaporação do solvente, aumento da viscosidade da tinta e a queda da dispersão. A temperatura ideal pode ser conseguida através do controle da proporção entre o pó e líquido da massa de moagem, definida na formulação. (FAZENDA, 1993).

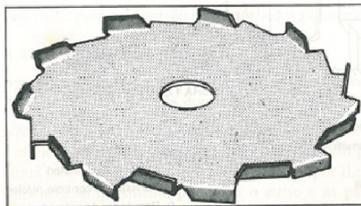
### 2.1.5 Disco Dispersador

Segundo Fazenda (1993, p. 715),

O disco dispersor de alta velocidade (também conhecido como *cowles*) consiste essencialmente de um disco serrado com as bordas alternadas montado em um eixo de alta rotação, que é verticalmente colocado em um tanque cilíndrico. Nesta forma simples, a lâmina impulsora é plana e o disco, de bordas chapadas.

Na figura 5, é demonstrado o perfil de um disco tipo *cowles*.

Figura 5 – Disco dispersor



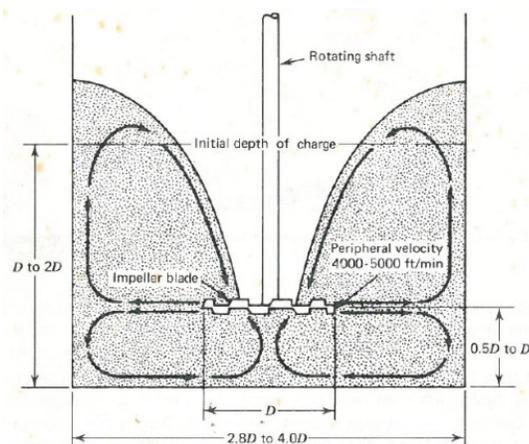
Fonte: Fazenda (1993).

Os *cowles* consistem em um disco dentado, montado sobre um eixo com cabeça móvel, que pode operar a várias velocidades. A velocidade mais baixa de aproximadamente 600 RPM é utilizada durante a adição dos pós (pigmentos e cargas), e as velocidades mais

altas, acima de 1000 RPM, para realizar efetivamente a pré-dispersão (LÁZARO apud ADAMI, 2002).

O posicionamento e a velocidade do disco dispersor são definidos de acordo com os dimensionamentos representados na figura 6. Para alguns casos, são necessários ajustes com os valores de “D” até que se consigam excelentes relações. Quando o dispersor de alta velocidade está operando adequadamente, induz-se uma matriz giratória de circulação através da lâmina de impulsão. Com isso cria-se um vórtex de tal maneira que as partículas que estão na superfície, vão ao fundo antes de completar uma revolução no tanque. (FAZENDA, 1993).

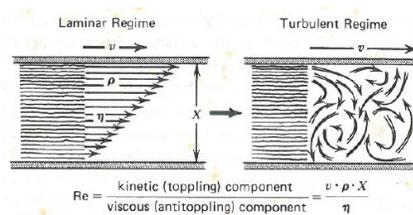
Figura 6 – Posicionamento e velocidade do disco dispersor



Fonte: Fazenda (1993).

Segundo Fazenda (1993), existem duas ações que ocorrem na dispersão com discos: o impacto e o atrito. O disco dispersor produz os dois tipos de ação. Através de experiências realizadas, conclui-se que discos dispersores de altas velocidades, podem operar com maior eficiência se o atrito for considerado como fator primário. Os fluídos em movimento apresentam dois padrões de fluxo, o laminar e o turbulento, conforme figura 7. Se a força de cisalhamento no escoamento for baixa, as camadas do líquido deslizam sobre si mesmas, caracterizando o fluxo laminar. Com a força de cisalhamento aumentada, atinge-se um ponto crítico, onde o movimento torna-se caótico, turbulento. Neste momento, a força laminar é vencida, e com isso aparece o movimento turbulento onde o líquido atende a qualquer direção ao movimento.

Figura 7 – Padrões de fluxo Laminar e Turbulento



Fonte: Fazenda (1993).

## 2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são altamente resistentes à corrosão especialmente na atmosfera ambiente. Possui como principal elemento químico de liga o cromo, com porcentagens mínimas de 11%. Consegue-se um aumento relativo da resistência a corrosão através da adição de elementos como o níquel e molibdênio. Os aços inoxidáveis são divididos em três classes de acordo com suas microestruturas predominantes, ou seja: os austeníticos, os ferríticos e os martensíticos. Devido a sua ampla faixa de propriedades mecânicas e ótima resistência à corrosão, estes aços são amplamente empregados pois podem ser tratados termicamente, de tal maneira que a martensita é sua microestrutura principal. Os aços martensíticos e ferríticos possuem características magnéticas, diferentemente dos austeníticos. Dentre as três classes, tratar-se-á especificamente neste trabalho sobre os aços inoxidáveis martensíticos AISI 420. (CALLISTER, 2008, p. 263).

### 2.2.1 Aço Inoxidável Martensítico AISI 420

Segundo Villares Metals et al. (1997 apud PINEDO, 2000), os aços inoxidáveis 420, sempre são fornecidos no estado recozido, com dureza máxima de 200 HB, a partir do qual são confeccionadas os mais diferentes tipos componentes. Após a usinagem inicial dos componentes, deve ser realizado o tratamento térmico de têmpera e revenimento para se condicionar a dureza ao nível de resistência especificado em cada aplicação, seguido da usinagem final.

Os aços inoxidáveis martensíticos são ligas de F-C-Cr, possuindo entre 11,5 a 18% de cromo e carbono entre 0,1 a 1% (OCHOA, 2007 apud SANTOS, 2013, p. 8).

Os aços martensíticos são utilizados após a têmpera, pois tem a capacidade de formar austenita em temperaturas elevadas e transformá-las em martensita por resfriamento rápido.

Devido aos altos teores de elementos de liga, possuem alta temperabilidade e podem ter uma estrutura completamente martensítica em peças espessas. Estes aços são magnéticos, e suas principais aplicações são em peças que exigem alta dureza e resistência mecânica e abrasão ou erosão. (PORTO, 2012).

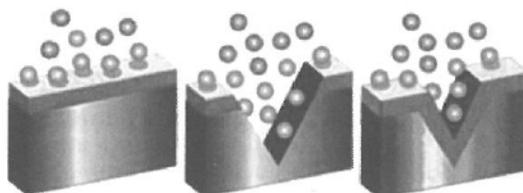
Conforme afirma Pinedo (2011, p. 87),

O aço inoxidável martensítico tipo AISI 420 é um dos mais empregados na fabricação de moldes. A possibilidade de endurecimento no tratamento térmico de têmpera e revenimento é uma característica importante desse aço, atingindo durezas de até 50 HRC, aproximadamente 500 HV. A prática de tratamento térmico sugere uma temperatura de austenitização próxima de 1.025°C. O revenimento pode ser realizado na faixa de temperatura de 200°C ou após o pico de endurecimento secundário, acima de 500°C [...].

Quando for necessário o tratamento superficial por nitretação, deve-se utilizar o revenimento em temperatura elevada, e para realizar tratamentos superficiais, deve-se evidenciar que esses tratamentos não devem comprometer a resistência à corrosão. A nitretação tem sido muito aplicada em aços inoxidáveis AISI 420 para elevar a resistência ao desgaste. Uma característica particular desse aço é o intenso potencial de endurecimento atingido na nitretação, obtendo-se dureza superior a 1.400 HV. Esse forte endurecimento é consequência de uma intensa precipitação de nitretos de cromo na superfície nitretada. (PINEDO, 2011).

A característica de resistência à corrosão se deve à formação de um filme passivo de óxidos de Cr na superfície da peça. O Cr livre no aço reage com o oxigênio ( $O_2$ ) do ar e a umidade forma um filme aderente que isola o restante do aço do contato com o oxigênio, evitando a oxidação do ferro. Isso ocorre devido ao Cr ser o elemento mais facilmente oxidável das ligas Fe-Cr. Quando a superfície do aço inox é arranhada, é removida a camada passiva de Cr (figura 8), expondo novamente o Cr ao oxigênio e à umidade, que volta a formar a camada passiva. Por isso, diz-se que a camada passiva é regenerativa em contato com o ar. (PORTO, 2012).

Figura 8 – Esquema de formação da camada passiva em superfície com arranhão

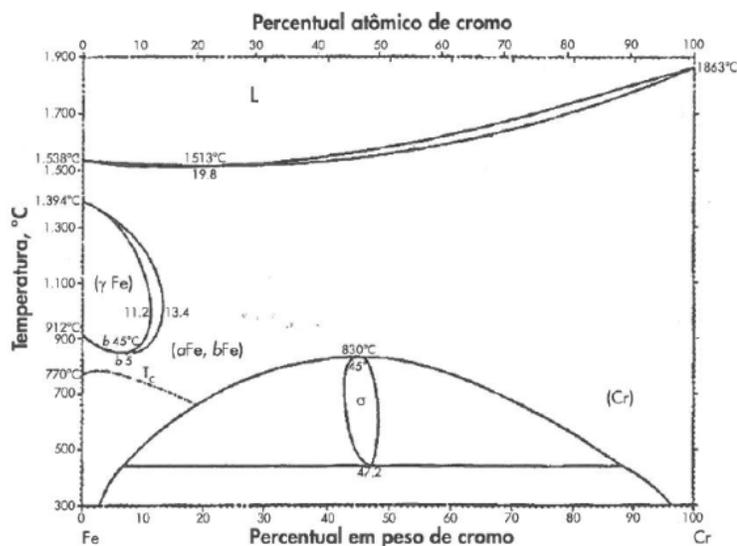


Fonte: Porto (2012).

### 2.2.2 Diagrama de Equilíbrio Fe-Cr

A necessidade do aço inoxidável martensítico do ponto de vista metalúrgico é devido ao campo austenítico (cúbica de faces centradas) no diagrama de equilíbrio, podendo realizar-se a têmpera com a obtenção da martensita (tetragonal de corpo centrado), com no mínimo de 10,5% de Cr para a garantia da camada passiva do inoxidável. Na figura 9, pode-se observar o diagrama de equilíbrio do sistema Fe-Cr, onde se percebe que para qualquer relação de Fe-Cr a solidificação se inicia pela ferrita delta ( $\delta$ ). Percebe-se também que o campo austenítico, diminui de acordo com o teor de Cr, ocorrendo a estabilização da ferrita após 13%Cr. Assim a austenita se limita a faixa de temperatura de 846 a 1394°C e teores máximo de Cr de 12%. Deste modo, surge a necessidade do aumento do campo de austenitização por meio da adição de elementos que formam a austenita, (carbono, nitrogênio, níquel e manganês), para com isso se ter os aços inoxidáveis martensíticos com altos teores de Cr. (PORTO, 2012).

Figura 9 – Diagrama de fases binário Fe-Cr



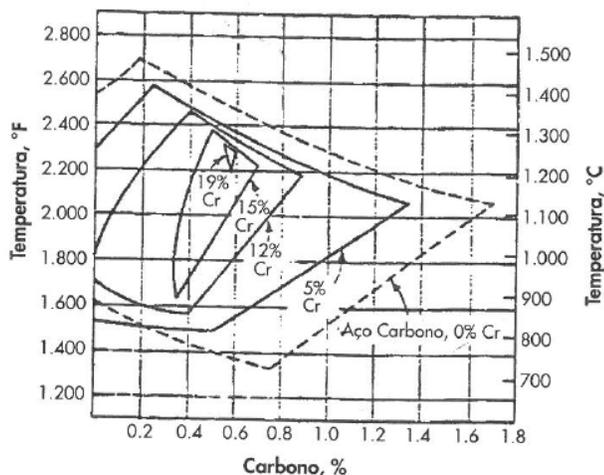
Fonte: Porto (2012).

### 2.2.3 Diagrama de Equilíbrio Fe-C-Cr

Segundo Porto (2012), para ligas de Fe-C (aços), o Cr serve para estabilizar a ferrita. Na figura 10, percebe-se que através de seções no diagrama Fe-C, para diferentes teores de

Cr, o campo austenítico diminui de acordo com o aumento dos teores de Cr, a partir do ponto em que a ferrita é estável.

Figura 10 – Efeito dos teores de Cr sobre o campo austenítico em ligas ferrosas



Fonte: Porto (2012).

### 2.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os aços são materiais que permitem alterações nas microestruturas e propriedades mecânicas, em função de sua utilização. De acordo com as necessidades, os aços são tratados termicamente através do aquecimento durante um intervalo de tempo e resfriamento em condições controladas, resultando em transformações de fases exigidas para os parâmetros. O aquecimento realizado no aço deve ser suficiente para que a microestrutura se transforme de fase. Desta forma, para a obtenção da microestrutura martensítica, o aço deve ser aquecido a uma temperatura de austenitização e após ser submetido a um resfriamento rápido. A temperatura de austenitização depende da composição do aço. (STROHAECKER, 1998).

O tratamento térmico dos aços inoxidáveis martensíticos, é semelhante ao dos aços carbonos comuns. O carbono influencia diretamente na dureza e resistências máximas. A grande diferença está na sua maior temperabilidade devido aos seus elementos de liga. Outra diferença considerável é por serem suscetíveis às variáveis de tratamentos térmicos. (PORTO, 2012).

## 2.4 TÊMPERA

De acordo com Porto (2012), o tratamento térmico tem o objetivo de obter uma estrutura martensítica de alta dureza. A dureza aumenta de acordo com o aumento do percentual de carbono e chega ao seu máximo entre as temperaturas de austenitização de 1000 a 1100°C.

Alguns parâmetros determinam a estrutura e dureza, entre eles é possível citar: a composição química dos aços, a temperatura, o tempo de austenitização e a taxa de resfriamento. (ASM, 1997).

A ductilidade e a tenacidade das peças apresentam uma redução significativa com a aplicação deste tratamento de ganho de dureza. Para realizar estas correções, deve-se fazer a combinação das propriedades, que só se consegue realizando o tratamento de revenimento após a têmpera. (STROHAECKER, 1998; ASM, 1997).

De acordo com a velocidade de resfriamento, pode ou não ocorrer a formação da microestrutura totalmente martensítica que é desejada através da têmpera. Com a variação da temperabilidade, ocorrem também as variações dos teores de carbono e elementos de liga, pois a velocidade de resfriamento depende destes fatores. Se a velocidade for muito alta, podem ocorrer os empenamentos nas peças mais finas, ou até trincas. Se a velocidade for muito baixa, pode não ocorrer a formação da martensita, alterando as propriedades dos produtos deixando-os com baixa dureza e resistência. (STROHAECKER, 1998).

Deve-se evitar a formação de óxido de cromo na atmosfera controlada dos fornos de têmpera, pois o mesmo empobrece a superfície em cromo e diminui a resistência a corrosão. Este fenômeno é visualmente percebido através da coloração da peça ao sair do forno, pois a mesma adquire a cor escura e esverdeada. Como a condutividade térmica dos aços inoxidáveis martensíticos é menor que a dos aços carbonos comuns, podem ocorrer trincas e distorções em peças menores. Nesses casos, são indicados preaquecimentos nas temperaturas de 760 a 790°C durante um intervalo de tempo que equalize todas as seções da peça. Para peças muito sensíveis e complexas, indica-se um pré-aquecimento prévio na temperatura de 540°C. (PORTO, 2012).

## 2.5 REVENIMENTO

O tratamento térmico de revenido permite a redução da saturação de carbonos da martensita, gerando com isso o equilíbrio entre as propriedades tenacidade e dureza, por meio da temperatura abaixo da eutetóide. Esse equilíbrio ocorre em função da correta seleção da temperatura e tempo do processo de revenido, pois quando a tenacidade aumenta, ocorre a redução da dureza. (ASM, 1997).

Após a têmpera, deve-se sempre realizar o tratamento de revenimento para se adequar o nível de tenacidade e dureza, para melhor atender aos projetos. Em função das temperaturas de revenimentos aplicadas industrialmente, este processo não requer que seja realizado a vácuo, unicamente é necessário o controle da atmosfera do forno para garantir a integridade superficial da ferramenta. (PINEDO, 2011).

Segundo Porto (2012), deve-se realizar o revenimento após a têmpera para aliviar as tensões internas e evitar as “fragilizações por martensita não revenida”. As temperaturas de revenimento ficam entre 180 e 750°C em função das durezas desejadas, mas temperaturas superiores a 450°C devem ser evitadas para não ocorrer precipitações de carbonetos de cromo. A dureza após o tratamento térmico é em função do C e tende a aumentar com o aumento do C até 0,6% quando se torna estável, e mesmo quase chegando a 1,00% C a dureza aumenta pouco.

A supersaturação de carbono está relacionada a dureza elevada da martensita, e necessariamente todos os aços devem ser revenidos após a têmpera, devido a baixa tenacidade para as aplicações. (ASM, 1997).

A temperatura, o tempo, a taxa de resfriamento e a composição química do revenimento, combinados ao tamanho das peças e forma, estão entre as principais variáveis que afetam as microestruturas dos aços revenidos. (ASM, 1997).

O aquecimento da martensita permite a reversão do reticulado instável ao estável cúbico centrado, que gera reajustamentos internos que aliviam tensões. De acordo com as variações de temperaturas, verificam-se várias transformações, tais como:

- entre 25 e 100°C, ocorre a segregação do carbono em direção a discordâncias;
- entre 100 e 250°C, 1° estágio do revenimento, ocorre a precipitação de carboneto de ferro;
- entre 200 e 300°C, 2° estágio do revenimento, ocorre a transformação da austenita retida em bainita;

- entre 250 e 350°C, 3º estágio do revenimento, formação de carboneto metaestável;
- entre 400 e 600°C, ocorre uma recuperação da subestrutura de discordância;
- entre 500 e 600°C, somente nos aços contendo Ti, Cr, Mo, V, Nb ou W, há precipitações de carbonetos de liga, conhecido como endurecimento secundário;
- entre 600 e 700°C, ocorre a recristalização e crescimento do grão.

Diante destas colocações, pode-se perceber que a temperatura pode ser escolhida de acordo com a necessidade do processo e de acordo com as propriedades mecânicas que se deseja no aço temperado. (CHIAVERINI, 1984).

Conforme referenciado anteriormente, os elementos cromo, molibdênio, tungstênio, vanádio, tântalo, nióbio e titânio são os principais elementos na formação de carbonetos, e contribuem para que a dureza não reduza muito em altas temperaturas. (ASM, 1997).

## 2.6 ENGENHARIA DE SUPERFÍCIES

A engenharia de superfícies tem por objetivos, melhorar a resistência ao desgaste do material de uma superfície, e modificar seu comportamento em relação ao atrito. Neste trabalho, aplicam-se duas formas para melhorar a resistência ao desgaste: a primeira trata das modificações de superfície e a segunda refere-se aos revestimentos superficiais.

Os tratamentos térmicos servem para aumentar a dureza da superfície, para garantir a melhoria da vida útil em função do desgaste de aços macios. Para materiais que passam por razoáveis transformações de fases, o aquecimento térmico é realizado até que se tenha a austenita a qual é temperada para formar a martensita, para posterior revenimento. A proposta para este trabalho é a execução do tratamento termoquímico de nitretação gasosa sobre o substrato de aço inoxidável martensítico.

A segunda forma para melhorar a resistência ao desgaste é através de revestimentos superficiais, que possuem procedimentos que elevam substancialmente a resistência ao desgaste de componentes mecânicos. Existem diversos processos de revestimentos superficiais, dentre os quais se aplica a aspersão térmica de carbeto de tungstênio.

### 2.6.1 Cromo duro eletrodepositado

Como o cromo é um metal não-nobre e apresenta o equilíbrio padrão baixo, este deveria se comportar como ferro, em relação às reações corrosivas. Conforme já visto, na

prática o metal se comporta como um metal nobre, devido a passivação causada pelo cromo na superfície em meios pouco oxidantes. (PANOSSIAN, 1997; WEINER, 1973 apud MORILLAS, 2005).

Para aplicações anticorrosivas, o cromo é um elemento muito importante quando utilizado em grandes teores, acima de 10%. É um dos mais eficientes entre outros elementos aplicados para esta situação, embora os aços ao cromo e ao cromo-níquel não sejam tão resistentes em alguns meios, como ácido clorídrico. (CHIAVERINI, 1984).

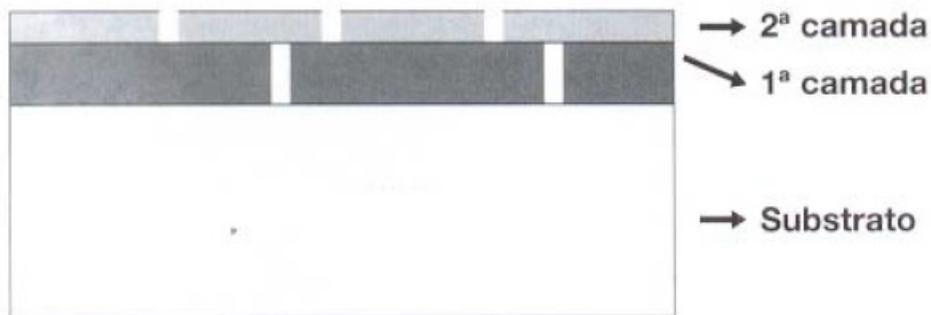
Uma das aplicações do cromo duro como revestimento é quando se deseja associar dureza, taxas de desgaste e resistência à corrosão, além de aumentar a vida útil de peças devido ao custo alto com peças de reposição. (PAREDES, 2000; PANOSSIAN, 1997 apud MORILLAS, 2005).

O processo de galvanização com cromo é muito aplicado, pois apresenta elevada dureza superficial, ocasionando com isso o favorecimento de origens de trincas.

Segundo Panossian, (1997 apud MORILLAS, 2005), falhas sempre ocorrem nas partes entre a interface e o substrato. O verdadeiro significado da resistência a corrosão é a inexistência de corrosão no substrato. Para o revestimento tipo barreira, que são considerados revestimentos nobres, consegue-se estes resultados com a diminuição das discontinuidades que acabam deixando expostos o substrato, ou a mudança de comportamento frente às corrosões múltiplas.

Com o aumento gradativo das camadas depositadas, consegue-se a diminuição das porosidades utilizando-se para isso as múltiplas camadas que fazem com que a probabilidade de poros de camadas diferentes não coincidam (Figura 11). (PANOSSIAN, 1997 apud MORILLAS, 2005).

Figura 11 – Ilustração da não-coincidência de discontinuidades em camadas diferentes



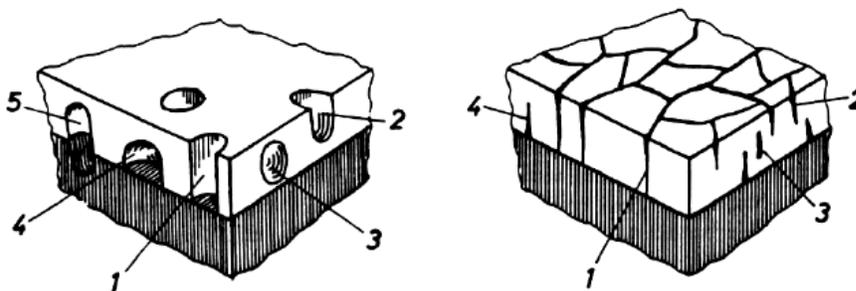
Fonte: Panossian (1997 apud MORILLAS, 2005).

Deve-se manter o substrato totalmente isolado pela camada depositada para se manter uma boa qualidade durante certo tempo de utilização. As variações de espessuras na camada depositada, pode ser em função da camada ser mais nobre (catódica) que o substrato, no caso de haver falhas, existe uma relação desfavorável de área entre o ânodo-cátodo que causará ataques localizados no substrato. A camada pode se desprender do substrato devido à formação de corrosão debaixo da camada. O contrário ocorre se a camada for menos nobre, sendo assim, ela poderá agir como uma camada de sacrifício protegendo o substrato, mas os poros crescerão e a camada será destruída eventualmente. (LEISNER; BENZON, 1997 apud MORILLAS, 2005).

#### 2.6.1.1 Definições do cromo duro

Segundo Jelinek (1997 apud MORILLAS, 2005), as porosidades são cavidades que ficam isoladas umas das outras e poros interconectados ou passantes, conforme evidenciado pela figura 12, afetam as propriedades físicas da condutividade elétrica e térmica, gerando com isso a diminuição da coesão entre as camadas e sua aderência ao substrato. Desta forma, a porosidade quando passante é muito indesejável quando se requer a proteção do substrato quanto a ação da corrosão. As definições adotadas para os poros são defeitos com expansão em três dimensões não preenchidas com materiais sólidos ou líquidos, em contra partida, as trincas são defeitos com expansão predominantemente em uma dimensão.

Figura 12 – Ilustração esquemática de diferentes tipos de poros e trincas



Fonte: Jelinek (1997 apud MORILLAS, 2005).

A figura 12 apresenta os seguintes tipos de trincas e poros:

\* Tipo 1: poro/trinca passante;

- \* Tipo 2: poro/trinca aberto e não-passante;
- \* Tipo 3: poro/trinca fechado e restrito inteiramente no revestimento;
- \* Tipo 4: poro/trinca fechado e contíguo ao substrato;
- \* Tipo 5: poro/trinca fechado e penetrante no substrato.

Os produtos que atacam o cromo são praticamente de dois tipos: o ácido clorídrico e o ácido sulfúrico a quente. São bastante resistentes as condições atmosféricas e ao embaçamento. Possui uma grande resistência ao desgaste, e baixo coeficiente de fricção com muita dificuldade para se molhar, é bastante repelente de óleos e meios aquosos. Por estas características, o cromo é bastante aplicado para revestir metais de durezas inferiores e características distintas, com o objetivo de conferir à superfície dos mesmos as suas propriedades. (PANOSSIAN, 1997; WEINER, 1973 apud MORILLAS, 2005).

De acordo com a escolha da composição do eletrólito, o cromo depositado galvanicamente pode adquirir durezas variadas, devido a sua estrutura e não ao hidrogênio contido na sua camada. (WEINER, 1973 apud MORILLAS, 2005).

A eletrodeposição de cromo contendo ácido crômico e catalisadores, é um dos principais métodos utilizados para a aplicação do cromo. Para os revestimentos pode-se utilizar banhos de ácido sulfúrico, ácido fluorsilícico ou fluorbórico. O banho é aplicado de acordo com percentuais predefinidos de cada componente, sendo a razão  $\text{CrO}_3:\text{SO}_4^{-2}$  um parâmetro adequado para o desempenho do banho, que deve ser mantido em torno de 100:1. (PANOSSIAN, 1997 apud MORILLAS, 2005).

No processo de galvanização com cromo duro, há algumas maneiras para se obter mudanças nas características dos depósitos, que são: ou por meio de mudanças nas concentrações dos ácidos ou catalisadores, alterando as formulações, ou agindo diretamente no processo através das mudanças de condições de operação, corrente, tempo, temperatura. (PANOSSIAN, 1997 apud MORILLAS, 2005).

O substrato tem característica importante quanto às camadas finas ou grossas para o banho de cromo eletrodepositado. Se o substrato for brilhante, ele possui maior densidade e favorece a nucleação do metal depositado, gerando as camadas finas e brilhosas. Mas para camadas maiores, a influência do substrato diminui, e as camadas de cromo vão se tornando grosseiras por não possuírem no banho elementos abrillantadores.

Existem duas classes de revestimentos de cromo: o decorativo e o duro. O cromo decorativo é aplicado sobre camada de níquel ou cobre-níquel para evitar manchas, possui

espessura fina, variando de 0,13 a 1,3 $\mu$ m. Já O cromo duro é utilizado quando se deseja a resistência ao desgaste e baixa fricção, normalmente as camadas depositadas variam de 20 a 500 $\mu$ m, depositadas diretamente sobre o aço. (PANOSSIAN, 1997; WEINER, 1973 apud MORILLAS, 2005).

De acordo com estudos comparativos das propriedades tribológicas, em função do mecanismo de desgaste das camadas eletrodepositadas e as dúplex, percebe-se que as camadas livres de trincas possuem comportamento adesivo diferentemente das dúplex que possuem um comportamento característico de abrasivas em suas camadas duras. (SOHI et al., 2003 apud MORILLAS, 2005).

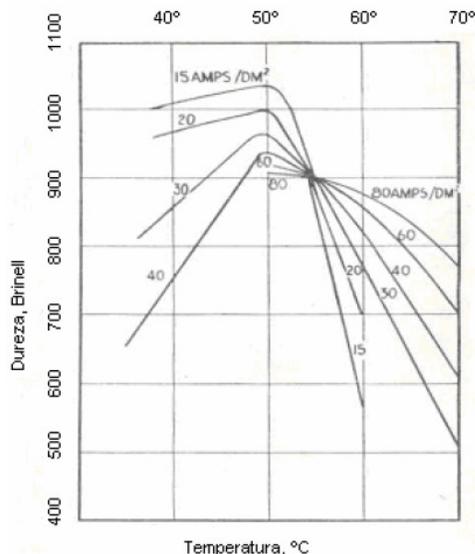
#### 2.6.1.2 Propriedades do cromo

O cromo possui diversas características individuais para cada tipo de aplicação e processo, dentre as quais pode-se destacar algumas das propriedades mais importantes para o processo, que são: \* resistência ao desgaste, \* resistência ao risco, \* camada repelente, \* condutibilidade elétrica e \* resistência à corrosão. De todas estas propriedades, o trabalho dá ênfase a Resistência ao Desgaste por ser enfoque principal desta aplicação.

#### 2.6.1.3 Resistência ao Desgaste

Segundo Silman (1955 apud MORILLAS, 2005, p. 53), a resistência ao desgaste é uma das necessidades mais exigidas quando se fala em aplicação de camadas de cromo duro. Conseguem-se durezas que variam entre 850 a 1200 Vickers, aproximadamente 70 Rockwell C ou 800 Brinell. Nos processos de aplicação de cromo duro, as durezas do revestimento podem variar de acordo com as condições do banho eletrolítico e das estruturas cristalinas. Na figura 13, percebe-se que as maiores durezas se conseguem para todas as variadas correntes com temperaturas próximas de 50°C, demonstrando desta forma, o efeito da temperatura da solução eletrolítica sobre a dureza do cromo duro eletrodepositado.

Figura 13 – Efeito da temperatura do revestimento de cromo eletroliticamente



Fonte: Silman (1955 apud MORILLAS, 2005, p. 53).

## 2.6.2 Nitretação

### 2.6.2.1 Definições da nitretação

A nitretação é um processo de tratamento de endurecimento superficial, no qual o nitrogênio é introduzido superficialmente no aço, até uma profundidade, a uma temperatura determinada em ambiente nitrogenoso. A nitretação é realizada quando se deseja obter elevada resistência superficial, aumento da resistência ao desgaste, aumento da resistência à fadiga, melhoria quanto à corrosão e calor. (CHIAVERINI, 1984).

A nitretação a exemplo da cementação, também altera as composições das camadas superficiais do aço, com um diferencial em relação à cementação, sendo que a nitretação não exige a têmpera antes do processo, pois os nitretos formados já possuem durezas elevadas. Dentre algumas vantagens da nitretação, pode-se citar a execução a baixas temperaturas, entre 500 e 600°C, durezas elevadas, baixa sensibilidade ao entalhe e alta estabilidade dimensional. (STROHAECKER, 1998).

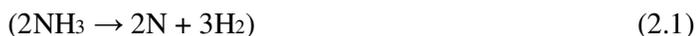
Quando se deseja o endurecimento superficial do aço AISI 420, a nitretação tem sido muito utilizada para se elevar a resistência ao desgaste. Uma característica particular desse aço é o intenso potencial de endurecimento superficial com o processo de nitretação, obtendo-se dureza superior a 1.400 HV. Isso ocorre devido à intensa precipitação de nitretos de cromo

na superfície nitretada. Para a aplicação do tratamento de nitretação em aços inoxidáveis, é fundamental a realização da remoção do filme passivo de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , devido o filme de óxido atuar como uma barreira para a incorporação do nitrogênio. (PINEDO, 2011).

#### 2.6.2.2 Processo de nitretação a gás

O processo de nitretação a gás é um processo onde o nitrogênio é introduzido na superfície de uma liga ferrosa sólido, mantendo o metal, a uma temperatura adequada (abaixo da  $\text{Ac}_1$ , para os aços ferríticos) em contato com um gás nitrogênio, normalmente amônia. A têmpera não é necessária para este tratamento. A temperatura de nitretação para todos os aços é entre  $495$  e  $565^\circ\text{C}$  ( $925$  e  $1050^\circ\text{F}$ ). (ASM, 1997).

Neste processo, utiliza-se amônia injetada diretamente no forno aquecido, normalmente a  $510^\circ\text{C}$ , onde na qual a amônia se dissocia de acordo com a equação 2.1.



Neste caso, ocorre a liberação do nitrogênio atômico que se difunde para o aço. Normalmente os tempos variam de 12 a 120 horas. (STROHAECKER, 1998).

Segundo Chiaverini (1984), a nitretação gasosa é um processo clássico que exige um tempo muito longo, podendo variar de 48 a 72 horas, podendo chegar até 90 horas. O processo clássico submete as peças a serem nitretadas à ação de um meio gasoso com a presença de nitrogênio e amônia à temperatura determinada. Neste processo a difusão do nitrogênio é muito lenta, e mesmo com grandes tempos de exposição, as camadas nitretadas ainda são inferiores se comparadas com o processo de cementação, dificilmente superior a 0,8mm.

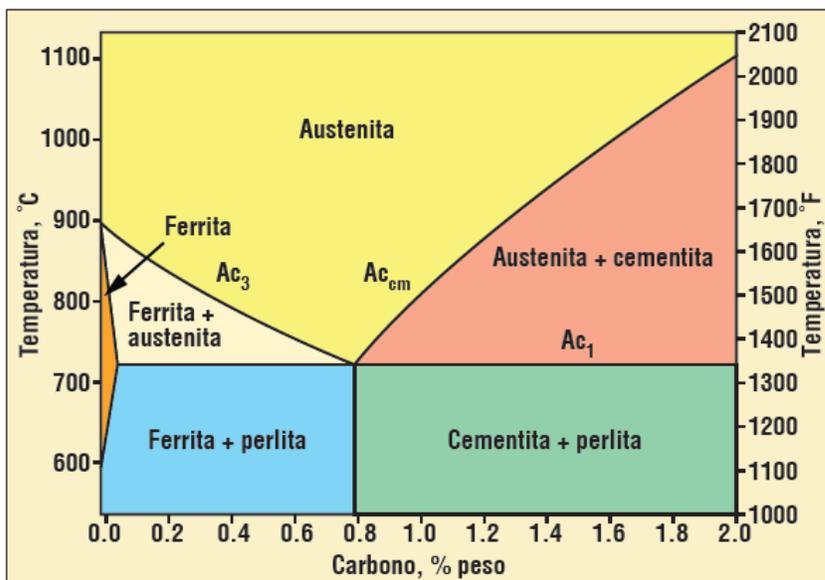
O processo de nitretação para Aços Inoxidáveis ocorre de acordo com o teor de cromo. Todos os aços inoxidáveis podem ser nitretados em algum grau. Embora o tratamento de nitretação afete negativamente a resistência à corrosão, que aumenta a dureza da superfície e proporciona um menor coeficiente de atrito, melhorando assim a resistência à abrasão.

As ligas endurecíveis são ligas martensíticas capazes de proporcionar elevada resistência para suportar a têmpera em seguida o revenido a uma temperatura que seja pelo menos  $15^\circ\text{C}$  ( $25^\circ\text{F}$ ) acima da temperatura de nitretação, deve preceder a operação de

nitretação. Ligas de endurecimento por precipitação, tais como 17-4 PH, 17-7 PH, e A- 286, também têm sido sujeitas a nitretação com êxito. (ASM, 1997).

Conforme referenciado pela Revista Industrial Heating (2012), a nitretação é considerada um processo de cementação, onde o nitrogênio é introduzido no aço, mantendo o metal a uma temperatura inferior à temperatura de transformação da austenita, ou seja, abaixo da linha ( $Ac_1$ ), conforme definido pelo diagrama de fase ferro-carbono demonstrado pela figura 14. Neste processo, normalmente o aço é colocado em contato com a amônia, fazendo com que ocorra a transferência de nitrogênio para a superfície, durante a realização da decomposição térmica em nitrogênio e hidrogênio.

Figura 14 – Diagrama de fases ferro-carbono de ferro simplificado



Fonte: Revista... (2012).

O processo de nitretação baseia-se na afinidade de nitrogênio nascente para o ferro e certos outros elementos metálicos. Nitrogênio nascente é produzido pela dissociação do amoníaco gasoso quando em contato com as peças de aço a quente. As taxas de dissociação podem ser usadas com sucesso na nitretação. É importante que o ciclo de nitretação comece com uma velocidade de cerca de 15 a 35% de dissociação e que esta taxa seja mantida durante 4 a 10 horas, dependendo da duração do ciclo total, a temperatura deve ser mantida a cerca de 525°C (975°F). (ASM, 1997).

### 2.6.2.3 Durezas obtidas com a nitretação

Com a nitretação a gás, consegue-se durezas superficiais na faixa de 1000 a 1100 Vickers. A camada branca e a profundidade da camada dependem diretamente da temperatura e tempo de exposição ao forno e da velocidade de dissociação da amônia. A combinação entre os nitrogênios ativos e os elementos de liga, formam os nitretos de elevadas durezas. No processo de nitretação a gás, uma estrutura ferrítica cristalina é altamente desejada em vez de austenítica. (CHIAVERINI, 1984).

### 2.6.2.4 Espessura da camada nitretada

De acordo com a profundidade que o nitrogênio consegue chegar abaixo da superfície do aço, está diretamente ligada a dependência da espessura da camada de dureza. O processo ocorre com o abastecimento do nitrogênio direto da superfície, após a remoção dos elementos de liga da solução sólida, ocorrendo a difusão do nitrogênio mais longe na liga, formando com isso, uma camada bem mais profunda. A sua profundidade, para qualquer tempo de tratamento e temperatura, depende da quantidade de elementos de liga com que o nitrogênio deve reagir antes que ele possa se difundir mais. (REVISTA..., 2012).

### 2.6.2.5 Inconvenientes da nitretação

O processo de nitretação apresenta alguns inconvenientes, dentre os quais se destacam o crescimento da peça que ela produz, em função diretamente do tempo e temperatura de exposição. Sendo assim, após o conhecimento da composição da peça, pode-se optar por trabalhar descontando o crescimento durante a usinagem da peça ou optar pela retifica após a peça passar pelo tratamento de nitretação. Em função destas características, os aços para nitretação a gás, são aços-liga, contendo alumínio, cromo, vanádio, e molibdênio, devido estes elementos formarem nitretos que se mantêm estáveis nas faixas de temperaturas da nitretação. Sendo assim, estes tipos de aços devem passar pelos processos de têmpera e revenimento, para garantir a estabilidade estrutural. A temperatura mínima exigida para o revenimento das peças é pelo menos 25°C acima da temperatura utilizada durante a nitretação. (CHIAVERINI, 1984).

### 2.6.3 Aspersão térmica (HVOF)

A aspersão térmica é um processo onde as partículas fundidas, semifundidas ou sólidas são depositadas em forma de *spray* sobre um substrato, criando uma camada sobre a superfície. Normalmente se utiliza o material a ser depositado em forma de pó ou arames. O processo de aspersão necessita de uma fonte de calor, seja por chama ou através de arco voltaico, com o intuito de realizar a fusão do material a ser depositado. O material a ser depositado é acelerado a partir da vazão de um gás, normalmente se utiliza o ar comprimido. Como o material é aquecido, ele tende a se tornar totalmente fundido, semifundido ou, em alguns casos as partículas se mantêm sólidas.

Segundo *American Welding Society* (1985 apud COMELLI, 2006), a aspersão térmica é um processo onde se utiliza materiais metálicos ou não, que são depositados em uma condição fundida ou semifundida sobre um substrato formando uma camada com características especiais, dentre elas, as principais são: proteção contra o desgaste, proteção contra a corrosão química, proteção física (calor e eletricidade). Os materiais fundidos são acelerados por um gás comprimido em direção ao metal base, fazendo com que as partículas aspergidas sejam aderidas ao substrato por mecanismos de natureza mecânica, químico-metalúrgica e física, dependendo de alguns fatores como a temperatura da fonte de calor e velocidade das partículas, que através da sobreposição formam as camadas de estrutura lamelar com óxidos e poros.

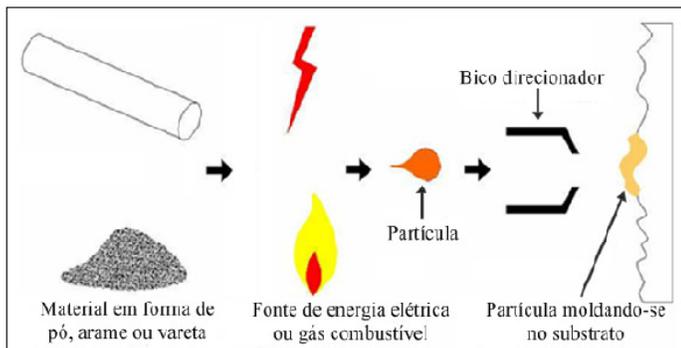
Além das características referenciadas anteriormente, a aspersão térmica também é muito conhecida pelos nomes de “*Spray térmico*” (*Thermal Spraying, THSP*), ou ainda como metalização. (LIMA; TREVISAN, 2002; ASM, 2004 apud CASTRO, 2012).

Devido às características da realização da deposição, o revestimento formado normalmente contém imperfeições tais como poros, óxidos e trincas, cujos tamanhos e distribuições influenciam decisivamente no seu desempenho em serviço. (SCHIEFLER, 2004 apud CASTRO, 2012).

De acordo com Paredes (2009), o princípio da aspersão térmica é lançar os materiais em forma de pó ou através de arame contra um metal base onde ocorrerá uma solidificação e aderência ao mesmo. A deposição ocorrerá através de sucessivas camadas das partículas que ao se chocarem contra a superfície, se achatam e formam finas lamelas, que se conformam e se aderem às irregularidades das superfícies entre si.

A figura 15 ilustra, de forma esquemática, o processo de deposição de um revestimento aspergido termicamente.

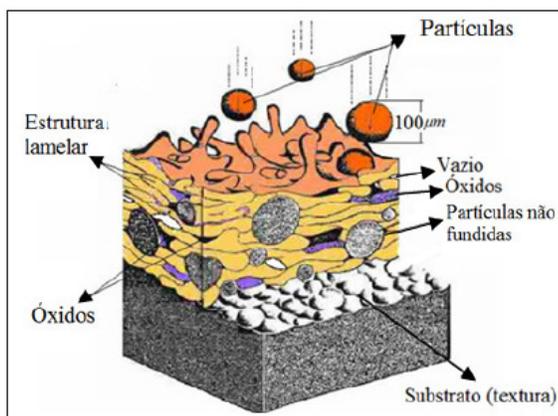
Figura 15 – Princípio de deposição de um revestimento por aspersão térmica



Fonte: Paredes (2009).

A figura 16 apresenta uma típica característica dos revestimentos aspergidos termicamente, onde aparecem as inclusões de óxidos, algumas partículas sólidas e porosidades. Os revestimentos aspergidos possuem características muito parecidas quanto à estrutura lamelar, mas ao contrário, exibem características variáveis dependendo: do processo, da técnica empregada e do tipo do material empregado. A densidade do depósito aspergido varia em função da velocidade e da temperatura das partículas e fonte de calor do processo de revestimento. A velocidade pode variar de 30 a 1200 m/s, de acordo com o tipo de processo utilizado, enquanto que a temperatura pode variar de 2000 a 28000°C, de acordo com a fonte de calor utilizada (PAREDES, 2009).

Figura 16 – Características das camadas depositadas por aspersão térmica



Fonte: Paredes (2009).

### 2.6.3.1 Classificação dos processos

Os processos de aspersão são bastante específicos e são utilizados tanto para manutenção como para fabricação de produtos novos. São diversos parâmetros envolvidos no processo, mas quando bem escolhidos produzem um efeito muito bom. Os componentes envolvidos no processo devem ser bem entendidos para serem aplicados da melhor forma possível, de acordo com a operação adequada para cada processo. A adesão do revestimento ao substrato é devido a diversos fatores, tais como: o tipo do material do revestimento, a rugosidade do substrato, a condição do substrato, a temperatura da superfície, entre outros. (MARQUES, 2008 apud BRITO, 2010).

De acordo com os estudos de Lima e Trevisan (2002 apud CASTRO, 2012), a aspersão térmica é subdividida em dois grupos, que se distinguem por utilizar a chama e o outro por utilizar a energia elétrica como fonte de energia conforme a figura 17. Para efeito de simplificação, uma nomenclatura baseada em siglas é bastante utilizada em substituição às denominações completas dos processos. A identificação de cada uma das siglas é a seguinte:

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

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

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

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

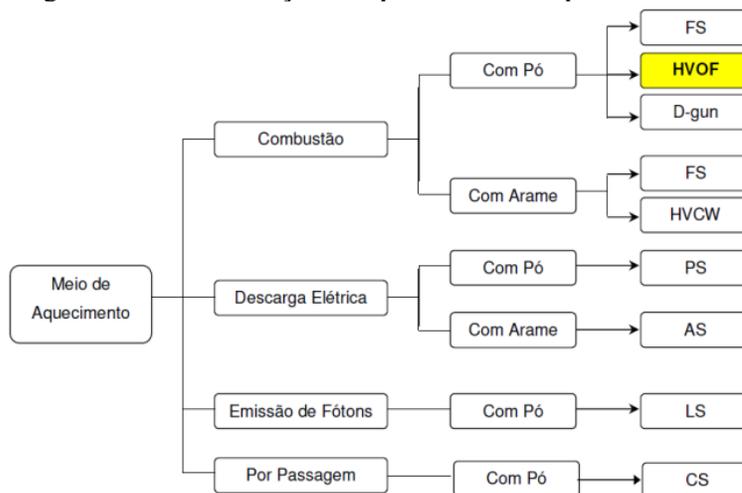
OS: *Plasma Spraying* (aspersão a plasma);

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

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

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

Figura 17 – Classificação dos processos de aspersão térmica



Fonte: Schiefler (2004 apud COMELI, 2006).

Para a realização das análises da aderência dos revestimentos, consideram-se três mecanismos de acordo com a natureza das forças atuantes: mecânico, químico-metalúrgico e físico. Devido ao impacto das deposições aquecidas e aceleradas contra o metal base, as mesmas deposições se achatam e resfriam-se rapidamente ficando 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 ocorrer a fusão localizada, difusão atômica com formação de soluções sólidas e inclusive compostos intermetálicos, caracterizando os mecanismos químico-metalúrgico. (MARANHO, 1996; MARQUES, 2005 apud COMELI, 2006).

### 2.6.3.2 Principais aplicações

Devido a grande variedade de tipos de materiais para a deposição sobre os substratos, existem também uma grande linha de aplicações e suas restrições. Segundo estudos apresentados por Pawlowski (2008 apud CASTRO, 2012), hoje em dia as áreas onde se aplicam os revestimentos aspergidos são bastante abrangentes, conforme indicados na relação a seguir:

\* atividades de restauração dimensional de partes de máquinas e equipamentos tais como: mancais, eixos, cilindros, etc.;

- \* recuperação de peças de alto valor no mercado e partes desgastadas e danificadas, sem a necessidade da troca por uma nova;

- \* revestimentos para implantes médicos;

- \* revestimentos para proteção contra a corrosão de peças, resistência ao desgaste, estruturas e equipamentos fabricados em materiais suscetíveis a diferentes formas de ataque corrosivo, abrasão, cavitação, erosão, indústrias químicas e petroquímicas utilizam nos processamentos;

- \* aumento da resistência contra a abrasão e proteção contra o desgaste adesivo e por *fretting*;

- \* Isolamento térmico e elétrico de componentes utilizados normalmente pelas indústrias automotiva e eletrônica;

- \* revestimentos com polímeros usados na proteção contra ataque químico.

### 2.6.3.3 Limpeza e rugosidade do substrato

Deve-se inicialmente realizar a preparação do substrato para aspersão térmica, realizando a retirada de contaminantes superficiais, tipo óxidos, umidade, poeira, óleos, graxas entre outros, devido ao calor do processo de aspersão não remover estes contaminantes, gerando com isso a não aderência do revestimento. (LIMA; TREVISAN, 2002 apud CASTRO, 2012).

O procedimento para preparar o substrato tem a finalidade de deixar a superfície ativa permitindo que as partículas propelidas tenham no momento do impacto, a máxima potencialização de aderência. E esta ativação da superfície é mediante as quatro etapas: \* Limpeza; \* Rugosidade da superfície; \* Camada de ligação; \* Pré-aquecimento. (PAREDES, 2009).

A técnica mais aplicada para realização da limpeza superficial, é através do jateamento com abrasivos, o qual além de limpar, dá a característica da rugosidade necessária à superfície, principalmente em peças de grande porte. Essa técnica ocorre através do choque das partículas abrasivas contra o substrato a velocidades altas. Superior aderência é atingida com abrasivos que sem contaminar a superfície, proporcionam rugosidade adequada. (ASM, 2004 apud BRITO, 2010).

Dentre os abrasivos mais utilizados para a realização da limpeza e rugosidade nas superfícies, pode-se destacar os abrasivos à base de  $Al_2O_3$  (óxido de alumínio), carvão de silício e granalha de aço. (PAWLOWSKI, 2008 apud CASTRO, 2012).

Para substratos moles, o parâmetro que mais influencia na rugosidade é o ângulo de jateamento, porém pouca influência para materiais de alta dureza. Entretanto, quando se considera a quantidade de incrustação, o ângulo de jateamento influencia para os materiais duros e também para os materiais de menor resistência, seguindo uma relação de quanto maior o ângulo de jateamento maior será o nível de incrustação. (BUSCHINELLI, 1999 apud COMELI, 2006).

A obtenção de uma rugosidade adequada é tão importante quanto a limpeza. De um modo geral, a rugosidade superficial mais adequada para a maioria dos revestimentos é aquela que apresenta  $R_a$  numa faixa de 2,5 a 13 $\mu$ m. (LIMA; TREVISAN, 2002 apud CASTRO, 2012).

#### 2.6.3.4 Preparação da superfície

É considerada por muitos, uma das etapas mais críticas da operação de aspersão térmica. A adesão dos revestimentos aspergidos está diretamente ligada a limpeza e a rugosidade da superfície a ser depositada. A aplicação rigorosa de procedimentos padrões para a preparação da superfície é necessária para garantir o sucesso da aplicação do revestimento. (MARQUES, 2008 apud BRITO 2010).

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. (LIMA; TREVISAN, 2002 apud COMELI, 2006).

A importância da preparação do metal base apresentado em um estudo realizado por Maranhão (1996), onde o mesmo informa que os procedimentos envolvidos na operação de preparação da superfície são os seguintes: a) pré-usinagem da superfície; b) limpeza e remoção de gorduras e c) jateamento abrasivo na superfície, para criar uma rugosidade controlada. (SCHIEFLER, 2004 apud COMELI, 2006).

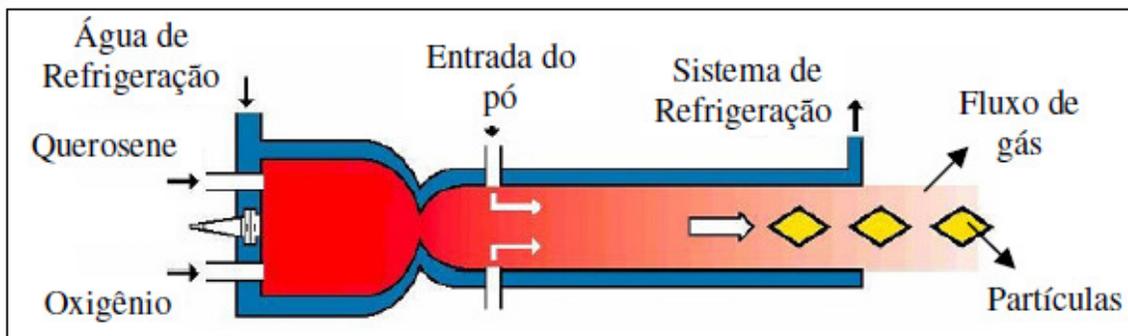
### 2.6.3.5 HVOF - Aspersão a chama de alta velocidade

O processo HVOF – Aspersão Óxi-Combustível de Alta Velocidade é um dos processos mais utilizados para a aspersão. Os processos de aspersão térmica podem ser categorizados em dois grupos básicos em função da geração de calor: por combustão: (FS, HVOF, D-gun, HVCW) e os 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 funde 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. (LIMA; TREVISAN, 2002 apud COMELI, 2006).

A aspersão óxi-combustível de alta velocidade (HVOF – High Velocity Oxi-Fuel) surgiu no início de 1980 e exerceu forte influência sobre as formas de aplicação da aspersão térmica. A técnica é baseada no projeto da 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 a uma velocidade de aproximadamente 650 m/s. Desta forma no momento do impacto na superfície as partículas aspergidas são distribuídas, formando um revestimento denso e com excelente aderência ao substrato (PAWLOWSKI, 2008 apud CASTRO, 2012).

A figura 18 mostra esquematicamente uma tocha HVOF, modelo JP-5000.

Figura 18 – Princípio de funcionamento da tocha para HVOF



Fonte: Comeli (2006 apud CASTRO, 2012).

Nesse modelo de tocha, a alimentação do pó é realizada após a expansão dos gases que entram em combustão na câmara e saem com energia cinética e térmica e transportam as partículas até o substrato a ser revestido.

Segundo LI et al. (1996 apud COMELI, 2006), no processo comparativo do processo a plasma (APS) com o HVOF, a velocidade hipersônica da chama aliada à baixa temperatura quando comparada, diminui a interação entre a mesma e o material de aspersão, e também a alta energia cinética das partículas de pó garantem uma boa coesão entre os pós dos revestimentos, dando condições para o emprego de revestimentos a base de carbetos.

Deve-se conhecer muito bem o projeto da pistola e suas características, assim como os parâmetros da aspersão e também do material a ser aspergido, para a garantia da obtenção de camadas com as propriedades desejadas, devido a forte dependência entre estes. No processo de aspersão térmica HVOF, tem-se particularidades que diferem pelo projeto da pistola, localização da injeção de pó e do tipo de combustível, resultando diretamente nas velocidades das partículas. As arpersões são definidas em função do tipo de aspersão e do pó, nos quesitos de definições de parâmetros. 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 (FREIRE, 2002 apud COMELI, 2006).

#### 2.6.3.6 Pós-utilizados no processo

Existem várias tipos de materiais de adição e formas de fornecimento de materiais aspergidos, tais como: os materiais aspergidos podem ser fornecidos em forma de vareta, cordão, arame, ou pó. Em função do tipo de processo, pode-se depositar vários tipos de camadas, tais como: metais, compostos intermetálicos, cermets, plásticos e até alguns vidros. Para os substratos onde serão aplicados estes depósitos, podem ser aplicados metais, óxidos, cerâmicos, vidros e a maioria dos plásticos. (BRITO, 2010).

De acordo com Lima e Trevisan (2002 apud CASTRO, 2012), as partículas de deposição são geralmente na faixa de 5 a 45  $\mu\text{m}$  para aplicação nos processos HVOF. Como a preparação do metal base são similares aos de outros processos de aspersão, a distância de aspersão varia na faixa de 120 a 300mm. A taxa de alimentação dos pós varia de 20 a 80 g/min. As taxas de fluxos de gás combustível estão entre 40 e 60 l/min e o fluxo de oxigênio é

bem maior, na faixa de até 430 l/min. A maioria dos pós aspergidos são carbetos, principalmente o de tungstênio e cromo.

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

Os pós utilizados no processo de aspersão podem derivar de um metal puro, uma liga metálica, um compósito, um carboneto, um cerâmico, um cermet ou combinação destes. Segundo Beczkowiaki (1998 apud COMELI, 2006), a morfologia dos pós determina a maneira com que as partículas ao se chocarem com o substrato, se deformarão e adaptará a ele, distribuindo homogeneamente as fases duras, formando a estrutura da camada.

Segundo Pawlowski (2008 apud COMELI, 2006), as aderências conseguidas nas camadas dos revestimentos utilizados com a técnica de HVOF são normalmente superiores a 90 Mpa e as porosidades inferiores a 1%, conseguem-se durezas de até 1245 HV e espessuras de material depositado na faixa de 100 a 300  $\mu\text{m}$  (0.1 a 0.3 mm).

Segundo Schwetzke e Kreye (2000 apud COMELI, 2006), a porosidade e a dureza estão diretamente ligadas a granulometria do pó, para os pós que possuem uma granulação máxima superior a 45 $\mu\text{m}$ , produzem-se em todos os sistemas durezas menores e maiores porosidades. Assim deve-se optar sempre que possível por pós aglomerados e sinterizados com granulometria abaixo de 45  $\mu\text{m}$ , ideal para melhorar as propriedades mecânicas das camadas. (MAGNANI, 2008 apud CASTRO, 2012).

#### 2.6.3.7 Porosidade

As porosidades são caracterizadas devido ao processo de aspersão térmica ser realizado através de superposição de partículas achatadas, e estas porosidades consistem tanto em cavidades isoladas, como em cavidades interconectadas capazes de permitir que líquidos e até gases penetrem até o substrato, ocasionando com isso um grave problema de penetração no revestimento até a superfície da peça. (SCHIEFLER, 2004 apud CASTRO, 2012).

Através da realização de uma análise metalográfica em corpos de prova através da avaliação com microscópio ótico, consegue-se detectar a presença de porosidades na superfície das peças, e com o auxílio de um analisador de imagens, permite-se avaliar a área

da camada observada e quantificá-la em porcentagens de poros presentes, área média de poros e número de poros. (PAREDES, 2009).

## 2.7 TRIBOLOGIA

### 2.7.1 Definição de tribologia

A palavra “tribologia” significa o ramo do conhecimento (do grego lógos) que estuda o atrito (do grego tribé). Sumarizando, o atrito é a força motriz que provoca o desgaste. Na década de 1960 verificou-se nos países mais industrializados um aumento notável de avarias em máquinas, provocadas pelo desgaste, ou outras causas a ele associadas. Com a utilização de novas tecnologias, com processos contínuos, a situação veio a agravar os efeitos de avarias. Este fato foi comprovado pelos especialistas em assuntos de tribologia e naquela oportunidade foram apresentadas comunicações analisando a situação. Somente em outubro de 1964, numa conferência organizada pela *Institution of Mechanical Engineers* em Londres foi reconhecida a necessidade de melhorar o ensino e coordenar a investigação no âmbito nacional. (SILVA, F.A., 2000).

A tribologia é definida como a ciência e a tecnologia da interação entre as superfícies com movimento relativo entre si e dos fenômenos que disso decorrem. A tribologia engloba os estudos relacionados ao atrito, a lubrificação e desgaste, e entendida através dos aspectos físicos, mecânicos, metalúrgicos e químicos do movimento relativo. (KAJDAS, 1990 apud BOTH, 2011).

Segundo Stoeterau (2004 apud CASTRO, 2012), a tribologia tem uma significativa parcela na economia, tendo em vista que cerca de metade da energia produzida no mundo é usada para vencer o atrito, o que se deduz que melhores projetos tribológicos têm significado considerável no futuro da própria humanidade.

A tribologia é uma ciência multidisciplinar, e atualmente se divide em quatro divisões principais que são: \* mecânica dos sólidos, \* mecânica dos fluidos, \* ciência dos materiais e \* química. A mecânica dos sólidos tem foco na matemática das tensões e temperaturas de contato, aborda assuntos como atrito e desgaste em componentes mecânicos. A mecânica dos fluidos estuda a matemática e os fenômenos envolvidos dos lubrificantes líquidos entre superfícies em movimento. A ciência dos materiais se detém mais aos mecanismos atômicos e

de microescala que provocam o desgaste ou degradação das superfícies e a química enfatiza na reatividade entre lubrificantes e superfícies sólidas. (LUDEMA, 1996 apud BOTH, 2011).

### **2.7.2 Mecanismos do desgaste**

O desgaste pode ser definido como o dano a uma superfície sólida, em função da remoção ou alteração do material através de uma força mecânica de um sólido, líquido ou gás. Ao tratar sobre os desgastes, deve-se assumir com cautela que o desgaste é um fenômeno totalmente mecânico, tendo em vista que a corrosão química pode depender de outros fatores de desgaste. A parte mais importante e crítica para o desgaste é saber a qual tipo de desgaste os componentes serão submetidos (ASM, 1992).

De acordo com ASM (2001), ocorrem vários tipos de classificações para os tipos de desgastes, diferenciando-se entre si apenas pelos esquemas de classificação e abordagens de cada autor, com experiências específicas. Outro complicador quanto à classificação é em virtude de ao mesmo tempo poder ter mais de um mecanismo atuando junto.

Neste trabalho é dada ênfase em uma classificação bastante utilizada e difundida por Budinski (ASM, 2001 apud BOTH, 2011), baseada na subdivisão do desgaste em quatro categorias: abrasão, erosão, adesão e fadiga superficial.

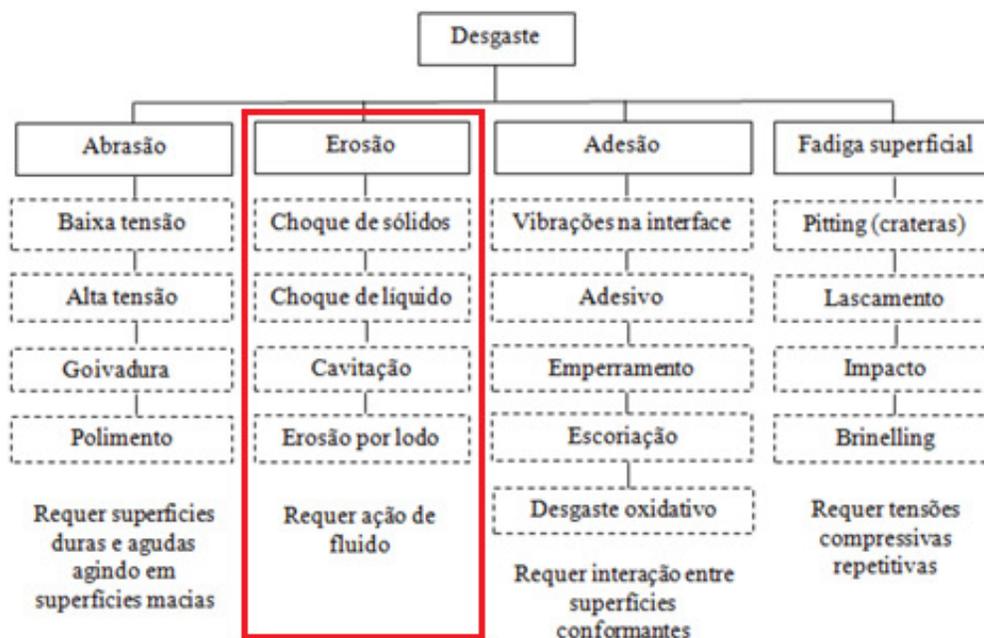
A figura 19 demonstra as subdivisões que envolvem cada categoria citada anteriormente.

Além das subdivisões das categorias, existe a abordagem do tipo de contato entre os sólidos, ou seja: se o desgaste é provocado por deslizamento entre superfícies, ou por partículas duras. Estes dois tipos de abordagens são parecidas, pois trabalham com o mesmo assunto visto de uma forma diferente.

Não existe consenso quando se trata em classificar os muitos processos de desgaste, cada processo obedece as suas próprias leis, sendo que em muitas vezes um dos modos de desgaste acaba influenciando nos outros modos de desgaste.

No trabalho em questão será dada ênfase, a categoria do desgaste por erosão provocada por partículas duras em contato com a ferramenta.

Figura 19 – Classificação dos modos de desgaste e suas subdivisões



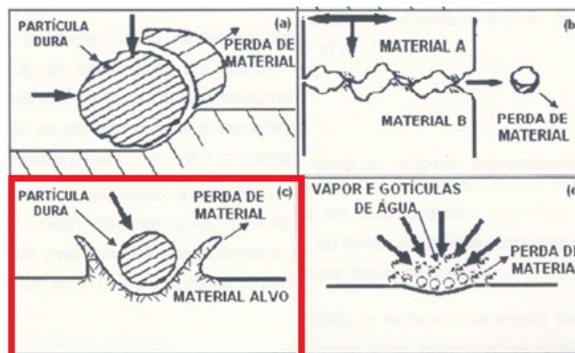
Fonte: Adaptada de Budinski (1988 apud BOTH, 2011).

De acordo com a norma DIN 50320 (1997 apud TASSI, 2010), os mecanismos de desgaste são subdivididos em quatro grupos distintos: adesão, abrasão, erosão e reação triboquímica, que é a reação que ocorre através da corrosão, gerando o desgaste. A norma ainda referencia outros tipos de desgaste, tais como: cavitação, fadiga de contato, *fretting* e *scuffing*, que também são causas de deterioração de materiais.

Já para Ball (1986 apud TASSI, 2010), o desgaste está dividido em três categorias: \* abrasivo, \* adesivo e \* erosivo. No entanto, é muito frequente a definição de quatro categorias: \* abrasão, \* erosão, \* desgaste adesivo e \* por cavitação.

A figura 20 ilustra as características de cada uma destas categorias. \* O desgaste abrasivo ocorre quando o material é retirado da superfície por ação de partículas duras. \* O desgaste adesivo é iniciado por pontos de contato localizados entre superfícies de materiais em contato e em movimento relativo. \* O desgaste por cavitação é um fenômeno que ocorre em máquinas hidráulicas, tubulações e, em qualquer dispositivo onde exista fluxo/escoamento de fluidos.

Figura 20 – Processo de desgaste: (a) abrasivo; (b) adesivo, (c) erosivo e (d) cavitação



Fonte: Adaptada de Ball (1986 apud TASSI, 2010).

### 2.7.3 Desgaste erosivo

A erosão é definida pela norma ASTM G40-92 como a perda crescente de material de uma superfície sólida devido à interação entre superfície e: fluido, partículas líquidas ou sólidas impactantes. Para Bhushan (1999 apud LOCATELLI, 2009), a erosão é um tipo de desgaste causado pelo impacto de partículas sólidas ou líquidas ou bolhas formadas no fluido contra uma superfície sólida.

O desgaste erosivo é a perda de material causada por impactos repetidos de pequenas partículas sólidas. Este tipo de desgaste ocorre quando partículas duras contidas em líquido, gás ou fluido se chocam em um sólido a certa velocidade (maior que 1m/s). O desgaste erosivo aparece através da redução ou afinamento dos componentes. Ocorrem também marcas que seguem a linha de fluxo do fluido atuante, aumento na rugosidade superficial, ausência de ranhuras direcionadas como na abrasão, e em alguns casos, surgimento de um padrão ondulatório na superfície (ASM, 1992).

Segundo Hutchings (1992), a extensão do desgaste depende do número e da massa das partículas incidentes, e também da sua velocidade de impacto.

Zum Gahr (1987 apud TASSI, 2010) destaca 6 diferentes tipos de erosão: (a) erosão por partículas sólidas em meio gasosos; (b) erosão por partículas sólidas devido a ação de líquidos; (c) erosão devido a ação de líquidos; (d) erosão-corrosão; (e) erosão por cavitação e (f) erosão térmica.

A diferença entre a erosão e a abrasão está na forma como a partícula se choca na peça. A abrasão ocorre com o deslizamento em função de uma força aplicada, por outro lado, a erosão por partícula sólida é uma série de partículas incidindo e rebatendo na superfície da

peça, com a força provocada pela desaceleração das partículas. A maior dificuldade para distinguir entre um mecanismo e outro, ocorre quando há incidência de um fluido muito denso em particulados, que acaba deslizando sobre a superfície e provocando desgaste da mesma forma que na abrasão. (BOTH, 2010).

Cada tipo de erosão possui o seu mecanismo de desgaste. A erosão por partículas sólidas são influenciadas pela velocidade de impacto, pelo ângulo de incidência e pela massa da partícula e em função do meio onde ocorre o contato, entre outros. (SILVA, F.J., 2008).

Algumas soluções aplicadas para minimizar o desgaste erosivo propõem a mudança das características da incidência do fluxo, das partículas e do material, ou a utilização de filtros ou de materiais com boa resistência e alterações nas superfícies como tratamentos térmicos e revestimentos superficiais no substrato.

#### **2.7.4 Erosão por partículas sólidas**

Na erosão por partículas sólidas o desgaste é ocasionado por eventos de impactos parecido e independentes, sendo assim o contato entre as partículas duras e a peça é muito rápido, desta forma a erosão tem características muito diferentes dos demais processos como a abrasão, o deslizamento e outros, onde o contato entre partícula e peça se mantém contínuo. (KUNIOSHI, 2004 apud LOCATELLI, 2009).

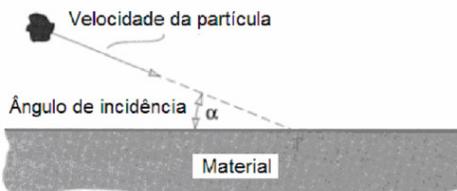
De acordo com Finnie (1995 apud SILVA, F.J., 2008), as variáveis que influenciam na energia de impacto e taxas de erosão são divididas em três grupos:

- (1) – variáveis do impacto;
- (2) – variáveis da partícula erosiva e,
- (3) – variável do material,

Sendo que as variáveis do impacto descrevem o escoamento das partículas, e são formadas pela velocidade da partícula ( $v$ ), pelo ângulo de incidência ( $\alpha$ ) e pelo fluxo de concentração de partículas e escoamento do fluido.

Segundo Hutchings (1992), o ângulo de incidência é definido em relação à superfície do material erodido e com a trajetória da partícula erosiva. Na prática o impacto ocorre por diversas partículas, e podem incidir simultaneamente em vários ângulos, normalmente ( $\alpha = 90^\circ$ ) e obliquamente (ângulos perto de zero), conforme evidenciado na figura 21.

Figura 21 – Ângulo de incidência de partícula sólida sobre a peça



Fonte: Silva, F.J. (2008).

Este trabalho abordará a erosão ocasionada através da incidência de partículas sólidas atuando sobre a superfície dos discos, mais especificamente a partícula de grãos de dolomita incidindo sobre os dentes dos discos, de acordo com a figura 22.

Figura 22 – Representação da incidência da dolomita sobre o dente do disco



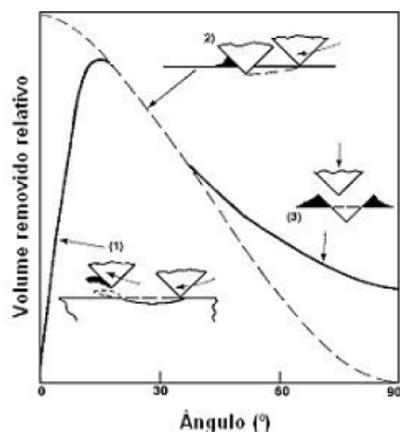
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para materiais dúcteis como metais e polímeros, o desgaste erosivo ocorre através da deformação plástica por descascamento ou corte. A figura 23 mostra o mecanismo de erosão em materiais dúcteis em função do ângulo de incidência do erodente. Para os materiais com grandes probabilidades de trincas e fissuras, materiais como os cerâmicos, por exemplo, são removidos pelas interligações de trincas que divergem do ponto de choque entre a partícula e a superfície da peça. (BERTHIER; HOPPERT, 1990 apud LOCATELLI, 2009).

Os materiais dúcteis e frágeis reagem diferentemente em relação ao ângulo de incidência das partículas sobre a peça. Nos materiais dúcteis, o maior desgaste ocorre para os ângulos rasos, enquanto que para os materiais frágeis, a incidência ocorre para ângulos normais. Outros fatores também afetam as avaliações, entre eles pode-se citar: \* as características das partículas, \* o formato, \* tamanho, \* dureza e a \* facilidade em fraturar.

Para os materiais do substrato ou revestimento, são relevantes as suas propriedades, como dureza, comportamento frente à deformação e microestrutura. (BOTH, 2010).

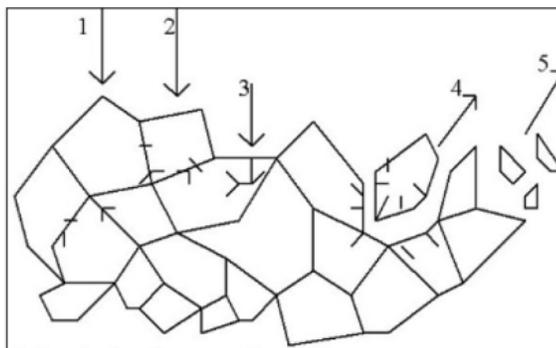
Figura 23 – Resultados experimentais para a erosão de um metal dúctil (linha contínua) e três mecanismos para remoção de material



Fonte: Finnie (1995 apud LOCATELLI, 2009).

A figura 24 demonstra o mecanismo de desgaste para materiais frágeis para ângulos próximos a 90°, onde: **1)** Fadiga da fase intergranular; **2)** Microtrincas no contorno de grão; **3)** Indução de microtrincas no grão; **4)** Desprendimento do grão; **5)** Desprendimento fragmentos grão.

Figura 24 – Mecanismos de desgaste para materiais frágeis

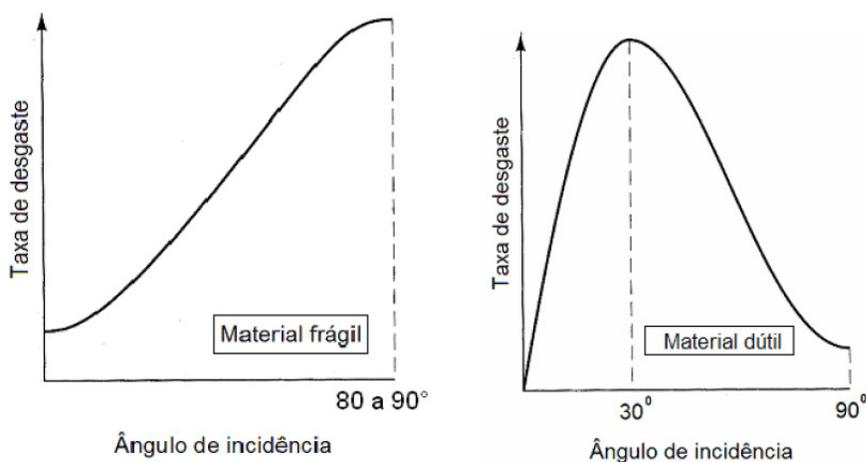


Fonte: Madruga et al. (1994 apud LOCATELLI, 2009).

Segundo Sundararajan (1991 apud SILVA, F.J., 2008), duas expressões foram criadas para representar os modelos de Hutchings (1981), para o mecanismo da “deformação crítica

por fadiga” tratada para ângulos de incidência próximos de  $90^\circ$  e outro modelo utilizado para todos os demais ângulos de impacto e diversas formas de partículas, baseado na energia absorvida durante as condições de impacto, “deformação crítica”. As expressões criadas referentes a estes mecanismos tratam sobre os impactos normais baseados nas deformações plásticas e outra para os diversos ângulos baseado na energia absorvida no cisalhamento. A taxa de erosão é baseada na relação do ângulo de incidência da partícula e o material. A figura 25 apresenta o efeito do ângulo de impacto sobre a taxa de desgaste nos materiais frágeis e dúcteis.

Figura 25 – Efeito do ângulo de impacto (taxa de desgaste materiais frágeis/dúcteis)

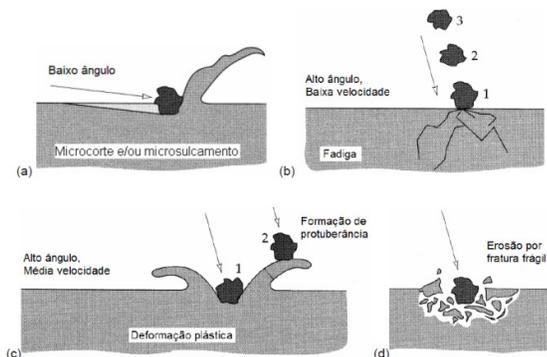


Fonte: Zum Gahr (1987 apud SILVA, F.J., 2008).

As maiores taxas de desgaste são verificadas para os ângulos de  $20$  a  $30^\circ$ , caindo para quase a metade em ângulos de incidência normal. Isto reflete o típico comportamento de material erodido dúctil, diferentemente das condições de fratura frágil e deformação plástica que possuem as maiores taxas de remoção de material através das incidências em ângulos normais, caracterizando o comportamento frágil. Alguns materiais frágeis fraturam com pouca ou nenhuma deformação que é o exemplo dos vidros, e com taxas de desgaste máxima atuando em ângulos de  $90^\circ$  devido as trincas superficiais no ponto de impacto. (WANG, 1995 apud SILVA, F.J., 2008).

A figura 26 apresenta a forma esquemática dos mecanismos básicos da erosão por partículas sólidas.

Figura 26 – Mecanismos básicos de erosão por partículas sólidas



Fonte: Stachowiak e Batchelor (2001 apud SILVA, F.J., 2008).

Onde:

- (a) – comportamento dúctil, baixos ângulos de incidência;
- (b) – comportamento frágil, fadiga, altos ângulos e baixas velocidades;
- (c) – deformação plástica, alto ângulo e média velocidade e,
- (d) – fratura frágil.

Segundo Ball (1986 apud TASSI, 2010), o desgaste erosivo depende das condições em que ocorre a solicitação devido as variáveis de tamanho da partícula, natureza, massa erodente, tipo, velocidade do fluxo e ângulo de impacto, estarem diretamente relacionadas ao grau de severidade da erosão.

A taxa de erosão é medida através de testes de erosão ou calculada utilizando-se os modelos matemáticos propostos na literatura. Em um dos modelos genéricos, a taxa de erosão é calculada em função da densidade do material erodido, da velocidade de impacto e da dureza do material de acordo com a equação 2.2. (HUTCHINGS, 1992).

$$E = \frac{K\rho V^2}{2H} \quad (2.2)$$

Onde:

**E** = taxa de erosão (g/g);

**K** = constante;

**v** = velocidade de impacto (m/s);

**H** = dureza do material erodido (Pa);

**P** = densidade do material erodido (kg/m<sup>3</sup>).

Como esta equação não leva em conta os efeitos das variáveis de ângulo de incidência, tamanho e forma da partícula, entre outras, a constante **K** é controlada por estas variáveis e utiliza-se então com valores típicos de  $10^{-5}$  a  $10^{-1}$ . Apesar das limitações e simplificações realizadas nestes modelos propostos para erosão, podem ser úteis para fornecerem estimativas para desgastes em projetos. (BHUSHAN, 2002 apud SILVA, F.J., 2008).

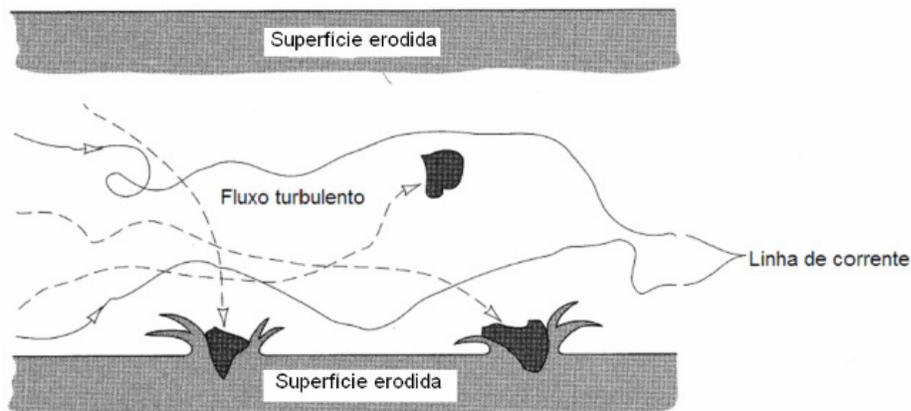
### **2.7.5 Variáveis relativas ao impacto**

De acordo com Hutchings (1992), um aumento moderado da velocidade de impacto, resulta em um grande aumento da taxa de erosão, independente do ângulo e concentração de partículas erosivas. Isto tudo está relacionado a energia de velocidade adquirida pelas partículas, em função da massa das partículas abrasivas e também da forma do impacto.

Segundo Zum Ghar (1987 apud SILVA, F.J., 2008), para metais puros, a taxa de erosão é proporcional à velocidade ( $V^n$ ) e depende da dureza do material erodido. De acordo com o material, se dúctil ou frágil, o índice “n” varia de 2,3 a 3.

Com o aumento da quantidade de partículas, ocorrem muitos choques entre as mesmas gerando uma diminuição da velocidade. Outro motivo da não linearidade é o acúmulo de partículas na superfície da peça gerando uma incrustação. Isto ocorre normalmente para materiais macios e com altos ângulos de incidência, este fenômeno é conhecido como período de incubação. O escoamento dos fluídos está diretamente relacionado ao impacto e a taxa de erosão. Para escoamentos onde o fluído é um meio turbulento o impacto das partículas erosivas é bem mais intenso quando comparado aos escoamentos laminares, resultando com isso em taxas bem maiores de desgaste erosivo. A única exceção é quando o fluxo laminar incide a um ângulo de  $90^\circ$  sobre a superfície da peça, ocasionando o chamado de desgaste tipo de cratera, conforme demonstrado pela figura 27. (HUTCHINGS, 1992).

Figura 27 – escoamento turbulento de um fluido com partículas sólidas



Fonte: Stachowiak e Batchelor (2001 apud SILVA, F.J., 2008).

A velocidade de impacto das partículas erodentes tem um significativo efeito sobre a taxa de erosão ( $\Delta E$ ) de um material, dada pela razão entre a quantidade de material perdido no desgaste e sua quantidade original. A dependência da velocidade é caracterizada por um expoente  $p$  e dada pela equação 2.3.

$$\Delta E \propto V^p \quad (2.3)$$

Onde:

$\Delta E$  = taxa de desgaste erosivo (g/g);

$V$  = velocidade de impacto (m/s);

$p$  = constante do material.

Segundo Hutchings (1992), para materiais metálicos um valor encontrado para o expoente  $p$  é de 2,4 para baixos ângulos para as ligas e metais. Enquanto um valor médio de 2,55 para  $p$ , diferentemente dos valores dados para os polímeros e cerâmicos que são de 3 e 5. (FINNIE, 1995 apud LOCATELLI, 2009).

Goodwin et al. (1970 apud TASSI, 2010) afirma que o valor de  $p$  decresce com a diminuição do tamanho das partículas erodentes.

O expoente  $p$  varia em um intervalo de 0,9 a 2,8 de acordo com o aumento da temperatura e velocidade de ensaio. (SUNDARARAJAN; ROY, 1991 apud TASSI, 2010),

### **2.7.6 Variáveis relativas à partícula erosiva**

Um dos fatores que devem ser levados em conta nos problemas envolvendo a erosão é o tamanho da partícula. Para a maioria dos casos, os tamanhos podem variar de 5 a 500 $\mu$ m. Em geral, quanto maior o tamanho da partícula, maior será a taxa de erosão causada, e maior será a energia de impacto, levando com isso, a um maior desgaste. (HARTWICH, 2001 apud SILVA, F.J., 2008).

Segundo Finnie (1995 apud SILVA, F.J., 2008), em função do formato das partículas, é observada uma maior taxa de desgaste em sistemas onde atuam partículas mais angulosas. A forma da partícula erosiva influencia nas deformações da superfície erodida. Partículas mais arredondadas geram menos deformações localizadas, necessitando uma maior quantidade de impactos para a retirada de materiais.

A taxa de desgaste é também muito influenciada pelo fator de dureza entre partícula erosiva e a superfície erodida. Partícula com durezas menores que o substrato, causa menos desgaste em função das mais duras. A sílica, por exemplo, vem da natureza e apresenta uma dureza superior a muitos aços, na ordem de 800HV, normalmente uma dureza obtida para aços martensíticos, com alto teor de carbono. (DIVAKAR et al., 2005 apud SILVA, F.J., 2008).

### **2.7.7 Variáveis do material**

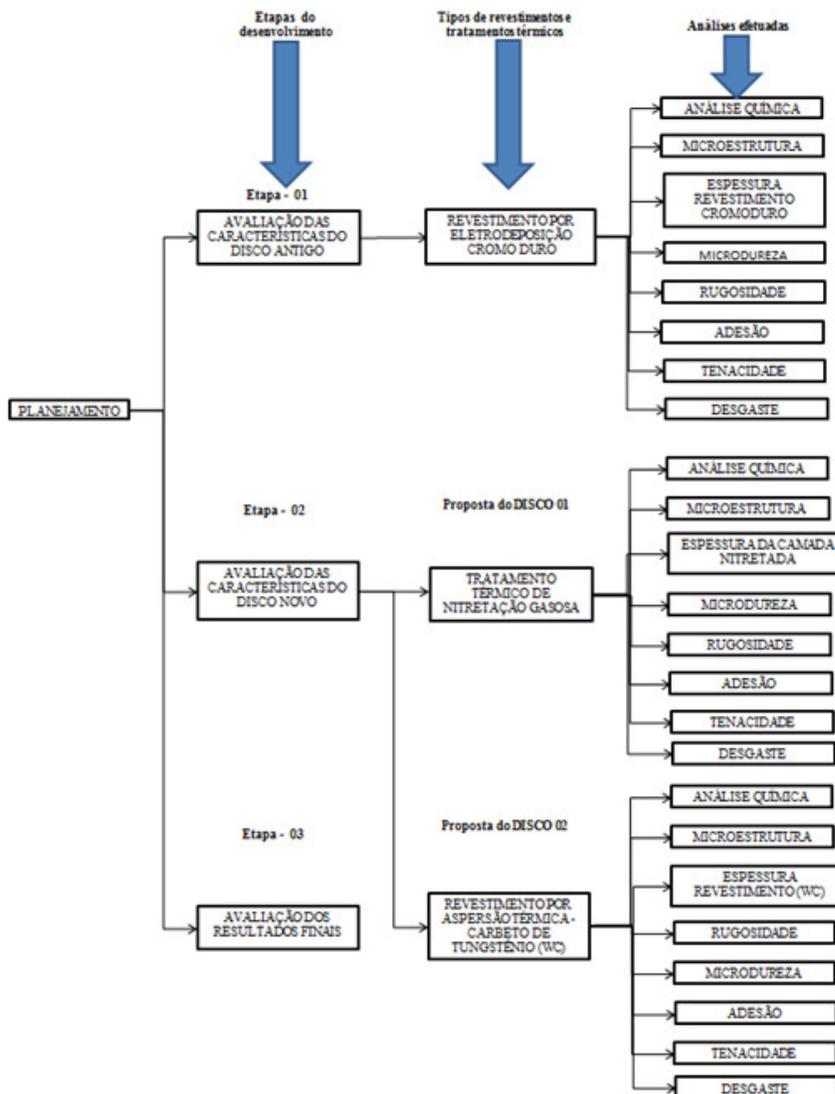
A resistência à erosão depende da dureza do material alvo e da partícula erosiva. Para quase todos os modelos de remoção de material por partículas sólidas, a dureza do material é considerada uma das principais variáveis do processo erosivo. Mas não pode ser considerada individualmente como a única fonte, deve-se levar em conta também características como a microestrutura e a tenacidade à fratura em função do mecanismo de desgaste atuante no conjunto. Para o mecanismo de microcorte e microsulcamento, o que mais impacta na taxa de desgaste é a dureza, desta forma melhorando a resistência do material, resulta numa maior resistência a penetração das partículas erosivas, aumentando com isso a resistência à erosão. (HAWTHORN et al., 1999 apud SILVA, F.J., 2008).

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 DISCO ANTIGO (CROMO DURO)

Este capítulo visa demonstrar as etapas e metodologias que foram utilizadas no desenvolvimento deste trabalho. A pesquisa foi realizada seguindo um planejamento dividido em três etapas que são: \* Etapa 01 - avaliação das características do disco antigo, \* Etapa 02 - avaliação das características dos discos novos, e \* Etapa 03 - avaliação dos resultados finais (Figura 28).

Figura 28 – Etapas do desenvolvimento da pesquisa



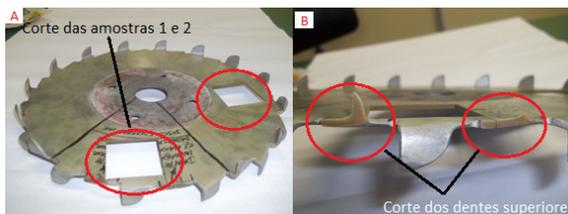
Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.1.1 Escolha do material e definições dos métodos aplicados

Como a idealização da proposta de melhoria dentro da fábrica partiu do acompanhamento realizado sobre as condições do disco utilizado até então, sem o conhecimento das características do metal utilizado como substrato, evidenciou-se primeiramente a necessidade da avaliação do metal, para, após serem estudadas quais as propostas comparativas seriam aplicadas ao processo, mantendo-se as mesmas características do substrato de referência.

Diante disso, a primeira ação foi a realização da retirada de corpos de prova (CP), de um disco utilizado no processo (Figura 29), e enviado para um laboratório metalográfico onde se constatou que o aço base utilizado em todos os discos da fábrica é o aço inoxidável martensítico AISI 420. As características metalográficas, análises químicas dos elementos e demais informações inerentes ao CP enviado a teste serão referenciadas no capítulo 4, resultados e discussões. Demais informações estão no relatório completo que se encontra no Anexo B deste trabalho.

Figura 29 – Corte dos corpos de prova avaliados em laboratório



Fonte: Elaborada pelo autor.

Devido à terceirização da fabricação dos dois novos discos que foram colocados em teste, foi utilizada a composição química dos elementos obtida no relatório referenciado para garantir que a compra do material ficasse dentro das especificações.

O aço inoxidável martensítico adquirido e utilizado na fabricação dos dois novos discos e para a utilização nos CP para os ensaios é fornecido em chapa de 3,17 x 1240 x 3000mm, atendendo a norma ASTM A276/2010 de acordo com o certificado de qualidade n° 7567/13 emitido pela empresa AÇOBRAS AÇOS INOXIDÁVEIS, fornecedora do material (Anexo C).

Seguindo na metodologia do trabalho realizado, as avaliações dos processos evidenciados pelas etapas de um a três na figura 28, foram desenvolvidas seguindo o

procedimento criado para organizar as atividades de uma maneira em que todas as etapas de avaliação sejam idênticas.

Sendo assim, o equipamento utilizado para fabricar a massa referenciada, possui dois motores elétricos denominados por M1= motor direito e M2= motor esquerdo, com as seguintes características técnicas: Motores trifásicos, modelo 250S/M - GK21249, frequência de 60Hz, categoria N, potência de 55Kw=75(Hp-cv), rendimento de 93,7%, rotação de 1780RPM, corrente de partida de 7A e tensão de 220/380/440V.

Esses motores são responsáveis pela realização da dispersão das partículas do pó de dolomita por meio da quebra dos grumos em função da sua rotação. Cada um desses motores, serve para movimentar dois eixos dotados de dois conjuntos de discos dispersores, ou seja: M1= motor direito, disco inferior e superior, e M2= motor esquerdo, disco inferior e superior.

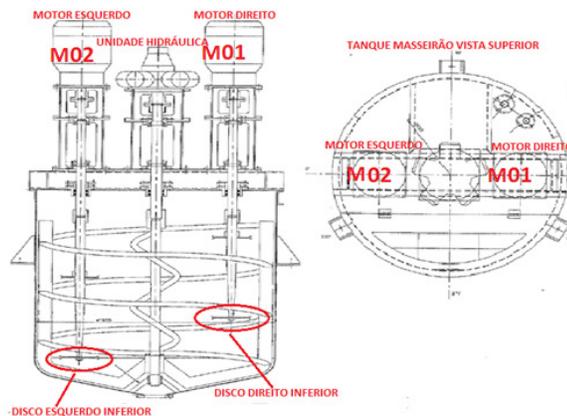
Para as propostas de avaliações dos parâmetros de desgaste erosivo gerados nos discos, por definição utilizam-se os dois discos inferiores, esquerdo e direito devido os mesmos estarem mais tempo expostos a ação do pó de dolomita, tendo em vista que desde o início do processo de produção da OP, os discos encontram-se em contato direto com a massa em formação.

Nesta metodologia, coloca-se em teste no disco direito “M1”, a proposta de melhoria aplicada com tratamento termoquímico de nitretação gasosa, e no disco esquerdo “M2”, a proposta de revestimento de carbetto de tungstênio aspergido termicamente.

Além do sistema de dispersão através dos discos movido pelos motores M1 e M2, o processo de fabricação da massa, possui um sistema de agitação tipo âncora, movido por meio de uma unidade hidráulica modelo CT5060ACMUH7100 - PM2191, pressão mínima de 500Psi, pressão máxima de 2000Psi acionada por um motor tipo Exact Power (hidráulico), modelo P200-3, com pressão máxima de trabalho de 25Bar e 2000cc, conforme evidenciado na figura 30.

A âncora tem a função de realizar a movimentação dos produtos utilizados na fabricação da massa, fazendo com que ocorra a suspensão dos sólidos, pó de dolomita, e também para fazer a homogeneização das matérias primas. Neste sistema, onde a mistura homogênea das matérias primas, associado ao cisalhamento dos sólidos no meio líquido, é de intensa necessidade, a agitação constante deve ser realizada para se conseguir uma eficiente dispersão através do uso dos discos.

Figura 30 – Desenho do masseirão onde são fabricadas as massas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para todas as etapas seguintes, realizaram-se as avaliações dos discos antes e após o uso, aplicando a metodologia definida neste trabalho para manter sempre os mesmos dentes escolhidos. Como o sistema de dispersão contém os discos instalados em dois eixos que são acionados quando em contato com a massa, para não realizar as avaliações em todos os trinta dentes, definiu-se por escolher 8 dentes dentre os trinta dentes da metade superior do disco, realizando a marcação de um deles com a letra “D” quando for referente ao disco inferior direito instalado no eixo do motor M1, ou “E” quando for referente ao disco inferior esquerdo instalado no eixo do motor M2.

Desta forma, a identificação dos dentes que fazem parte dos testes, foram marcados com as respectivas letras “D” ou “E”, seguindo no sentido horário e, intercalando um dente sim e outro não na parte superior, até o oitavo dente conforme evidenciado na figura 31.

Figura 31 – Desenho esquemático da identificação dos dentes dos discos avaliados

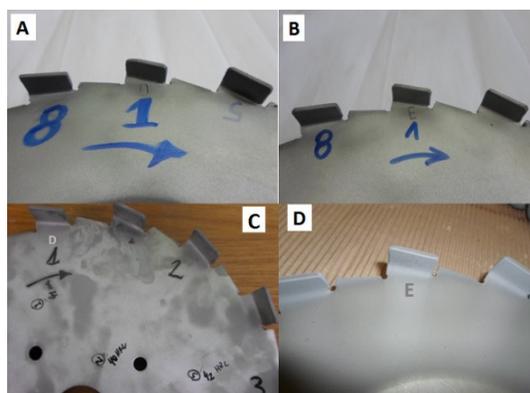


Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir, tem-se na figura 32, as imagens representativas das identificações de todos os discos que fazem parte das avaliações realizadas neste trabalho, seguindo a metodologia definida anteriormente, apresentadas da seguinte maneira:

- A – disco revestido com cromo duro, instalado no motor direito, M1;
- B – disco revestido com cromo duro, instalado no motor esquerdo, M2;
- C – disco com tratamento de nitretação gasosa, instalado no motor direito, M1 e;
- D – disco com aspersão térmica de WC, instalado no motor esquerdo, M2.

Figura 32 – Marca de identificação dos discos



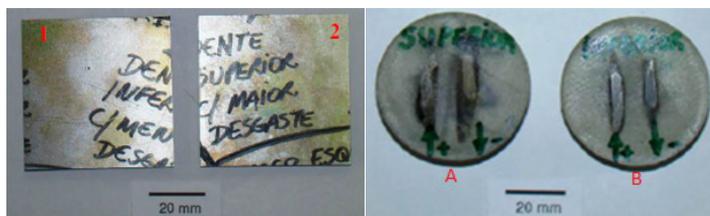
Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.1.2 Características químicas do aço inoxidável utilizado nos discos antigos

A composição química do aço utilizado foi determinada através de avaliação e caracterização do material realizado pelo Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), seguindo o procedimento interno GAF PE 008 (Método de ensaio de análise química em materiais ferrosos), utilizando o espectrômetro marca Spectro, modelo ESPECTROLAB.

Para se obter a análise da composição química e dos demais testes realizados em função dos dentes do disco, foram preparadas duas amostras de chapa 50 x 50mm de comprimento e duas amostras dos dentes superiores e inferiores do disco conforme figura 33, e enviadas para o laboratório onde foram nomeadas como “Amostra 1 e 2”.

Figura 33 – Amostras 1 e 2 (esquerda) e dentes do disco embutidos A e B(direita), enviadas para análise em laboratório



Fonte: LAMEF (2013).

O corte das amostras foi realizado nas dependências do laboratório de usinagem da Universidade de Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) em máquina de eletroerosão a fio, marca MITSUBISHI, modelo FX 10K controle DNC 3010, conforme a figura 34, de modo a evitar a ocorrência de alterações microestruturais devido ao aquecimento gerado pelo corte com máquinas rotativas como a serra circular manual ou de bancada.

Figura 34 – Detalhe da máquina de eletroerosão a fio (A) e fixação do disco para o corte das amostras (B)



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.1.3 Comparativo e validação do aço inoxidável utilizado nos testes

De acordo com os resultados obtidos na avaliação realizada pelo laboratório LAMEF, realizou-se um comparativo entre as porcentagens encontradas e a composição química dos elementos evidenciados, e comprovados a partir do certificado de qualidade fornecido pela empresa AÇOBRAS AÇOS INOXIDÁVEIS.

A comprovação da igualdade das composições químicas foi avaliada segundo a norma ASTM A276/2010 referenciada no certificado de qualidade, em comparativo a norma brasileira NBR 5601/1981 e também ao citado na referência. (ASM, 1998, p. 280).

### 3.1.4 Análise microestrutural do disco antigo

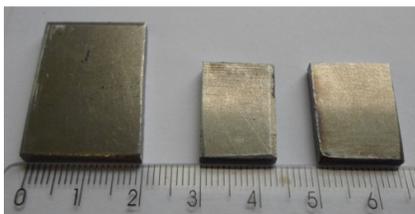
As amostras do aço inoxidável destinadas a análise metalográfica foram apenas cortadas na máquina de eletroerosão a fio e embutidas nas instalações do laboratório de metalografia da UNISINOS e, após, foram enviadas ao laboratório LAMEF.

Para a obtenção das microestruturas metalográficas, foram cortadas amostras no sentido transversal do CP seguindo o procedimento interno GAF PE 004 (Preparo de amostras para análise metalográfica). O reagente químico utilizado é composto por: 1% de ácido pícrico, 5% de ácido clorídrico e álcool.

### 3.1.5 Comparativo microestrutural (disco antigo X aço inox utilizado nos testes)

O procedimento interno realizado no laboratório de metalurgia física da UNISINOS, válido para as amostras de cromo duro, nitretação e aspensão, quando da análise metalográfica do aço inoxidável AISI 420 no estado de fornecimento da empresa AÇOBRAS AÇOS INOXIDÁVEIS, procedeu-se com o corte transversal e longitudinal de três amostras conforme evidenciado na figura 35. Os cortes foram realizados manualmente através do uso de arco de serra, tendo em vista o aço encontrar-se sem tratamento térmico e sem revestimento superficial.

Figura 35 – Amostra do aço inoxidável fornecido pela empresa AÇOBRAS

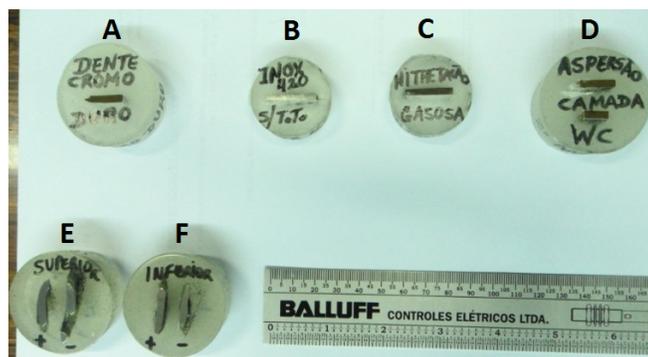


Fonte: Elaborada pelo autor.

As demais fases que serão apresentadas na sequência abaixo, evidenciando as formas que foram realizadas e as etapas que envolvem as técnicas metalográficas, foram aplicadas

para todas as demais amostras que fazem parte do estudo referenciado, ou seja: \* amostra do dente revestida com cromo duro (A), \* amostra do aço inoxidável AISI 420 sem tratamento térmico fornecido pela empresa AÇOBRAS (B), \* amostra do aço após a realização do tratamento térmico de nitretação gasosa (C), \* amostra do aço após a realização do revestimento superficial de carbeto de tungstênio (D) e \* amostras dos dentes superior e inferior da posição mais e menos desgastada (E, F) do disco já utilizado conforme a figura 36.

Figura 36 – Amostras embutidas para análises metalográficas



Fonte: Elaborada pelo autor.

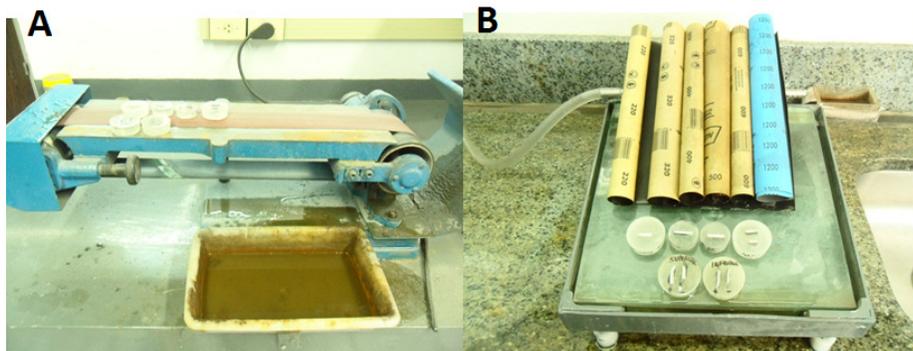
Todas as etapas do trabalho versando sobre as instruções de preparação das amostras, tais como: escolha do CP, metodologia do corte, técnicas de embutimento, lixamento e polimento e ataque químico, foram realizadas seguindo as prescrições contidas nas normas brasileiras NBR13284/1995 (Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica), NBR 8108/1983 (Ataques com reativos metalográficos em ligas ferrosas) e indicações contidas na referência de Colpaert (1974).

Após a realização do corte, as amostras passaram pelas operações de lixamento manual, seguindo uma sequência a partir da lixa de granulometria maior para menor. Assim sendo, ainda com a estrutura bruta, utilizou-se a lixadeira elétrica, conforme figura 37 (A) com as lixas de granulometrias 80, 100 e 120 para dar forma à resina embutida, e as demais granulometrias 220, 320, 400, 500, 600 e 1200, respectivamente, foram realizadas manualmente posicionando-as sobre um dispositivo que permite a lavagem e limpeza da amostra e da lixa, conforme figura 37 (B), facilitando as operações.

Seguindo as técnicas referenciadas para o lixamento, os movimentos devem ser realizados de tal forma que os riscos fiquem orientados para a mesma direção. Em cada troca

de lixa, deve-se alterar a direção do lixamento girando a amostra em 90°, até remover todos os riscos anteriores.

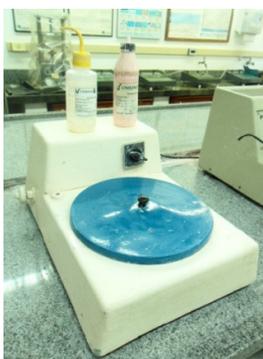
Figura 37 – Lixadeira elétrica (A) e mesa para lixamento (B)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Finalizando o processo de lixamento, foi realizado o polimento das amostras através da utilização de um abrasivo de alumina com 0,5 $\mu$ m de granulação sobre um disco de algodão em politriz (Figura 38) a 600 rotações por minuto (RPM), realizando o movimento da amostra no sentido contrário ao de rotação do disco acompanhada de água para evitar a secagem do abrasivo.

Figura 38 – Máquina Politriz



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a etapa de polimento, todas as superfícies das amostras foram limpas com algodão umedecido em álcool na concentração de 99,3%, e secas com soprador térmico.

Seguindo as prescrições contidas na norma NBR 8108/1983, para revelar as microestruturas (ME) presentes no aço inoxidável, realizou-se o ataque químico da superfície

com o reativo de Vilella (5mL de ácido clorídrico + 1g de ácido pícrico + 100mL de etanol), através do método de imersão das amostras dentro da solução, até que as mesmas revelassem um aspecto opaco característico do ataque químico.

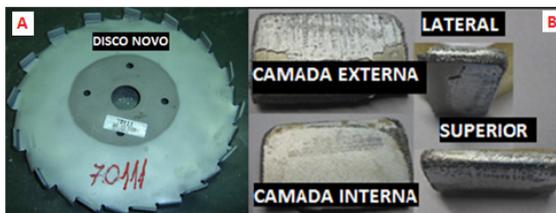
### 3.1.6 Avaliação das espessuras das camadas do disco antigo (com utilização)

Utilizando-se das mesmas amostras, enviadas ao laboratório LAMEF, das medições das microdurezas dos dentes mais e menos desgastadas, realizou-se a média de cinco medições das camadas de revestimentos de cromo duro, com a utilização do software Image J, para demonstrar fisicamente as características da ação do desgaste erosivo ocorrido nos dentes em processo real.

### 3.1.7 Avaliação das espessuras das camadas dos discos

Para a realização da avaliação da espessura da camada depositada através do processo de eletrodeposição de cromo duro sobre as superfícies dos dentes do disco antigo, foi adotado o procedimento de retirada de um dos dentes de um disco que ainda não tinha sido colocado em processo, ou seja: disco não desgastado, sem utilização (Figura 39) e realizado os procedimentos metalográficos citados anteriormente para visualizar as camadas e medi-las. Para os processos de nitretação e aspensão térmica, foram utilizados os corpos de provas enviados junto aos tratamentos.

Figura 39 – Dente de um disco antigo com revestimento de cromo duro



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tal procedimento foi utilizado para a realização da avaliação da espessura da camada, com o auxílio de um microscópio óptico da marca OLYMPUS, modelo CX 31, e uma câmera digital acoplada ao MO.

Para a avaliação da camada do dente de cromo duro, realizou-se um comparativo entre as especificações contidas no certificado de qualidade nº 001.12.12, emitido pela empresa TECNOCROMO CROMAGEM INDUSTRIAL (Anexo D), e a comprovação prática obtida com as medições (Figura 40).

Figura 40 – Microscópio óptico utilizado para avaliações das espessuras e ME



Fonte: Elaborada pelo autor.

As medições das camadas no dente utilizado como CP, foram realizadas através da observação das imagens da camada e o respectivo registro das espessuras foi feito através da utilização do software TS VIEW 7, que acompanha a câmera digital marca OPTICAM MICROSCOPIA de 9Mpixel.

### **3.1.8 Avaliação Microdureza Vickers (núcleo/camada do disco antigo com utilização)**

Para a realização das avaliações das microdurezas, realizou-se o corte de dois dentes de um disco velho, já desgastado conforme evidenciado na figura 29 (B). Inicialmente foi definido por avaliar os dentes já desgastados no processo, para se obter os pontos de maior incidência do desgaste e após poder definir quais os parâmetros serão considerados e avaliados nas novas propostas. Seguindo na avaliação do disco velho, foi escolhida a realização do corte dos dentes superiores do disco, com maior e menor desgaste visualmente apresentado.

Diante do exposto, foi enviado o CP evidenciado pela figura 36(E) para o LAMEF, onde foram realizadas as medições seguindo o procedimento interno GAF PE 005 (Ensaio de dureza Vickers para materiais metálicos).

### **3.1.9 Comparativo Microdureza Vickers (disco antigo com utilização X disco antigo sem utilização)**

Após as constatações obtidas através do relatório emitido pelo LAMEF, referenciado na tabela 4 do capítulo 4, realizado sobre um CP de um dente já desgastado, foi realizada a comprovação das durezas das camadas de cromo duro eletrodepositadas sobre o substrato de aço inoxidável de um dente sem utilização.

Os procedimentos de comprovação das microdurezas das amostras de cromo duro, nitretação e aspensão, foram realizados junto ao laboratório de metalurgia física da UNISINOS, utilizando-se dos CPs referenciados anteriormente e auxílio do microdurômetro, marca MITUTOYO, modelo HM-101 referenciado pela figura 41.

Figura 41 – Microdurômetro Vickers modelo HM-101



Fonte: Elaborada pelo autor.

### **3.1.10 Comparativo e validação da dureza do aço inoxidável utilizado nos testes**

Diante da necessidade de comprovação das durezas dos novos discos fabricados para as propostas deste trabalho, foi utilizado o CP referenciado pela figura 35, para os ensaios de medidas de durezas Rockwell “B”, indentedor de esfera de aço de 1/16” e aplicação de uma carga de 100Kgf, conforme figura 42.

Figura 42 – Durômetro da Unisinos utilizado para medições Rockell “A e B”



Fonte: Elaborada pelo autor.

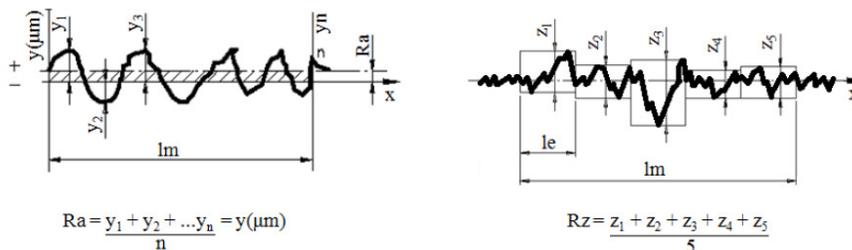
### 3.1.11 Avaliação dos parâmetros de rugosidades dos discos

Para os componentes onde se aplicam revestimentos e tratamentos térmicos com a intenção de melhorar as condições de trabalho, as rugosidades superficiais são muito importantes quando associadas à qualidade da adesão da camada tratada ou dos revestimentos ao substrato. Nas três situações estudadas neste trabalho, citam-se dois casos em que a qualidade da adesão é importante para a qualidade final do revestimento, que são os revestimentos aspergidos termicamente e os revestimentos eletrodepositados. Além destes dois citados, referencia-se também o tratamento termoquímico de nitretação gasosa.

Para todos os três casos, utiliza-se nos testes realizados os parâmetros de rugosidade média ( $R_a$ ) e a distância máxima entre pico e vale ( $R_z$ ).

Segundo Gadelmawla (2002 apud BARROS; MELLO, 2012), a rugosidade  $R_a$  é o parâmetro mais utilizado em controle de qualidade em geral. O parâmetro  $R_a$ , é a média das alturas das irregularidades ao longo do perfil, e a rugosidade  $R_z$  é definido como a média das distâncias entre o pico mais alto e o vale mais profundo de cada seção de amostragem do perfil de rugosidade, ver figura 43.

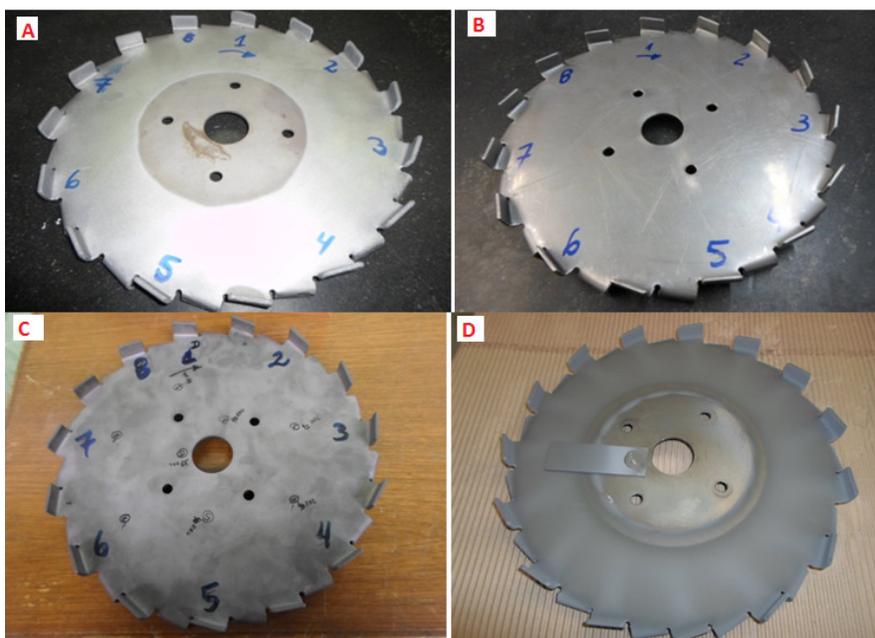
Figura 43 – Parâmetros de rugosidades  $R_a$  e  $R_z$



Fonte: Adaptada de Barros e Mello (2012, p. 6-7).

As etapas seguintes foram realizadas igualmente para todas as demais medições que fazem parte do estudo referenciado, ou seja: **(A)** dentes dos discos revestidos de cromo duro; **(B)** dentes dos discos de aço inox AISI 420 antes dos tratamentos e deposições; **(C)** dentes do disco com tratamento térmico de nitretação gasosa; **(D)** dente do disco revestido de carbeto de tungstênio, conforme figura 44 (A), (B), (C) e (D).

Figura 44 – Discos utilizados nos testes



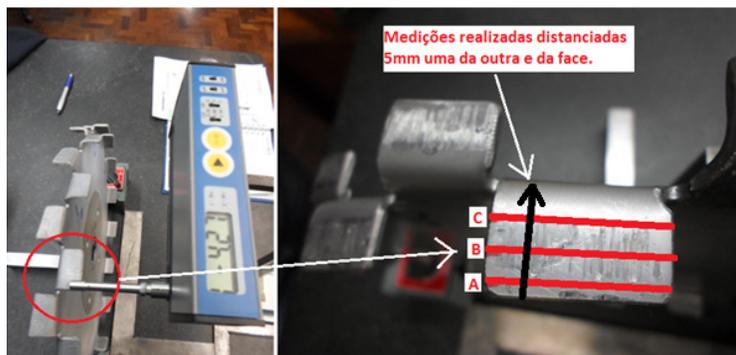
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a obtenção dos parâmetros de rugosidade dos dentes dos discos, necessita-se primeiramente da realização da calibração do aparelho.

O rugosímetro utilizado neste trabalho é da marca Pantec Inspex, modelo IPX-103 Surface Roughness Tester, com  $l_c = 0,25$  (Cutt-Off) e 5 medições ( $5 \times 0,25$ ).

Após as etapas de calibração do aparelho, as medições das rugosidades superficiais dos dentes dos discos foram realizadas de acordo com o seguinte procedimento adotado: \* definiu-se que as medições seriam feitas em 8 dentes dos 30 que o disco possui, \* para cada dente realiza-se medições de Ra e Rz, \* cada dente mede-se seis vezes para cada parâmetro, divididos em três duplas de medições em três locais diferentes do dente “A, B e C”, no sentido da seta preta conforme evidenciado na figura 45.

Figura 45 – Procedimento para medição dos dentes dos discos



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, necessita-se fazer com que as medições ocorram sem nenhuma interferência externa, como por exemplo, vibração, deslocamento, entre outras. Sendo assim, para todos os discos medidos colocaram-se bases magnéticas para fixar os discos sobre uma mesa de granito plana, e o rugosímetro foi alinhado com os discos através de esquadros colocados em sua base e costas dos discos, conforme evidenciado na figura 46.

Figura 46 – Alinhamento dos discos com o rugosímetro e a mesa



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.1.12 Adesão das camadas dos discos

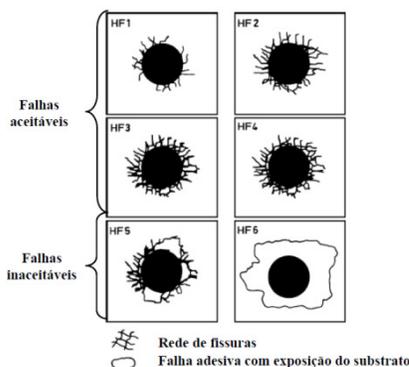
Utiliza-se como CP para a realização desta avaliação, a amostra do dente com revestimento de cromo duro conforme figura 39 (B) e as amostras enviadas junto ao tratamento de nitretação e ao processo de aspensão, e auxílio do durômetro para medições em Rockwell “A”, do laboratório de metalurgia física da UNISINOS conforme figura 42.

Utilizou-se para testes de indentação Rockwell “A”, indentedor de diamante com 120° e aplicação de uma carga de 60Kgf sobre a superfície da amostra. Este teste é desenvolvido baseando-se na norma alemã VDI-3198/1991 (*Verein Deutscher Ingenieure*), para a avaliação da qualidade da adesão de revestimentos finos. O teste consiste em realizar indentações na superfície das amostras, com a carga definida, para gerar falhas na camada. A avaliação é realizada através de uma comparação visual por meio do equipamento de medição TRIDIMENSIONAL ÓTICO STARRETT GALILEU, modelo AV300+, com as impressões de padrão de qualidade de adesão pré-definidas. Os comparativos são definidos como: \* impressões HF1 até HF4, utilizadas para adesões satisfatórias, pois possuem as bordas em boas qualidades, sendo assim, consideradas como aprovadas com falhas aceitáveis, e \* impressões HF5 e HF6, que não representam boa adesão, sendo consideradas não aprovadas, com falhas não aceitáveis. A relação de comparação está exemplificada conforme verificado na figura 47. (HEINKE et al., 1995 apud ANDRADE, 2008, p. 21).

Segundo Vidakis et al. (1997 apud FARIAS, 2007, p. 56),

Um indentedor cônico de diamante penetra na superfície do material revestido. Ele provoca uma deformação plástica e fratura do revestimento. O ideal é que a espessura do material seja no mínimo 10 vezes maior que a profundidade de penetração. O tipo e o volume da falha do filme mostra a adesão e a fragilidade do revestimento.

Figura 47 – Comparativos de qualidade da adesão (Norma VDI 3198/1991)



Fonte: Heinke et al. (1995 apud ANDRADE, 2008, p. 21).

### 3.1.13 Tenacidade das camadas dos discos

Para a avaliação da tenacidade do revestimento de cromo duro, nitretação e aspensão, utiliza-se o lado oposto do CP utilizado para a avaliação do item 3.1.10 e as amostras

enviadas junto ao tratamento de nitretação e ao processo de aspersão, e auxílio do durômetro para medições em Vickers, da marca HECKERT, do laboratório de metalurgia física da UNISINOS conforme a figura 48.

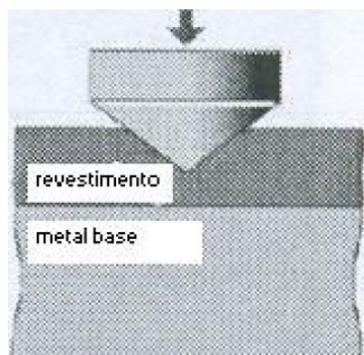
Figura 48 – Durômetro Vickers HECKERT utilizado nos testes de ruptura



Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo Brotzen (1992 apud FARIAS, 2007, p. 55), a técnica de indentação é muito utilizada na determinação de propriedades mecânicas de filmes finos, sendo esta a forma mais utilizada e mais fácil para reproduzir os resultados. Quando a técnica do indentador é empregada, ocorre o aumento da força aplicada sobre o revestimento, gerando uma pressão sobre a superfície, iniciando assim uma deformação no filme. Inicialmente esta deformação ocorre elasticamente e então plasticamente. Após a remoção gradual da carga, a deformação elástica é recuperada, sendo gerado um gráfico de força X profundidade de penetração, que fornecerá informações sobre a dureza, elasticidade e deslocamento do filme depositado na superfície (Figura 49).

Figura 49 – Indentador cônico aplicado em revestimento



Fonte: Brotzen (1992 apud FARIAS, 2007, p. 55).

### 3.1.14 Medição dos dentes dos discos

Tendo em vista o trabalho a ser realizado no âmbito empresarial, definiu-se por desenvolver os parâmetros avaliados seguindo o fluxo normal de trabalho dentro da empresa.

Desta forma, em 24/01/2013, realizou-se uma manutenção preventiva no equipamento denominado masseirão, na qual foi realizada a troca dos quatro discos desgastados por discos novos, objeto da avaliação deste trabalho.

Nesta data instalaram-se dois horímetros, contadores de horas para os motores “M1 e M2”, dos eixos do sistema de dispersão do masseirão, para a obtenção de comparativos ao final dos testes dos tempos de exposição dos discos em função do desgaste causado no intervalo considerado.

Seguindo o procedimento adotado e referenciado no item 3.1.1 para a escolha dos dentes do disco, antes da colocação dos discos novos em processo, realizou-se a medição de todos os parâmetros julgados necessários para o acompanhamento após o desgaste dos dois discos inferiores chamados por “M1 e M2”. Para esta tarefa, utilizou-se o Paquímetro Digital, da marca Vonder, escala de 0-150mm (0-6”), resolução 0,01mm e exatidão de +/-0,03mm para a medição das seguintes componentes dos dentes:

- e** – espessura do dente (mm);
- h1** – altura do lado maior do dente (mm);
- h2** – altura do lado menor do dente (mm);
- c** – comprimento do dente (mm).

Abaixo segue a figura 50, demonstrando a posição correta que realizou-se as medições.

Figura 50 – Desenho do disco com as posições medidas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os parâmetros mencionados acima foram obtidos através da medição realizada com o auxílio do paquímetro referenciado, e seguindo o procedimento representado através das imagens contidas na figura 51 (A), (B), (C), (D) e (E).

Figura 51 – Passo a passo das posições medidas do dente



Fonte: Elaborada pelo autor.

Além das medições realizadas por meios manuais conforme descrito anteriormente, realizou-se o acompanhamento do desgaste ocasionado nos dentes dos discos através da utilização do software de medições de imagens Image J.

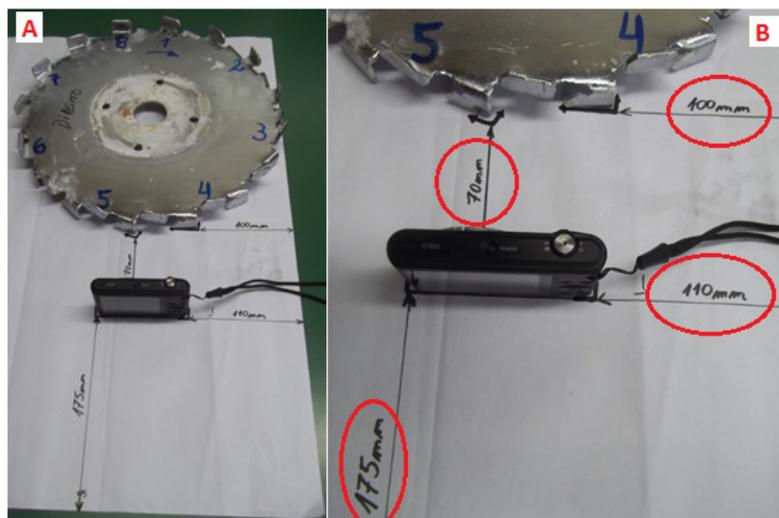
Para esta operação segue-se o seguinte procedimento:

\* utilizou-se a câmera digital da marca SAMSUNG, modelo ST 66, HD, ampliação 5x (lente 4,5-22,5mm, 1:2.5-6,3 25mm), sem nenhuma ampliação para obter as imagens dos 8 dentes de cada tipo de disco novo (cromo duro, nitretação e carbeto de tungstênio), selecionados de acordo com o item 3.1.1 deste trabalho;

\* posicionou-se o respectivo disco sobre uma cartolina numa mesa, onde a mesma foi identificada com medidas padronizadas para garantir que todas as fotos fossem tiradas com as mesmas características e dimensões;

\* a câmera digital ficou posicionada sempre na mesma posição, de acordo com as medidas referenciadas na figura 52.

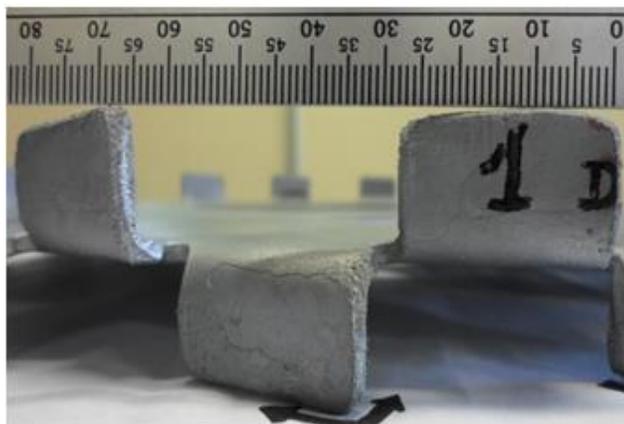
Figura 52 – Posicionamento da câmera digital para obtenção das imagens dos dentes



Fonte: Elaborada pelo autor.

\* realizaram-se 8 fotos, uma foto de cada dente da vista frontal do respectivo disco, e utilizou-se de uma escala padrão sobre cada dente para servir de referência de grandeza posterior para calibração do software Image J, conforme evidenciado na figura 53.

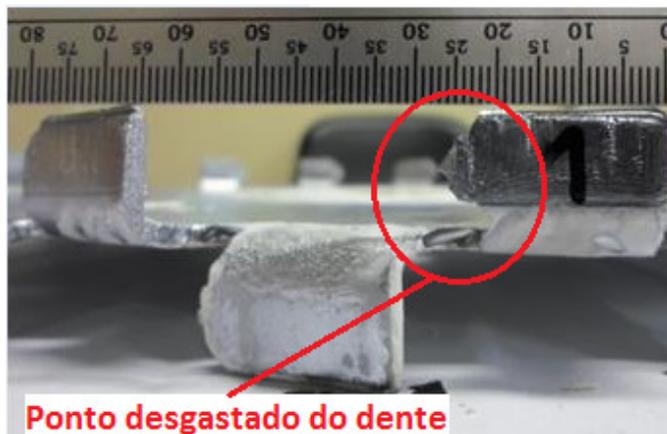
Figura 53 – Imagem obtida do dente novo



Fonte: Elaborada pelo autor.

\* realizaram-se as mesmas operações evidenciadas anteriormente, agora para os dentes dos discos já utilizados, ou seja: já desgastados, conforme evidenciado na figura 54.

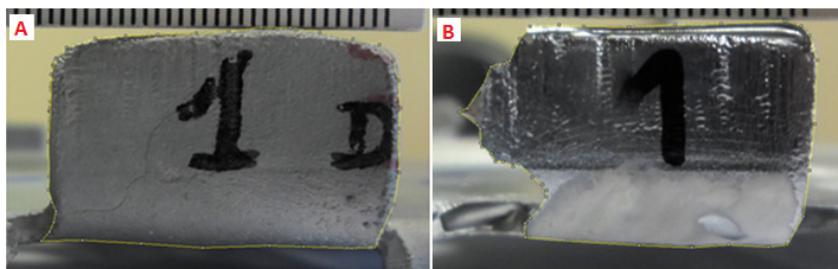
Figura 54 – Imagem obtida do dente já desgastado



Fonte: Elaborada pelo autor.

\* realizou-se para cada foto dos dentes, a calibração do software Image J com o auxílio da escala graduada sobre o dente, e calcularam-se as áreas das faces frontais de cada dente novo e usado através da aplicação das ferramentas de medição do software (Figura 55).

Figura 55 – Medições dos dentes antes do uso (A), e depois do uso (B)



Fonte: Elaborada pelo autor.

\* com as medições realizadas, obteve-se os resultados apresentados em uma planilha em excel, por onde realizou-se o desconto da área cheia do dente pela área do dente já desgastado para se obter o verdadeiro valor de área perdida com a operação de desgaste. Ou seja: para cada disco foram avaliados os 8 dentes, que por sua vez apresentam 16 resultados de áreas, e após os descontos das áreas fornecem 8 áreas de desgaste, conforme a figura 56.

Figura 56 – Resultados obtidos com o software Image J

File	Edit	For
Area		
1	471.712	
2	563.727	
3	567.625	
4	492.394	
5	582.179	
6	487.200	
7	621.085	
8	505.308	
9	598.122	
10	514.084	
11	606.349	
12	517.869	
13	586.952	
14	483.246	
15	590.730	
16	523.707	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos através das medições realizadas nos dentes dos discos M1 e M2, estão evidenciados no capítulo 4 deste trabalho, depois da retirada dos discos do processo, contabilizando para os respectivos motores **M1= 1065 horas** e **M2= 1058 horas** de operação. Este tempo foi contabilizado desde a data da instalação em 24/01/2013 até a retirada de serviço em 19/09/2013 (Figura 57).

Figura 57 – Identificação do tempo de operação dos discos com cromo duro



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 3.2 DISCO NOVO 1 (NITRETAÇÃO GASOSA)

### 3.2.1 Escolha do material e definições dos métodos aplicados

A primeira proposta de melhoria do disco, em função do desgaste erosivo ocorrido no processo de dispersão da massa, foi à aplicação do tratamento termoquímico de nitretação gasosa em função da identificação do material que já era aplicado ao disco antigo.

Com a comprovação da classe do aço inoxidável ser do tipo martensítico, e este tipo de aço ter a característica de poder passar por tratamento de endurecimento superficial, optou-se pela nitretação gasosa por ter algumas características em seu processo, que influenciam nesta aplicação. Dentre as mais importantes, podem-se destacar as seguintes: \* processo de temperatura relativamente baixa, \* pouca distorção da peça, \* parâmetros do processo de fácil controle, \* devido ao processo de resfriamento ser lento, alterações dimensionais são mantidas ao mínimo.

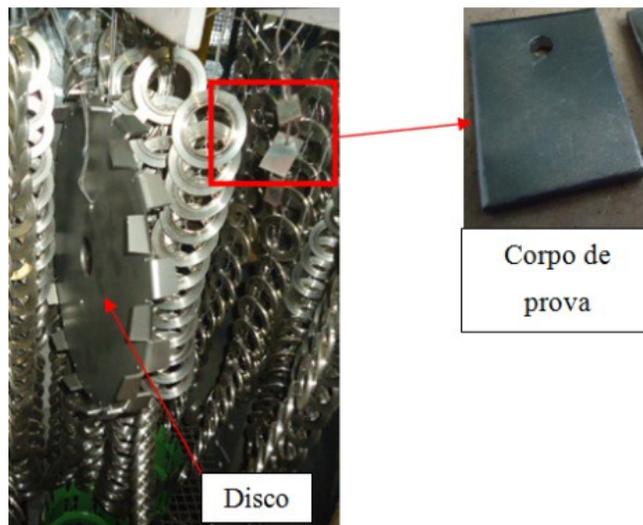
Após as comprovações realizadas no material comprado da empresa AÇOBRAS AÇOS INOXIDÁVEIS, para a fabricação dos discos novos, tais como: \* análise química, \* dureza, \* microestrutura, para ter-se a garantia de se manter os mesmos parâmetros, enviou-se o disco e dois CP para a empresa Metaltécnica Metalúrgica Ltda, para a realização do tratamento termoquímico de nitretação gasosa.

A peça enviada para o tratamento térmico está demonstrada pela figura 58, e no detalhe está um dos CPs em evidência, que acompanhou a peça e foi utilizado para as análises.

O processo de nitretação foi acompanhado junto à empresa, onde se registrou todas as etapas realizadas, garantindo que o CP passasse por todas as etapas juntamente com o disco para posteriores análises.

Todas as análises descritas neste trabalho foram conduzidas no corpo de prova que acompanhou a peça.

Figura 58 – Disco e corpo de prova utilizado para as análises



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2.2 Descrição do processo realizado

O disco dentado foi enviado para tratamentos térmicos de têmpera, revenimento e nitretação gasosa, com o objetivo de aumentar a resistência superficial à ação do desgaste e para melhorar a condição de vida útil da peça em aplicação.

As análises foram feitas em um corpo de prova que acompanhou a peça em todas as etapas de processo, verificando a condição de microestrutura, dureza superficial, profundidade de camada e dureza na camada nitretada.

A realização do processo de têmpera ocorreu através da montagem de um dispositivo para fixação do disco dentro de uma cesta que vai ao forno, conforme evidenciado na figura 59. O forno utilizado no processo de têmpera é do modelo Ipsen, tipo T8 com aquecimento elétrico, com sistema supervisório e controlador lógico programável (CLP), e controle para mantimento da atmosfera controlada.

O processo de têmpera foi realizado com temperatura de austenitização a 960°C, durante um intervalo de tempo de 30 minutos e o resfriamento foi realizado através da utilização de ar forçado.

Figura 59 – Etapas da execução da têmpera no Forno Ipsen T8



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a realização do resfriamento do disco, depois do processo de têmpera, no qual o disco ficou com alta dureza devido à martensita, mas muito baixa ductilidade, realizou-se o tratamento térmico de revenimento para aliviar as tensões internas e evitar as fragilizações por martensita não revenida. Para os aços inoxidáveis AISI 420, as temperaturas de revenimento ficam entre 180 e 750°C, em função da dureza desejada, mas não superior a 450°C devido às precipitações de carbonetos de cromo e diminuição da resistência à corrosão. (PORTO, 2012, p. 29).

O tratamento térmico de revenimento que foi aplicado no disco foi realizado a uma temperatura de 350°C, durante um intervalo de tempo de 3 horas.

Com a finalização do revenimento, realizou-se o tratamento termoquímico de nitretação gasosa, através da utilização de um forno de nitretação tipo poço, com aquecimento elétrico e atmosfera gasosa composta de gás amônia e nitrogênio, conforme figura 60.

Figura 60 – Forno tipo poço para nitretação gasosa



Fonte: registrada pelo autor.

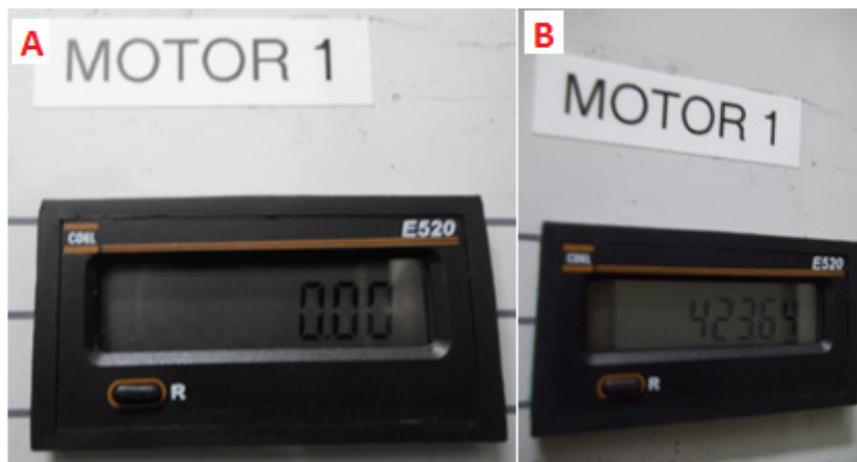
A nitretação gasosa é realizada normalmente entre as faixas de temperatura de 500 a 600°C, com intuito de diminuir as possibilidades de empenamentos por transformação de fases. No processo de nitretação a gás, a amônia é injetada no forno aquecido, onde ocorre a dissociação da amônia de acordo com a equação ( $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$ ), que libera o nitrogênio atômico que difunde para o aço. Os tempos de processo variam entre 12 e 120 horas. (STROHAECKER, 1998).

O tratamento termoquímico de nitretação que foi aplicado no disco foi realizado a uma temperatura de 520°C, durante um intervalo de tempo de 40 horas.

### 3.2.3 Medição dos dentes do disco nitretado

Seguindo as etapas referenciadas no item 3.1.14, realizou-se as medições nos componentes do disco nitretado, lado direito inferior sem utilização, figura 61 (A), instalado em 19/09/2013 no motor “M1”, e após a retirada do disco do equipamento em 30/10/2013 com aproximadamente **423 horas** de utilização (Figura 61) (B), conforme evidenciado no acompanhamento realizado através do horímetro instalado no equipamento.

Figura 61 – Identificação do tempo de operação do disco com nitretação



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.3 DISCO NOVO 2 (CARBETO DE TUNGSTÊNIO)

#### 3.3.1 Deposição do Carbeto de Tungstênio pelo processo de HVOF

Para a realização da deposição do revestimento de carbeto de tungstênio (WC), sobre o substrato do disco dentado de aço inoxidável AISI 420, através do processo de aspersão térmica por HVOF, realiza-se alguns procedimentos que devem ser cuidadosamente executados, a fim de se obter um bom revestimento. Um dos procedimentos que retrata diretamente a qualidade da adesão do revestimento ao material base é a preparação da superfície.

#### 3.3.2 Preparação da superfície

Para realizar o processo de deposição sobre o disco dentado e sobre o CP enviado para testes, e atender as especificações quanto à deposição do revestimento aspergido, o disco e o CP foram jateados com óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), granulometria 24 (mesh), fornecido pelo fabricante ELFUSA. O jateamento foi realizado em uma cabine com umidade relativa controlada em aproximadamente 59%, como demonstrado pela figura 62.

Figura 62 – Processo de jateamento com óxido de alumínio no disco e CP



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após o processo de jateamento as medições de rugosidade foram realizadas, conferindo ao substrato do disco e do CP, um parâmetro médio de rugosidade Ra de 4,156  $\mu m$  de acordo com medição efetuada com rugosímetro digital SJ 210 – Mitutoyo (Figura 63). Esta

operação é executada pois o controle da rugosidade do substrato é de extrema importância, pois auxilia diretamente no ancoramento mecânico do revestimento.

Figura 63 – Rugosímetro digital SJ 210 – Mitutoyo

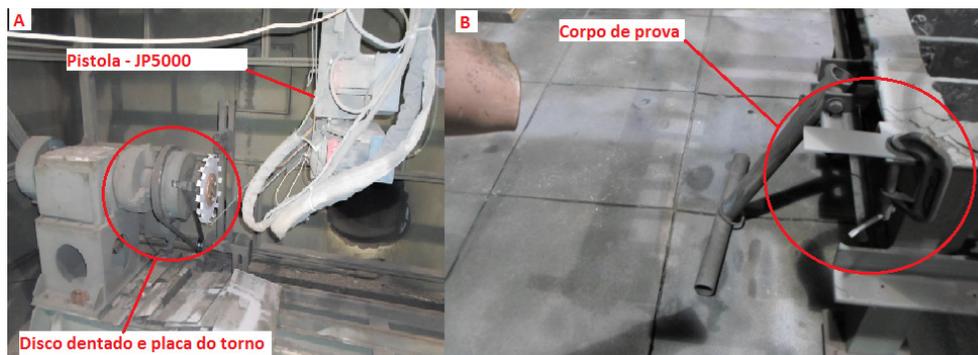


Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi utilizado como fonte de energia o ar comprimido para realizar a impulsão das partículas de óxido de alumínio sobre o substrato. A máquina foi regulada com os seguintes parâmetros para o jateamento: \* pressão de 6,2bar, \* 300mm de distância entre a pistola JP5000 e o disco e CP, \* com ângulo de incidência de 90°C.

Ao final da etapa de jateamento do disco e do CP, os mesmos foram levados para a cabine de aspersão térmica para realização do pré-aquecimento a uma temperatura de 120°C, medida através de um termômetro digital a laser, fabricado pela RAYTEC e por fim a deposição do revestimento conforme figura 64.

Figura 64 – Dispositivos utilizados durante a aspersão térmica do disco e CP



Fonte: Elaborada pelo autor.

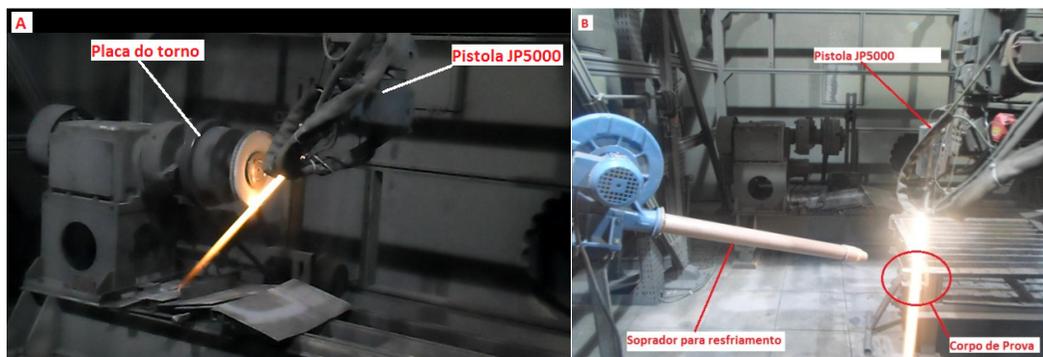
### 3.3.3 Equipamentos e parâmetros do processo de HVOF

No processo de deposição do revestimento de carbetos de tungstênio por HVOF, foi utilizado o equipamento HP/HVOF, modelo 5120, JP-5000, fabricado pela Tafa. Este equipamento pode atingir chamas com altíssimas velocidades, entre 1000 a 1200m/s e temperaturas relativamente baixas até 2800°C, empregando o combustível líquido. A seleção dos parâmetros do processo foi realizada devido a necessidade de se produzir uma camada que atendesse o processo de fabricação de massas, ou seja: alta resistência ao desgaste erosivo, baixas porosidades e boa adesão.

A deposição do revestimento foi executada para dois tipos de peças. A primeira, a deposição no disco dentado em todas as posições e a segunda no CP.

Na aspersão do CP, foi trabalhado com um sistema fixador. Já o disco dentado pela necessidade de ganhar espessura na superfície do dente, foi preso na placa do torno conforme mostra a figura 65 (A) e (B).

Figura 65 – Aspersão no disco (A) e no Corpo de Prova (B)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A pistola para aspersão térmica modelo HP/HVOF JP-5000, é fixada em um braço de um equipamento CNC (*Controle Numérico Computadorizado*), permitindo controlar de forma linear o deslocamento da tocha nos três eixos (X, Y, Z), através de servomotores e atuadores pneumáticos.

Os parâmetros de aspersão expressos na tabela 1 foram determinados segundo informações do catálogo da SULZER METCO e da engenharia de processo da empresa Rijeza Indústria Metalúrgica LTDA. O pó utilizado no processo de aspersão térmica HVOF,

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

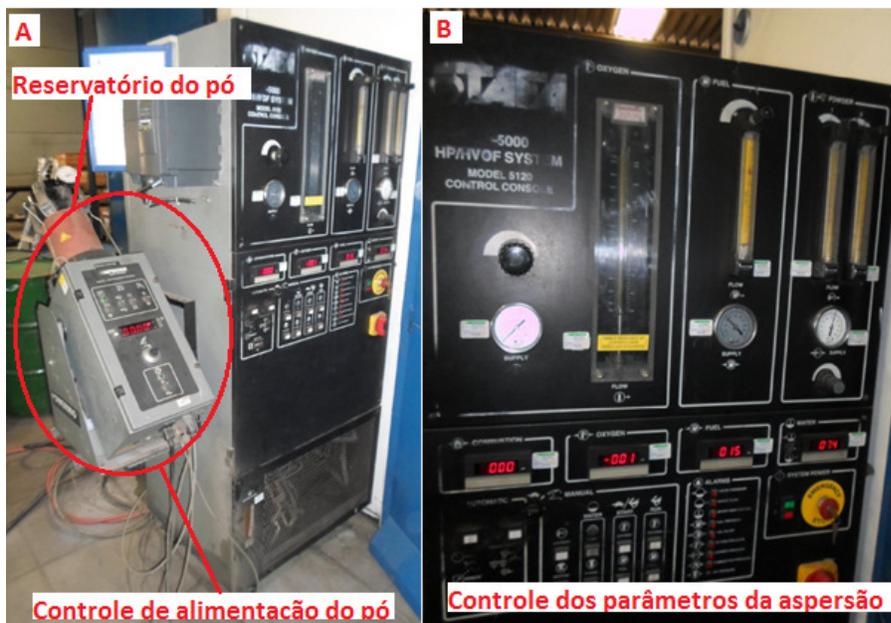
Tabela 1 – Parâmetros da aspersão utilizados na deposição do WC

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

Fonte: Rijeza (apud CASTRO, 2012).

O equipamento utilizado para o processo de aspersão por HVOF (Figura 66) utilizando-se da pistola do grupo JP, tem a finalidade de controlar as taxas de alimentação do pó durante a aspersão. Esse equipamento indica os principais parâmetros que devem ser controlados nesse processo, tais como: \* vazão do pó da aspersão, \* pressão e vazão do oxigênio e combustível, \* pressão de combustão, entre outros.

Figura 66 – Unidade de controle TAFA-HP/HVOF – JP5000

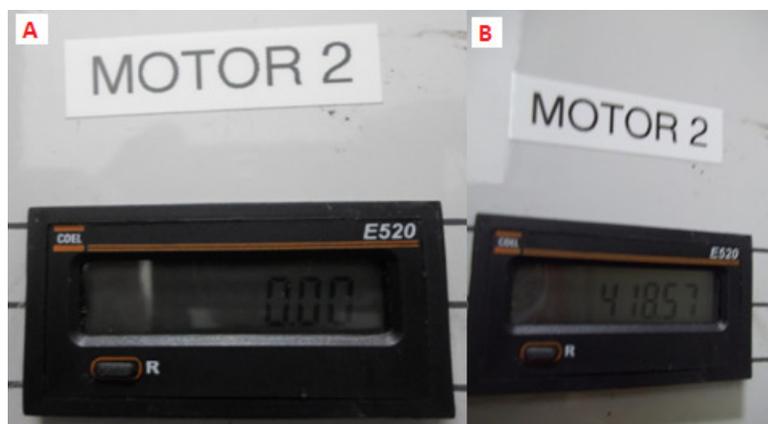


Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.3.4 Medição dos dentes do disco aspergido

Seguindo as etapas referenciadas no item 3.1.14, realizou-se as medições nos componentes do disco aspergido, lado esquerdo inferior sem utilização, conforme figura 67 (A), instalado em 19/09/2013 no motor “M2”, e após a retirada do disco do equipamento em 30/10/2013 com aproximadamente **418 horas** de utilização, conforme figura 67 (B), conforme evidenciado no acompanhamento realizado através do horímetro instalado no equipamento.

Figura 67 – Identificação do tempo de operação do disco aspergido



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados adquiridos mediante a utilização da metodologia descrita no capítulo 3 “PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL” serão apresentados a seguir:

### 4.1 DISCO REVESTIDO COM CROMO DURO

#### 4.1.1 Características químicas do aço inoxidável utilizado nos discos antigos

Os resultados obtidos referentes à análise química realizada nas amostras enviadas ao laboratório estão representados na tabela 2, apresentando a porcentagem da composição química presente em cada elemento do aço avaliado.

Tabela 2 – Análise da composição química do material utilizado nos discos antigos

ELEMENTOS QUÍMICOS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	COMPARAÇÃO AÇO INOX AISI 420
C	0,346	0,334	0,15 mín
Si	0,417	0,410	1,0 máx
Mn	0,285	0,282	1,0 máx
P	0,03020	0,03080	0,04 máx
S	<0,00100	<0,00100	0,03 máx
Cr	12,430	12,420	12,0 - 14,0
Mo	0,01320	0,012	
Ni	0,171	0,163	
Al	0,00230	0,00170	
Co	0,01550	0,01610	
Cu	<0,0100	<0,0100	
Nb	0,01180	0,01100	
Ti	0,00310	0,00290	
V	0,02240	0,02190	
Fe	86,300	86,300	

Fonte: Adaptada de LAMEF (2013).

#### 4.1.2 Comparativo e validação do aço inoxidável utilizado nos testes

Com os resultados obtidos nas comparações realizadas (Tabela 3), pode-se comprovar que os dois discos novos que foram fabricados para serem avaliados nas mesmas condições dos discos que estavam em operação, possuem o mesmo substrato base, tendo como diferenças apenas as propostas do trabalho.

Tabela 3 – Comparativo das análises da composição química dos materiais utilizados

ELEMENTOS QUÍMICOS	AMOSTRA 1 (disco antigo)	AMOSTRA 2 (disco antigo)	CH INOX AISI 420 COMPRADA (discos novos)	EXIGÊNCIA NORMA NBR5601/1981
C	0,346	0,334	0,345	0,15 min
Si	0,417	0,410	0,410	1,0 máx
Mn	0,285	0,282	0,290	1,0 máx
P	0,03020	0,03080	0,03300	0,04 máx
S	<0,00100	<0,00100	0,00200	0,03 máx
Cr	12,430	12,420	12,270	12,0 - 14,0

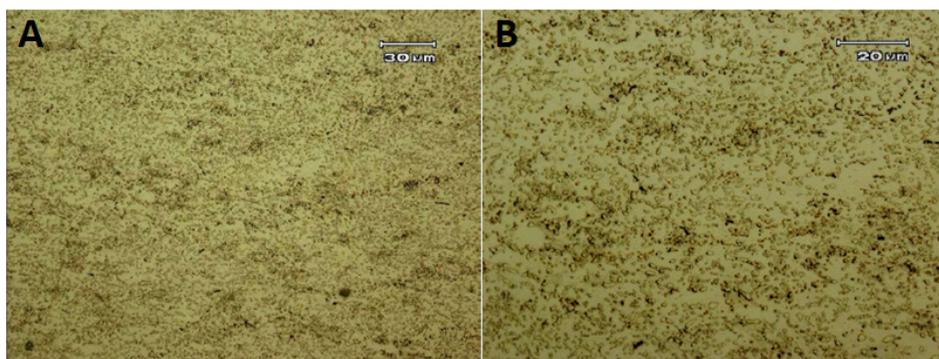
Fonte: Adaptada de LAMEF (2013), ABNT (1981) e ASM (1998).

#### 4.1.3 Análise microestrutural do disco antigo

Após a realização do ataque químico, as microestruturas foram observadas através de um microscópio óptico (MO) da marca Olympus, modelo BX 51 M e as micrografias foram registradas através de câmera digital conforme figura 68 (A) e (B).

Com os resultados obtidos através da avaliação das metalografias, foi possível constatar que todo o substrato base identificado anteriormente como um aço inoxidável martensítico AISI 420, encontra-se na condição de fornecimento sem qualquer tratamento térmico de endurecimento do núcleo.

Figura 68 – Microestrutura do corte transversal. Ampliação: 100x (A) e 400x (B), mostrando o material no estado não temperado



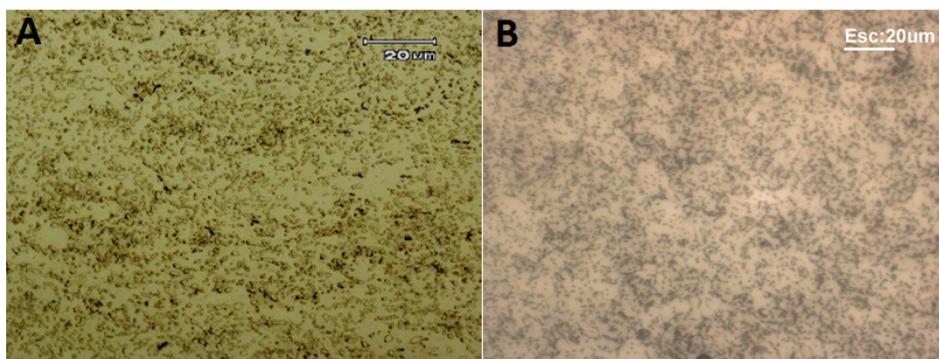
Fonte: Adaptada de LAMEF (2013).

#### 4.1.4 Comparativo microestrutural (disco antigo X aço inox utilizado nos testes)

Com a finalização das etapas de revelação das ME, foi possível concluir que os aspectos dos cortes transversal e longitudinal a 400 vezes de aumento, obtidos na avaliação

realizada pelo LAMEF, conforme figura 69 (A), possuem as mesmas características microestruturais obtidas no CP referente ao aço utilizado para a fabricação dos dois novos discos colocados em teste, evidenciando uma ME no estado de não temperada conforme a figura 69 (B).

Figura 69 – Microestrutura do corte transversal. Ampliação: 400x (A) e 400x (B), mostrando o material no estado não temperado

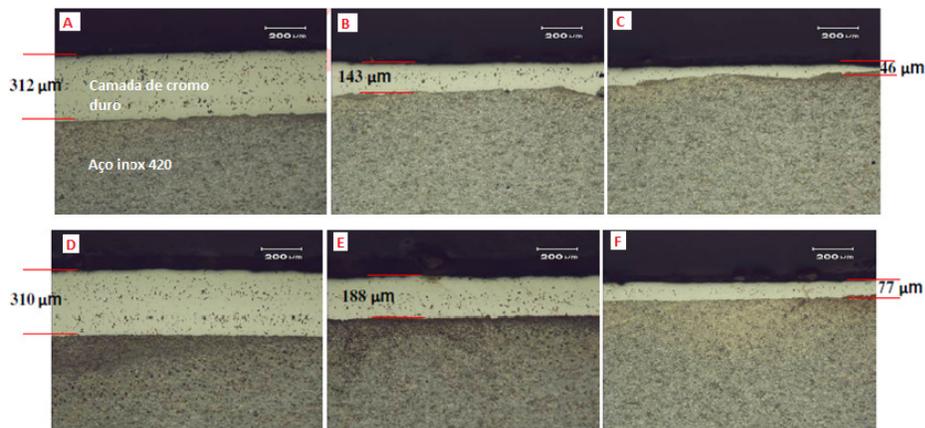


Fonte: Adaptada de LAMEF (A) e elaborada pelo autor (B).

#### 4.1.5 Avaliação das espessuras das camadas do disco antigo (com utilização)

A seguir observa-se uma sequência de imagens, conforme figura 70 (A), (B), (C), (D), (E) e (F), representando as medições obtidas das camadas dos dentes com maior e menor desgaste após a utilização.

Figura 70 – Medições das camadas do revestimento de cromo duro



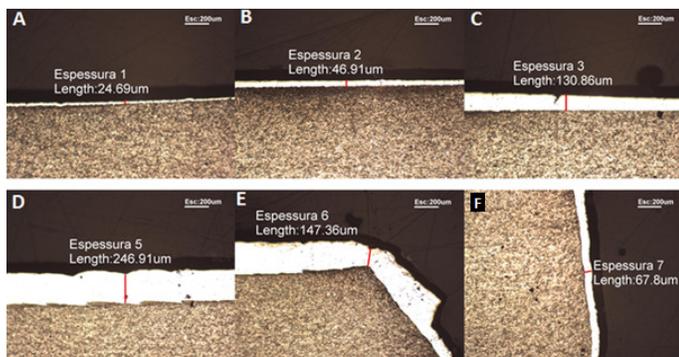
Fonte: Adaptada de LAMEF (2013).

Através das medidas referenciadas acima, percebe-se que no processo real não ocorre um desgaste homogêneo dos dentes, devido a variação da espessura de camada depositada, e ou, devido ao desgaste desproporcional dos dentes, caso pouco provável tendo em vista o abrasivo dolomita estar sempre em contato em iguais proporções e também devido ao movimento rotacional ser sempre o mesmo para o dente avaliado no teste.

#### 4.1.6 Avaliação das espessuras das camadas do disco antigo (sem utilização)

Na figura 71 (A), (B), (C), (D), (E) e (F), observa-se a forma como foi realizado as medições, partindo das figuras A, B e C referentes às camadas internas do dente, seguindo pela camada externa (D) e (E), e finalizando pelo topo do dente, camada superior (F).

Figura 71 – Espessuras do revestimento de cromo duro (dente do disco antigo)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com os resultados obtidos, percebe-se que apesar do certificado de qualidade citado, apresentar valores verificados entre 0,19 a 0,23mm de revestimento, em alguns pontos de um dos dentes amostrados, as espessuras da camada são inferiores ao referenciado, não garantindo desta forma a qualidade desejada do revestimento.

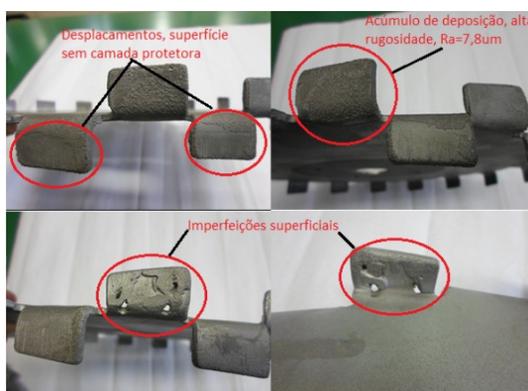
Diante do exposto no item 4.1.6, referente às possíveis causas para o desgaste não homogêneo, e comparando com os testes realizados com um dente novo, sem utilização, percebe-se que através da observação das imagens, tem-se uma variação desproporcional entre as diferentes regiões do dente avaliado, fato explicado devido à falta do controle de qualidade no processo de eletrodeposição de alguns dos itens referenciados nas bibliografias, tais como: \* superfícies na presença de graxas ou óleos, \* controle da camada (filmes de

óxidos), \* substrato já possuindo fonte de porosidades, \* eletrólito do banho na composição correta, \* temperatura, \* corrente elétrica, \* tempo de processo, entre outros.

Além das características microestruturais e das avaliações realizadas referentes à qualidade das camadas eletrodepositadas, o processo ao qual o trabalho foi proposto, apresenta em seus componentes principais, os discos, uma qualidade superficial muito ruim nos quesitos de acabamento superficial e forma geométrica dos dentes gerada nos processos de fabricação e de tratamento superficial.

Como os processos não possuem nenhum controle de recebimento e acompanhamento da qualidade dos discos e também dos tempos de vida útil, os problemas referenciados na figura 72 contribuem efetivamente para a deterioração precoce dos discos.

Figura 72 – Problemas de qualidade superficial nos discos antigos



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.1.7 Avaliação da Microdureza Vickers (núcleo/camada do disco antigo com utilização)

As medições das microdurezas foram realizadas com carga de 0,2Kgf e apresentadas conforme tabela 4, através de uma média de 5 pontos realizados no núcleo e camada do CP.

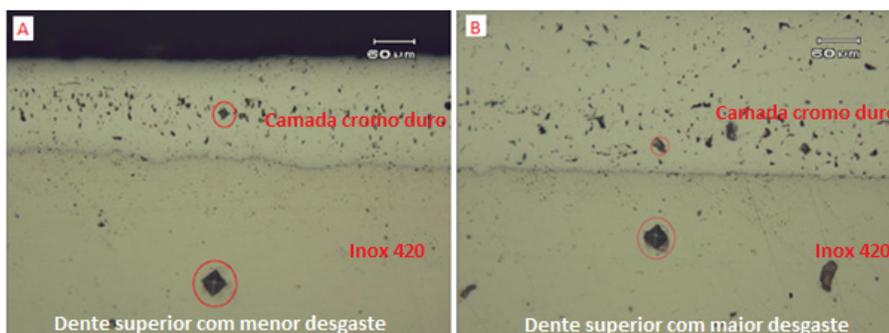
Tabela 4 – Medidas de microdurezas Vickers (núcleo e camada dente superior com desgaste)

DENTE SUPERIOR	MEDIDAS DAS DUREZAS EM VICKERS					MÉDIA
	1-(0,2Kgf)	2-(0,2Kgf)	3-(0,2Kgf)	4-(0,2Kgf)	5-(0,2Kgf)	
NÚCLEO > DESGASTE	196	197	189	187	191	192,00
CAMADA > DESGASTE	961	873	779	928	895	887,20
NÚCLEO < DESGASTE	179	190	187	189	182	185,40
CAMADA < DESGASTE	1019	1088	908	1018	1015	1009,60

Fonte: Adaptada de LAMEF (2013).

As marcas das indentações realizadas em ambos os dentes, com menor e maior desgaste podem ser observadas através da figura 73 (A) e (B).

Figura 73 – Indentações Vickers com carga de 0,2Kgf (núcleo e camada)



Fonte: Adaptada de LAMEF (2013).

Com os resultados obtidos através dos testes de durezas realizados nas camadas e no núcleo dos dentes mais e menos desgastados, percebe-se que o dente superior que teve o menor desgaste da camada em operação, obteve os maiores valores de microdureza superficial (1009,60-HV0,2), em comparação ao dente com maior desgaste (887,2-HV0,2). Esta variação das microdurezas em função da espessura da camada pode ser explicada devido ao controle da corrente elétrica em função da temperatura na faixa dos 50°C, do banho eletrolítico e do tipo de estrutura cristalina, entre outros fatores. (SILMAN, 1955 apud MORILLAS, 2005, p. 53).

#### 4.1.8 Comparativo Microdureza Vickers (disco antigo com utilização X disco antigo sem utilização)

As medições das microdurezas foram realizadas com carga de 0,2Kgf, através de uma média de seis pontos realizados na camada do CP citado, e apresentadas conforme tabela 5.

Tabela 5 – Medidas de microdurezas Vickers (camada dente sem desgaste)

Nº DE MEDIÇÕES	MEDIDAS DAS MICRODUREZAS VICKERS					
	DIAGONAL 1 (mm)	DIAGONAL 2 (mm)	MÉDIA (mm)	DES VIO PADRÃO (mm)	MICRODUREZA HV (0,2Kgf)	MICRODUREZA MÉDIA HV (0,2Kgf)
1	0,930	0,980	0,955	0,035	1017	
2	0,880	0,930	0,905	0,035	1132	
3	0,850	1,010	0,930	0,113	1072	
4	0,920	0,940	0,930	0,014	1072	1065
5	0,950	0,930	0,940	0,014	1049	
6	0,990	0,890	0,940	0,071	1049	

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com os resultados obtidos na avaliação realizada pelo laboratório LAMEF, no dente superior desgastado, em comparação aos resultados obtidos nos testes realizados no laboratório da UNISINOS, com o dente novo, percebe-se que ambos os testes estão dentro do especificado no certificado de qualidade nº 001.12.12, emitido pela empresa TECNOCROMO CROMAGEM INDUSTRIAL, empresa responsável pelo processo de eletrodeposição de cromo duro nos discos antigos, que cita as durezas especificadas dentro de uma faixa de 1000 a 1150HV (Anexo D).

#### 4.1.9 Comparativo e validação da dureza do aço inoxidável utilizado nos testes

A tabela 6 demonstra as durezas obtidas no teste e apresenta a média para seis medições realizadas na superfície do aço inoxidável AISI 420, sem tratamento térmico.

Tabela 6 – HRB (100Kgf): Medidas durezas Rockwell B

Nº DE MEDIÇÕES	MEDIDAS DAS DUREZAS ROCKWELL		
	DUREZA HRB (100Kgf)	DESVIO PADRÃO	DUREZA MÉDIA HRB (100Kgf)
1	84,000		
2	85,000		
3	86,000		
4	84,000	0,983	85
5	84,000		
6	86,000		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a realização das medições das durezas, comprova-se através do valor obtido da média das seis medições realizadas, (85HRB), que o material fornecido pela empresa AÇOBRAS AÇOS INOXIDÁVEIS está de acordo com o valor emitido no certificado de qualidade nº 7567/13 que é 84,7HRB (Anexo C).

#### 4.1.10 Avaliação dos parâmetros de rugosidades do disco antigo

Realizaram-se as medições nos discos novos, esquerdo e direito inferiores, obtendo-se os resultados apresentados nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Ra e Rz ( $\mu\text{m}$ ): Rugosidade dos dentes (disco direito inox 420 - cromo duro)

POSIÇÃO DO DISCO	Nº DO DENTE	POSIÇÃO - A		POSIÇÃO - B		POSIÇÃO - C		MÉDIA Ra total	MÉDIA Rz total	DESVIO PADRÃO Ra	DESVIO PADRÃO Rz
		Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz				
M1 - DISCO DIREITO INFERIOR	1	3,94	23,40	5,74	24,90	3,20	23,20	4,10	23,67	1,07	1,02
		3,65	22,40	5,02	24,90	3,05	23,20				
	2	5,69	24,90	4,23	24,90	1,90	18,80	4,12	23,58	1,61	2,45
		6,11	24,90	3,87	24,90	2,90	23,10				
	3	2,07	24,90	5,79	24,90	4,19	24,80	3,89	24,88	1,49	0,04
		2,19	24,90	4,91	24,90	4,19	24,90				
	4	5,43	24,90	3,08	24,40	5,12	24,90	4,31	24,50	1,27	0,55
		3,86	24,40	2,70	23,50	5,66	24,90				
	5	4,40	24,90	2,61	20,30	2,40	15,60	3,12	20,22	0,97	4,12
		4,33	24,90	2,47	19,80	2,51	15,80				
	6	5,57	24,90	4,66	24,90	5,14	24,90	4,88	24,90	0,50	0,00
		5,12	24,90	4,68	24,90	4,13	24,90				
	7	4,59	24,90	3,16	24,90	3,11	24,80	3,51	24,67	0,78	0,48
		4,40	24,90	2,75	23,70	3,05	24,80				
	8	7,80	24,90	7,22	24,90	4,85	24,90	6,29	24,90	1,34	0,00
		7,27	24,90	5,92	24,90	4,67	24,90				

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8 – Ra e Rz ( $\mu\text{m}$ ): Rugosidade dos dentes (disco esquerdo inox 420 - cromo duro)

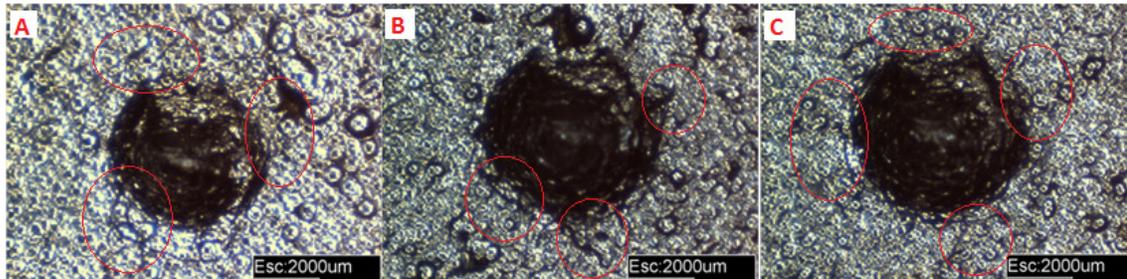
POSIÇÃO DO DISCO	Nº DO DENTE	POSIÇÃO - A		POSIÇÃO - B		POSIÇÃO - C		MÉDIA Ra total	MÉDIA Rz total	DESVIO PADRÃO Ra	DESVIO PADRÃO Rz
		Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz				
M2 - DISCO ESQUERDO INFERIOR	1	0,48	9,50	2,21	23,10	1,58	17,20	1,40	16,80	0,79	5,94
		0,49	10,10	2,25	22,90	1,40	18,00				
	2	4,77	24,90	3,57	24,40	0,25	5,00	2,98	19,87	2,11	8,18
		5,28	24,90	3,40	24,60	0,59	15,40				
	3	1,52	18,10	4,32	24,90	4,05	22,80	3,26	21,93	1,45	3,11
		1,29	18,10	4,34	24,90	4,05	22,80				
	4	1,14	20,60	1,70	24,80	2,22	24,90	1,80	23,93	0,51	1,68
		1,50	24,60	1,71	23,80	2,55	24,90				
	5	2,92	24,90	5,18	24,90	4,53	24,90	4,07	24,90	1,02	0,00
		2,80	24,90	4,96	24,90	4,05	24,90				
	6	2,48	19,80	4,96	24,90	2,82	18,80	3,22	21,65	1,25	3,66
		2,38	24,80	4,63	24,90	2,03	16,70				
	7	1,68	21,40	3,66	24,70	2,69	19,50	2,80	22,43	0,75	2,11
		2,36	23,20	3,57	24,70	2,83	21,10				
	8	4,64	24,90	4,92	24,90	3,00	13,80	4,12	22,32	0,73	4,32
		4,27	24,90	4,40	22,30	3,51	23,10				

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.1.11 Adesão da camada de cromo duro do disco antigo

A qualidade de adesão das camadas de cromo duro, eletrodepositadas no substrato do disco foi avaliada segundo as normas referenciadas acima, e executada no laboratório de metalurgia física da UNISINOS através do durômetro para medições em Rockwell “A”, obtendo os resultados evidenciados na figura 74.

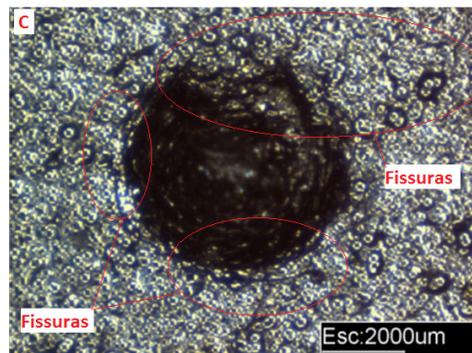
Figura 74 – Qualidade da adesão de cromo duro (Rockwel A - 60kgf)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Através das avaliações realizadas sobre as imagens obtidas com a ampliação de 581x, visualizadas e registradas por meio da TRIDIMENSIONAL ÓTICA STARRETT GALILEU, percebe-se que houve algumas rachaduras na superfície da camada de cromo duro sobre o substrato de inoxidável, podendo, na escala comparativa da norma alemã VDI 3198, ser classificada entre HF1 e HF2, evidenciando desta forma qualidades de adesões satisfatórias, com bordas em boas qualidades, sendo assim consideradas como aprovadas com falhas aceitáveis, conforme demonstrado na figura 75 representada em maior aumento.

Figura 75 – Ampliação da figura 74 (C) para visualizar fissuras HF1 e HF2



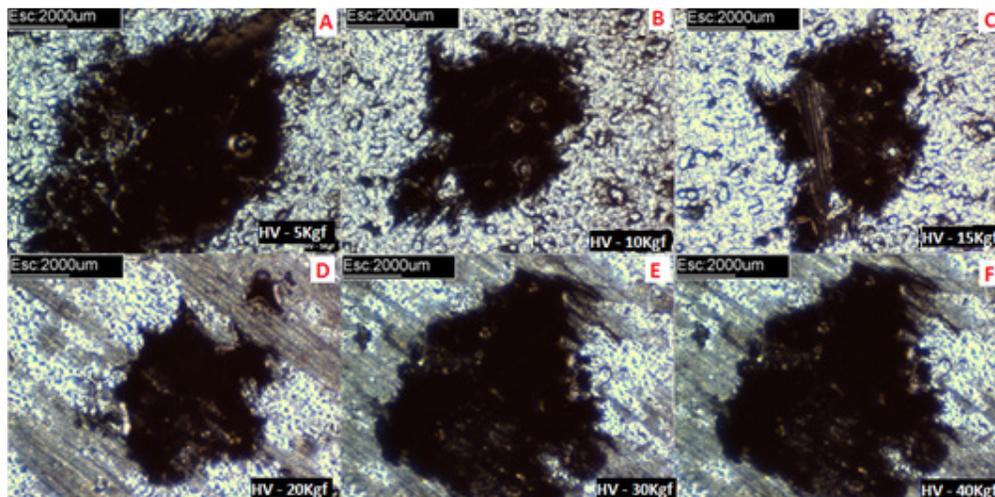
Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.1.12 Tenacidade da camada de cromo duro do disco antigo

Utilizam-se cargas variadas de (5, 10, 15, 20, 30 e 40 kgf) em posições diferentes do CP conforme figura 76, com a intenção de se avaliar e determinar a estimativa da carga de ruptura do revestimento sobre o substrato do aço inoxidável. Dessa forma, pretende-se avaliar qualitativamente a tenacidade após a aplicação da carga com a qual as amostras iniciam sua

ruptura na superfície, ou seja, o modo de falha e delaminação do filme de cada amostra em relação ao substrato. (NOLAN, 2006 apud TASSI, 2010, p. 55).

Figura 76 – Cargas de ruptura do revestimento de cromo duro



Fonte: Elaborada pelo autor.

Através das avaliações realizadas sobre as imagens das indentações “Vickers” obtidas com a ampliação de 581x, visualizadas e registradas por meio da TRIDIMENSIONAL ÓTICA STARRETT GALILEU, observa-se que o recobrimento de cromo duro sobre o substrato do aço inoxidável, apresentou ruptura para todas as cargas utilizadas no respectivo teste, (5, 10, 15, 20, 30 e 40kgf).

Conforme observado nas imagens acima, percebe-se que não formou a marca característica da indentação Vickers, devido ao desprendimento da camada do filme do substrato, aproveitando as estrias da textura da superfície, dando lugar a um contorno irregular em torno da maior secção do indentador que penetrou no conjunto substrato / filme.

#### 4.1.13 Medição dos dentes dos discos revestidos com cromo duro

Realizaram-se as medições nos componentes dos discos revestidos com cromo duro, direito e esquerdo inferiores sem utilização, obtendo-se os resultados evidenciados nas tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Medições dos dentes do disco (CROMO DURO NOVO) direito inferior

POSIÇÃO DO DISCO	Nº DO DENTE	ALTURA >	ALTURA <	LARGURA DO DENTE	ESPESSURA DO DENTE
		h1 (mm)	h2 (mm)	c (mm)	e (mm)
M1 - DISCO DIREITO INFERIOR	1	16,23	16,03	28,57	3,74
	2	16,36	15,88	28,83	3,97
	3	16,33	16,02	28,28	3,91
	4	16,28	16,13	28,91	3,85
	5	15,64	16,31	28,97	3,92
	6	16,14	16,38	28,87	3,85
	7	16,01	16,24	29,10	3,84
	8	16,27	16,34	28,35	3,81

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 10 – Medições dos dentes do disco (CROMO DURO NOVO) esquerdo inferior

POSIÇÃO DO DISCO	Nº DO DENTE	ALTURA >	ALTURA <	LARGURA DO DENTE	ESPESSURA DO DENTE
		h1 (mm)	h2 (mm)	c (mm)	e (mm)
M2 - DISCO ESQUERDO INFERIOR	1	14,90	14,98	28,39	3,71
	2	15,71	14,80	29,15	3,66
	3	15,69	14,61	28,57	3,70
	4	15,87	14,99	28,83	3,65
	5	14,98	15,57	28,31	3,74
	6	15,45	14,64	28,60	3,76
	7	15,08	14,65	28,33	3,69
	8	15,46	14,85	28,65	3,70

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos através das medições realizadas nos dentes dos discos M1 e M2 estão evidenciados nas tabelas 11 e 12, e os mesmos, são referentes aos dados obtidos depois da retirada dos discos do processo, contabilizando para os respectivos motores os seguintes tempos de operação:

\* M1= 1065 horas (disco direito inferior);

\* M2= 1058 horas (disco esquerdo inferior).

Tabela 11 – Medições dos dentes do disco (CROMO DURO USADO) direito inferior

POSIÇÃO DO DISCO	Nº DO DENTE	ALTURA >	ALTURA <	LARGURA DO DENTE	ESPESSURA DO DENTE
		h1 (mm)	h2 (mm)	c (mm)	e (mm)
M1 - DISCO DIREITO INFERIOR	1	15,25	15,42	27,69	3,55
	2	15,51	15,73	27,61	3,46
	3	15,34	15,80	26,99	3,37
	4	15,41	15,74	28,44	3,45
	5	14,29	16,15	28,79	3,41
	6	15,54	15,64	28,73	3,63
	7	15,42	15,71	29,05	3,39
	8	15,75	15,98	26,78	3,55

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 12 – Medições dos dentes do disco (CROMO DURO USADO) esquerdo inferior

POSIÇÃO DO DISCO	Nº DO DENTE	ALTURA >	ALTURA <	LARGURA DO DENTE	ESPESSURA DO DENTE
		h1 (mm)	h2 (mm)	c (mm)	e (mm)
M2 - DISCO ESQUERDO INFERIOR	1	12,51	14,60	25,33	3,48
	2	12,93	12,52	25,82	3,32
	3	13,07	12,62	24,95	3,49
	4	12,28	12,20	23,68	3,44
	5	12,98	14,61	26,47	3,40
	6	12,94	12,11	22,78	3,45
	7	12,98	12,36	22,04	3,32
	8	14,32	13,31	25,53	3,38

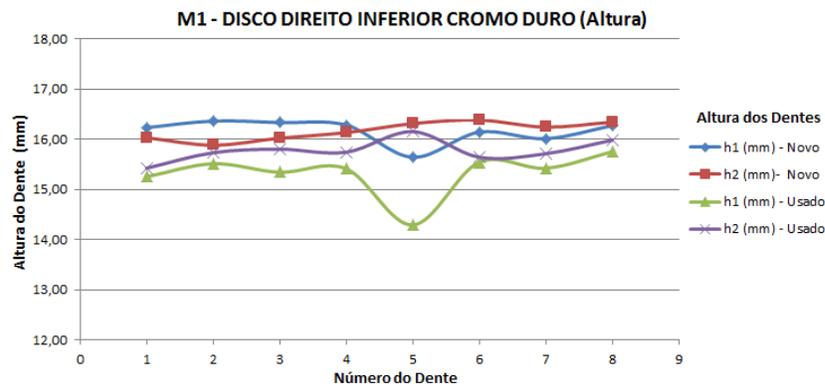
Fonte: Elaborada pelo autor.

Abaixo são apresentados os gráficos de 1 a 6, representando a quantificação dos comparativos dos desgastes ocorridos nos dentes dos discos M1 e M2 medidos com paquímetro digital Vonder, durante o intervalo de tempo avaliado.

São apresentados os seguintes parâmetros dos dentes:

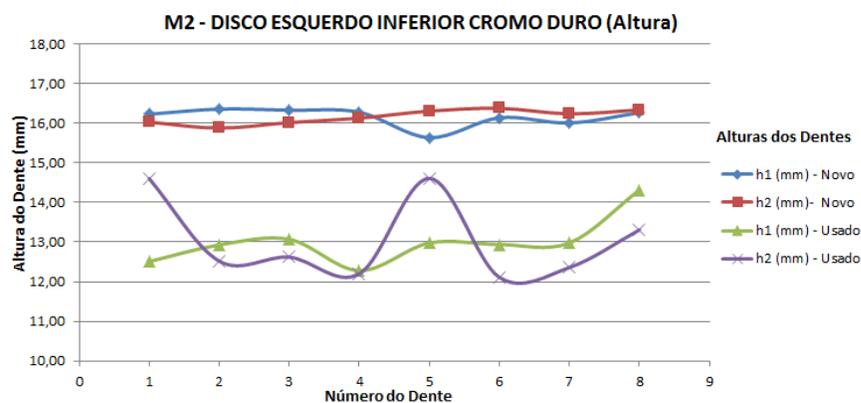
- \* alturas h1 e h2;
- \* espessuras e;
- \* larguras.

Gráfico 1 – Comparativo dos desgastes das alturas h1 e h2 - (1065 horas) - Disco M1



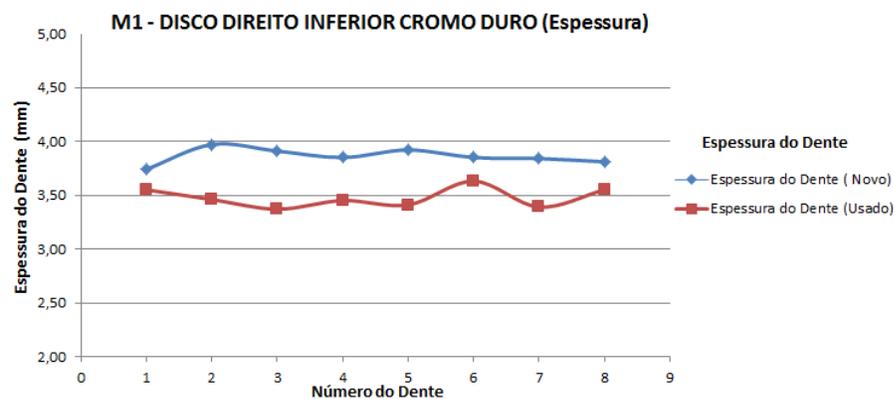
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2 – Comparativo dos desgastes das alturas h1 e h2 - (1058 horas) - Disco M2



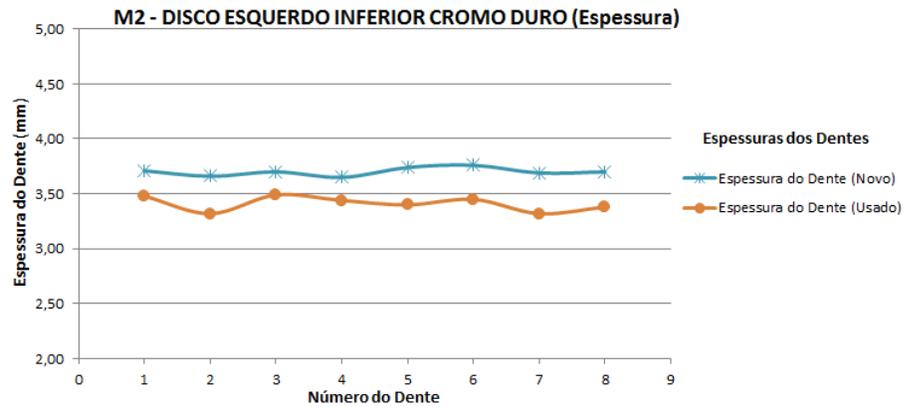
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 – Comparativo dos desgastes das espessuras - (1065 horas) - Disco M1



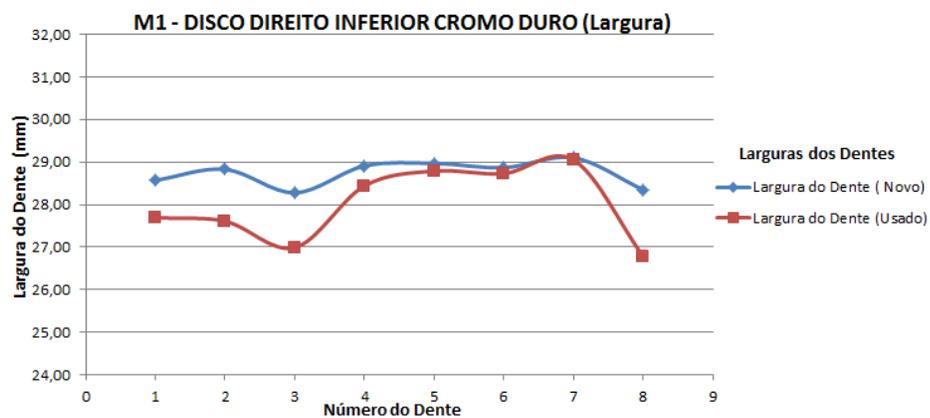
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 4 – Comparativo dos desgastes das espessuras - (1058 horas) - Disco M2



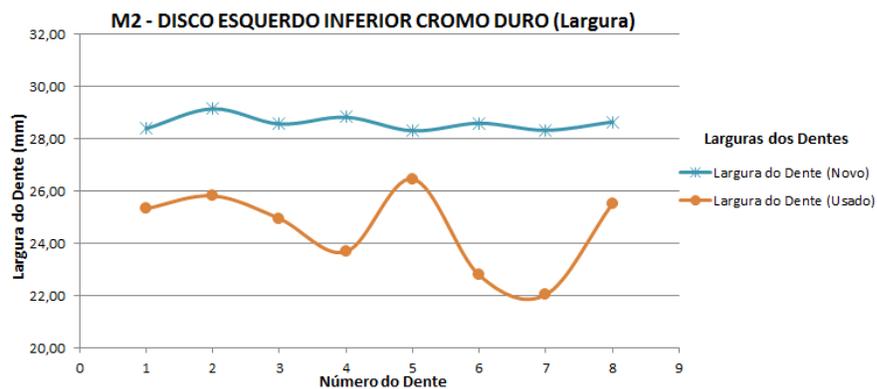
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 5 – Comparativo dos desgastes da largura - (1065 horas) - Disco M1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6 – Comparativo dos desgastes da largura - (1058 horas) - Disco M2

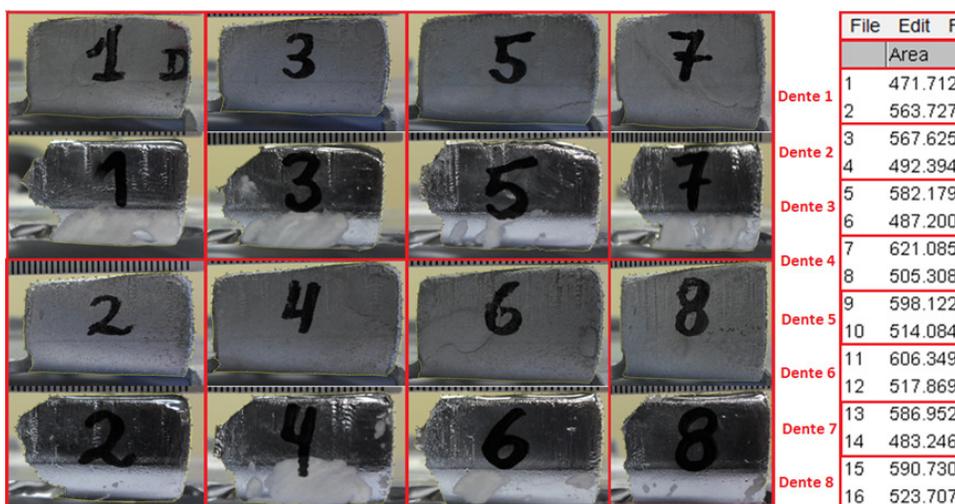


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.1.14 Avaliação do desgaste

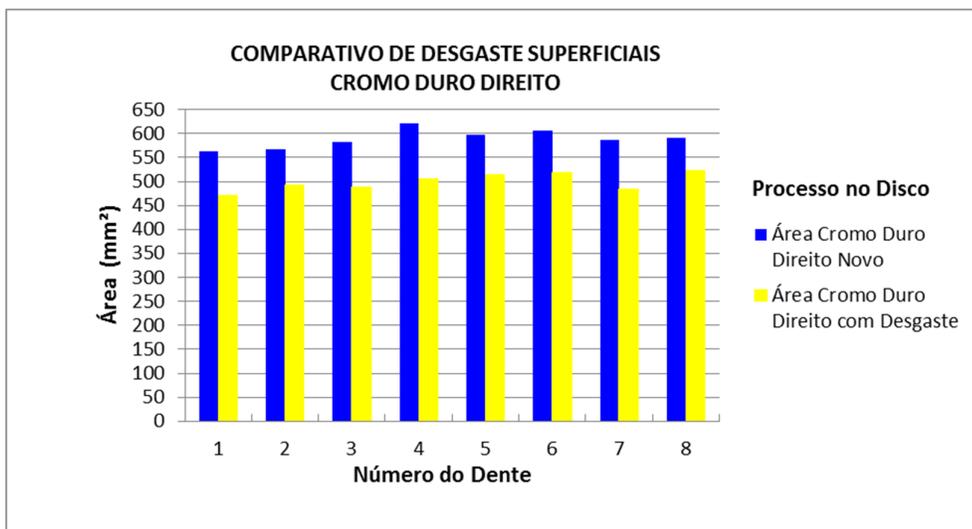
O desgaste dos dentes dos discos “M1 e M2” foram avaliados através da perda de área na região desgastada em relação à região não desgastada, conforme as figuras 77 e 78 e os gráficos 7 e 8. Para quantificar a perda de área de material dos revestimentos estudados, utilizou-se o software Image J de acordo com o procedimento referenciado no item 3.1.14. Desta forma, pôde-se comparar o desempenho dos revestimentos utilizados.

Figura 77 – Desgastes cromo duro evidenciados nos dentes do disco M1 (direito inferior)



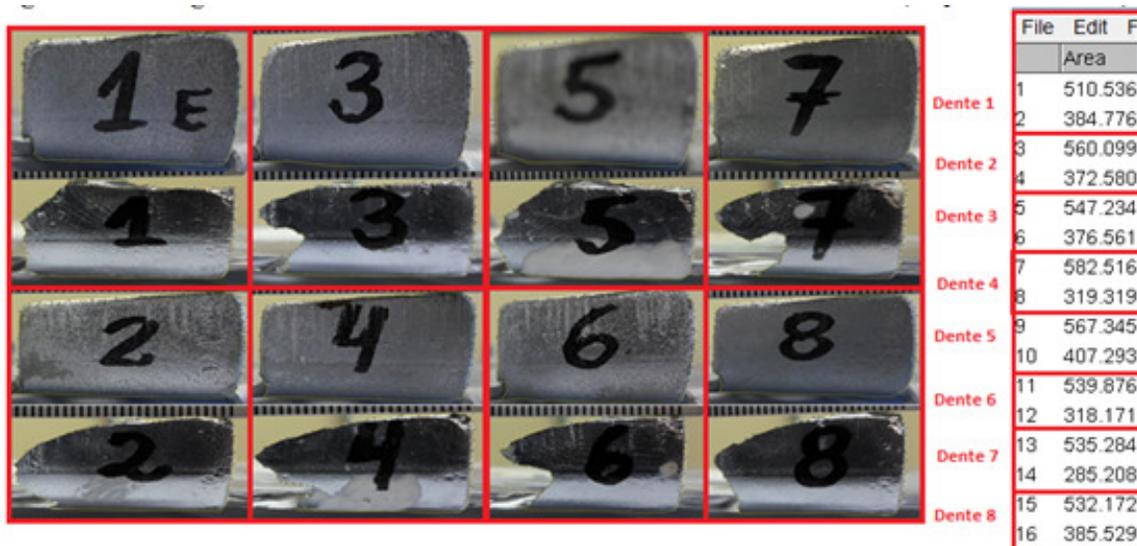
Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 7 – Perda de área por desgaste do disco M1 (1065 horas)



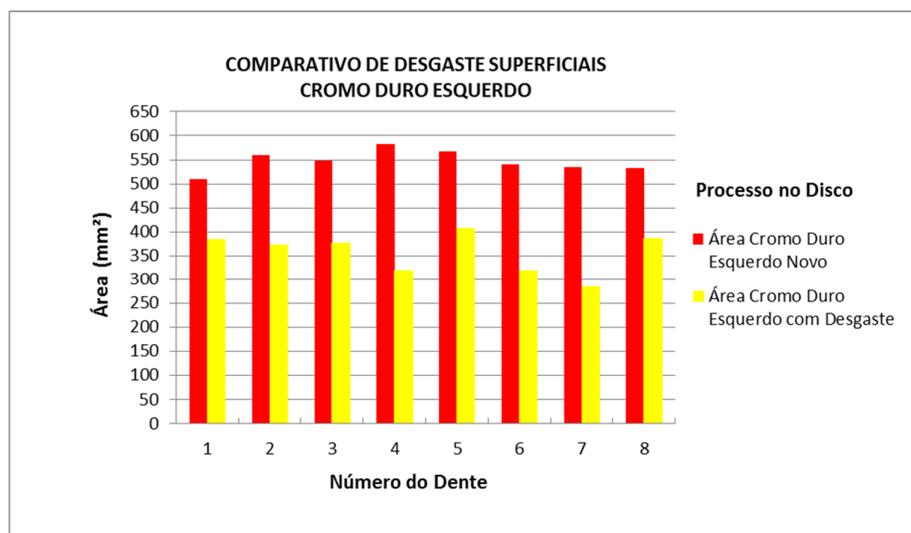
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 78 – Desgastes cromo duro evidenciados nos dentes do disco M2 (esquerdo inferior)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 8 – Perda de área por desgaste do disco M2 (1058 horas)



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 DISCO NOVO 1 (NITRETAÇÃO GASOSA)

### 4.2.1 Comprovação da dureza após a têmpera

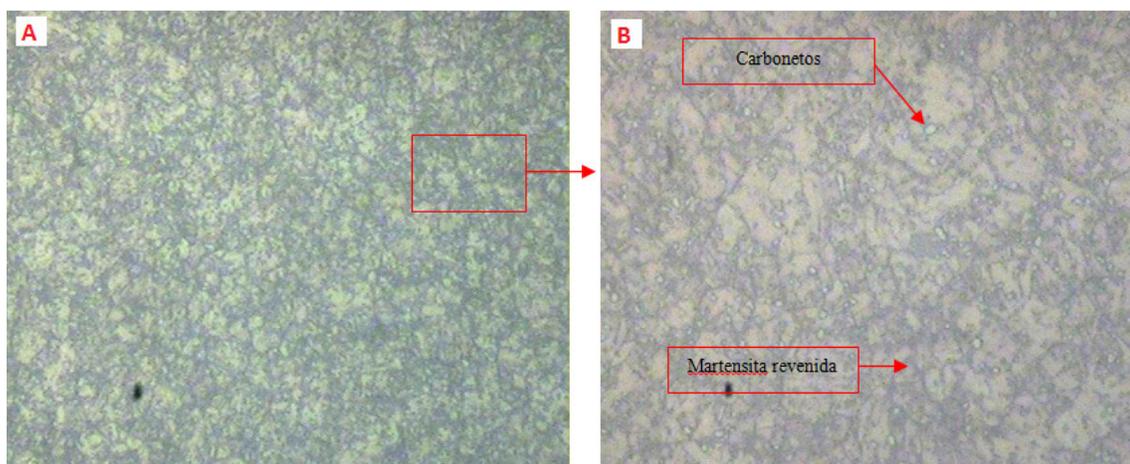
O disco e os CPs enviados para o tratamento térmico acompanharam todo o processo e foram utilizados para as análises. Todas as análises descritas no presente relatório foram conduzidas no corpo de prova que acompanhou a disco no forno.

Os resultados obtidos após o tratamento térmico de têmpera foram 45 a 48HRC de dureza após têmpera e revenimento, e de 1000 Hv1 de dureza superficial após nitretação. Estes dados foram fornecidos ao final do processo, através do certificado de qualidade n° 348389, de 02/09/2013, emitido pela empresa Metaltécnica Metalurgica Ltda, empresa executora do tratamento (Anexo E).

### 4.2.2 Análise microestrutural do disco nitretado

Conforme a figura 79, a amostra analisada apresentou microestrutura no núcleo composta de martensita revenida e pequenos carbonetos arredondados distribuídos de forma homogênea na matriz martensítica.

Figura 79 – Microestruturas (A) aumento de 400x, (B) aumento de 1000x



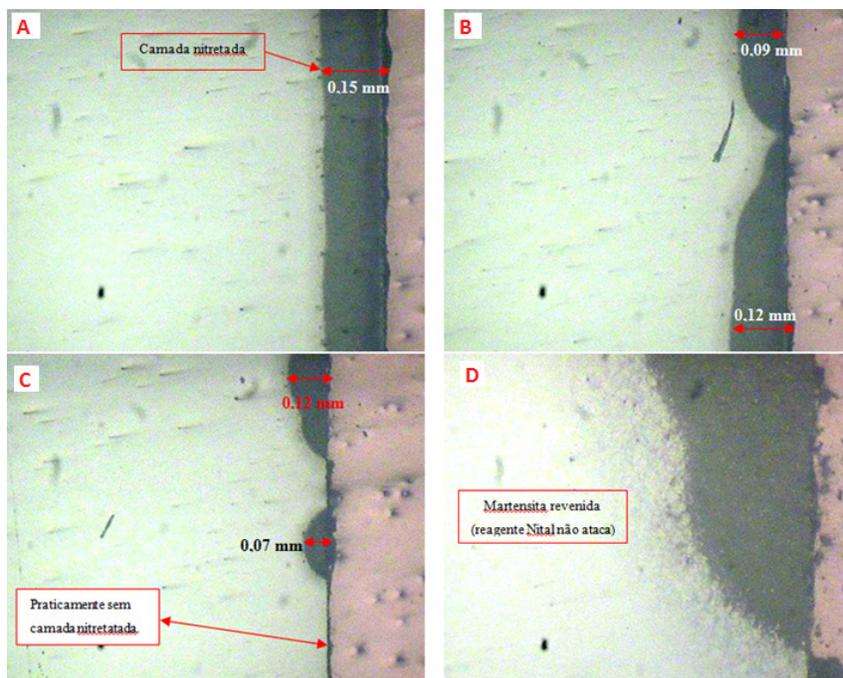
Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados de microestrutura obtida no núcleo a partir do processo de têmpera e revenimento e da microestrutura obtida na camada nitretada a partir do processo de nitretação gasosa estão dentro do esperado e compatíveis com o material e com os processos executados.

#### 4.2.3 Avaliação das espessuras das camadas de nitretação

Avaliou-se o CP onde foi possível perceber que a superfície da amostra apresentou camada nitretada irregular, ou seja: regiões com maior camada, regiões com menor camada e regiões sem camada nitretada, conforme evidenciado pela figura 80 (A), (B), (C) e (D).

Figura 80 – Espessuras nitretação (A), (B), (C) aumento de 200x ataque c/ Nital a 4%; (D) aumento de 400x ataque c/ Nital a 4%

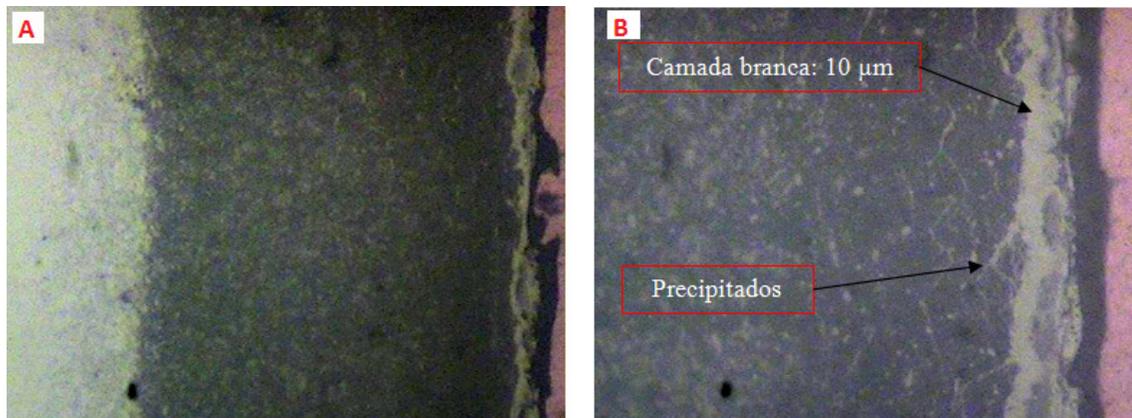


Fonte: Elaborada pelo autor.

As regiões da amostra que apresentam camada nitretada homogênea evidenciam microestrutura na camada composta de martensita revenida e nitretos formados a partir dos elementos de liga presentes no aço.

A superfície nitretada apresenta camada branca (*compound layer*) e precipitados logo abaixo da camada branca, conforme evidenciado na figura 81.

Figura 81 – Camada branca e precipitados (A) aumento de 400x ataque c/ Nital a 4%; (B) aumento de 1000x ataque c/ Nital a 4%



Fonte: Elaborada pelo autor.

A variação de penetração da camada nitretada em aço AISI 420 a partir do processo de nitretação gasosa convencional é esperada, visto que esse aço possui elevado teor de Cromo, o que forma uma película de óxido de cromo sobre a peça, dificultando a penetração do nitrogênio nascente durante o processo de nitretação gasosa.

Este processo ocorrido é denominado como “Passividade”, em alguns metais e ligas normalmente ativas, correm as perdas das reatividades químicas e se tornam inertes. Esse fenômeno ocorre no cromo, ferro, níquel, titânio e outras ligas desses metais. Acredita-se que esse comportamento passivo resulte da formação de um filme de óxido muito fino, que serve como uma barreira de proteção contra uma corrosão. Os aços inoxidáveis são muito resistentes à corrosão em várias atmosferas como resultado da passivação. (CALLISTER, 2008, p. 468).

Existem procedimentos de despassivação da superfície da peça que podem ser conduzidos antes da nitretação gasosa, ativando a superfície, o que resultará em uma camada nitretada homogênea em toda a superfície da peça. (ASM, 1997).

#### 4.2.4 Avaliação Microdureza Vickers

As medições das microdurezas foram realizadas com carga de 0,2Kgf, através de uma média de seis pontos realizados na camada do CP citado, e apresentadas conforme a tabela 13.

Tabela 13 – HV (0,2Kgf): Microdurezas Vickers na camada com nitretação

Nº DE MEDIÇÕES	MEDIDAS DAS MICRODUREZAS VICKERS					
	DIAGONAL 1 (mm)	DIAGONAL 2 (mm)	MÉDIA (mm)	DESVIO PADRÃO (mm)	MICRODUREZA HV (0,2Kgf)	MICRODUREZA MÉDIA HV (0,2Kgf)
1	0,875	0,895	0,885	0,014	1184	1160
2	0,880	0,930	0,905	0,035	1132	
3	0,890	0,885	0,888	0,004	1184	
4	0,910	0,900	0,905	0,007	1132	
5	0,880	0,910	0,895	0,021	1157	
6	0,885	0,895	0,890	0,007	1171	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme as avaliações realizadas no item 4.2.4, espessura das camadas nitretadas, percebeu-se que a superfície da amostra apresentou camada nitretada irregular, com regiões com maior camada, regiões com menor camada e regiões sem camada. Desta forma, decidiu-se por realizar as análises de microdurezas em outras partes do CP para comprovar a inexistência de camadas nitretadas em alguns pontos do disco.

As medições das microdurezas foram realizadas com carga de 0,2Kgf, através de uma média de seis pontos realizados na camada do CP citado, e apresentadas conforme a tabela 14.

Tabela 14 – HV (1Kgf): Microdurezas Vickers na camada com nitretação irregular

Nº DE MEDIÇÕES	MEDIDAS DAS MICRODUREZAS VICKERS					
	DIAGONAL 1 (mm)	DIAGONAL 2 (mm)	MÉDIA (mm)	DESVIO PADRÃO (mm)	MICRODUREZA HV (1Kgf)	MICRODUREZA MÉDIA HV (1Kgf)
1	3,550	3,900	3,725	0,247	334	355
2	3,400	3,420	3,410	0,014	399	
3	3,720	3,180	3,450	0,382	385	
4	3,560	3,890	3,725	0,233	334	
5	3,690	3,530	3,610	0,113	356	
6	3,840	3,760	3,800	0,057	321	

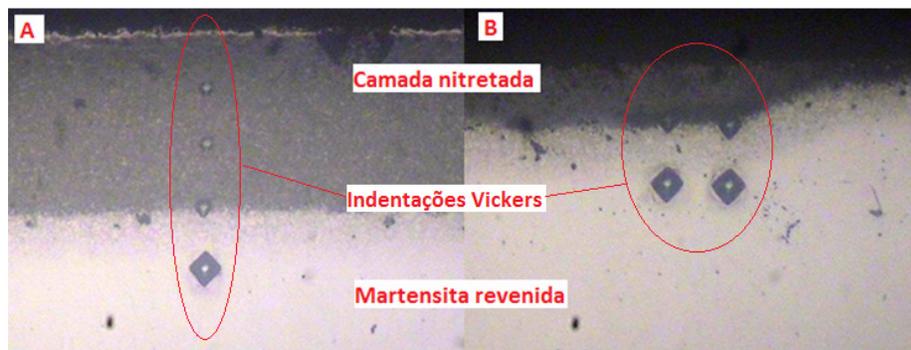
Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.2.5 Profundidade da camada efetiva

A profundidade da camada efetiva nitretada foi analisada através de microdurezas Vickers, realizadas com carga de 0,2Kgf, medindo em diversos locais da amostra.

Ao final, realizou-se a avaliação das medições e os resultados foram apresentados no gráfico 9. Conforme as variações observadas na camada nitretada, referenciada pela figura 82 (A) e (B) em diferentes posições da camada.

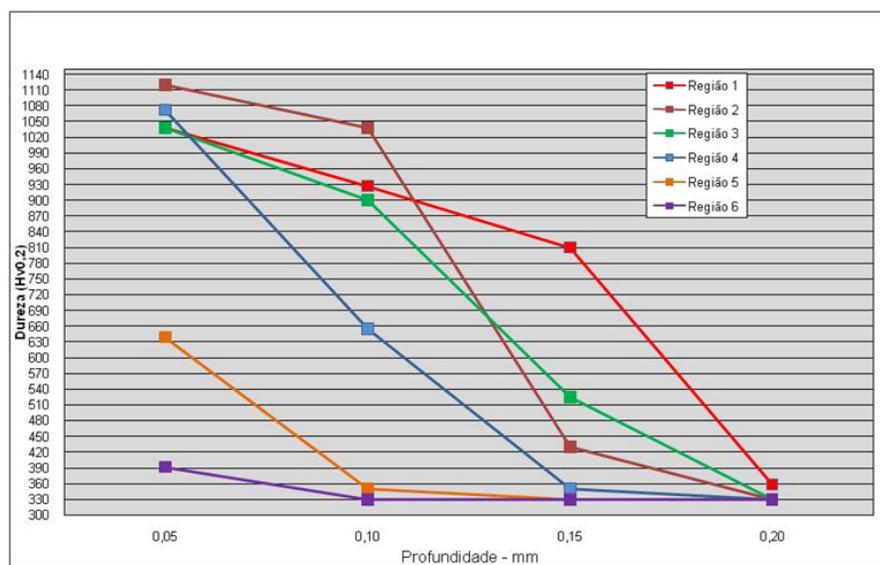
Figura 82 – Camada efetiva (A) aumento de 200x ataque c/ Nital a 4%; (B) aumento de 200x ataque c/ Nital a 4%



Fonte: Elaborada pelo autor.

A dureza na camada e a curva de dureza, encontrada em cada ponto inspecionado, estão apresentadas conforme evidenciado no gráfico 9.

Gráfico 9 – Curva de dureza na camada nitretada



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.6 Avaliação dos parâmetros de rugosidades do disco nitretado

Da mesma forma que se realizam o procedimento para obtenção das rugosidades do disco revestido com cromo duro segue-se todos os detalhes referenciados no item 3.1.11 deste trabalho, obtendo-se para o disco nitretado os resultados detalhados na tabela 15.

Tabela 15 – Ra e Rz ( $\mu\text{m}$ ): Rugosidade dos dentes do disco nitretado

POSIÇÃO DO DISCO	Nº DO DENTE	POSIÇÃO - A		POSIÇÃO - B		POSIÇÃO - C		MÉDIA Ra total	MÉDIA Rz total	DESVIO PADRÃO Ra	DESVIO PADRÃO Rz
		Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz				
MI - DISCO DIREITO INFERIOR	1	0,61	3,80	1,08	9,60	1,90	17,50	1,16	9,93	0,55	5,79
		0,59	3,70	1,03	9,30	1,74	15,70				
	2	0,91	12,70	1,51	10,30	2,35	18,60	1,70	14,98	0,66	3,61
		0,99	13,40	2,09	15,20	2,37	19,70				
	3	2,03	23,70	1,26	10,40	3,01	22,90	2,08	18,18	0,68	6,89
		2,15	24,50	1,39	9,00	2,61	18,60				
	4	0,92	7,80	1,97	13,40	2,24	20,10	1,80	16,20	0,46	5,21
		1,76	20,60	1,96	14,60	1,92	20,70				
	5	1,26	18,10	0,44	2,80	0,30	1,90	0,56	5,28	0,36	6,37
		0,56	4,60	0,48	2,70	0,33	1,60				
	6	1,04	11,00	1,42	12,90	1,35	11,50	1,23	12,15	0,16	1,17
		1,04	11,00	1,30	13,90	1,21	12,60				
	7	0,83	6,70	1,36	8,20	1,97	9,10	1,28	9,07	0,44	2,07
		0,77	7,90	1,41	9,80	1,35	12,70				
	8	1,42	18,80	1,25	17,70	1,41	15,70	1,33	17,07	0,15	1,39
		1,55	18,00	1,13	17,00	1,23	15,20				

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.2.7 Adesão na camada nitretada

Seguindo o procedimento realizado no item 3.1.12 deste trabalho, utilizou-se o CP evidenciado pela figura 58, e avaliou-se a qualidade de adesão da camada nitretada. Executaram-se os testes no laboratório de metalurgia física da UNISINOS através da utilização do durômetro para medições em Rockwell “A”, obtendo os resultados evidenciados na figura 83.

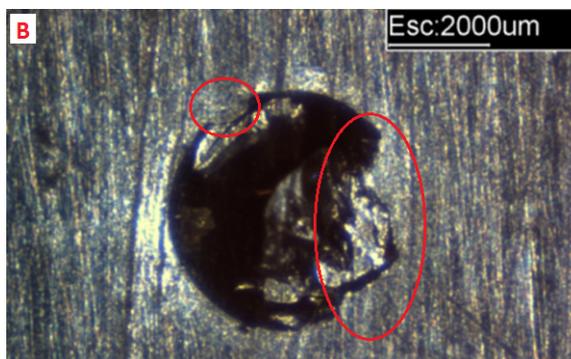
Figura 83 – Qualidade da adesão da nitretação (Rockwel A - 60kgf)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Através das avaliações realizadas sobre as imagens obtidas com a ampliação de 581x, visualizadas e registradas por meio da TRIDIMENSIONAL ÓTICA STARRETT GALILEU, percebeu-se que houve alguns deslocamentos na superfície da camada nitretada, podendo, na escala comparativa da norma alemã VDI 3198, apresentada no item 3.1.12, ser classificada como HF5, evidenciando desta forma, que não representam boa adesão, sendo consideradas não aprovadas, com falhas não aceitáveis, conforme demonstrado na figura 84 representada em maior aumento.

Figura 84 – Ampliação da figura 83 (B) para visualizar deslocamentos HF5

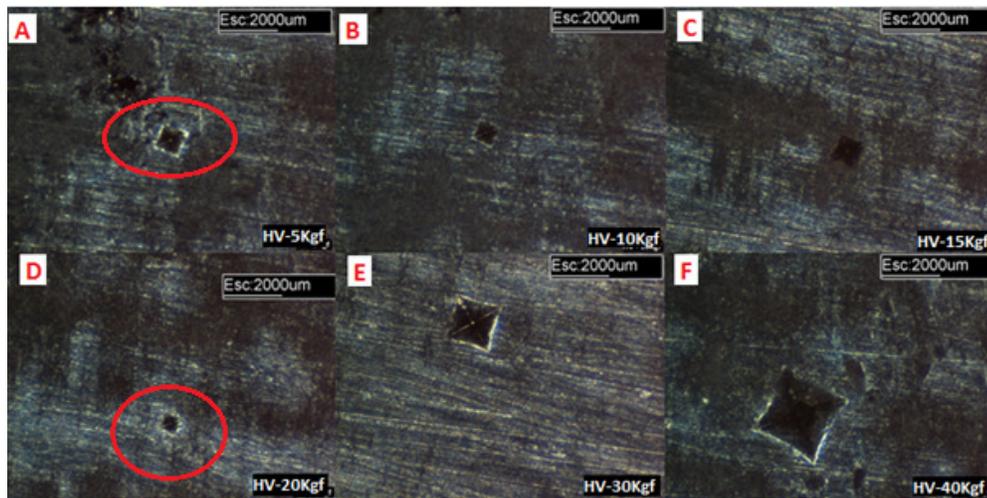


Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.2.8 Tenacidade da camada nitretada

Seguindo o procedimento realizado no item 3.1.13 deste trabalho, utilizou-se o CP evidenciado pela figura 58, e avaliou-se a tenacidade da camada nitretada. Executaram-se os testes no laboratório de metalurgia física da UNISINOS através da utilização do durômetro para medições em Rockwell “A”, obtendo os resultados evidenciados na figura 85.

Figura 85 – Cargas de ruptura da camada de nitretação

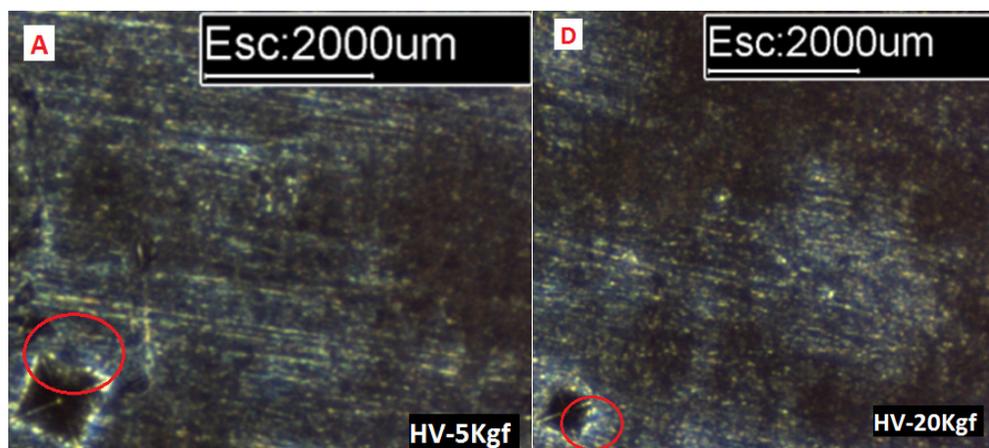


Fonte: Elaborada pelo autor.

Através das avaliações realizadas sobre as imagens das indentações “Vickers” obtidas com a ampliação de 581x, visualizadas e registradas por meio da TRIDIMENSIONAL ÓTICA STARRETT GALILEU, observa-se que a camada de nitretação gasosa no aço inoxidável, apresentou ruptura para as cargas utilizadas de 5 e 20kgf no respectivo teste.

Conforme observado nas imagens da figura 85 (A) e (D), evidenciadas em maior ampliação na figura 86, percebeu-se que apesar de ter formado a marca característica da indentação Vickers, em alguns pontos dos perfis da indentação, ocorre o desprendimento da camada do filme do substrato, dando lugar a um contorno irregular em torno do perímetro da marca do indentador.

Figura 86 – Ampliação da figura 85 (A) e (D) para visualizar rupturas superficiais



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.2.9 Medição dos dentes do disco nitretado

Seguindo as etapas do item 3.1.14, realizou-se as medições nos componentes do disco nitretado, lado direito inferior sem utilização primeiramente e após a utilização, conforme evidenciado no acompanhamento realizado através do horímetro instalado no equipamento, ver figura 61, obtendo-se os seguintes resultados referenciados nas tabelas 16 e 17.

Tabela 16 – Medições dos dentes do disco - 19/09/2013 - (NITRETAÇÃO)

POSIÇÃO DO DISCO	Nº DO DENTE	ALTURA >	ALTURA <	LARGURA DO DENTE	ESPESSURA DO DENTE
		h1 (mm)	h2 (mm)	c (mm)	e (mm)
M1 - DISCO DIREITO INFERIOR	1	16,82	16,22	27,86	3,14
	2	16,92	16,34	27,84	3,22
	3	17,13	16,52	28,39	3,11
	4	17,14	16,32	27,92	3,09
	5	17,09	16,42	28,01	3,11
	6	16,79	16,08	28,20	3,11
	7	16,34	15,89	27,81	3,10
	8	16,10	15,97	28,03	3,09

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos através das medições realizadas nos dentes do disco M1, estão evidenciados na tabela 17, e os mesmos, são referentes aos dados obtidos depois da retirada do disco do processo, contabilizando para o respectivo motor o seguinte tempo de operação:

**\* M1= 423 horas (disco direito inferior).**

Tabela 17 – Medições dos dentes do disco - 30/10/2013 - (NITRETAÇÃO)

POSIÇÃO DO DISCO	Nº DO DENTE	ALTURA >	ALTURA <	LARGURA DO DENTE	ESPESSURA DO DENTE
		h1 (mm)	h2 (mm)	c (mm)	e (mm)
M1 - DISCO DIREITO INFERIOR	1	15,63	14,39	26,19	2,80
	2	15,43	14,94	25,47	2,79
	3	16,05	15,01	27,01	2,83
	4	15,70	14,01	25,64	2,89
	5	15,54	14,02	25,39	2,81
	6	15,56	14,11	25,91	2,86
	7	15,38	14,76	25,68	2,90
	8	15,81	15,39	26,16	2,88

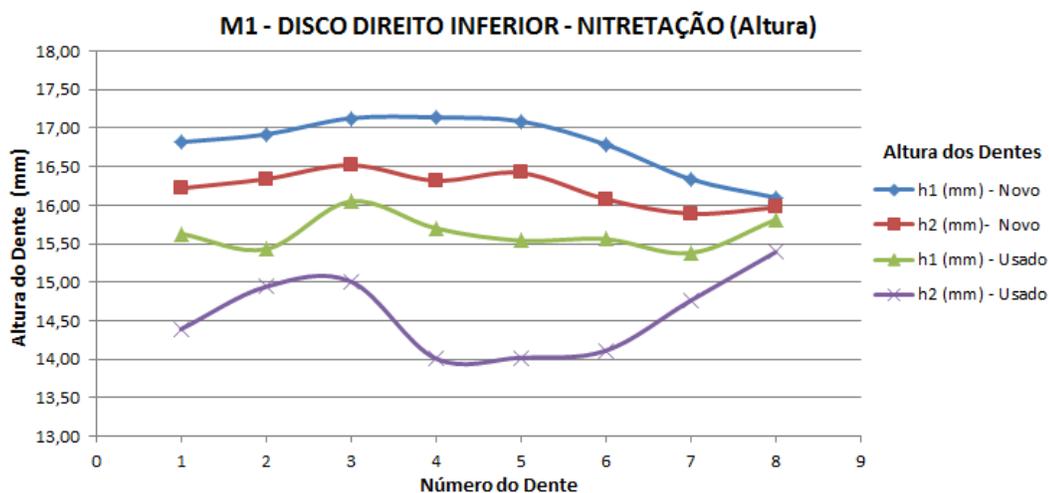
Fonte: Elaborada pelo autor.

Abaixo são apresentados os gráficos 10, 11 e 12, representando a quantificação dos comparativos dos desgastes ocorridos nos dentes do disco M1 medidos com paquímetro digital Vonder, durante o intervalo de tempo avaliado.

São apresentados os seguintes parâmetros dos dentes:

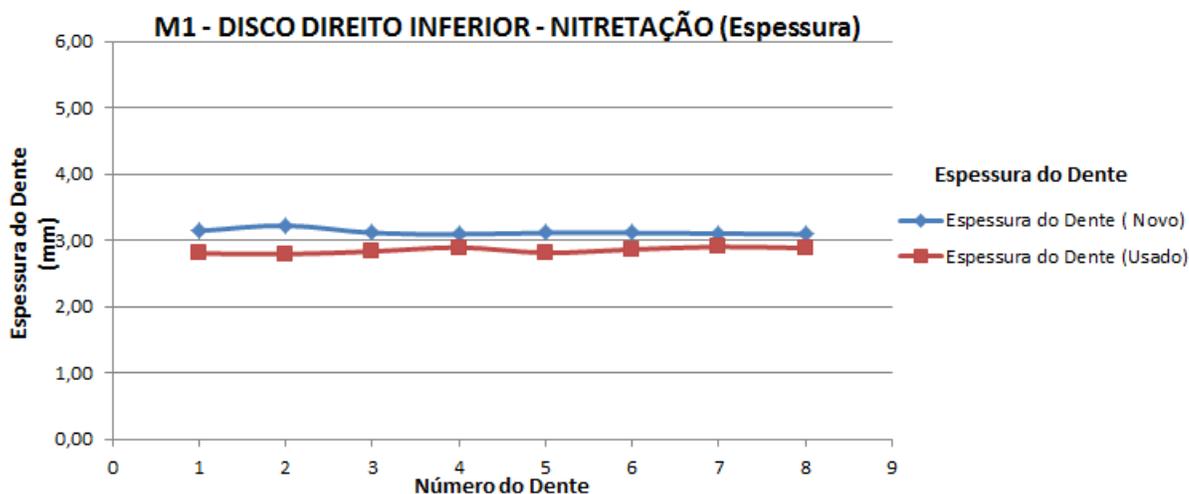
- \* alturas h1 e h2;
- \* espessuras e;
- \* larguras.

Gráfico 10 – Comparativo dos desgastes das alturas h1 e h2 - (423 horas) - Disco M1



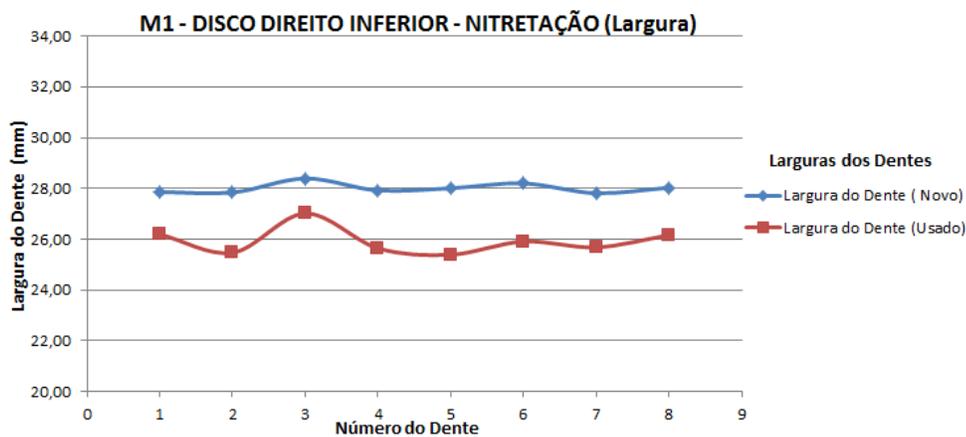
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 11 – Comparativo dos desgastes das espessuras - (423 horas) - Disco M1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 12 – Comparativo dos desgastes da largura - (423 horas) - Disco M1

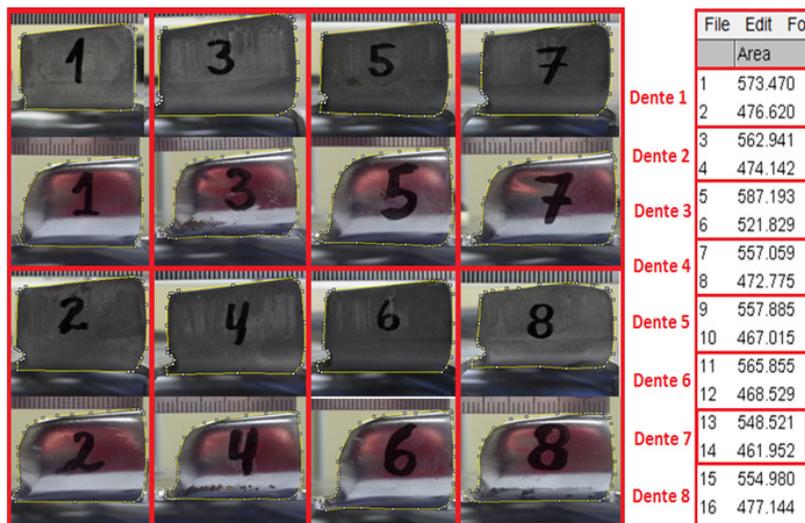


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.10 Avaliação do desgaste

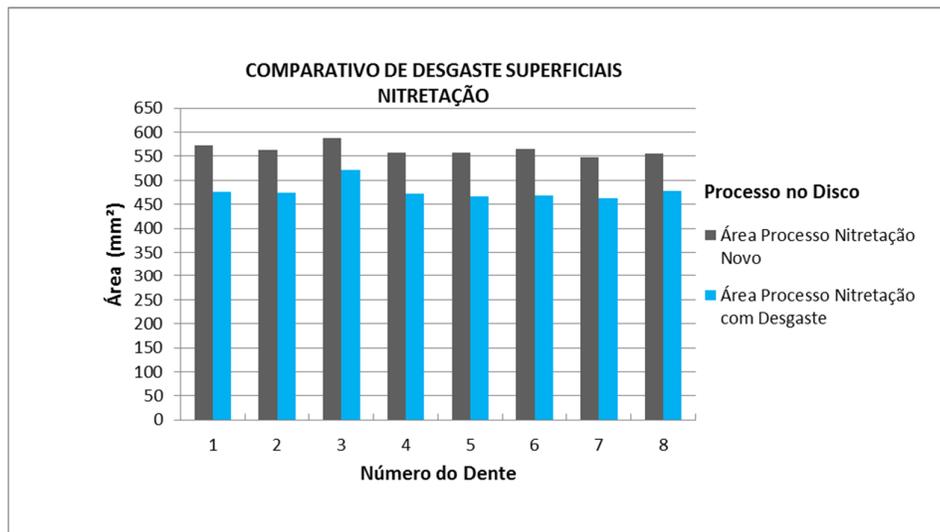
O desgaste dos dentes do disco “M1” foi avaliado através da perda de área na região desgastada em relação à região não desgastada, conforme a figura 87 e o gráfico 13. Para quantificar a perda de área de material dos revestimentos estudados, utilizou-se o software Image J de acordo com o procedimento referenciado no item 3.1.14. Desta forma, pôde-se comparar o desempenho dos revestimentos utilizados.

Figura 87 – Desgastes nitretação evidenciados nos dentes do disco M1 (direito inferior)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 13 – Perda de área por desgaste do disco M1 (423 horas)



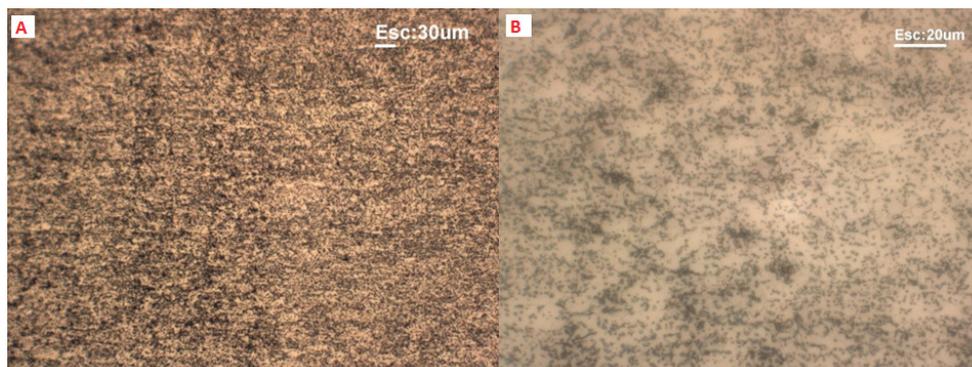
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.3 DISCO NOVO 2 (CARBETO DE TUNGSTÊNIO)

##### 4.3.1 Análise microestrutural do disco aspergido

Com a finalização das etapas de revelação das ME, foi possível concluir que os aspectos dos cortes transversal e longitudinal a 100 e 400 vezes de aumento, obtidos na avaliação realizada no laboratório de metalurgia física da UNISINOS, figura 88 (A), possuem as mesmas características microestruturais obtidas no CP referente ao aço utilizado para a fabricação dos dois novos discos colocados em teste, evidenciando uma ME no estado de não temperada conforme evidenciado na figura 88 (B).

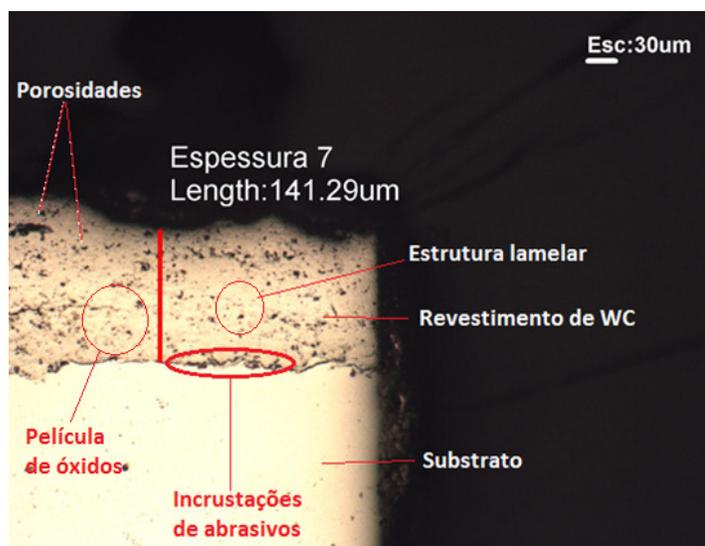
Figura 88 – Microestruturas (A) aumento de 100x, (B) aumento de 400x



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os revestimentos aspergidos sobre o substrato apresentam um grau de porosidade residual que pode permitir o contato do meio agressivo com a superfície do substrato. Caso isso aconteça, utilizam-se selantes orgânicos adequados para este fim. Entretanto, revestimentos depositados por aspersão térmica HVOF possuem porosidade extremamente baixa, devido a altíssima velocidade com que as partículas semifundidas atingem o substrato, fazendo com que ocorra uma melhor acomodação das partículas na formação do revestimento. De acordo com o tipo de material e de certa espessura, além dos parâmetros de deposição, o revestimento pode ser considerado impermeável. A seguir, observa-se uma imagem de micrografia obtida após a análise por microscopia ótica do revestimento de carbeto de tungstênio (WC), aspergido termicamente por HVOF (Figura 89).

Figura 89 – Micrografias da camada aspergida com WC por HVOF – ampliação (100x)



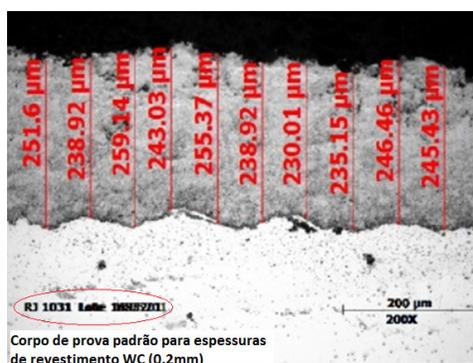
Fonte: Elaborada pelo autor

Em relação às microestruturas encontradas para o revestimento depositado por HVOF, foi possível observar a característica lamelar típica de revestimentos aspergidos, contendo em seu contorno uma discreta película de óxidos. Observa-se também que houve incrustações de partículas abrasivas, provavelmente oriundas do processo de jateamento. Devido às altas velocidades de impacto neste processo, os revestimentos possuem porosidades extremamente baixas e elevada força de adesão em relação aos processos de aspersão térmica convencionais. Todas estas características são indicadores da qualidade dos revestimentos produzidos por aspersão térmica.

### 4.3.2 Avaliação das espessuras das camadas aspergidas

Realizaram-se as medições das camadas aspergidas pelo processo de HVOF, de acordo com a especificação de espessura definida em 0,2mm para o revestimento de carbeto de tungstênio (WC). Após os resultados, os mesmos foram comparados com o CP padrão que a empresa Rizeja disponibiliza para seu controle de qualidade e a deposição ficou dentro das especificações (Figura 90).

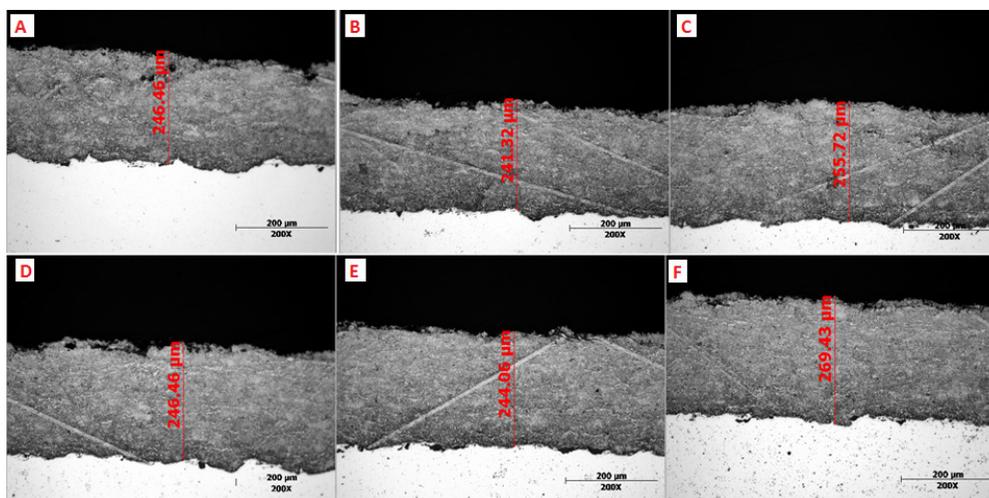
Figura 90 – CP padrão para testes comparativos (especificação para WC- 0,2mm)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Avaliou-se o CP onde se percebeu que a superfície da amostra apresenta camada totalmente regular e homogênea, ou seja, apresentou as regiões com camadas todas acima do especificado no processo, conforme evidenciado pela figura 91 (A), (B), (C), (D) e (F).

Figura 91 – Espessuras do carbeto de tungstênio (WC) - aumento de (200x) sem ataque



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.3.3 Avaliação Microdureza Vickers

As medições das microdurezas foram realizadas com carga de 0,2Kgf, através de uma média de seis pontos realizados na camada do CP citado, e apresentadas conforme tabela 18.

Tabela 18 – HV (0,2Kgf): Microdurezas Vickers na camada aspergida

N° DE MEDIÇÕES	MEDIDAS DAS MICRODUREZAS VICKERS					
	DIAGONAL 1 (mm)	DIAGONAL 2 (mm)	MÉDIA (mm)	DES VIO PADRÃO (mm)	MICRODUREZA HV (0,2Kgf)	MICRODUREZA MÉDIA HV (0,2Kgf)
1	0,795	0,800	0,798	0,004	1467	
2	0,835	0,880	0,858	0,032	1283	
3	0,925	0,930	0,928	0,004	1084	
4	0,845	0,900	0,873	0,039	1225	1333
5	0,755	0,805	0,780	0,035	1524	
6	0,810	0,815	0,813	0,004	1413	

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com os valores de microdureza ao longo da seção transversal do revestimento aspergido, verificou-se que houve variações devido a não uniformidade das fases. É possível observar que quando se trabalha com subcamadas (revestimentos aspergidos), ocorre a não linearidade dos valores de microdureza, pois, cada ponto da indentação pode estar localizado em microestruturas diferentes, nesse caso, carbonetos, óxidos, inclusões e a própria matriz. Os revestimentos aspergidos com materiais a base de WC apresentam-se como compostos metais-cerâmicos, sendo que os valores de microdureza encontrados estão associados a cada microconstituente. (NUCCI, 2005 apud CASTRO, 2012).

### 4.3.4 Avaliação dos parâmetros de rugosidades do disco aspergido

Da mesma forma que realiza-se os procedimentos para obtenção das rugosidades do disco revestido com cromo duro segue-se todos os detalhes referenciados no item 3.1.11 deste trabalho, obtendo-se para o disco aspergido os resultados detalhados na tabela 19.

Tabela 19 – Ra e Rz ( $\mu\text{m}$ ): Rugosidade dos dentes do disco aspergido

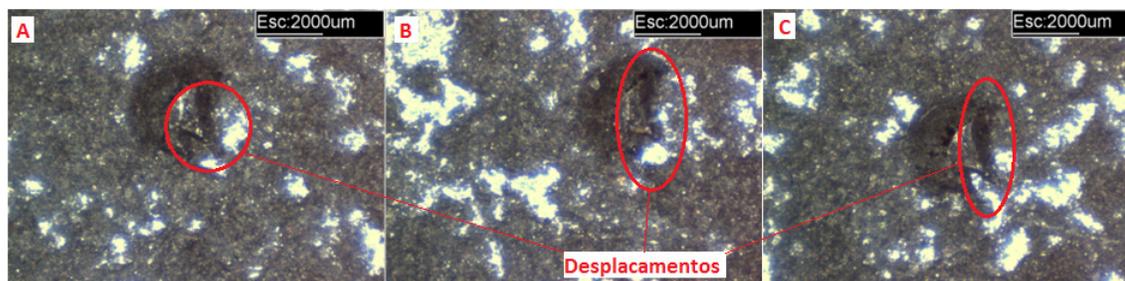
POSIÇÃO DO DISCO	Nº DO DENTE	POSIÇÃO - A		POSIÇÃO - B		POSIÇÃO - C		MÉDIA Ra total	MÉDIA Rz total	DESVIO PADRÃO Ra	DESVIO PADRÃO Rz
		Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz				
M2 - DISCO ESQUERDO INFERIOR	1	4,09	24,40	4,58	24,90	3,66	23,20	4,10	24,50	0,36	0,66
		4,04	24,90	4,45	24,80	3,80	24,80				
	2	3,30	23,20	4,58	24,90	4,18	24,90	3,96	24,10	0,71	1,18
		2,87	22,10	4,60	24,90	4,22	24,60				
	3	3,21	24,80	3,53	23,50	3,63	24,00	3,59	23,87	0,26	0,80
		3,43	24,70	3,77	22,70	3,94	23,50				
	4	4,22	24,90	3,42	22,80	4,21	24,90	3,83	23,35	0,50	1,79
		3,57	21,50	3,17	21,10	4,36	24,90				
	5	2,13	24,90	2,22	24,60	2,76	24,90	2,45	24,67	0,24	0,30
		2,52	24,70	2,40	24,10	2,65	24,80				
	6	3,35	21,20	4,27	24,90	3,93	24,70	3,74	23,13	0,35	1,45
		3,41	22,20	3,59	23,20	3,89	22,60				
	7	3,75	23,30	3,25	23,60	4,55	24,90	3,66	24,02	0,57	0,70
		3,19	23,60	3,14	23,80	4,05	24,90				
	8	2,34	20,30	2,56	21,70	3,42	22,60	2,84	21,90	0,60	1,37
		2,44	21,70	2,51	20,90	3,77	24,20				

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.3.5 Adesão na camada aspergida

Seguindo o procedimento realizado no item 3.1.12 deste trabalho, utiliza-se o CP evidenciado pela figura 36 (D), e avalia-se a qualidade de adesão da camada aspergida. Executam-se os testes no laboratório de metalurgia física da UNISINOS através do durômetro para medições em Rockwell “A”, obtendo os resultados evidenciados na figura 92.

Figura 92 – Qualidade da adesão da aspersão térmica (WC) - (Rockwel A - 60kgf)

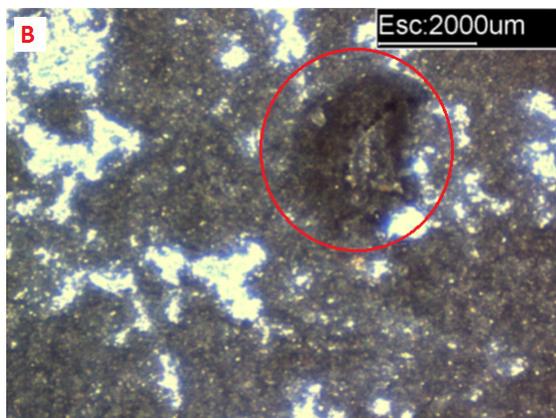


Fonte: Elaborada pelo autor.

Através das avaliações realizadas sobre as imagens obtidas com a ampliação de 581x, visualizadas e registradas por meio da TRIDIMENSIONAL ÓTICA STARRETT GALILEU, percebe-se que houve alguns deslocamentos na superfície da camada aspergida, podendo, na

escala comparativa da norma alemã VDI 3198, apresentada no item 3.1.12, ser classificada como HF5, evidenciando desta forma, que não representam boa adesão, sendo consideradas não aprovadas, com falhas não aceitáveis, conforme demonstrado na figura 93 representada em maior aumento.

Figura 93 – Ampliação da figura 92 (B) para visualizar deslocamentos HF5

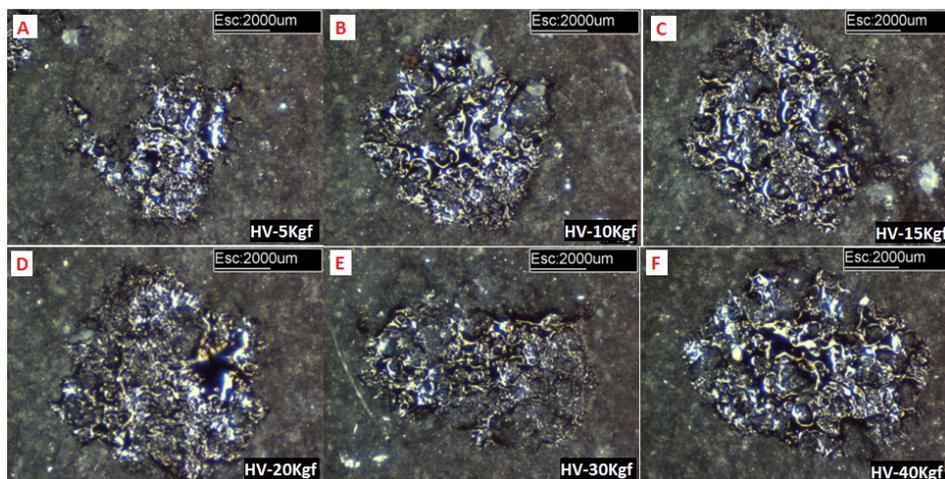


Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.3.6 Tenacidade da camada aspergida

Seguindo o procedimento realizado no item 3.1.13 deste trabalho, utiliza-se o CP evidenciado pela figura 36 (D), e avalia-se a tenacidade da camada aspergida. Executam-se os testes no laboratório de metalurgia física da UNISINOS através do durômetro para medições em Rockwell “A”, obtendo os resultados evidenciados na figura 94.

Figura 94 – Cargas de ruptura da camada de carbeto de tungstênio



Fonte: Elaborada pelo autor.

Através das avaliações realizadas sobre as imagens das indentações “Vickers” obtidas com a ampliação de 581x, visualizadas e registradas por meio da TRIDIMENSIONAL ÓTICA STARRETT GALILEU, observa-se que o revestimento de camada de carbeto de tungstênio (WC), no substrato de aço inoxidável, apresentou ruptura para todas as cargas utilizadas de 5 a 40kgf no respectivo teste.

Conforme observado nas imagens da figura 94, percebe-se que apesar de não ter formado a marca característica da indentação Vickers no momento da carga aplicada, em todos os casos, em torno dos pontos dos perfis da indentação, ocorre o desprendimento da camada do revestimento, dando lugar a um contorno irregular em torno do perímetro da marca do indentador.

#### 4.3.7 Medição dos dentes do disco aspergido

Seguindo as etapas do item 3.1.14, realizou-se as medições nos componentes do disco aspergido, lado esquerdo inferior sem utilização primeiramente e após a utilização, conforme evidenciado no acompanhamento realizado através do horímetro instalado no equipamento, ver figura 67, obtendo-se os seguintes resultados referenciados nas tabelas 20 e 21.

Tabela 20 – Medições dos dentes do disco - 19/09/2013 - (ASPERSÃO)

POSIÇÃO DO DISCO	Nº DO DENTE	ALTURA >	ALTURA <	LARGURA DO DENTE	ESPESSURA DO DENTE
		h1 (mm)	h2 (mm)	c (mm)	e (mm)
M2 - DISCO ESQUERDO INFERIOR	1	17,25	15,94	28,30	3,72
	2	16,39	15,74	28,37	3,60
	3	16,93	16,06	28,22	3,67
	4	16,62	15,71	28,48	3,65
	5	16,45	15,38	29,03	3,62
	6	16,61	15,42	27,64	3,53
	7	16,49	15,89	27,81	3,73
	8	16,40	16,01	28,53	3,61

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos através das medições realizadas nos dentes do disco M2 estão evidenciados na tabela 21, e os mesmos, são referentes aos dados obtidos depois da retirada do disco do processo, contabilizando para o respectivo motor o seguinte tempo de operação:

**\* M2= 418 horas (disco direito inferior).**

Tabela 21 – Medições dos dentes do disco - 30/10/2013 - (ASPERSÃO)

POSIÇÃO DO DISCO	Nº DO DENTE	ALTURA >	ALTURA <	LARGURA DO DENTE	ESPESSURA DO DENTE
		h1 (mm)	h2 (mm)	c (mm)	e (mm)
M2 - DISCO ESQUERDO INFERIOR	1	16,93	15,34	28,28	3,71
	2	16,28	15,23	28,32	3,57
	3	16,76	15,71	28,14	3,63
	4	16,42	15,43	28,35	3,63
	5	16,37	15,48	28,98	3,60
	6	16,51	15,32	27,60	3,51
	7	16,39	15,61	27,71	3,59
	8	16,38	15,76	28,42	3,58

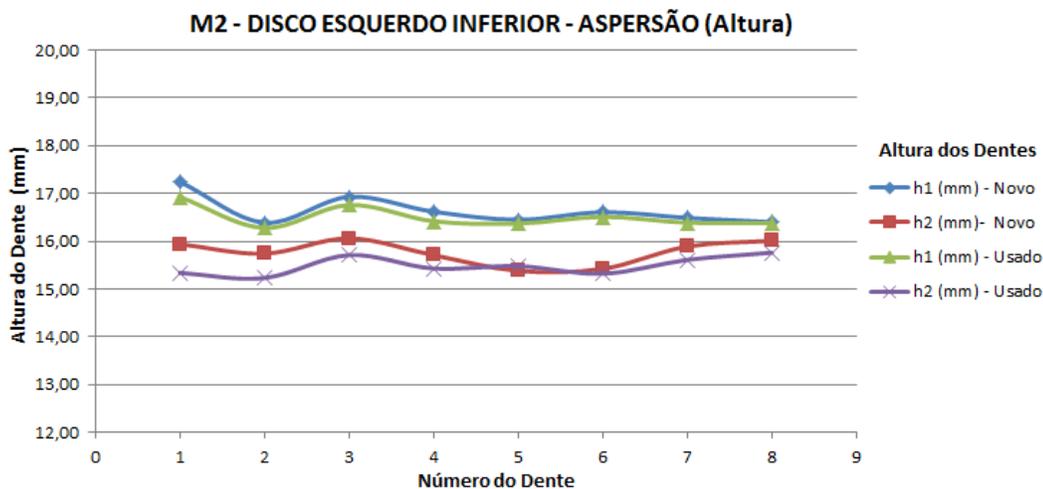
Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir são apresentados os gráficos 14, 15 e 16, representando a quantificação dos comparativos dos desgastes ocorridos nos dentes do disco M2 medidos com paquímetro digital Vonder, durante o intervalo de tempo avaliado.

São apresentados os seguintes parâmetros dos dentes:

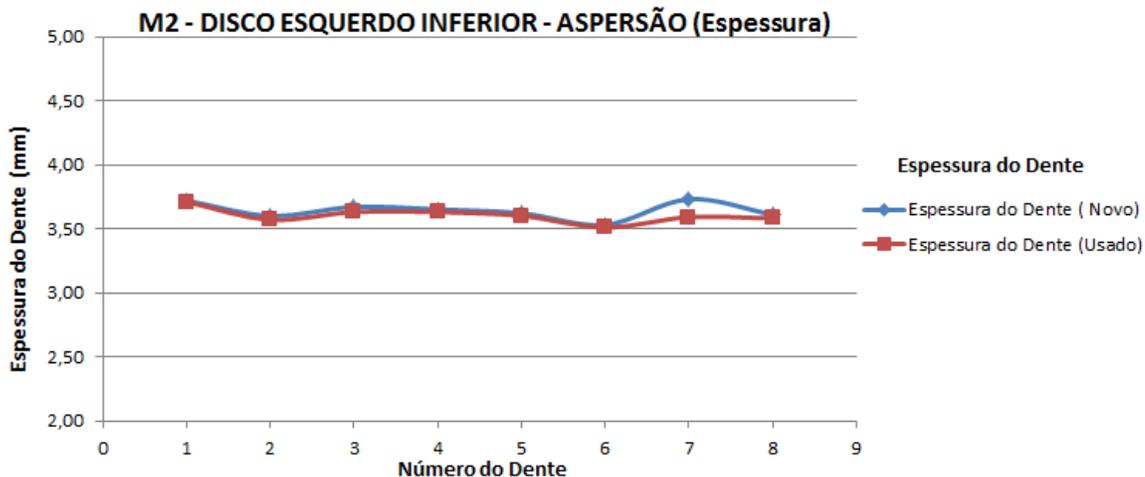
- \* alturas h1 e h2;
- \* espessuras e;
- \* larguras.

Gráfico 14 – Comparativo dos desgastes das alturas h1 e h2 - (418 horas) - Disco M2



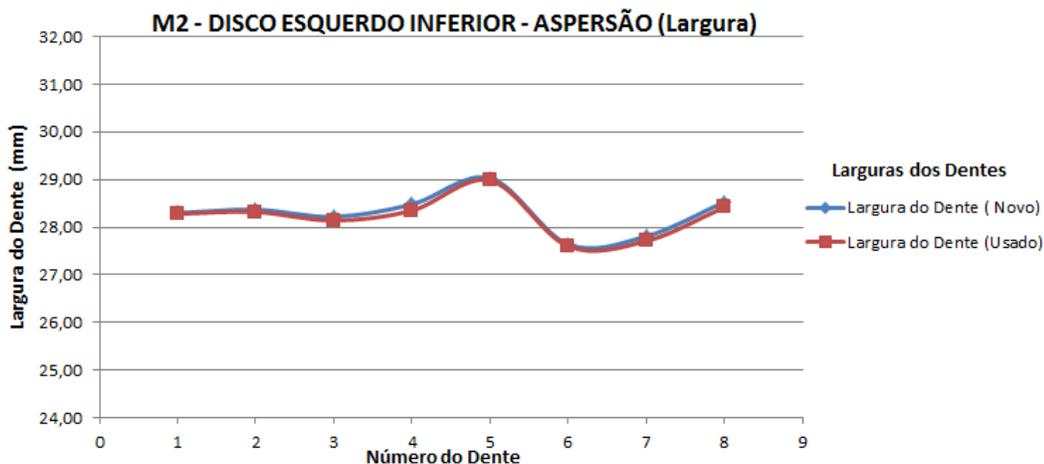
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 15 – Comparativo dos desgastes das espessuras - (418 horas) - Disco M2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 16 – Comparativo dos desgastes da largura - (418 horas) - Disco M2

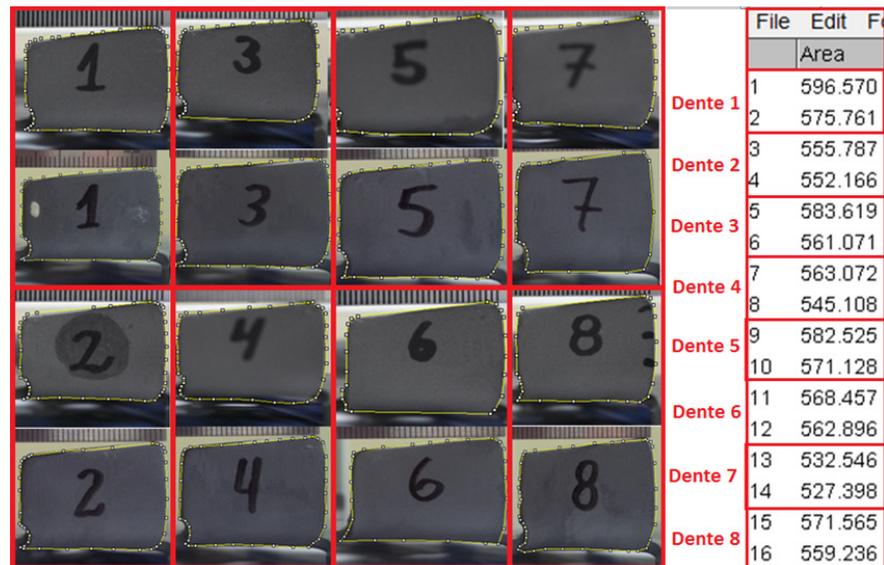


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.3.8 Avaliação do desgaste

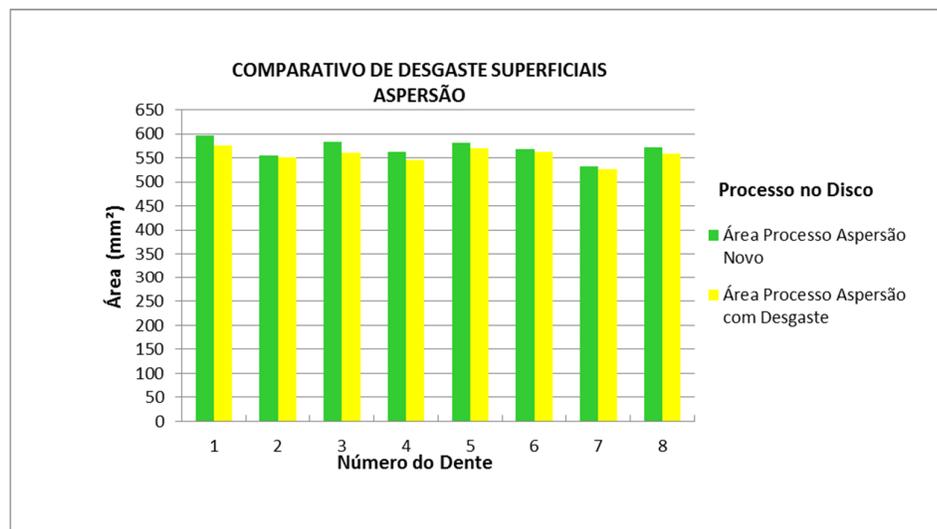
O desgaste dos dentes do disco “M2” foi avaliado através da perda de área na região desgastada em relação à região não desgastada, conforme a figura 95 e o gráfico 17. Para quantificar a perda de área de material dos revestimentos estudados, utilizou-se o software Image J de acordo com o procedimento referenciado no item 3.1.14. Desta forma, pode-se comparar o desempenho dos revestimentos utilizados.

Figura 95 – Desgastes aspensão evidenciados nos dentes do disco M2 (esquerdo inferior)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 17 – Perda de área por desgaste do disco M2 (418 horas)



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.4 COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS

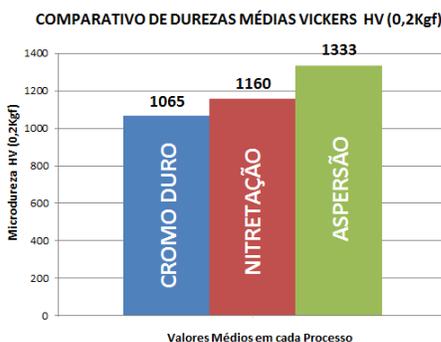
### 4.4.1 Comparativos entre as microdurezas

Através dos resultados obtidos com os testes apresentados no gráfico 18, percebe-se que o processo que atingiu as melhores eficiências quanto às características de dureza e resistência ao desgaste é o revestimento de carbeto de tungstênio (WC) aspergido termicamente.

Cabe ressaltar, que o processo de nitretação realizado não obteve camada dura homogênea, e em alguns pontos conforme citado anteriormente nem sequer obteve camada, devido à falta da realização do processo de despassivação necessário para aços inoxidáveis de alto teor de cromo, que é o caso dos martensíticos AISI 420 foco deste trabalho.

Sendo assim, para fins comparativos de vida útil e resistência ao desgaste dos discos, entre os processos colocados em teste, o valor de dureza utilizado e encontrado em alguns pontos do disco, não pode ser considerado como eficiente para estas comparações.

Gráfico 18 – Durezas médias Vickers entre processos



Fonte: Elaborado pelo autor.

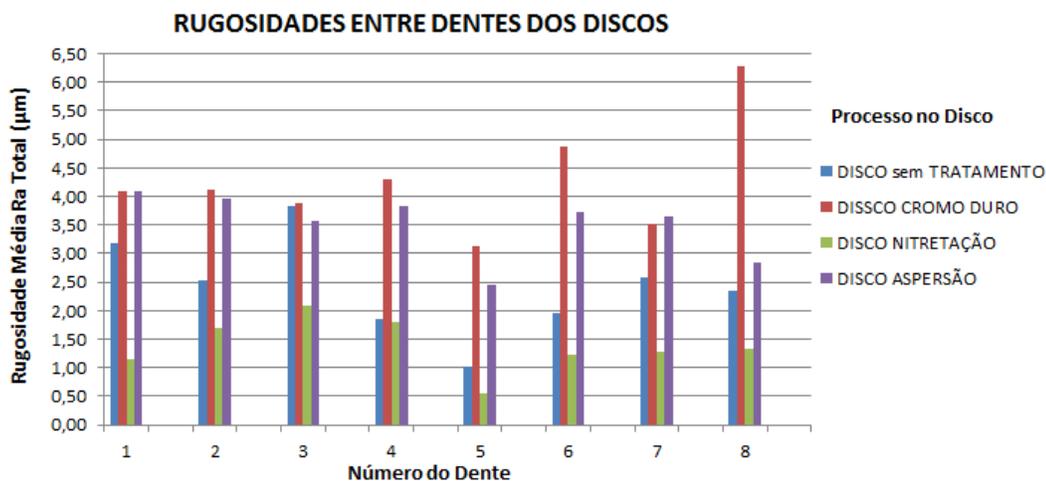
### 4.4.2 Comparativos entre as rugosidades

Com os valores apresentados no gráfico 19, é possível afirmar que após o revestimento em WC, o mesmo apresentou uma maior rugosidade superficial sobre os dentes, com relação aos principais parâmetros, Ra e Rz. Provavelmente o acréscimo dos valores de Ra deve-se ao arrancamento de carbonetos e aparecimento de poros, só perdendo para os parâmetros do cromo duro.

A média da rugosidade do cromo duro, não obteve bons resultados tendo em vista apresentar o pior acabamento superficial e inclusive vazios na superfície do dente.

A nitretação se mostrou a melhor opção quanto aos requisitos de rugosidade superficial.

Gráfico 19 – Rugosidades médias entre processos



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4.3 Comparativos entre os desgastes

Baseado nos resultados obtidos com o teste prático, realizado com os três processos distintos aplicados nos discos, percebe-se que o desgaste mais acentuado ocorreu nos dentes dos discos M1 e M2 revestido com cromo duro.

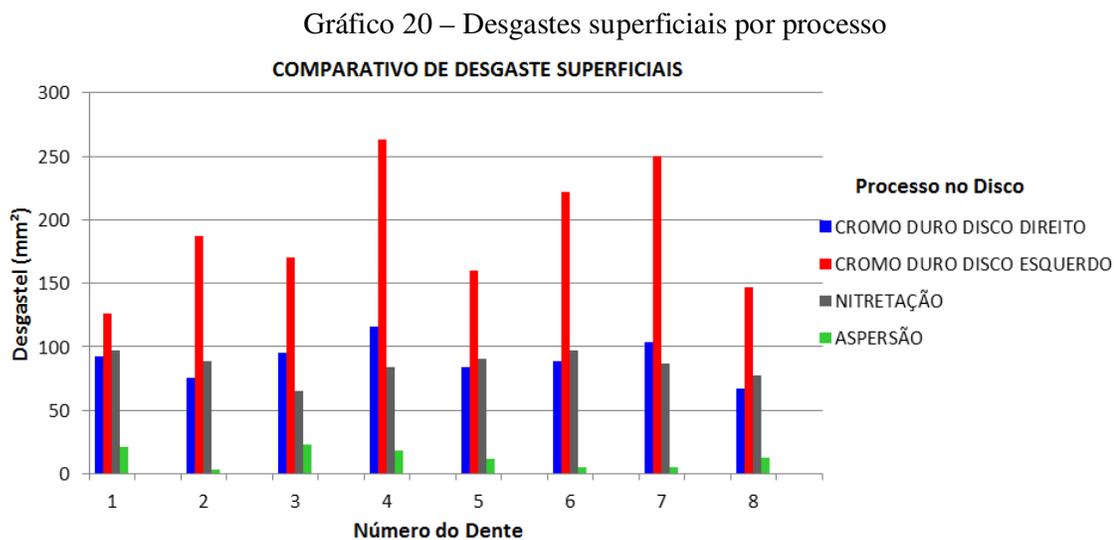
Em relação aos demais processos de nitretação “M1” e aspensão “M2”, cabe salientar que se mantiveram em processo de desgaste apenas 423 e 418 horas respectivamente, diferentemente dos discos revestidos com cromo duro que ficaram expostos ao desgaste em torno de 1065 e 1058 horas.

A exposição dos discos ao desgaste real em processo, leva a uma análise quantitativa após o desgaste, permitindo avaliar de forma mais precisa o desgaste erosivo, com o auxílio do software de medição de áreas Image J.

O gráfico 20 apresenta os resultados da análise quantitativa em função da perda de área dos dentes dos discos, após o teste de desgaste erosivo.

Assim, em ordem crescente de resistência ao desgaste erosivo, dentre estes revestimentos sugeridos, nas condições do teste descrito, tem-se:

- 1° - carbeto de tungstênio (WC) revestimento por aspersão térmica HVOF;
- 2° - cromo duro – revestimento por eletrodeposição e;
- 3° - nitretação gasosa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados experimentais e as análises realizadas, pôde-se formular as seguintes conclusões referentes aos testes realizados:

Referentes aos parâmetros de rugosidades superficiais é possível afirmar que o revestimento de (WC) apresentou uma rugosidade superficial sobre os dentes, superior a nitretação, com relação aos principais parâmetros de Ra e Rz. Provavelmente o acréscimo dos valores de Ra se deva ao arrancamento de carbonetos e aparecimento de poros, sendo menores apenas aos parâmetros do cromo duro.

Ao avaliar o comportamento do tratamento termoquímico de nitretação gasosa, aplicado em aços inoxidáveis martensíticos AISI 420 em função da microdureza obtida com o processo, não pôde ser comparável nos mesmos parâmetros que as demais. Por não apresentar homogeneidade da espessura da camada em função da não execução da despassivação durante o processo. As camadas de nitretação se mostraram irregulares e apresentaram valores médios de durezas variando de 355HV 1Kgf a 1160HV 0,2Kgf.

Referente à viabilidade da utilização do processo de aspersão térmica para revestir o disco de aço inoxidável martensítico AISI 420, com camada de carbeto de tungstênio, é possível afirmar que revestimentos depositados através da aspersão térmica possuem uma microestrutura bastante homogênea, reduzido nível de óxidos, ausência de defeitos na interface e baixos níveis de porosidades.

A microdureza do revestimento de carbeto de tungstênio é superior ao do revestimento de cromo duro eletrodepositado, por se tratar de uma liga metálica designada para proteção contra desgastes e corrosões. Os testes laboratoriais estavam de acordo com a fundamentação teórica e se mantiveram como o esperado, resultando em microdurezas variando de 1065HV 0,2Kgf para o cromo duro até 1333HV 0,2Kgf para a aspersão térmica de carbeto de tungstênio.

Os revestimentos depositados por aspersão térmica HVOF com dureza superior ao do cromo duro apresentam um desempenho em desgaste erosivo consideravelmente superior como poderia ser esperado pelos valores de microdureza, e possuem uma excelente capacidade de proteção ao substrato sem a necessidade da utilização de selantes.

Os equipamentos e parâmetros de aspersão do processo HVOF utilizados neste trabalho, permitiram que se obtivessem boas propriedades das camadas aspergidas em relação a: dureza, resistência ao desgaste e à adesão, porosidades compatíveis com as literaturas.

A dureza deste revestimento é comparável aos aços nitretados, sendo que o carbeto de tungstênio possui uma elevada resistência à corrosão e resistência ao desgaste.

A confirmação que leva a viabilidade técnica e econômica do uso da aspersão térmica como proteção contra o desgaste erosivo em discos dentados é a existência de equipamentos para a aspersão e os materiais de adição de (WC) de fácil acesso no mercado nacional.

Uma outra vantagem é a possibilidade da realização da recuperação dimensional dos dentes dos discos aspergidos evitando a aquisição de novos discos.

Sobre a necessidade de compreender os mecanismos de desgaste erosivo que atuam no disco durante sua utilização no processo real, realizaram-se testes práticos de desgaste, aos quais os discos foram submetidos. O disco com tratamento de nitretação gasosa apresentou uma maior taxa de desgaste em relação ao disco aspergido termicamente, no mesmo intervalo de tempo. O principal e mais importante mecanismo de desgaste atuante nos discos é o “desgaste por erosão”, devido ao contato com as partículas erosivas em meio líquido.

Portanto, os testes práticos realizados durante toda a investigação, garantem a eficiência da utilização do processo de aspersão térmica em relação aos processos de cromo duro e nitretação gasosa.

## SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Ao realizar as determinações teóricas e práticas deste trabalho, foi verificado que existem assuntos que possam ser desenvolvidos para futuros trabalhos tais como:

- Realizar novos testes comparativos entre os revestimentos e tratamentos superficiais utilizados, aprimorando os parâmetros envolvidos no processo;
- Propor novos estudos de materiais aplicáveis ao endurecimento superficial dos dentes dos discos;
- Estudar melhorias e influência do ângulo de incidência dos dentes dos discos sobre a taxa de desgaste erosiva;
- Estudar a viabilidade da utilização de outros processos para a deposição de novos filmes sobre a superfície dos dentes dos discos, tais como: PVD (Physical Vapour Deposition), e ou CVD (Chemical Vapour Deposition);
- Realizar a nitretação gasosa longa com a despassivação da camada e testar novos parâmetros.

## REFERÊNCIAS

ADAMI, Vivian Sebbem. **Estudo da variabilidade da viscosidade na produção de lotes de tintas**. 2002. 147 f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1976/000362605.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 3 nov. 2013.

ALTERNATIVA MINÉRIOS. **Dolomita**. Disponível em: <<http://www.alternativaminerios.com.br/Dolomita.html>>. Acesso em: 3 nov. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS – ASM. **ASM Handbook – Heat Treating**. Ohio: ASM International, 1997. (Vol. 4).

\_\_\_\_\_. **ASM Handbook – Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance**. Ohio: ASM International, 2001. (Vol. 5).

\_\_\_\_\_. **ASM Handbook – Metallography and Microstructures**. Ohio: ASM International, 1998. (Vol. 9).

\_\_\_\_\_. **ASM Handbook – Friction, Lubrication and Wear Technology**. Ohio: ASM International, 1992. (Vol. 18).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM A 276**: Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes. EUA, 2010.

ANDRADE, Maria de Fátima Gonçalves da Costa. **Análise da morfologia e da resistência ao desgaste de revestimentos TiAlSiN efectuados por PVD**. 2008. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Universidade do Porto, Porto, 2008. Disponível em: <<http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58371/2/Texto%20integral.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5601**: Aços inoxidáveis. Classificação por composição química. Rio de Janeiro, 1981.

\_\_\_\_\_. **NBR 8108**: Ataque com reativos metalográficos em ligas ferrosas. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **NBR 13283**: Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.

BARROS, Murilo Borges; MELLO, José Daniel Biasoli. **Análise quantitativa do mecanismo de desgaste predominante em ensaios de desgaste abrasivo**. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012. Disponível em:

<<http://www.trabalhosfeitos.com/ensaios/An%C3%A1lise-Quantitativa-Do-Mecanismo-De-Desgaste/490165.html>>. Acesso em: 3 nov. 2013.

BOTH, Guilherme Brandes. **Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste para aplicação em ferramentas de conformação a frio**. 2011. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2011. Disponível em:  
<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/30208/000778014.pdf?sequence=1>>.  
Acesso em: 3 nov. 2013.

BRITO, V. R. **Caracterização de Revestimentos Metálicos Aspergidos Termicamente por Arco Elétrico**. 2010. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow a Fonseca (CEFET/RJ), Rio de Janeiro, 2010. Disponível em:  
<[http://dippg.cefet-rj.br/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=1170&Itemid=159](http://dippg.cefet-rj.br/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=1170&Itemid=159)>. Acesso em: 3 nov. 2013.

CALLISTER JR., William D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CASTRO, Carmen Dias. **Estudo da influência das propriedades de diferentes cargas minerais no poder de cobertura de um filme de tinta**. 2009. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2009. Disponível em:  
<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/37394/000818735.pdf?sequence=1>>.  
Acesso em: 3 nov. 2013.

CASTRO, Richard de Medeiros. **Avaliação das propriedades de superfície e do comportamento ao desgaste abrasivo de hastes de cilindros hidráulicos revestidas pelos processos HVOF e cromo duro eletrodepositado**. 2012. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2012. Disponível em:  
<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/70708/000878075.pdf?sequence=1>>.  
Acesso em: 3 nov. 2013.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 5. ed. São Paulo: ABM, 1984.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1974.

COMELI, F. W. **Estudo de Revestimento Aspergido por HVOF Contra o Desgaste em Hastes de Válvulas de Turbinas Termelétricas**. 2006. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2006. Disponível em:

<<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/88783/235626.pdf?sequence=1>>.  
Acesso em: 3 nov. 2013.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG – DIN. DIN 50320: Análise sistemática dos processos de desgaste. Classificação dos fenômenos de desgaste. **Metalurgia & materiais**, v. 53, p. 619-622, 1997.

FARIAS, Marcelo Andrios. **Análise da vida útil e da geometria da ponta do punção de aço AISI D2 utilizado na furação de chapas de aço LNE600**. 2007. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2007. Disponível em: <<http://www.ppgem.ct.utfpr.edu.br/dissertacoes/FARIAS,%20Marcelo%20Andreas.pdf>>.  
Acesso em: 3 nov. 2013.

FAZENDA, Jorge M.R. **Tintas e Vernizes: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: ABRAFATI, 1993.

HOCH, Renato. **Manual de pintura industrial e elementos de pintura imobiliária profissional**. Porto Alegre, 2007.

LABORATÓRIO DE METALURGIA FÍSICA – LAMEF. Relatório de Ensaio Suplementar – Protocolo 137/13A. Porto Alegre, 2013.

LOCATELLI, Andrei. **Determinação do comportamento ao desgaste erosivo a diferentes temperaturas de um revestimento a base FeNbCrW aplicado pela técnica de arco elétrico**. 2009. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Materiais) – Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/25627/000747632.pdf?sequence=1>>.  
Acesso em: 3 nov. 2013.

MORILLAS, Débora Jimenez. **Aplicação de dissolução anódica para avaliação de descontinuidades em revestimentos de cromo duro**. 2005. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2005. Disponível em: <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/094.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2013.

NORMAS REGULAMENTADORAS. **Segurança e Medicina do Trabalho: NR-33– Segurança e saúde nos trabalhos em espaços confinados**. Aprovada pela Portaria nº 3.214, de 08/06/1978. 71. ed. São Paulo: Ed. Atlas, 2013.

PAREDES, R. S. **Aspersão Térmica**. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica. Curitiba: [s.n.], 2009. Apostila.

PAWLOWSKI, L. **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings**. 2. ed. EUA: Ed. John Wiley & Sons, 2008.

PINEDO, Carlos Eduardo. **Estudo morfológico e cinético da nitretação por plasma pulsado do aço inoxidável martensítico aisi 420**. 2000. 176 f. Tese (Doutorado em

Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Autarquia Associada à Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2000. Disponível em: <[http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Carlos%20Eduardo%20Pinedo\\_D.pdf](http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Carlos%20Eduardo%20Pinedo_D.pdf)>. Acesso em: 3 nov. 2013.

PINEDO, Carlos Eduardo; MONTEIRO, Waldemar Alfredo. Tratamento térmico e de nitretação sob plasma do aço inoxidável martensítico AISI 420. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 86-90, abr.-jun., 2011. Disponível em: <<http://tecnologiammm.com.br/files/v8n2/v8n2a03.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2013.

PORTO, João Paulo Sarmiento. **Aços Inoxidáveis Planos**. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2012.

REVISTA INDUSTRIAL HEATING. **Princípios de nitretação a gás**: o processo de nitretação - Parte I. 2012. Disponível em: <<http://www.revistaih.com.br/artigo/principios-de-nitretacao-a-gas-o-processo-de-nitretacao-parte-i/>>. Acesso em: 3 nov. 2013.

SANTOS, Poliana Rochele Félix. **Estudo da viabilidade técnica para obtenção de superfície duplex de aço inoxidável martensítico AISI 410 através do processo de deposição a plasma por gaiola catódica**. 2013. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2013. Disponível em: <[http://bdtd.bczm.ufrn.br/tde\\_arquivos/25/TDE-2013-04-26T140912Z-5141/Publico/PolianaRFS DISSERT.pdf](http://bdtd.bczm.ufrn.br/tde_arquivos/25/TDE-2013-04-26T140912Z-5141/Publico/PolianaRFS DISSERT.pdf)>. Acesso em: 3 nov. 2013.

SILVA, Fernando A. Pina da. **Tribologia – volume I**. 2. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2000.

SILVA, Flávio José da. **Erosão, corrosão, erosão-corrosão e cavitação do aço ABNT 8550 nitretado a plasma**. 2008. 272 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/68>>. Acesso em: 3 nov. 2013.

SILVA, Gilvan Gustavo Zimiani da. **Influência da água na composição de esmalte sintético alquídico**. 2011. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Tecnologia em Polímeros) – Curso Superior de Tecnologia em Polímeros, Faculdade SENAI de Tecnologia Ambiental, SBC, São Bernardo do Campo, 2011. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAFV8AJ/a-influencia-agua-na-composicao-esmalte-sintetico-alquidico>>. Acesso em: 3 nov. 2013.

STROHAECKER, Telmo Roberto; FRAINER, Vitor José. **Princípios de tratamento térmico**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998.

TASSI, Reginaldo. **Revestimentos superficiais via PAPVD e avaliação do desempenho de bicos pulverizadores de suspensões cerâmicas**. 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2010.

Disponível em:

<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/28795/000768719.pdf?sequence=1>>.

Acesso em: 3 nov. 2013.

## ANEXO A – FISPQ DA DOLOMITA



## FICHA DE SEGURANÇA

**Material:** - DOLOMITA  $\text{CaCO}_3$  -  $\text{MgCO}_3$

**Nome Comercial:** Dolomita M-325 - PARANACAL.

**Composição Química Típica:** P.F. 47,00% -  $\text{CaO}$  31,50 % -  $\text{MgO}$  20,00 % -  $\text{SiO}_2$  1,00 %.

**Propriedades Físicas:** Sólido, particulado, inodoro, não inflamável, não explosivo, insolúvel em água.

**Classificação N.B.M.:** 2518.10.00

**Ponto de Calcinção:** 850° C - A esta temperatura inicia-se a liberação de  $\text{CO}_2$ .

**Reatividade:** Inerte, estável, sem riscos de decomposição.

**Densidade:** 1,3 g/cm<sup>3</sup>.

## PROTEÇÃO E CUIDADOS NO MANUSEIO

**Proteção pessoal:** Usar máscaras respiratórias leves, dentro das normas PPRA da empresa usuária.

**Ventilação do ambiente:** Utilizar sistemas de exaustão padrão nos ambientes que trabalhem com mineral em pó.

**Outros equipamentos de proteção:** Em caso de concentração excessiva, usar óculos protetores e luvas.

**Manuseio:** Evitar o manuseio sem a utilização do equipamento de proteção individual. As embalagens após abertas podem produzir poeira na sua locomoção, acondicioná-las de forma a evitar que sejam agitadas.

**Estocagem:** Quando em lugar seco, arejado e palletizado, não possui riscos de deterioração. ( Preferencialmente, consumir em até 20 meses)

**Outras precauções:** Não permitir o acúmulo de poeira no ambiente de trabalho. Manter sempre limpos os equipamentos de proteção individual.

## EFEITOS SOBRE O ORGANISMO E PRIMEIROS SOCORROS.

**Inalação:** Pode causar irritação respiratória quando manuseada sem o devido equipamento de proteção. Sem riscos de doenças respiratórias ( silicose ), em condições adequadas e básicas de trabalho.

**Toxicidade:** Não tóxico, inodoro e não corrosivo.

**Ingestão:** Sem riscos.

**Contato com olhos:** Pó inerte, em excesso pode causar irritação.

**Contato com a pele:** Pó inerte não há absorção, em excesso pode causar ressecamentos.

**Condições médicas:** Pessoas com doenças respiratórias tais como, asma, bronquite, não se recomenda a exposição por longos períodos ao pó do minério.

**Primeiros socorros:** Inalação: Nenhum efeito agudo, respirar ar fresco. Em caso extremo de sufocamento, aplicar respiração de emergência. **OLHOS:** Poeira inerte, em caso de irritação, lavar com água limpa, corrente e abundante.



**FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE  
PRODUTOS QUÍMICOS – FISPQ.  
(NBR 14725:2001)**

**Material :** - DOLOMITA CaCO<sub>3</sub> - MgCO<sub>3</sub> - GRANULOMETRIAS DIVERSAS.  
**FISPQ :** N° 001  
**Página :** 001/004  
**Data da última revisão:** 13.08.2003

### 01 - Identificação do produto e da empresa.

- **Nome Comercial** - Dolomita PARANACAL.
- **Código interno de identificação do Produto:** 25.18.10.00 N.B.M.
- **Nome da Empresa :** Produtora de Cal Colombo Ltda. – PARANACAL LTDA.
- **Endereço:** Rua Victor Tosin 390 – C. postal 86  
Centro. Colombo - PR  
CEP - 83414-970.
- **Telefone da Empresa :** 0 XX (41) 656-3255
- **Telefone para Emergências :** 0 XX (41) 656-3255
- **Fax :** 0 XX (41) 656-3255
- **E-Mail:** paranacal@uol.com.br.

### 02 - Composição e informações sobre os ingredientes:

- **Substância :** Dolomita.
- **Nome químico comum :** Dolomita não calcinada nem sinterizada denominada crua.
- **Sinônimo:** Dolomito
- **Registro no Chemical Abstract Service:** n° CAS – 16.389/88-1
- **Ingredientes que contribuem para o perigo:** Não possui ingredientes perigosos e/ ou misturados.

**Composição Química Típica:** P.F. 47,00% - CaO 31,50 % - MgO 20,00 % - SiO<sub>2</sub> 1,00 %.  
**Propriedades Físicas :** Sólido, particulado, inodoro, não inflamável, não explosivo, insolúvel em água.  
**Classificação N.B.M.:** 25.18.10.00  
**Ponto de Calcinação:** 850° C - A esta temperatura inicia-se a liberação de CO<sub>2</sub>.  
**Reatividade:** Inerte, estável, sem riscos de decomposição.  
**Densidade:** Variável de acordo com a granulometria..

### 03 - Identificação de perigos.

- Por tratar-se de substância inerte e não conter mistura, o único perigo é a inalação excessiva do pó, que poderá causar irritação ou afogamento. – Não é considerado asfixiante e nem narcótico.
- Recomenda-se que o manuseio seja efetuado com máscaras respiratórias leves, óculos protetores ( para evitar irritação pelo pó) e luvas – conforme PPRA da empresa usuária.
- Em caso de manuseio em ambiente fechado, recomenda-se a utilização de sistemas de exaustão.

130804  
 Dra. Carmem Lucia Kuster  
 OREMEERS 1648 CHE 519238600-24



**FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE  
PRODUTOS QUÍMICOS – FISPQ,  
(NBR 14725:2001)**

**Material :** - DOLOMITA CaCO<sub>3</sub> - MgCO<sub>3</sub>

**FISPQ :** N° 001

**Página :** 002/004

**Data da última revisão:** 13.08.2003

#### **04– Medidas de primeiros – socorros.**

- **Em caso de inalação** – Ventilar ambiente, respiração boca – a – boca, oxigênio ( em casos extremos de sufocamento ). – Não apresenta riscos de doenças respiratórias ( silicose), se manuseado adequadamente, com uso de proteção.
- **Em caso de contato com a pele** – Não há absorção. Lavar com água em abundância somente para evitar ressecamento. Não tóxico, inodoro e não corrosivo.
- **Em caso de contato com os olhos** – Lavar com água corrente , limpa e abundante para evitar irritação. Pó inerte.
- **Em caso de ingestão** – Não apresenta riscos.

#### **05 – Medidas de combate a incêndio.**

- Produto não combustível.
- Em caso de incêndio ( na embalagem) - utilizar água.

#### **06 – Medidas de controle para derramamento ou vazamento.**

- Precauções somente quanto ao controle de poeira, afim de evitar ressecamento de pele e/ou irritação por inalação do produto.
- Não representa riscos para o meio ambiente. Em contato com o solo corrige sua acidez.
- Para limpeza efetuar varredura normal, ou aspiração .

#### **07 – Manuseio e Armazenamento.**

- No manuseio, evitar contato prolongado do produto com a pele e os olhos.
- Procurar trabalhar com ventilação adequada. Danos na embalagem causam liberação de pó.
- Evitar armazenar junto a outros produtos químicos para não haver contaminação.
- Armazenar em local seco, arejado e, se possível paletizado a fim de evitar umidade.
- Manter o produto em sua embalagem original a fim de evitar contaminação.



**FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE  
PRODUTOS QUÍMICOS – FISPQ.  
(NBR 14725:2001)**

**Material :** - DOLOMITA CaCO<sub>3</sub> - MgCO<sub>3</sub>

**FISPQ :** N° 001

**Página :** 003/004

**Data da última revisão:** 13.08.2003

### 08 – Controle de Exposição e Proteção individual .

- Limite de exposição ocupacional – Não definido no anexo 12 da NR 15 – Portaria 3214/78 MTB.
- Equipamento de proteção das vias respiratórias - Máscara leve.
- Equipamento de proteção das mãos – Luva .
- Equipamento de proteção dos olhos – Óculos de proteção.
- Equipamento de proteção do corpo e pele – Avental de raspa e ou tecido.
- Precauções especiais – Não há necessidade de precauções especiais, ficando a cargo do manipulador do material o uso dos equipamentos acima – exceto a máscara leve .
- Medidas de higiene – Lavar sempre as mãos após a manipulação do produto, antes de alimentar-se ou tocar nos olhos e mucosas.

### 09 – Propriedades Físico-químicas.

- Estado físico ----- Pó.
- Cor ----- Branco.
- Odor ----- Inodoro.
- Ph (1% em H<sub>2</sub>O- 1 min agit. )– 10,2
- Ponto de fusão ----- acima de 1200° C
- Solubilidade ----- Insolúvel.
- Ponto de fulgor----- Não aplicável – não inflamável.
- Limite de explosividade ----- Não explosivo
- Data de validade do produto ---- Indeterminado. Em condições ideais de armazenagem.

### 10 – Estabilidade e reatividade.

- Instabilidade ou reações perigosas. – Por se tratar de produto inerte, o mesmo não apresenta instabilidade ou reação perigosa, mesmo submetido a variações de temperaturas.
- Produtos perigosos da decomposição: Não aplicável.

### 11– Informações toxicológicas .

- Informações de acordo com as diferentes vias de exposição: Não é tóxico..



FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE  
PRODUTOS QUÍMICOS – FISPQ.  
(NBR 14725:2001)

**Material :** - DOLOMITA CaCO<sub>3</sub> - MgCO<sub>3</sub>

**FISPQ :** N° 001

**Página :** 004/004

**Data da última revisão:** 13.08.2003

### 12 – Informações Ecológicas .

- Efeitos ambientais, comportamentos e impactos do produto : Material estável.
- Os resíduos podem ser dispostos em aterros conforme legislação do Órgão Ambiental Local.

### 13 – Considerações sobre tratamento e disposição.

- a) Métodos de tratamento e disposição:
- Produtos e restos de produto : Dispor em aterros de acordo com os Órgãos Ambientais locais.
- Embalagem usada : Reciclar sacaria, big-bags e palets.

### 14 - Informações sobre transportes.

- a) Regulamentações Nacionais e internacionais.
- Transporte terrestre : Produto não classificado. Não considerado como perigoso.
- Transporte Marítimo: Produto não classificado. Não considerado como perigoso
- Transporte Aéreo : Produto não classificado. Não considerado como perigoso

### 15 - Regulamentações.

- Não são conhecidas recomendações específicas ao produto.

### 16 – Outras informações.

- As informações contidas nesta ficha de Segurança foram consideradas válidas para a versão atual, até onde vão nossos conhecimentos sobre o produto, podendo não representar uma confirmação das características. O consumidor do nosso produto é responsável pela observação das leis e normas vigentes no seu local de utilização.
- Esta FISPQ ( Ficha de Segurança de Produtos Químicos ) está de acordo com a NBR 14725:2001.
- Preparada por: Nilton Reginaldo Gabardo.

## ANEXO B – RELATÓRIO METALOGRAFICO 137/13A - (LAMEF-UFRGS)

	<p align="center"><b>LABORATÓRIO DE METALURGIA FÍSICA</b>          Av. Osvaldo Aranha 99, sala 610          CEP: 90035-190 - Porto Alegre – RS – Brasil          Fone: (51) 3308-3565/ Fax: (51) 3308-3988          CNPJ: 92.971845/0001-42          www.ufrgs.br/lamef</p>	 <p align="center">Fundação Luiz Englert</p>
---	---	---

<b>DOCUMENTO: RELATÓRIO DE ENSAIO SUPLEMENTAR</b>		<b>PROTOCOLO: 137/13A</b>			
<b>CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL</b>					
Cliente:	PPG Industrial do Brasil Tintas e Vernizes Ltda				
Endereço:	ROD RS 118, 5200 – Gravataí - RS				
CEP:	94130-390				
CNPJ:	43.996.693/0002-08				
IE:					
Objeto de análise: Duas (02) amostras de chapas aço e quatro (04) dentes já embutidos.					
<b>LOCAL DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO</b>					
<input checked="" type="checkbox"/> Av. Osvaldo Aranha, 99/610 Porto Alegre - RS			<input type="checkbox"/> Av. Bento Gonçalves, 9500 Prédio 104, Porto Alegre - RS		
<b>INFORMAÇÕES GERAIS</b>					
Data de recebimento do item de ensaio:	16/07/2013	Data de emissão do relatório:	01/08/2013	Data de realização do ensaio:	23/07/2013
<b>MÉTODO UTILIZADO</b>					
<b>Análise</b>	<b>Baseado na Norma/ e ou Procedimento</b>	<b>Título</b>		<b>Válida desde:</b>	
Dureza Vickers	GAF PE 005	Ensaio de dureza vickers para materiais metálicos		07/08/2012 Rev.04	
Análise Química	GAF PE 008	Método de ensaio de análise química em materiais ferrosos.		10/08/2010 Rev. 02	
Preparação Metalográfica	GAF PE 004	Preparo de amostras para análise metalográfica		13/11/2008 Revisão 00	
Ataque Ferrosos	GAF PE 002	Ataque com reativos metalográficos em ligas ferrosas		19/03/2010 Rev. 02	
<b>ANALISTA</b>					
Márcio Medeiros de Magalhães					
<b>TESTEMUNHAS</b>					
N.A.					

\* Este relatório suplementar cancela e substitui o Relatório de Ensaio de Protocolo 137/13. \*

Protocolo: 137/13A

CONFIDENCIAL LAMEF/PPG

Página 1 de 15

Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e aplicam-se exclusivamente ao(s) item(ns) ensaiado(s). Este documento somente terá validade com assinatura do Coordenador do LAMEF ou signatário autorizado e só poderá ser reproduzido na íntegra. Reprodução de partes requer aprovação escrita do laboratório.

Sistema de Gestão – DC 029 – Revisão 02 – 09/07/2013

## TERMO DE RESPONSABILIDADE

O LAMEF se responsabiliza pelos dados aqui apresentados, para a(s) amostra(s) descrita(s) no item 2 – DESCRIÇÃO, não se responsabilizando por outra(s) amostra(s) semelhantes do cliente, por diferenças devidas aos processos de fabricação ou por alterações de projetos atuais e futuras.

### 1- DESCRIÇÃO

Foram recebidos para caracterização de material em duas chapas e quatro dentes já embutidos e nomeados pelo cliente como superior/inferior e com mais/menos desgaste como mostra a figura 1. Para esta análise foram feitos os seguintes ensaios: análise química, metalografia e microdureza Vickers.

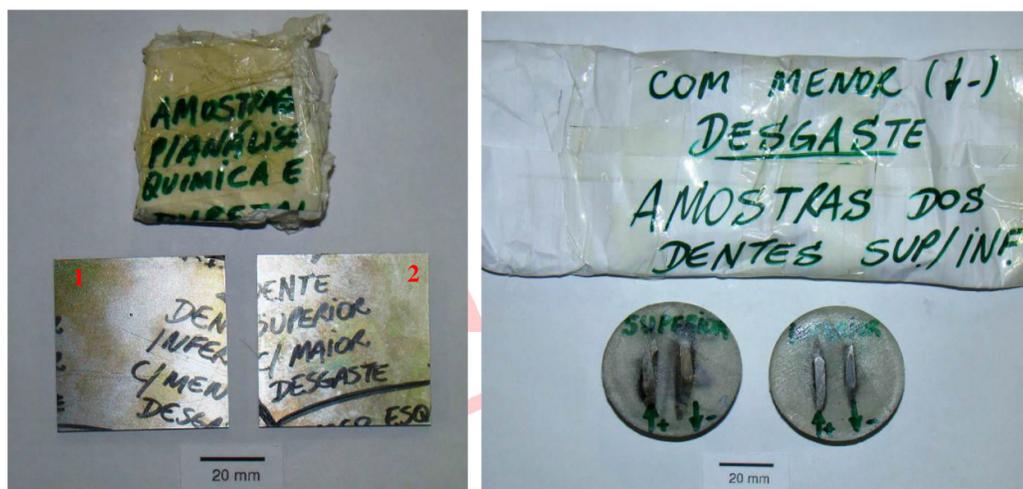


Figura 1: Imagens mostrando as peças como recebidas, à esquerda as chapas e à direita os dentes já embutidos pelo cliente.

### 2- ANÁLISE QUÍMICA

A análise química foi realizada utilizando-se um espectrômetro marca Spectro modelo Spectrolab, seguindo-se o procedimento interno GAF PE 008. As amostras foram nomeadas como 1 e 2 para fins de identificação dos ensaios realizados, o que está salientado na figura 1. Os resultados das análises estão apresentados na tabela 1, salientando-se a média de três análises efetuadas na amostra.



Tabela 1: Resultado da análise química (% em massa).

Amostra / Elemento	1	2	SAE 420
C	0,346	0,334	0,15 mín
Si	0,417	0,410	1,0 máx
Mn	0,285	0,282	1,0 máx
P	0,0302	0,0308	0,04 máx
S	<0,00100	<0,00100	0,03 máx
Cr	12,43	12,42	12,0 – 14,0
Mo	0,0132	0,0120	-
Ni	0,171	0,163	-
Al	0,00230	0,00170	-
Co	0,0155	0,0161	-
Cu	<0,0100	<0,0100	-
Nb	0,0118	0,0110	-
Ti	0,00310	0,00290	-
V	0,0224	0,0219	-
Fe	86,3	86,3	Balanço

### 3- CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Para a realização da análise microestrutural foram retiradas amostras no sentido transversal das duas chapas para observação do tamanho da camada, e junto com as amostras já embutidas foram preparadas seguindo o procedimento experimental GAF PE 004, preparo de amostras para ensaio metalográfico e atacadas com reagente químico composto de 1% de ácido pícrico, 5% de ácido clorídrico e álcool. A observação foi efetuada através de Microscopia Ótica (MO) após o ataque químico, utilizando-se um microscópio marca Olympus, modelo BX 51 M, com as micrografias obtidas através de câmera digital acoplada ao microscópio.

O tamanho da camada depositada nas chapas foi medido através da utilização do software de análise de imagens ImageJ, salientando-se que foi feita a média de 5 medidas. As figuras 2 e 3 mostram as regiões avaliadas das duas chapas. O tamanho médio da camada na chapa identificada como 1 foi de 95,9  $\mu\text{m}$ , e para a número 2 foi de 107,2  $\mu\text{m}$ .

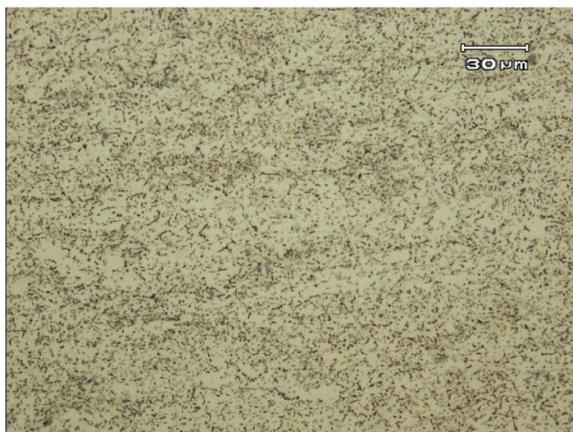


Figura 2: Imagem em MO da amostra da chapa identificada como 1, tamanho médio de camada de 95,9 μm.

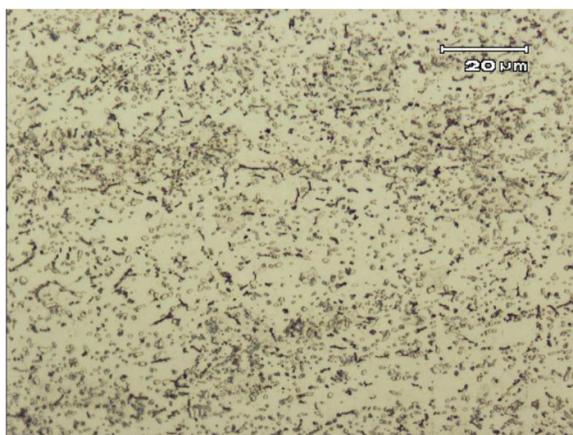


Figura 3: Imagem em MO da amostra da chapa identificada como 2, tamanho médio de camada de 107,2 μm.

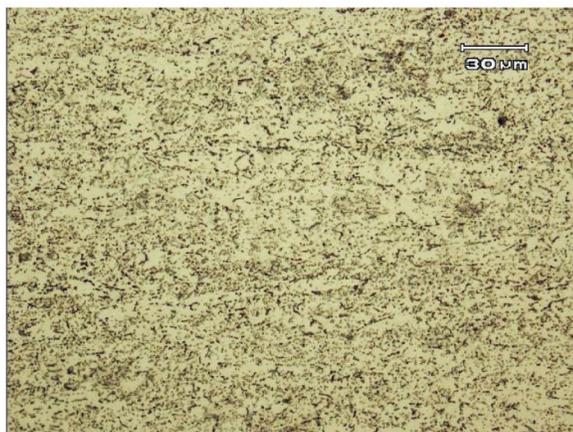
As figuras de 4 a 11 ilustram as metalografias dos dentes, em todas as amostras ficou constatado que os componentes estão com suas microestruturas no estado de não temperadas, já as figuras de 12 a 15 mostram as diferenças de tamanho de camada ao longo das amostras, ressaltando que os valores apresentados são uma média de cinco medições.



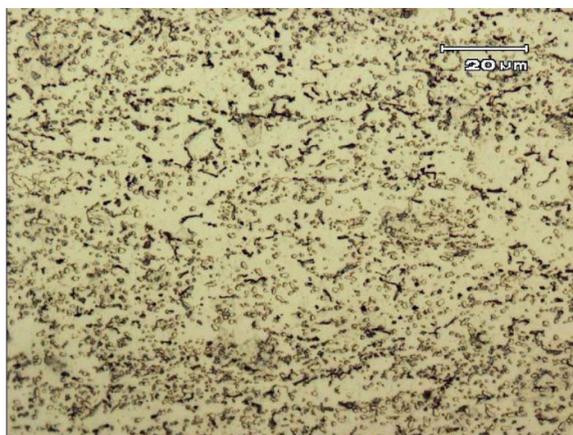
**Figura 4 : Imagem em MO da amostra inferior com menor desgaste, mostrando material no estado não temperado.**



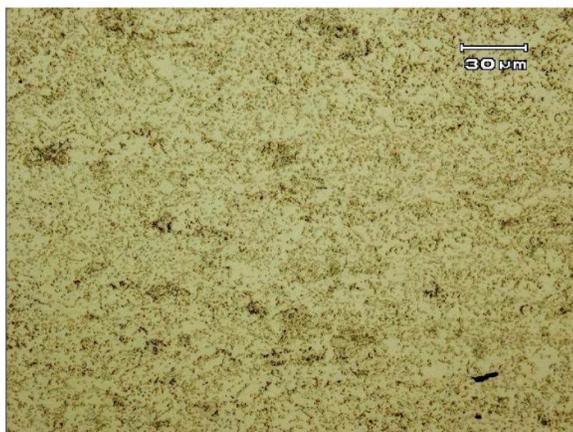
**Figura 5 : Imagem em MO da amostra da figura 4 em maior aumento.**



**Figura 6 : Imagem em MO da amostra inferior com maior desgaste, mostrando material no estado não temperado.**



**Figura 7: Imagem em MO da amostra da figura 6 em maior aumento.**



**Figura 8:** Imagem em MO da amostra inferior com maior desgaste, mostrando material no estado não temperado.



**Figura 9:** Imagem em MO da amostra da figura 8 em maior aumento.



Figura 10: Imagem em MO da amostra inferior com maior desgaste, mostrando material no estado não temperado.

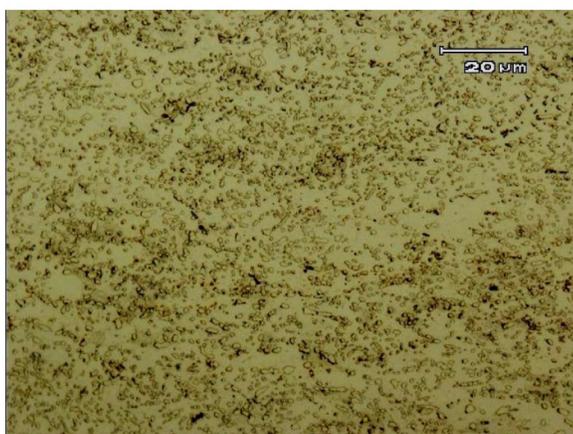


Figura 11: Imagem em MO da amostra da figura 10 em maior aumento.



Figura 12: Imagens em MO da amostra identificada como inferior com menor desgaste, apresentando variação na espessura média da camada, à esquerda 162  $\mu\text{m}$ , ao centro 45  $\mu\text{m}$  e à direita 75  $\mu\text{m}$ .

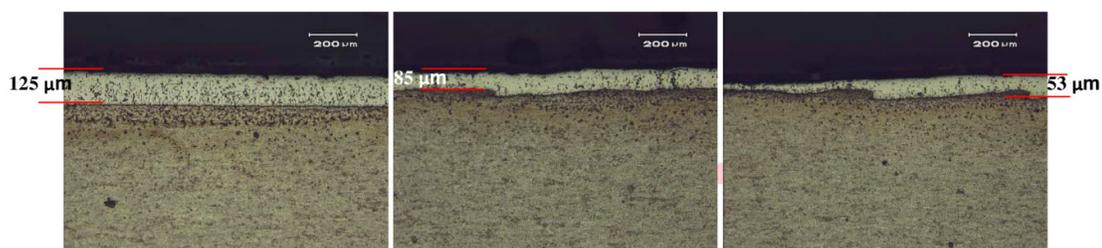


Figura 13: Imagens em MO da amostra identificada como inferior com maior desgaste, apresentando variação na espessura média da camada, à esquerda 125  $\mu\text{m}$ , ao centro 85  $\mu\text{m}$  e à direita 53  $\mu\text{m}$ .



Figura 14: Imagens em MO da amostra identificada como superior com menor desgaste, apresentando variação na espessura média da camada, à esquerda 312  $\mu\text{m}$ , ao centro 143  $\mu\text{m}$  e à direita 46  $\mu\text{m}$ .

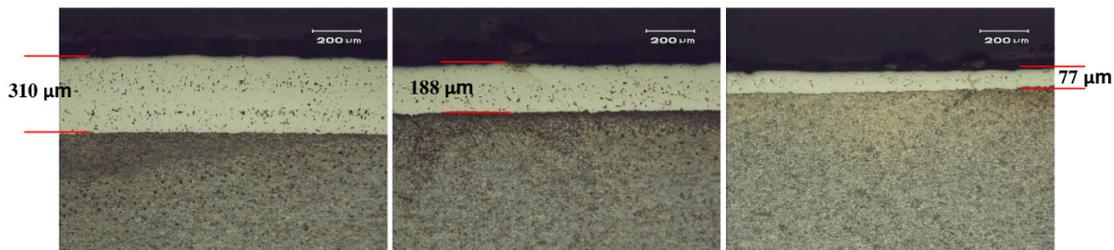


Figura 15: Imagens em MO da amostra identificada como superior com maior desgaste, apresentando variação na espessura média da camada, à esquerda 310 µm, ao centro 188 µm e à direita 77 µm.

#### 4- ENSAIOS DE MICRODUREZA

Após a análise metalográfica foram realizados 5 (cinco) pontos de microdureza Vickers com carga de 0,2 Kgf no núcleo das amostras e também nas camadas depositadas, os resultados estão apresentados nas tabelas de 2 a 4.

Tabela 2: Resultado dos ensaios de microdureza Vickers (HV) nas chapas.

Medidas	1 (HV)	2 (HV)	3 (HV)	4 (HV)	5 (HV)	Média	Incerteza de medição
Chapa 1 núcleo	178	182	172	192	168	178,4	15
Chapa 1 camada	918	845	871	853	776	852,6	66
Chapa 2 núcleo	169	159	177	159	180	168,8	15
Chapa 2 camada	850	771	801	900	849	834,2	64



**Tabela 3: Resultado dos ensaios de microdureza Vickers (HV) nos dentes inferiores.**

Medidas	1 (HV)	2 (HV)	3 (HV)	4 (HV)	5 (HV)	Média	Incerteza de medição
(+) desgastado núcleo	179	179	179	176	178	178,2	12
(+) desgastado camada	998	958	958	1006	936	971,2	37
(-) desgastado núcleo	191	192	186	192	181	188,4	13
(-) desgastado camada	929	987	1035	953	1003	981,4	54

**Tabela 4: Resultado dos ensaios de microdureza Vickers (HV) nos dentes superiores.**

Medidas	1 (HV)	2 (HV)	3 (HV)	4 (HV)	5 (HV)	Média	Incerteza de medição
(+) desgastado núcleo	196	197	189	187	191	192	12
(+) desgastado camada	961	873	779	928	895	887,2	87
(-) desgastado núcleo	179	190	187	189	182	185,4	12
(-) desgastado camada	1019	1088	908	1018	1015	1009,6	82

**Nota:** A incerteza expandida relatada (U) é baseada em uma incerteza padronizada combinada multiplicada por um fator de abrangência  $k = 2,0$ , fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.

As figuras de 16 a 21 retratam as identações realizadas nas amostras dos dentes e das chapas, na camada depositada e no substrato das mesmas.



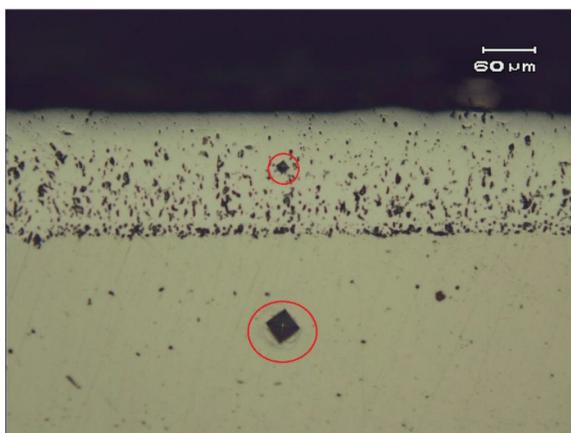
Figura 16: Imagens em MO da amostra identificada como chapa 1, com as identações feitas destacadas pelo círculo.



Figura 17: Imagens em MO da amostra identificada como chapa 2, com as identações feitas destacadas pelo círculo. Podem ser observadas trincas na camada.



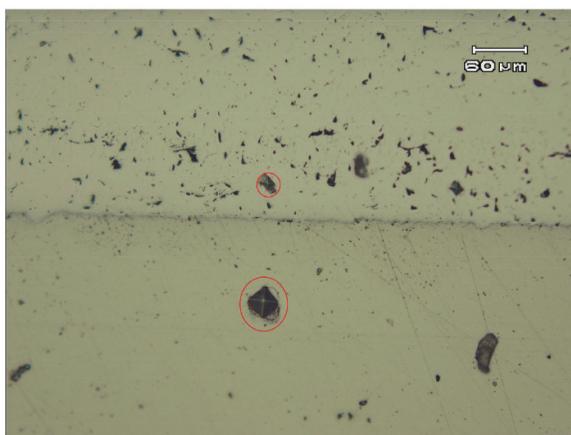
**Figura 18: Imagens em MO da amostra identificada como inferior com menor desgaste, com as identações feitas destacadas pelo círculo.**



**Figura 19: Imagens em MO da amostra identificada como inferior com maior desgaste, com as identações feitas destacadas pelo círculo.**



**Figura 20: Imagens em MO da amostra identificada como superior com menor desgaste, com as identações feitas destacadas pelo círculo.**



**Figura 21: Imagens em MO da amostra identificada como superior com maior desgaste, com as identações feitas destacadas pelo círculo.**



## 5- INTERPRETAÇÕES

Com base nos ensaios realizados podem-se fazer as seguintes observações:

Através da análise química verifica-se que o material possui uma composição semelhante ao aço SAE 420.

O tamanho médio da camada na chapa identificada como 1 foi de 95,9  $\mu\text{m}$ , e para a número 2 foi de 107,2  $\mu\text{m}$ . Constatou-se também que as camadas nos dentes apresentavam relevantes variações de espessura, tanto nos que apresentaram maior desgaste como nos que tinham menor, como ficou demonstrado nas figuras 12 a 15, porém como os dentes já tinham sido utilizados não se pode concluir que eles apresentavam esta diferença antes de serem postos em serviço.

O material apresentou uma microestrutura na forma não temperada em todos os componentes analisados (figuras 4 a 11), isto resulta em uma diminuição da dureza e da resistência mecânica do componente, pois o mesmo é fabricado com um aço inoxidável martensítico, material que necessita de um tratamento térmico de beneficiamento para alcançar níveis elevados em suas propriedades mecânicas. Uma grande diferença de dureza entre o substrato e a camada depositada pode resultar em lascamento da camada. Sugerimos o beneficiamento do componente anteriormente ao depósito caso o desgaste prematuro esteja associado ao lascamento da camada.

Analisando-se a dureza média das camadas depositadas nos quatro dentes, ficou evidente que os dentes com maior desgaste (971,2 HV e 887,2 HV) apresentaram valores inferiores aos dos dentes com menor desgaste (981,4 HV e 1009,6 HV), fato que pode justificar o desgaste prematuro acentuado dos mesmos.

## 6- OBSERVAÇÕES FINAIS

Conforme item 1, os resultados aqui apresentados são válidos apenas para a(s) amostra(s) ensaiada(s) e condições de ensaio adotadas. O LAMEF não se responsabiliza pela extrapolação dos resultados a outra(s) amostra(s) de mesmo nome. É responsabilidade dos órgãos competentes acreditados para este fim a certificação, homologação ou aprovação de produtos.

  
Afonso Reguly  
Signatário Autorizado

## ANEXO C – CERTIFICADO DE QUALIDADE N° 7567/13- (AÇOBRAS)

 <b>AÇOBRAS</b> AÇOS INOXIDÁVEIS	Rua : "C" N° 41 – Distr Indl Niterói Canoas – RS CNPJ 07.623.865/0001-53 acobras@acobras.com.br																										
	<b>CERTIFICADO DE QUALIDADE</b>	N° 7567/13																									
CLIENTE: POHLMAC INDUSTRIA DE MAQUINAS P/ INJETADOS LTDA ENDEREÇO: Novo Hamburgo – RS NF: 7567																											
Descrição do Material CH AISI 420 3,17 X 1240 X 3000MM																											
Análise Química %																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Cr</th> <th>Ni</th> <th>Mo</th> <th>Cu</th> <th>Co</th> <th>Ti</th> <th>N</th> <th>T-T</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,345</td> <td>0,410</td> <td>0,290</td> <td>0,033</td> <td>0,002</td> <td>12,270</td> <td>0,190</td> <td>0,022</td> <td>0,0219</td> <td>0,019</td> <td>0,003</td> <td>126PPM</td> <td>RE</td> </tr> </tbody> </table>	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Co	Ti	N	T-T	0,345	0,410	0,290	0,033	0,002	12,270	0,190	0,022	0,0219	0,019	0,003	126PPM	RE	
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Co	Ti	N	T-T															
0,345	0,410	0,290	0,033	0,002	12,270	0,190	0,022	0,0219	0,019	0,003	126PPM	RE															
Dureza : 84,70HRB ATENDE NORMAS: ASTM A276/2010 CORRIDA : 207294J																											
Canoas RS, 10 de Setembro de 2013.																											
* Este certificado de qualidade reproduz fielmente os dados constantes no certificado do fornecedor/fabricante que encontra-se em nosso poder.																											
<b>AÇOBRAS INOXIDÁVEIS LTDA</b>																											

**ANEXO D – CERTIFICADO DE QUALIDADE N° 001.12.12 - (TECNOCROMO)**



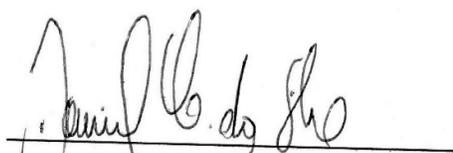
***CERTIFICADO DE QUALIDADE N° 001.12.12***

**CLIENTE..... TINTAS RENNER - PPG**  
**DENOMINAÇÃO..... DISCO 30 DENTES**  
**CÓDIGO.....**  
**NF REMESSA.....**  
**NF DEVOLUÇÃO.....**  
**QUANTIDADE..... 03 Peças**

**OBS: Revestimento em 03 (Três) Discos de 30 Dentes com aplicação de Cromo Duro (Cromo Catalizado) com 0,20mm de camada**

<b>ESPECIFICADO</b>	<b>VERIFICADO</b>
Camada - 0,20 mm	Camada - 0,19mm a 0,23mm
Aspecto Visual	OK
Dureza – 1000 a 1150 HV	1056 a 1124 HV
Acabamento	Fosco

Sapucaia do Sul, 19 de dezembro de 2012.

  
 Daniel Comoretto da Silva  
 Inspetor de Qualidade

## ANEXO E – CERTIFICADO DE QUALIDADE N° 348389 - (METALTÉCNICA)



### CERTIFICADO DE QUALIDADE

Número do Certificado: <b>348389</b>	Data: <b>02/09/2013</b>
NF de Entrada: <b>1295</b>	Nome da Peça: <b>DISCO DENTADO</b>
NF de Saída: <b>108315</b>	Material: <b>420</b>
N° OS: <b>511987</b>	Quantidade: <b>1,00 PC</b>
Cliente: <b>POHLMAC INDUSTRIA DE MAQ PARA INJETADOS LTDA</b>	

<b>Especificações</b>	
Tratamento Térmico: <b>TÊMPERA - REVENIMENTO (350°) - NITRETAÇÃO GAS CURTA</b>	
Dureza Solicitada: <b>45/48 HRC</b>	Dureza Verificada: <b>46 HRC</b>
Camada Solicitada:	Camada Verificada:

<b>Observações</b>
Referência da Peça: <b>0099</b>
Tamanho do Grão:
<i>NITRETAÇÃO: 1087 HV1</i>

<b>Imagens</b>

FRANCINE SILVA VEIGA  
Dept. de Controle de Qualidade  
CECÍLIA BIZOTTO