

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RETIFICAÇÃO DE AÇOS COM REBOLOS DE CBN LIGADO GALVANICAMENTE SOBRE  
CORPO DE ALUMÍNIO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANTONIO CARLOS SEVERIANO

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 2002

RETIFICAÇÃO DE AÇOS COM REBOLOS DE CBN LIGADO GALVANICAMENTE SOBRE  
CORPO DE ALUMÍNIO

ANTONIO CARLOS SEVERIANO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESPECIALIDADE MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO FABRICAÇÃO,  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA MECÂNICA

-----  
Prof. José Bellini da Cunha Neto , Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-graduação  
em Engenharia Mecânica

-----  
Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.  
Orientador

BANCA EXAMINADORA

-----  
Prof. Márcio Fredel, Dr.-Ing.

-----  
Prof. Jefferson de Oliveira Gomes, Dr. Eng.

-----  
Prof. Rodrigo Lima Stoeterau, Dr. Eng.

*“Aprendemos aquilo que amamos”.  
Sabido é aquilo que resta depois  
de tudo ter sido esquecido.”  
Rubem Alves (15/09/1933 )*

*Ao meu filho Thomas que ainda menino, soube expressar seus sentimentos sobre este trabalho e a minha filha Isabella que nasceu neste período como presente de Deus. A minha esposa Adevani, eterna companheira, que soube me apoiar e incentivar para terminar o que eu havia iniciado.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Walter L. Weingaertner, orientador e amigo de longa data, que soube dentre tantas dificuldades reconhecer a perseverança do aluno.

Aos Professores, Marcio, Rodrigo e Jefferson, que souberam ver de maneira objetiva, o proposto do trabalho técnico-científico.

A todos os colegas de trabalho da Saint-Gobain Abrasivos, marca Winter, em especial aos amigos Rebouças, Ivandir, Rolf, Eduardo e Ivan Schneider, que, sempre interessados no desenvolvimento tecnológico, tanto colaboraram para a realização deste trabalho.

Aos amigos da WEG, Luiz e Horst, que sempre apoiaram o desenvolvimento de novos produtos, necessários para a busca contínua da redução de custos de fabricação.

Aos amigos da Embraco, Heriberto, Valedir e Domício, que, na busca da qualidade e da produtividade, apoiaram, de maneira indireta, a realização deste trabalho.

Aos amigos da Frasle, Sr. Reolon e Mondoni, que incentivaram este desenvolvimento tecnológico visando a aplicação imediata no processo produtivo.

Aos amigos da Bosch, ex-companheiros de trabalho, como Nelson Bellos, Joécio Benvenuto, Marco Antonio e David Buhler, que possibilitaram a realização dos experimentos.

Enfim, a todos que, de forma direta ou indireta, colaboraram para a conclusão deste trabalho técnico-científico.

## RESUMO

A indústria metal-mecânica tem passado por grandes transformações nas três últimas décadas, na busca contínua da qualidade e da produtividade, com redução do nível de poluição ao meio ambiente e aumento da reciclabilidade.

Isto faz com que os projetos de componente de produtos sejam dimensionados com tolerâncias de construção cada vez mais reduzidas e que, crescentemente, sejam empregados métodos estatísticos para controle da produção. Desta forma, cresce proporcionalmente a exigência sobre o desenvolvimento do projeto de máquinas retificadoras para operações de acabamento no processo produtivo. Um exemplo disso é o contínuo crescimento da velocidade de corte obtido através da melhoria do sistema de refrigeração e da otimização do formato do rebolo com conseqüente aumento da velocidade de remoção em operações de retificação, proporcionando redução do tempo de produção.

Para atender a essas exigências, os fabricantes de máquinas retificadoras empregam, preferencialmente, os rebolos superabrasivos. Os rebolos superabrasivos constituídos de grãos de diamante ou de CBN diferem dos abrasivos convencionais pela superior dureza, condutibilidade térmica e estabilidade a altas temperaturas geradas no processo de retificação. Muitos são os tipos de rebolos empregados nas diversas operações de retificação diferenciando-se entre si pela forma geométrica do corpo, pela natureza dos grãos ou pelo processo de fabricação. Os rebolos superabrasivos fabricados por deposição galvânica são empregados para altas velocidades de remoção de material e são atualmente construídos sobre um corpo de aço.

Esse trabalho alia as características da deposição galvânica e as vantagens do emprego do corpo de alumínio, com o objetivo de otimizar as operações de retificação que empregam este tipo de rebolo.

Inicialmente, foi planejado realizar experimentos com um rebolo de CBN de corpo de alumínio de ligante galvânico a baixas, elevadas e altas velocidades de corte com o objetivo de avaliar seu comportamento quando submetidos a efeitos térmicos e mecânicos. Como não havia equipamento disponível para realizar os experimentos a altas velocidades, estes foram realizados via simulação numérica, enquanto que os experimentos a baixas e elevadas velocidades foram realizados na companhia Robert Bosch Ltda, na fábrica de Curitiba. Desta forma, foi projetado um corpo de rebolo para a simulação numérica e, para os experimentos práticos, foi projetado e construído um rebolo para a operação de retificação de mergulho empregando aço ligado tratado termicamente.

Após a realização dos experimentos, comprovou-se que a deposição galvânica em corpo de alumínio resiste aos esforços térmicos e mecânicos submetidos e que a expansão elástica, como conseqüência da velocidade periférica, influencia nas tolerâncias dimensionais, mas não nas tolerâncias de acabamento e de formas geométrica da peça. Desta forma, é possível o emprego imediato do corpo de alumínio para baixas e elevadas velocidades sendo que, para altas e altíssimas velocidades, é preciso otimizar o projeto do rebolo.

## ABSTRACT

The metal-mechanics industry has passed great transformations in the three last decades, in the continual search for quality and productivity, with reduction of pollution level to the environment and recycling regard.

That makes component projects of products to be calculated with construction tolerances each time more reduced, and each time more methods of statistical control for the production control to be used. In this way, the requirement grows proportionally on the project development of grinding machines for finishing operations in the productive process. An example is the continuous growth of the cut speed gotten through the improvement of the refrigeration system and the wheel's format improvement with the consequent increase of the removal speed in operations of grinding providing reduction of the production time.

To answer these requirements, manufacturers of grinding machines use, preferably, the super abrasive wheel. Super abrasive wheel made of CBN (Cubic Boron Nitride) or diamond grains differ from conventional abrasives on the superior hardness, thermal conductivity and stability to the high temperatures generated in the grinding process. There are several kinds of grinding wheels used in many grinding operations differentiated by the geometric form of the body, by the grains nature or by the manufacturing process. The super abrasive grinding wheels manufactured by galvanic deposition are used for high speed material removal and currently are built on a steel body.

This work links the galvanic deposition characteristics and the advantages in using the aluminum body aiming to optimize the grinding operations that use this kind of grinding wheel.

Initially it was planned to realize experiments using an aluminium body CBN grinding wheel with galvanic linking in low, high and very high cutting speeds aiming the evaluation of the wheel behavior when affected thermically and mechanically. As there was not available equipment to realize the very high speed experiments, these were simulated numerically at UFSC while the low and high experiments were made at Robert Bosch Company Ltda, Curitiba's factory. In this way a grinding wheel body was projected for the numerical simulation. For the practical experiments a grinding wheel was projected and manufactured for a canal grindig in a thermically treated steel using a plane grinding machine.

The experiment results proved that the galvanic deposition in aluminum body can resists to the thermal and mechanical efforts submitted and the elastic expansion, as consequence of the peripheral speed, influences on the dimensional tolerances, but not in the finishing and geometrical shape tolerances. In this way, it's possible to apply immediately the aluminum body for low and high cutting speed, but for very high speeds an optimization of the grinding wheel is necessary.

## ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS .....	xii
LISTA DE TABELAS .....	xv
LISTA DE ABREVIACÕES .....	xvii
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1 Introdução ao processo de retificação.....	6
2.2 A operação de retificação.....	6
2.2.1 Forças na retificação .....	8
2.2.2 Distribuição de energia no corte .....	9
2.2.3 Desgaste do grão abrasivo .....	10
2.2.4 Tipos de grãos abrasivos .....	12
2.3 Retificação com rebolos superabrasivos .....	12
2.3.1 O Diamante - Dt .....	13
2.3.2 O Nitreto Cúbico de Boro - CBN.....	14
2.4 O Emprego de rebolos superabrasivos no processo de retificação.....	16
2.4.1 Especificação de rebolos com grão superabrasivos.....	17
2.4.1.1 Dimensões da camada .....	19
2.4.1.2 Material do corpo .....	20
2.4.1.3 Granulometria .....	21
2.4.1.4 Ligantes.....	22
2.4.1.5 Concentração .....	25
2.4.2 Condicionamento de rebolos superabrasivos .....	26
2.4.3 Fluidos de corte e refrigeração no processo de retificação.....	26

2.4.3.1	Propriedades dos fluídos de corte e refrigeração .....	27
2.4.3.2	Água com aditivos diversos .....	27
2.4.3.3	Emulsões de água com óleos minerais ou óleos sintéticos .....	28
2.4.4	Fluídos de refrigeração e de corte .....	28
2.4.5	Óleos sintéticos de corte e refrigeração .....	29
2.4.6	Comparação entre fluídos refrigerantes .....	29
2.4.7	Recomendações para o emprego de fluídos refrigerantes .....	30
2.4.8	Vantagens no emprego do óleo integral .....	31
2.4.9	Vida do rebolo em função do fluído refrigerante .....	31
2.4.10	Pressão e vazão do fluído refrigerante .....	32
2.4.11	Retificação a altas velocidades .....	34
2.4.11.1	Base teórica para retificação a altas velocidades .....	35
2.4.11.2	Rebolos para altas velocidades de retificação .....	36
2.4.11.3	Máquinas retificadoras para alta velocidade .....	38
2.4.11.4	Fusos para altas velocidades .....	41
2.5	Normas de segurança para rebolos em geral .....	43
2.5.1	Recomendações para teste de segurança de rebolos .....	45
2.6	Desbalanceamento estático e dinâmico de rotores .....	45
2.6.1	Desbalanceamento estático .....	46
2.6.2	Desbalanceamento dinâmico .....	47
2.6.3	Tipos de balanceamento .....	48
2.6.4	Recomendações e normas para balanceamento .....	49
2.6.5	Desbalanceamento causado por ferramentas .....	52
2.7	Vibrações de rotores .....	55
2.7.1	Tipos de vibrações .....	55
2.7.2	Origem das vibrações .....	56
2.7.2.1	Vibrações externas à máquina .....	56
2.7.2.2	Vibrações regenerativas .....	56



2.7.2.3 Vibrações causadas pela máquina .....	57
<b>3 OBJETIVO DO TRABALHO .....</b>	<b>58</b>
<b>4 ESTUDO DO PROBLEMA .....</b>	<b>60</b>
4.1 Exemplos de operações com rebolos galvânicos de corpo de aço .....	60
4.1.1 Retificação de lonas de freio.....	61
4.1.2 Retificação de cames de eixo de comando - virabrequins.....	63
4.1.3 Retificação de mancais de eixo de comando de válvulas.....	65
4.1.4 Retificação de rasgo de pistão .....	66
4.1.5 Retificação de mancais de eixo de engrenagens .....	68
4.2 Análise do problema .....	68
4.2.1 Propriedades físico-químicas do alumínio .....	69
4.3 Vantagens no emprego do corpo de alumino na operação de retificação .....	70
<b>5 ANÁLISE NUMÉRICA .....</b>	<b>72</b>
5.1 Expansão de um corpo otimizado.....	72
5.1.1 Modos de ruína.....	72
5.1.2 Avaliação da possibilidade de falha ou ruína.....	73
5.2 Expansão de um corpo cilíndrico (abordagem analítica) .....	74
5.3 Simulação numérica (MEF) .....	74
5.3.1 Formato do corpo de alumínio para modelação numérica.....	74
5.3.2 Parâmetros empregados na simulação numérica.....	76
5.3.3 Critério de falha .....	76
5.4 Análise de tensões.....	77
5.4.1 Resultados da expansão.....	79
5.5 Expansão teórica do reboło empregado nos experimentos.....	79

<b>6 MATERIAIS E MÉTODO</b> .....	<b>81</b>
6.1 Tipo de processo empregado .....	81
6.1.1 Descrição da operação .....	82
6.2 Projeto e especificação do rebolo de CBN .....	82
6.3 A peça .....	84
6.3.1 Material da peça .....	84
6.3.2 Forma e dimensão dos canais .....	85
6.4 A máquina retificadora empregada .....	85
6.5 Fluido de refrigeração empregado .....	85
6.5.1 Condições de refrigeração .....	86
6.5.2 Características do fluido refrigerante empregado .....	87
6.6 Balanceamento estático .....	87
6.7 Exame visual de queima .....	88
6.8 Os meios de medição e fotográficos empregados .....	89
6.8.1 Alicate de efeito Hall .....	90
6.8.2 Rugosímetro .....	90
6.8.3 Aparelho de formas geométricas .....	91
6.8.4 Microscópio .....	92
6.8.5 Aparelho usado para medir vibrações .....	92
<b>7 PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO</b> .....	<b>94</b>
7.1 Retificação do aço DIN 16 Mn Cr S5 .....	94
7.2 Análise do desgaste do grão abrasivo .....	96
7.3 Balanceamento estático e ajuste da concentricidade do rebolo .....	97
7.4 Influência dos parâmetros de retificação .....	99
7.4.1 Influência da velocidade de corte sobre os esforços de corte .....	99
7.4.2 Influência da velocidade de remoção sobre os esforços de corte .....	99
7.4.3 Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade .....	100

7.4.4 Influência da velocidade de remoção sobre a rugosidade .....	100
7.5 Exame visual de queima .....	100
7.6 Teste de vibrações.....	100
<b>8 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>102</b>
8.1 Retificação do aço 16Mn Cr S5 .....	102
8.1.1 A influência da velocidade de corte sobre o consumo da corrente elétrica.....	103
8.1.2 A influência da velocidade de remoção sobre o consumo de corrente elétrica .....	104
8.1.3 A influência da velocidade de corte sobre a rugosidade da peça .....	105
8.1.4 A influência da velocidade de remoção sobre a rugosidade da peça .....	106
8.1.5 O balanceamento estático, a ajustagem do rebolo no flange e os níveis de vibrações .....	107
8.1.6 A influência da velocidade de corte sobre o erro de forma de linha .....	108
8.1.7 A influência da velocidade de remoção sobre o erro de forma de linha.....	109
8.2 Análise da camada afetada pelo calor.....	110
8.2.1 Análise metalográfica .....	110
8.3 Análise da camada abrasiva .....	111
8.3.1 Análise do macro-desgaste do grão de CBN.....	112
8.3.2 Análise do micro-desgaste do grão de CBN.....	112
<b>9 CONCLUSÕES .....</b>	<b>114</b>
<b>10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>117</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação de dureza para diversos materiais.....	4
Figura 2 – Seqüência de formação de cavaco na retificação.....	7
Figura 3 – Distribuição de energia no gume de corte do grão abrasivo .....	10
Figura 4 – Mecanismo de desgaste do grão abrasivo .....	11
Figura 5 – Grãos de Diamante.....	14
Figura 6 – Grãos de CBN.....	15
Figura 7 – Especificação de rebolos com superabrasivos conforme norma FEPA.....	18
Figura 8 – Formato de rebolos superabrasivos conforme norma FEPA .....	19
Figura 9 – Processo de deposição galvânica .....	25
Figura 10 – Recomendações conforme Studer .....	30
Figura 11 – Vida do rebolo em função do tipo de fluído refrigerante .....	32
Figura 12 – Tubeiras de limpeza e de refrigeração.....	33
Figura 13 – Taxa de remoção para altas velocidades de corte .....	35
Figura 14 – Tipos de ligantes para altas velocidades de corte .....	37
Figura 15 – Potência requerida de corte com o aumento da velocidade de corte.....	40
Figura 16 – Fusos de mancal de rolamento UVA modelo EU4-150 .....	42
Figura 17 – Fuso com mancal magnético IBAG .....	42
Figura 18 – Desbalanceamento estático.....	47
Figura 19a – Desbalanceamento dinâmico .....	48
Figura 19b – Binário de desbalanceamento combinado com balanceamento estático deslocado de ângulo diferente de 180° .....	48
Figura 20 – Desbalanceamento residual para diferentes qualidades de balanceamento .....	50
Figura 21a – Desbalanceamento residual para ferramenta de 1,5 Kg e para diferentes qualidades de balanceamento .....	53

Figura 21b – Desbalanceamento residual para $G=2,5$ e para diferentes massas de ferramenta .....	53
Figura 22a – Batimento em função da rotação para mandril balanceado fora da máquina .....	54
Figura 22b – Batimento em função da rotação para mandril balanceado na máquina.....	54
Figura 22c – Batimento em função da rotação para mandril balanceado em dois planos fora da máquina.....	54
Figura 23 – Rebolos de diamante de liga galvânica para lonas de freio.....	62
Figura 24.1 – Rebolo de CBN de liga galvânica de corpo de aço .....	64
Figura 24.2 – Disco dressador .....	64
Figura 24.3 – Rebolo de CBN de liga vitrificada .....	64
Figura 25 – Rebolos de CBN de liga galvânica para mancal de eixo de comando.....	66
Figura 26 – Pistão de bombas injetoras .....	67
Figura 27– Conjunto de rebolos de CBN para retificação de mancais de eixo de engrenagens .....	68
Figura 28 – Corpo de formato B1- 3A1- 75 - 6 - 16.....	75
Figura 29 – Corpo do rebolo em perspectiva e dividido em malhas .....	77
Figura 30 – Tensões de Von Mises em MPa (vista frontal) .....	78
Figura 31 – Tensões de Von Mises em MPa (vista inferior) .....	78
Figura 32 – Corpo deformado em perspectiva (deslocamentos nodais).....	79
Figura 33 – Expansão teórica sofrida pelo corpo do rebolo empregado nos experimentos .....	80
Figura 34 – Operação de abertura de canal com retífica plana .....	81
Figura 35 – Projeto do rebolo B64 GSS A.....	83
Figura 36 – Peça de preparação e retificação final .....	84
Figura 37 – Variáveis envolvidas .....	85
Figura 38 – Bomba de fluído refrigerante de baixa pressão e alta vazão .....	86
Figura 39 – Balanceamento estático .....	88
Figura 40 – Exemplo de camada afetada pelo calor .....	89

Figura 41 – Amperímetro de efeito Hall modelo E-T 3800.....	90
Figura 42 – Circularímetro MMQ3 da Mahr & Perthen.....	91
Figura 43 – Aparelho usado para medir vibrações VIBROPORT 30 .....	92
Figura 44 – Marca de referência para avaliação de micro e macro-desgaste do grão.....	97
Figura 45 – Rebolo balanceado e fixado na máquina .....	98
Figura 46 – Ajuste da concentricidade .....	98
Figura 47 – Comportamento da corrente elétrica com o aumento da velocidade de corte..	103
Figura 48 – Comportamento da corrente elétrica com o aumento da velocidade de remoção .....	104
Figura 49 – Comportamento da rugosidade com o aumento da velocidade de corte.....	105
Figura 50 – Comportamento da rugosidade com o aumento da velocidade de remoção ...	106
Figura 51 – Comportamento dos níveis de vibrações com a velocidade de corte .....	107
Figura 52 – Comportamento da forma de linha com o aumento da velocidade de corte....	108
Figura 53 – Comportamento da forma de linha com o aumento da velocidade de remoção .....	109
Figura 54 – Queima de retificação no experimento de número 3.....	110
Figura 55 – Análise da camada limite.....	111
Figura 56 – Isenção do macro-desgaste do grão de CBN.....	112
Figura 57 – Micro-desgaste do grão de CBN após os experimentos .....	113
Figura 58 – Grão de CBN antes do experimento .....	113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Granulometria disponíveis de grão superabrasivos .....	21
Tabela 2 – Exemplo de tipos de ligas resinóides.....	22
Tabela 3 – Concentrações padrão para rebolos de Dt e CBN.....	25
Tabela 4 – Comparações entre propriedade de fluídos refrigerantes.....	30
Tabela 5 – Reações químicas do Nitreto de Boro com o refrigerante a base de água.....	31
Tabela 6 – Parâmetros de retificação para operação retificar lonas de freio .....	62
Tabela 7 – Parâmetros de retificação para operação desbaste de eixo virabrequim .....	64
Tabela 8 – Parâmetros de retificação para mancais de eixo de comando de válvulas.....	65
Tabela 9 – Parâmetros de retificação para abertura de rasgo de pistão .....	67
Tabela 10 – Propriedades do alumínio em relação ao aço e ao cobre .....	70
Tabela 11 – Formas de rebolos mais empregados nas operações de retificação.....	75
Tabela 12 – Parâmetros de entrada para análise do ANSIS .....	76
Tabela 13 – Valores absolutos de máximos deslocamentos nodais em coordenadas cilíndricas.....	79
Tabela 14 – Expansão teórica sofrida pelo corpo do reboło empregado nos experimentos .....	80
Tabela 15 – Especificações do reboło B64 GSS A.....	83
Tabela 16 – Material da peça .....	84
Tabela 17 – Sobrematerial retirado na operação atual.....	85
Tabela 18 – Especificações da retificadora ABA 600 modelo FV600 .....	85
Tabela 19 – Pressão e vazão do fluído refrigerante ECOCOUT HSG 915 .....	86
Tabela 20 – Especificações do fluído refrigerante ECOCOUT HSG 915.....	87
Tabela 21 – Especificações técnicas do amperímetro ET-3800.....	90
Tabela 22 – Especificações do rugosímetro S6P da Mahr & Perthen .....	91
Tabela 23 – Especificações do circularímetro MMQ3.....	95

Tabela 24 – Especificações do microscópio PME-3 .....	92
Tabela 25 – Especificações do aparelho VIBROPORT 30 .....	93
Tabela 26 – Parâmetros de retificação para o experimento n°1 .....	95
Tabela 27 – Parâmetros de retificação para o experimento n°2 .....	95
Tabela 28 – Parâmetros de retificação para o experimento n°3 .....	96
Tabela 29 – Parâmetros de retificação para o experimento n°4 .....	96



## LISTA DE ABREVIações

## SIGLAS

CEP	_____	Controle Estatístico do Processo
FEMA	_____	Análise dos Modos de Falha e Efeitos
CNC	_____	Comando Numérico Computadorizado
CBN	_____	Nitreto Cúbico de Boro
PKD	_____	Diamante Policristalino
DT	_____	Diamante
DIN	_____	Deutsche Industrie-Norm
FEPA	_____	Federação Européia de Fabricantes de Abrasivos
EP	_____	Extrema Pressão
CD	_____	Dressagem Contínua
AMB	_____	Active Magnetic Bearings
HSK	_____	Hohlschaftkegel
EAT	_____	Eccentric Actuating Tool
MQFC	_____	Mínima Quantidade de Fluido de Corte
LMP	_____	Laboratório de Mecânica de Precisão
UFSC	_____	Universidade Federal de Santa Catarina
CPK	_____	Capabilidade do processo
CMK	_____	Capabilidade da Máquina

## SÍMBOLOS

B	_____	Borazon (Nitreto Cúbico de Boro)
CB	_____	Carboneto de Boro
SiC	_____	Carboneto de Silício
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	_____	Óxido de Alumínio
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	_____	Óxido de Boro
BN	_____	Nitreto de Boro
NH <sub>3</sub>	_____	Amônia
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	_____	Ácido Bórico
WC	_____	Carboneto de Tungstênio
VC	_____	Carboneto de Vanádio
TiC	_____	Carboneto de Titânio
CG	_____	Centro de gravidade
S	_____	Processo de deposição galvânica do diamante
GSS	_____	Processo de deposição galvânica do CBN
E	_____	Corpo de aço
A	_____	Corpo de alumínio
A, $\beta$ , $\gamma$	_____	Expoentes da expressão da espessura do cavaco $h_{cu}$
k	_____	Constante da expressão da espessura do cavaco $h_{cu}$
F <sub>ns</sub>	[N]	Componente da força normal de corte na retificação
F <sub>ts</sub>	[N]	Componente da força tangencial de corte na retificação
G	_____	Relação de desgaste entre peça e rebolo
$h_{cu}$	[mm]	Espessura média do cavaco
$C_{stat}$	[1/mm <sup>3</sup> ]	Densidade estatística das arestas de corte
$v_w$	[m/min]	Velocidade da peça
$v_c$	[m/s]	Velocidade do rebolo
$d_{ea}$	[mm]	Diâmetro equivalente do rebolo
$E_c$	[J]	Energia cinética
$M$	[Kg]	Massa do rebolo
$V_c$	[m/s]	Velocidade de corte
$\omega$	[rad/s]	Velocidade angular
$P_{total}$	[kw]	Potência total
$P_c$	[kw]	Potência de corte

$P_I$	[kw]	Perda de potência
$F_t$	[N]	Força de corte
$P_L$	[kw]	Perda de potência no fuso
$P_{KSS}$	[kw]	Perda de potência causada pelo refrigerante
$P_{SSP}$	[kw]	Perda de potência causada pela limpeza do rebolo
$F$	[N]	Força centrífuga
$m$	[kg]	Massa do rotor
$U$	[mm.g]	Desbalanceamento residual
$G$		Qualidade do balanceamento
$e$	[mm]	Excentricidade máxima
$\varepsilon$	[mm]	Excentricidade
$A$	[Amper]	Corrente elétrica
$V_c$	[m/s]	Velocidade de corte
$n_s$	[rpm]	Rotação
$a_e$	[mm]	Profundidade de corte
$V_f$	[mm/min]	Avanço
$Q_w$	[mm <sup>3</sup> /s]	Velocidade de remoção
$Q'_w$	[mm <sup>3</sup> /mm.s]	Velocidade de remoção específica
$u$	[mm]	Expansão do diâmetro do rebolo
$Q'_{Wmax}$	[mm <sup>3</sup> /mm.s]	Máxima velocidade de remoção específica
$\nu$		Coefficiente de Poisson
$E$	[GPa]	Módulo de elasticidade
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Aceleração da gravidade
$r$	[mm]	Raio do corpo
$\gamma$	[Kg/m <sup>3</sup> ]	Peso específico

## 1 INTRODUÇÃO

O parque industrial brasileiro sofreu grandes transformações nas últimas três décadas. As necessidades em termos de qualidade e produtividade cresceram nas décadas de 80 e 90 e no início do século XXI. A concorrência com as empresas multinacionais aumentou com a globalização e o consumidor, por ter acesso a outros mercados, ficou mais exigente.

Nos anos 80, a indústria de transformação de materiais produzia com máquinas-ferramentas da década de 40 e 50. Máquinas manuais e semi-automáticas e o conceito das linhas “transfer” regiam o parque industrial brasileiro. Essas tinham sua capacidade limitada em termos de produtividade e flexibilidade. A alta produção, impulsionada pelo mercado altamente consumidor, determinava a prioridade dentro da empresa, mas a capacidade instalada era insuficiente para atender o fornecimento de peças com qualidade e produtividade. Com isso, os problemas tornavam-se cada vez mais freqüentes. Reclamações de clientes insatisfeitos com o produto eram cada vez mais comuns e difíceis de serem equacionadas. As ações eram tomadas no sentido de controlar para não fornecer com defeito, mas com isso os índices de refugos e os custos de produção aumentavam. No intuito de melhorar o processo de fabricação, para aumentar a produtividade e reduzir os problemas com refugos, várias técnicas de qualidade e análise de problemas foram introduzidas. O controle estatístico de processo CEP, o diagrama causa e efeito e as técnicas de FEMA são exemplos dessas técnicas.

Em máquinas-ferramentas, iniciou-se o conceito de linhas flexíveis de manufatura, o qual cada máquina, individualmente, poderia ser programada para diversas famílias de peças, adaptando-se à necessidade de produção momentânea. Essas máquinas eram equipadas com comando numérico computadorizado (CNC) e fusos de esfera recirculantes.

No campo das ferramentas de corte iniciou-se o uso do diamante natural, policristalino e o CBN (Nitreto Cúbico de Boro), para uso em operações com ferramentas de geometria definida e não-definida.

Como exemplo, pode-se citar a operação com cabeçote de fresar para facear carcaças de liga de alumínio com 24 insertos de metal duro, que era trocada com uma vida de oito horas, e que com o emprego de insertos de diamante policristalino (PKD) a troca passou a ser realizada a cada 30 dias com a mesma produção diária. Na retificação com rebolos de óxido de alumínio, dependendo da operação, esses podem ser substituídos por rebolos de CBN, o que pode proporcionar um aumento de vida do rebolo da ordem de até 30 vezes e com um possível incremento na velocidade de remoção de material com conseqüente redução dos tempos principais de retificação e, portanto, com aumento de produtividade. Como exemplo pode-se citar a indústria de lonas de freio para veículos pesados que empregava rebolos de SiC e agora emprega o diamante natural para retificar lonas de freio.

Nos anos 90, com a globalização, houve a necessidade de uma modernização rápida da indústria de transformação de materiais. Modelos de veículos e caminhões, que outrora eram lançados no Brasil após vários anos de lançamento na Europa e Estados Unidos, agora são lançados quase que ao mesmo tempo no mercado nacional. Com isso, os fornecedores de peças para a indústria automobilística tiveram a necessidade de investir no mesmo processo de fabricação que seus concorrentes no exterior ou desenvolver tecnologia que atenda a suas necessidades de fabricação. Ao mesmo tempo, surgiu a necessidade de redução dos custos de produção com os processos de usinagem instalados, nos quais o conceito de terceirização é largamente empregado.

A década de 90 também foi marcada pela redução de custos de produção. O objetivo era reduzir os tempos do processo de fabricação. Cada segundo economizado significa um aumento da produtividade e, portanto, uma redução de custo. Dessa forma, aumentou o interesse por novas tecnologias de ferramentas de corte, que permitem maiores avanços de usinagem e com a mesma vida, representando uma redução no custo de produção com otimização do processo e melhoria da qualidade do produto.

Hoje, no início do século XXI, a preocupação com a melhoria do desempenho dos produtos industrializados, visando menores níveis de ruído, bem como a economia de combustível e a preocupação com o meio ambiente, têm exigido cada vez mais tolerâncias apertadas dos componentes de produtos manufaturados. Os rejeitos da usinagem, tais como cavacos e a “borra” de retificação, não podem mais ser simplesmente descartados em

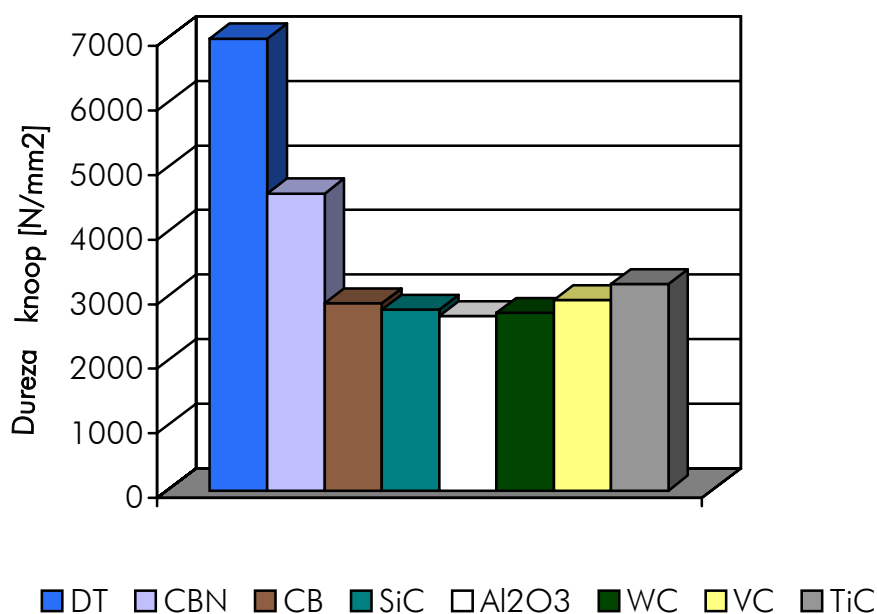
depósitos sem sofrer o devido tratamento de neutralização. Como exemplo, pode-se citar os fabricantes de lona de freios, que classicamente empregavam o asbesto ligado nas resinas fenólicas e hoje estão gradativamente alterando a composição da lona por fibra de vidro ligada a resinas fenólicas, reduzindo assim agressão ao meio ambiente tanto na fabricação como também no uso da lona. Também podemos citar os circuitos fechados de óleos solúveis que abastecem as máquinas-ferramentas e que periodicamente sofrem correções de suas características físico-químicas em estações de tratamento.

Para satisfazer essas necessidades, há o desenvolvimento de novas tecnologias de processo com novas máquinas-ferramentas e novas ferramentas de corte. Dentre os novos processos podemos citar a tecnologia de fabricação com máquinas e ferramentas para alta velocidade, a usinagem de aços endurecidos, a usinagem com pastilhas de Cerâmica, Cermet e CBN, a usinagem com mínimas quantidades de fluido de corte (MQFC), a retificação com rebolos de CBN com ligantes vitrificados e o emprego de rebolos de diamante e CBN de ligantes galvânicos para desbastes com alta velocidade de remoção de material.

Dentro destas tecnologias a retificação de desbaste empregando rebolos de superabrasivos com ligante de níquel aplicado galvanicamente apresenta um particular interesse para a indústria de manufatura, devido à elevada produtividade e é apresentado de forma detalhada neste trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A usinagem está baseada no princípio do corte dos materiais, no qual o material mais duro corta ou risca o mais mole (Fig.1). A operação de usinagem confere à peça de trabalho as características de formas, dimensões e/ou acabamento, com a geração de cavacos [4].



**Figura 1** – Comparação de dureza para diversos materiais [3,5,6].

Dentro dos processos de fabricação conhecidos na indústria de transformação de materiais, estima-se que 70% são através da remoção de material, com conseqüente geração de cavacos [4].

Conforme König [1], em todos os processos de remoção com formação de cavaco, as características do processo como saída do cavaco, força de corte, desbaste e o resultado do trabalho são influenciadas, consideravelmente, pela geometria da ferramenta. A norma DIN 8580 diferencia o processo de fabricação por separação de material, em três diferentes processos [2]:

- ❖ Usinar com ferramentas de corte com geometria definida.

Os processos de fabricação com remoção de cavaco utilizando ferramentas de geometria de corte definida sempre foram e continuam sendo um dos principais processos de fabricação na produção de peças unitárias, pequenas séries e em massa, como decorrência dos grandes volumes de matérias que podem ser removidos na unidade de tempo. Como próprio nome já diz, as ferramentas desse grupo têm uma geometria de corte definida, que deve ser adaptada ao material da peça, ao material ferramenta e às condições específicas da máquina-ferramenta. Os termos, a denominação e a designação da geometria da cunha estão normalizados pela DIN 6581 e pela ISO 3002/1. Como exemplo desse processo, podemos citar as operações: torneamento, fresamento, furação, brochamento, aplainamento e a operação de serrar [1].

- ❖ Usinar com geometria de corte não definida.

Na usinagem com ferramentas de corte com geometria não-definida, como o próprio nome diz, os seus gumes não possuem uma geometria definida para o corte da peça. A remoção de material se dá por meio dos grãos disformes de materiais duros que são postos em interferência com o material da peça. A norma DIN 8588 divide o processo de fabricação por separação de material através do uso de ferramentas de corte com geometria não-definida em operações de retificação, brunimento, lapidação, tamboreamento e jateamento. O foco deste trabalho será a operação de retificação com rebolos de grãos superabrasivos de Diamante (DT) e Nitreto Cúbico de Boro (CBN) [3].

- ❖ Remover por remoção térmica, química e eletroquímica.

No processo de fabricação por remoção térmica, a energia necessária para a separação do cavaco é introduzida na peça por fontes térmicas externas. Como exemplo pode-se citar o processo de remoção térmica por descarga elétrica gasosa, ou eletroerosão.

O princípio da remoção química se baseia numa reação química entre a peça e um agente químico e deverá resultar em um produto volátil solúvel ou de fácil remoção.



A erosão eletroquímica está baseada na reação eletroquímica entre um material metálico e um meio de ação, dissociado ionicamente e condutor de eletricidade, sob ação de uma corrente elétrica, levando a formação de um produto de reação solúvel no meio da reação e que precipite no meio de ação [2].

## 2.1 Introdução ao processo de retificação

É difícil de ser determinado quando, pela primeira vez, foram usinados metais com remoção de cavaco. Certo é que, na Idade Antiga, os rebolos rotativos haviam sido usados para afiação de ferramentas e armas. No fim da antiguidade, o homem havia aprendido a usar a água como meio de acionamento para os rebolos. Com isto, já na Idade Média, iniciou-se a industrialização em pequenas escalas. Nas margens de rios e riachos, formaram-se verdadeiras comunidades de retificação. Nelas foram desenvolvidas as bases para uma tecnologia que, durante os séculos seguintes, se desenvolveu constantemente [3].

A Idade Moderna da usinagem com ferramentas de geometria de corte não definida inicia-se com a descoberta de ferramentas artificiais. Aproximadamente na metade do século XIX, na Europa, foram sintetizados os primeiros rebolos com abrasivos naturais. Em 1861, os americanos Acheson conseguem a sinterização do carboneto de silício. Com isso, iniciaram-se desenvolvimentos na área de materiais duros que até hoje não foram encerrados. Entre esses desenvolvimentos estão descobertas decisivas, como a sintetização do diamante artificial e do nitreto de boro cúbico (CBN). Ao passo que os desenvolvimentos de ferramentas e de máquinas-ferramentas já haviam sido submetidos pela pesquisa nas áreas da física, da química e da construção de máquinas, o desenvolvimento dos processos de fabricação, durante muito tempo, foi apenas apoiado no conhecimento do artesanato.

## 2.2 A operação de retificação

A retificação é um dos processos de fabricação realizados por retirada de material por ação mecânica do rebole sobre a peça onde o grão abrasivo é constituído de um material mais duro do que o material da peça. Nesse processo, os grãos abrasivos passam pela peça-obra em uma trajetória definida e retiram materiais, sob forma de cavacos, gerando calor por um forte atrito e deformações elástico-plásticas na zona afetada [fig.2] [3].

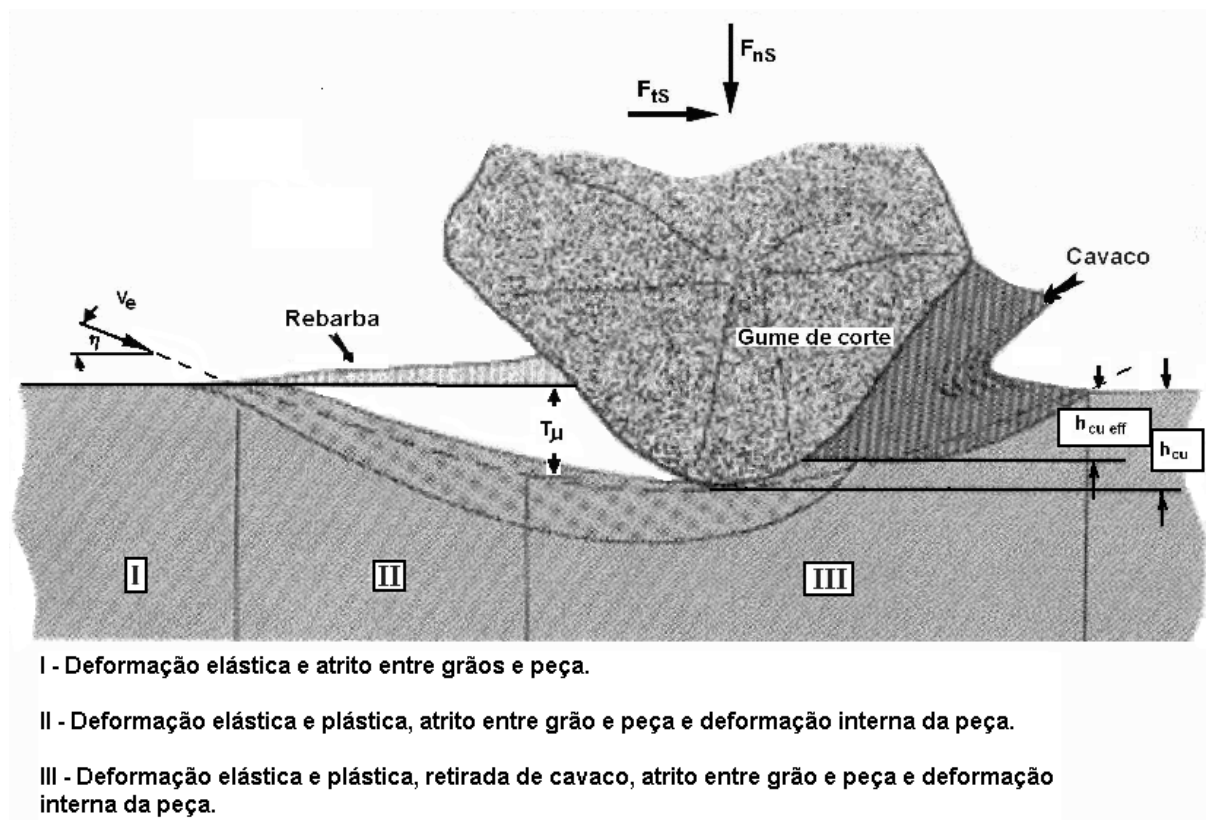


Figura 2 – Seqüência de formação do cavaco na retificação [3].

Muitas são as variáveis envolvidas no processo de retificação. Dentre elas pode-se citar:

- Parâmetros de retificação,
- Rebolo,
- Parâmetros de dressagem,
- Material da peça,
- Máquina retificadora,
- Fluido refrigerante.

Teoricamente, os problemas que se apresentam na retificação deveriam ter uma solução rápida através do estudo pormenorizado das variáveis envolvidas no processo de retificação. No entanto, isso não acontece na prática. O resultado desejado, em função do projeto da peça, de uma forma geral não pode ser obtido pela avaliação de um único

parâmetro, mas sim por uma avaliação criteriosa da combinação de vários parâmetros simultaneamente.

O processo de retificação pode ser caracterizado por grandezas como as componentes da força de usinagem, a vida do rebolo (desgaste do grão abrasivo) e a temperatura. O resultado do processo deve ser avaliado em função da qualidade da superfície retificada e de aspectos econômicos, como custo de fabricação, que estão diretamente ligados com a variável velocidade de remoção.

### 2.2.1 Forças na retificação

Segundo König [3], a força de usinagem que atua sobre o gume e sobre a peça durante a fase de ação do rebolo, pode ser subdividida em duas componentes: a força tangencial ( $F_{ts}$ ) no sentido do corte e uma componente normal ( $F_{ns}$ ) (normal a  $F_{ts}$ ) conforme Fig.2.

O quociente entre ( $F_{ns}/F_{ts}$ ) é denominado: relação de força de usinagem.

A força de usinagem da ferramenta como um todo é a soma vetorial das forças que atuam momentaneamente sobre os gumes isolados da parte da ferramenta em que se está atuando. Por este motivo, a relação da força de usinagem que age sobre a máquina-ferramenta depende de uma forma bastante intensa da relação da força de usinagem que atua sobre os grãos isolados.

Durante a fase em que temos apenas o escoamento lateral do material (vide figura 2) a força normal com a qual o gume deve ser pressionado para dentro da peça é, consideravelmente, maior do que a força tangencial. A relação da força de usinagem, nesse caso, tem um valor relativamente alto. No início da formação do cavaco, a força tangencial aumenta, de forma que a relação de forças diminui. Desta forma, podemos constatar que:

Gumes mais afiados com um raio do gume menor e/ou um atrito maior permitem que o início da formação do cavaco se dê mais cedo. Dessa forma, a força tangencial é maior e, portanto, a relação de forças se torna menor.

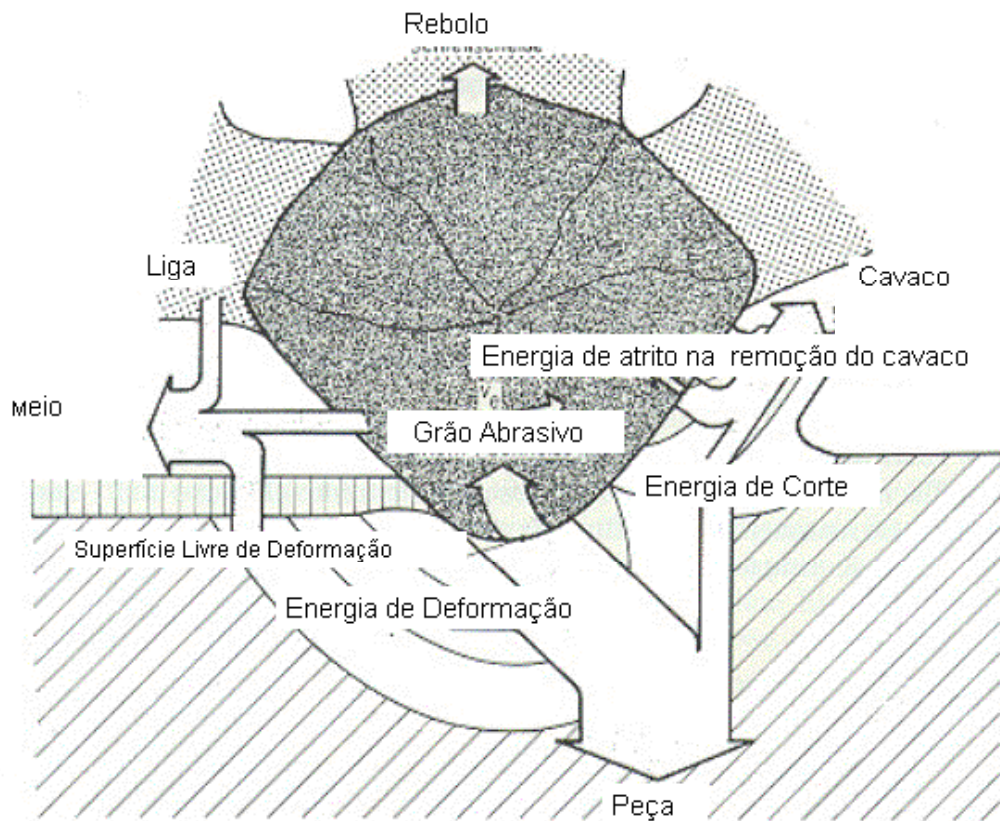
Ao contrário, gumes mais cegos com um raio do gume maior e/ou um atrito menor, que atue no sentido de aumentar a fase de escoamento do material, de forma que quando há lubrificação, é excessiva, ou, quando o gume está demasiadamente cego, deve-se esperar uma relação de força grande.

No caso de gumes cegos, esses somente atiram contra a peça. O material é apenas deformado plasticamente, sem que haja a formação de cavacos. Com isso, a quantidade de energia dissipada no corte sobre a peça aumenta, comprometendo a qualidade da mesma [3].

### 2.2.2 Distribuição de energia no corte

A Fig.3 mostra que a energia mecânica introduzida no processo pode ser dividida em quatro regiões. Em decorrência dos poucos gumes afiados, a maior parte da energia é transformada em energia térmica pelo atrito no flanco dos gumes e em deformação plástica na região superficial da peça. Além disso, tem-se a produção de calor ou a transformação de energia em calor, nas faces do grão, durante a remoção de cavaco propriamente dito. Por último, deve-se mencionar que uma parte da energia, principalmente quando se trata de rebolos ligados, é transformada em calor em decorrência do atrito do ligante sobre a superfície da peça.

Na usinagem com ferramentas de geometria não-definida, as principais fontes de calor se encontram abaixo do gume, de forma que a maior parte do calor, inicialmente, flui para dentro da peça e lá provoca um aumento localizado de temperatura. Esse aumento de temperatura pode, dependendo da sua ordem de grandeza e do tempo de atuação, provocar mudanças na estrutura cristalina do material da peça, bem como fenômenos de oxidação superficial da peça (camada termicamente afetada pelo calor). Pela utilização de fluidos de corte, é possível reduzir o tempo de atuação do calor e a magnitude do aumento de temperatura de uma maneira favorável. Assim, a lubrificação do fluido de corte leva a uma redução do atrito e, com isso, reduz a geração de calor, ao passo que o fluido, propriamente dito faz com que se dê uma remoção rápida do calor da peça. Além disso, a lubrificação traz outra vantagem como a redução do desgaste do grão abrasivo [3].



**Figura 3** – Distribuição de energia no gume do grão abrasivo, na peça e no meio e na retificação [3].

### 2.2.3 Desgaste do grão abrasivo

As influências térmicas influenciam não só a peça-obra, mas também a ferramenta. A figura 4 mostra que o desgaste dos grãos abrasivos tem início nas camadas cristalinas próximas à camada superficial do grão abrasivo. Nessas, as pressões de contato e as temperaturas extremamente altas levam a fenômenos de oxidação e de difusão que reduzem a resistência abrasiva do material. Forma-se uma camada menos resistente à compressão que devido à ação mecânica subsequente é removida por abrasão e, com isso, novas camadas cristalinas do grão abrasivo estão sendo submetidas a esse tipo de desgaste [3].

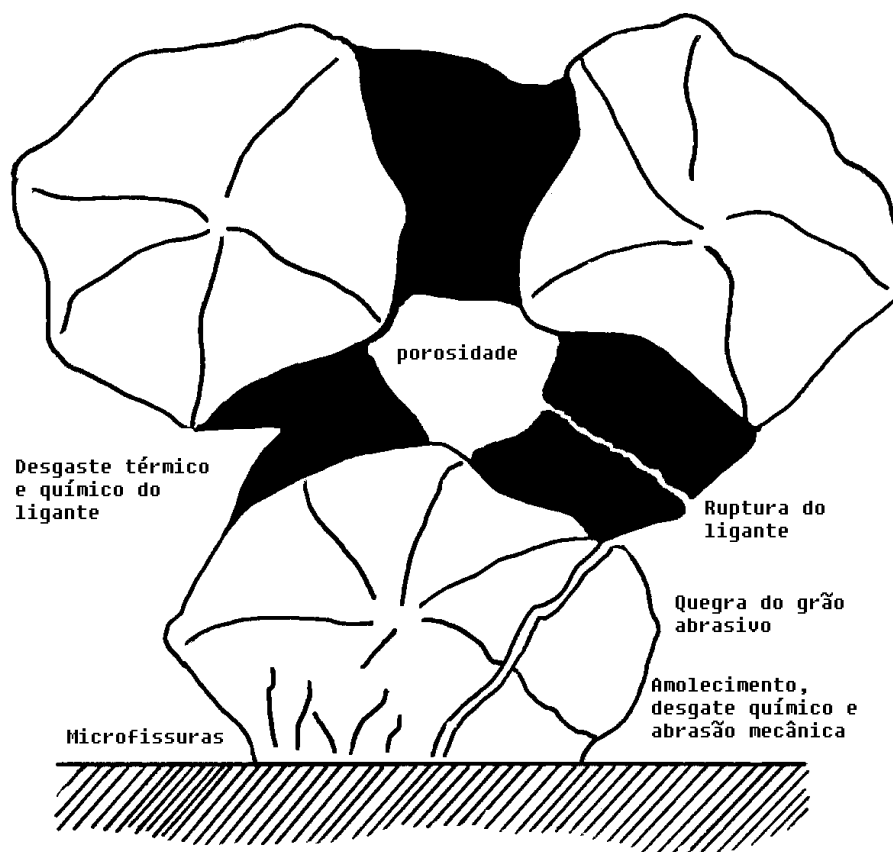


Figura 4 – Mecanismo de desgaste do grão abrasivo [3].

Pela ação mecânica e térmica alternadamente, é possível ocorrer fadiga em locais com falhas que podem ser encontradas em todo o material (na forma de impurezas na estrutura cristalina, em contornos de grão, variações de dureza e etc.), onde iniciam as fissuras de fadiga. Essas fissuras podem se propagar e levar ao lascamento de partes do grão ou podem provocar a formação de uma microfissura (micro-desgaste) que pode levar ao fissuramento de grandes partes do grão abrasivo (macro-desgaste). Em muitos casos, o desgaste do grão abrasivo é a causa imediata para o desgaste do ligante, pois devido ao achatamento do gume tem-se um aumento da força de atrito, que leva a um aumento localizado na força de corte e, com isto, ultrapassa-se a resistência mecânica do ligante. É possível ocorrer a quebra de vários grãos em cadeia, dependendo de como o grão está ancorado no ligante. Esse desgaste pode estar mais localizado no grão ou mais no ligante. O ligante também pode sofrer um desgaste diretamente pela ação térmica ou química do meio, liberando o grão abrasivo prematuramente [4]. O desgaste localizado na superfície

do grão é considerado como sendo o desgaste de micro-efeito e o desgaste de lascamentos de grãos e ruptura do ligante é considerado como um macro-efeito.

#### 2.2.4 Tipos de grãos abrasivos

Os materiais empregados para grãos abrasivos podem ser divididos em abrasivos naturais e abrasivos sintéticos [3]. Dentre os materiais abrasivos naturais podemos citar o Diamante, o Coríndon natural e o Quartzo, sendo esses obtidos na natureza. Já os materiais abrasivos sintéticos são obtidos através do controle de parâmetros, como o tempo, a temperatura e a pressão em uma atmosfera controlada. Dentre estes podemos citar o Nitreto Cúbico de Boro (CBN), o Diamante sintético (DT), o Óxido de Alumínio ( $Al_2O_3$ ) e o Carboneto de Silício (SiC).

Segundo Bertalan (1997) [7] e Denis (2002) [8], os grãos abrasivos sintéticos ainda podem ser divididos em abrasivos convencionais e superabrasivos, sendo os abrasivos convencionais o Óxido de Alumino e o Carboneto de Silício e os superabrasivos, o Diamante e o Nitreto Cúbico de Boro. Maiores detalhes podem ser encontrados na literatura indicada no capítulo 11 [31,32].

### 2.3 Retificação com Rebolos Superabrasivos

Até há pouco tempo, a retificação era um dos processos preferidos na usinagem de acabamento de materiais duros ou endurecidos por tratamento térmico. O desenvolvimento de novos materiais para ferramenta e de máquinas tem propiciado também a usinagem desses tipos de peça nas operações de torneamento e fresamento, contudo em situações que não sejam exigidas classes de tolerâncias dimensionais abaixo de IT5. Para essas situações, as operações de retificação ainda detêm certa supremacia, já que também ocorreram fortes desenvolvimentos nessa área. Isso se refere principalmente às novas máquinas retificadoras, com os recursos do CNC, mancais e guias hidrostáticas, motores que possibilitam altíssimas velocidades de corte e também melhorias nos rebolos, como a utilização de superabrasivos, granulometrias extremamente reduzidas e o desenvolvimento de ligantes especiais para essas novas condições [9,10].

A retificação com superabrasivos refere-se, especificamente, à utilização de abrasivos de diamante e de nitreto de boro cúbico (CBN). O uso de rebolos de CBN, principalmente

para a retificação de aços temperados, vem ganhando grande aplicação na produção fabril. As principais vantagens encontradas são a alta durabilidade do grau de afiação dos abrasivos, que ocasiona redução drástica no número de recondicionamentos de rebolos e de tempos de preparação, as possibilidades de retificação em cheio, a redução da camada afetada pelo calor e, até mesmo, o ganho no acabamento superficial [31].

Os tipos de grãos superabrasivos, Diamante ou CBN, bem como seu tamanho de grão (126, 91, 46, ect), são classificados conforme a norma ISO 6106 e a DIN 848.

### 2.3.1 O Diamante – DT

Tanto o diamante natural (Fig.5) quanto o sintético são compostos quimicamente de carbono puro. O diamante natural se formou em condições de pressões extremas e em temperaturas elevadas, durante um longo período de tempo. Nem todos podem ser empregados em joalheria, em decorrência de falhas internas e de coloração não adequada para o comércio. Aproximadamente 80% dos diamantes naturais são empregados na indústria [3]. O diamante sintético obtido pela transformação alotrópica do elemento químico carbono, através da ação de um catalisador sob alta pressão e temperatura, detém praticamente as mesmas propriedades do diamante natural. Sua dureza extrema média em Knoop é tida como sendo ( $K_{100} = 7000$ ) duas vezes maior que o Óxido de alumínio e que o Carboneto de Silício. A grafitização do Diamante inicia-se a partir de 900 °C e a sua oxidação, após 1400 °C. Essas propriedades limitam à aplicação do diamante em materiais ferrosos [3].





Figura 5 – Grãos de Diamante [5]

### 2.3.2 O Nitreto de Boro Cúbico - CBN

O CBN [Fig.6] é um material sintético, obtido através da transformação alotrópica do nitreto de boro hexagonal, mediante elevadas pressões e temperaturas. Com altíssima dureza ( $K_{100} = 4700$ ), independente da orientação dos cristais, apresenta vantagens na aplicação quando comparado ao diamante, devido à possibilidade de usinagem de ferrosos. Isso porque, apesar da extrema dureza do diamante ( $K_{100} = 7000$ ), o seu emprego na usinagem de aços, principalmente hipoeutéticos, é dificultado pela tendência do carbono do diamante se difundir no ferro, sob condições de pressão e temperatura usuais de usinagem [3,9,10].

Além disso, comparado ao diamante, o CBN apresenta uma resistência elevada à temperatura. Enquanto que no diamante a grafitação se inicia a partir de  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o nitreto de boro cúbico, à pressão atmosférica, apresenta estabilidade até  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Paralelamente a isso, segundo Bertalan (1997) [7], a queda da dureza do diamante com o aumento de temperatura é acentuada a partir de  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  e em  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  ela é inferior à do CBN na mesma temperatura [3,9,10].

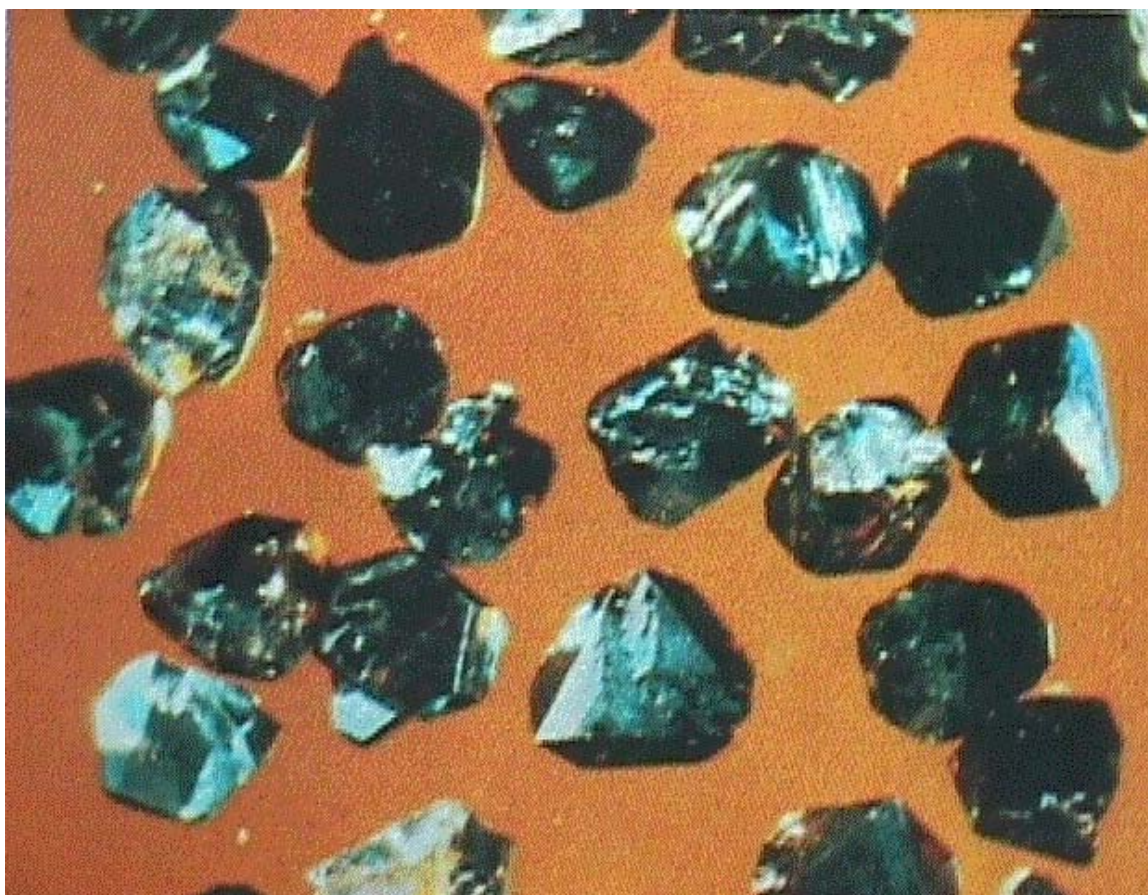


Figura 6 – Grãos de CBN [5]

Até o surgimento do CBN, a escolha do abrasivo recomendado para retificação de aços endurecidos recaía quase que, exclusivamente, sobre o coríndon (óxido de alumínio). Comparando-se às características desses rebolos, tem-se nos de coríndon, com ligante vitrificado, velocidades de corte máximas de 60 m/s, enquanto que, com CBN, com o mesmo ligante, já são usadas velocidades superiores a 200 m/s [9,10].

Em rebolos com abrasivos convencionais, as profundidades de corte radiais utilizadas situam-se na ordem de décimos de milímetro. Já com rebolos de CBN, são usuais as aplicações de corte em cheio, como na abertura de canais para brocas helicoidais, retirando-se vários milímetros por passe. Isso se deve a uma maior resistência ao desgaste de CBN em relação ao Óxido de Alumínio [9,10].

Algumas razões podem explicar o fato de que os grãos abrasivos de CBN apresentam menores desgastes na retificação do que o coríndon. Segundo Bastos (1999) [11], os grãos de CBN, por possuírem uma elevada dureza e por não apresentarem uma redução tão acentuada desta com o aumento da temperatura, podem trabalhar com os

gumes afiados em velocidades de corte mais altas. Nessas velocidades, as espessuras de usinagem são menores e não causam um macro-desgaste tão acentuado, mantendo a capacidade de corte do rebolo e uma redução do calor causado pelo atrito entre os grãos e o material da peça. Além disso, o desgaste dos grãos de CBN na retificação se dá em grande parte por microlascamentos, gerando um grande número de gumes secundários, que participam efetivamente da formação de cavaco [7,9,10].

Uma outra razão para o menor desgaste do CBN é o efeito térmico. A condutividade térmica do CBN é dezoito vezes maior do que a do coríndon e superior do que a do ferro, de modo que uma parte do calor gerado pelo processo é transmitida aos grãos [7]. Como o grão abrasivo na retificação passa uma parte extremamente grande de tempo fora do contato com a peça e pela maior condutibilidade térmica do CBN, a ação do fluido de corte e do ar na redução do calor gerado no corte é facilitada. Isso faz o grão retornar à temperatura ambiente e recuperar a sua capacidade de absorver calor no contato seguinte [11]. Como na retificação com CBN, o grau de afiação do abrasivo é mantido por tempos mais longos e a temperatura resultante na peça é muito inferior a da retificação com coríndon para as mesmas condições de corte. A dureza na peça dificilmente se altera quando empregado um rebolo de CBN e as deformações térmicas são sensivelmente menores, o que reduz a ocorrência de tensões residuais de tração que tendem a provocar trincas.

Mais detalhes sobre a estrutura morfológica dos cristais de CBN bem como sua classificação poderão ser encontrados no trabalho de Denis (2002) [30].

## **2.4 Emprego dos Rebolos Superabrasivos no processo de retificação**

As situações normalmente mais indicadas para aplicação de rebolos Superabrasivos são aquelas onde se necessita obter um ganho substancial em produtividade e em qualidade, tais como produções seriadas ou ferramentarias de alto desempenho, já que na maioria dos casos, são necessários investimentos iniciais em máquinas de elevadas velocidades de corte, nos sistemas de refrigeração, no sistema de dressagem, bem como no rebolo e também no sistema recondicionamento de rebolos [9,10].

O custo unitário de rebolos superabrasivos (DT e CBN) é muito superior ao de rebolos convencionais. Uma unidade volumétrica útil de CBN custa cerca de quinhentas vezes a mais do que a mesma quantidade de um abrasivo convencional [7]. Mesmo se

considerando que, para um dado volume de material retificado, um rebolo superabrasivo necessita de um volume de abrasivos sensivelmente menor do que com abrasivos convencionais, o custo de uma ferramenta é elevado, obrigando inclusive a se tomar maiores cuidados no manuseio. Além disso, situações nas quais são necessários rebolos de grandes dimensões apresentarão maiores dificuldades na utilização dos rebolos de diamante e CBN, seja pelo alto custo de aquisição ou mesmo pela dificuldade de fabricação dos mesmos [9,10].

O retorno econômico também é dependente das condições de processo que serão utilizadas. Para aproveitar os menores desgastes dos rebolos de superabrasivos e a possível redução nos tempos principais e de preparação, é necessário trabalhar com taxas de remoção de material bem superiores às dos rebolos convencionais. Isso só é possível no emprego de elevadas velocidades de corte e de avanço, as quais normalmente não são possíveis de serem realizadas em máquinas mais antigas. A utilização de velocidades de corte baixas, inclusive, resulta em maiores desgastes dos rebolos superabrasivos [9,10].

As máquinas retificadoras mais antigas precisam ser adaptadas à utilização de rebolos superabrasivos. Principalmente o eixo porta-rebolo precisa ser adequado às rotações mais elevadas, respeitando-se a rigidez elevada requerida pelos rebolos superabrasivos. Além disso, é necessário implementar sistemas de condicionamento dos rebolos, uma vez que estes não são dressados como rebolos convencionais. Sistemas de medição digitais e sistemas de emissão acústica permitem posicionar e reposicionar o rebolo com maior segurança, evitando colisões ou interferências maiores com a peça ou com parte da máquina-ferramenta. O sistema lubri-refrigerante deve ser adequado às maiores velocidades de corte empregadas.

#### **2.4.1 Especificação de rebolos com grãos superabrasivos**

A norma FEPA, Federação Européia de Fabricantes de Produtos Abrasivos, especifica os rebolos superabrasivos (Fig.7) classifica as diversas formas geométricas (Fig.8) dos rebolos conforme a ISO 8168 e a DIN 69800f.

As diferenças básicas dessa especificação, com relação aos rebolos com abrasivos convencionais (coríndon e carboneto de silício), encontra-se na inclusão das dimensões da camada abrasiva, no material do corpo base e na concentração do material abrasivo.

Por motivos econômicos, os rebolos de materiais superabrasivos são construídos de um corpo base e há apenas uma camada mais externa, constituída de material abrasivo e ligante.

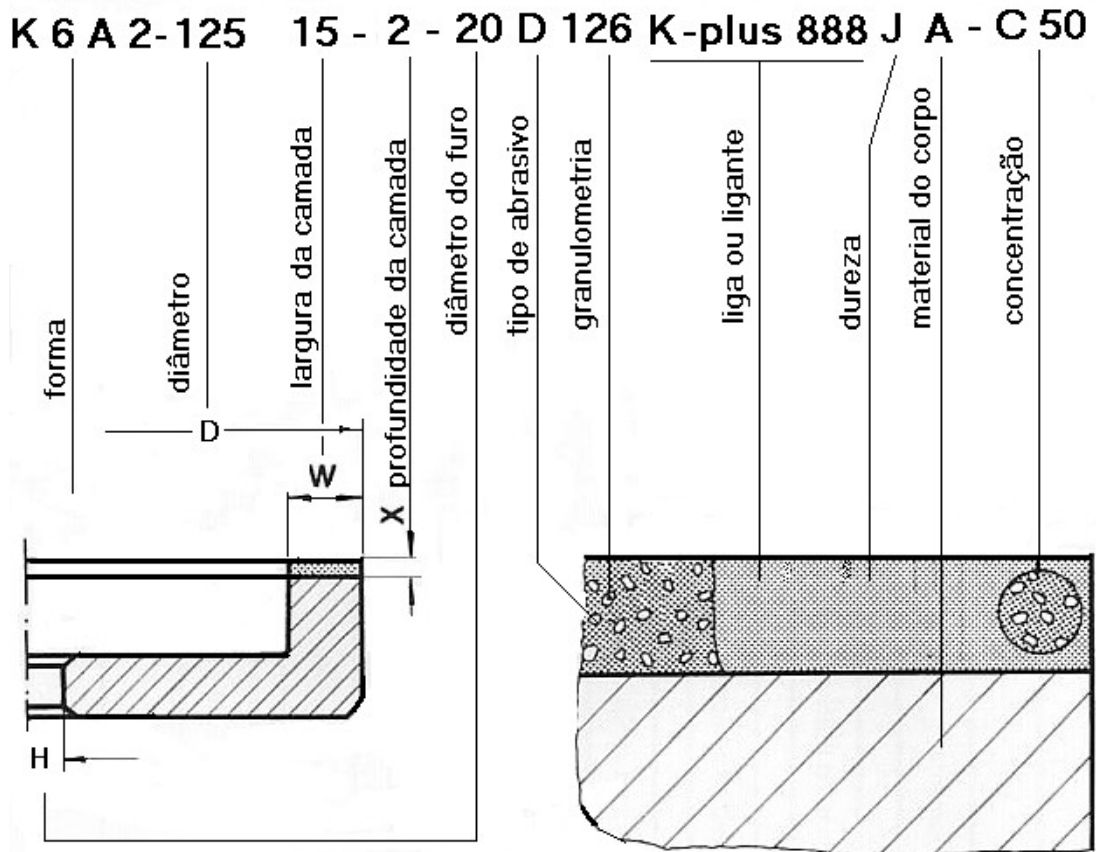


Figura 7 – Especificação de rebolos com superabrasivos conforme FEPA [6].

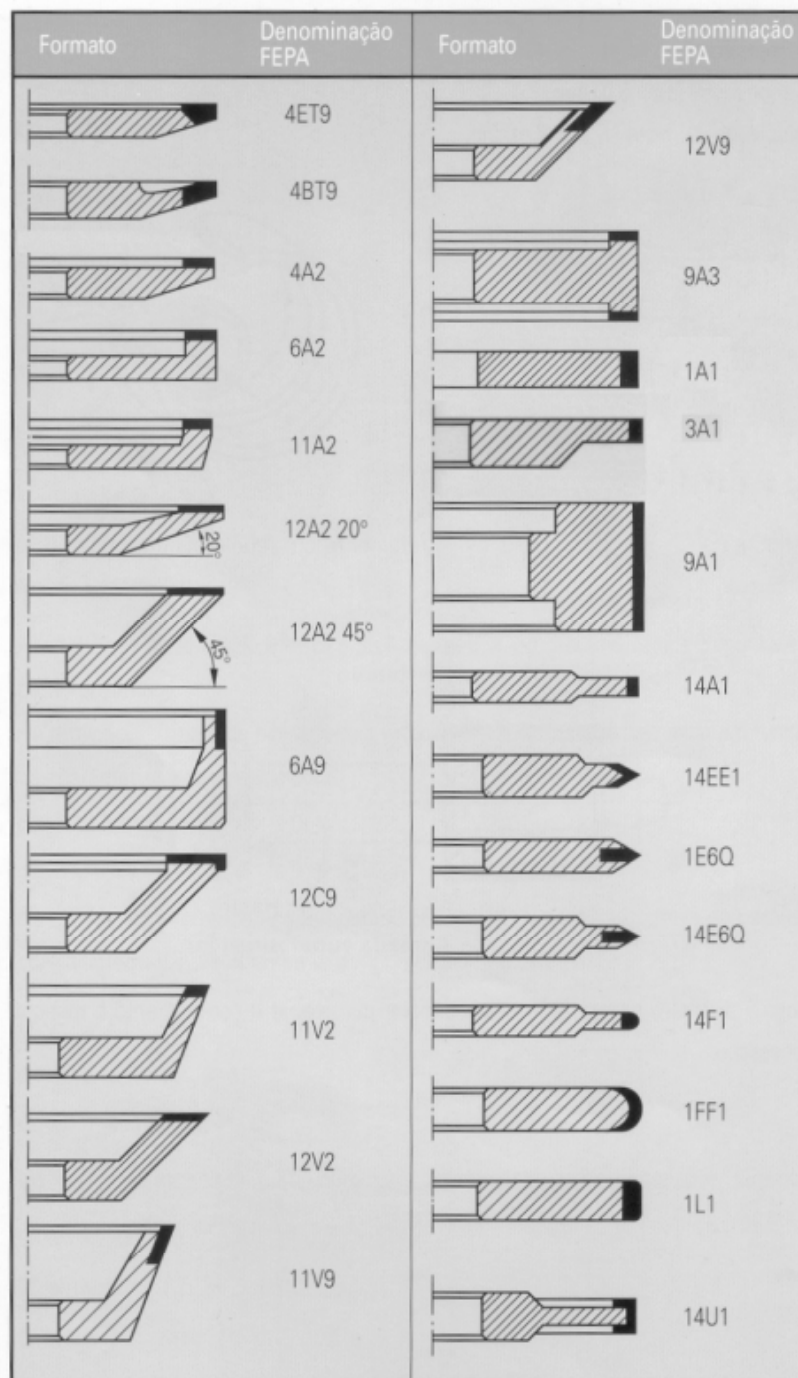


Figura 8 – Formatos de rebolos superabrasivos conforme FEPA [6].

#### 2.4.1.1 Dimensões da camada

A dimensão da camada abrasiva é basicamente definida pelas características da aplicação. Para atender às necessidades mais usuais em ferramentarias, as formas padronizadas pela FEPA são oferecidas pelos fabricantes (fig.8). Formas especiais são desenvolvidas para atender necessidades específicas de grandes usuários [6].

### 2.4.1.2 Material do corpo

A camada abrasiva é fixada sobre um corpo-base produzido de diversos materiais (como, por exemplo, alumínio, aço e resinas plásticas), selecionados de acordo com a aplicação e com os esforços termomecânicos ao qual será submetido [6].

#### 2.4.1.2.1 Corpo de Alumínio

As ligas de alumínio são muito empregadas na fabricação de rebolos superabrasivos com ligante resinóide. Seu módulo de elasticidade  $E = 69$  GPa proporciona um relativo amortecimento das vibrações causadas por desbalanceamentos decorrentes de excentricidades na montagem do rebole. Dependendo da liga empregada, sua resistência mecânica pode chegar a  $270$  N/cm<sup>2</sup> e proporciona aplicações em operações relativamente severas como a abertura de rasgos em materiais endurecidos. Seu peso específico  $\rho = 2,7$  g/cm<sup>3</sup> proporciona um baixo peso do rebole facilitando a montagem e a desmontagem na máquina retificadora. Sua condutibilidade térmica  $234$  W/m.K permite rápida dissipação de calor gerado na operação de retificação, evitando a queima do ligante resinóide e diminuindo a camada afetada pelo calor [6, 12].

#### 2.4.1.2.2 Corpo de Aço

A principal característica do corpo de aço é a sua resistência mecânica de  $415$  N/mm<sup>2</sup>. Por isso, são empregados para corpos de rebolos com ligantes resinóides, vitrificados e galvânicos [6, 13].

Os rebolos de ligante resinóide são largamente empregados em operações de corte de materiais como de aço rápido e de metal duro em afiadoras de ferramentas convencionais. Nesse caso, a forma geométrica é do tipo 14A1 [fig.8].

Rebolos de perfil reto (1A1) [fig.8], de ligante vitrificado, são muitos empregados em operações com altas velocidades de corte ( $100 - 200$  m/s) [14] e ligantes galvânicos, para médias velocidades de corte ( $45$  e  $100$  m/s). Como exemplo de aplicações, podem-se citar as operações de eixo de comando e de válvulas, os virabrequins e a retífica de lonas de freio (vide 4.1.1).

### 2.4.1.2.3 Corpo de Baquelite

A principal característica do corpo de baquelite é o amortecimento das vibrações. Esse tipo de material é muito empregado nas operações de retificação cilíndrica, em ferramentaria, nas quais são exigidas tolerâncias de forma geométrica, acabamento e dimensionais bastante apertadas [6].

### 2.4.1.3 Granulometria

As influências da granulometria sobre o processo de retificação utilizando grãos superabrasivos são similares aos de abrasivos convencionais. Entretanto, para a classificação de superabrasivos é usada a norma FEPA, na qual o tamanho médio de grãos é dado em micrometros. Para os abrasivos convencionais, conforme a ANSI, dados o tamanho=ho é dado em "mesh" (Tab.1) [6]. A disponibilidade dos grãos abrasivos é dada pelo fabricante e este disponibiliza os grãos abrasivos em vários tamanhos, divididos em faixas. A faixa de grãos larga é constituída de duas faixas de grãos estreitas.

Tabela 1 – Granulometria de grãos superabrasivos [6].

Padronização internacional para granulometria de diamante e nitreto de boro cúbico								
Granulometria por peneiração						Granulometria fina		
Diamante		CBN		US Standart ASTM-E-11-70		Diamante		
Variação dimensional	Tamanho	Variação dimensional	Tamanho	Variação dimensional	Tamanho	DIN 846	Denominação conf. Winter	Variação dimensional
D1181	D1182	B1181	B1182	16/18	16/20		D20	25-40
D1001		B1001		18/20			D20 B	30-40
D851	D852	B851	B852	20/25	20/30		D20 A	25-30
D711		B711		25/30		D15		10-25
D601	D602	B601	B602	30/35	30/40		D15C	20-25
D501		B501		35/40			D15 B	15-20
D426	D427	B426	B427	40/45	40/50		D15A	10-15
D356		B356		45/50		D7		5-10
D301		B301		50/60		D3		2-5
D251	D252	B251	B252	60/70		D1		1-2
D213		B213		70/80		D0,7		0,5-1
D181		B181		80/100		D0,25		< 0,5
D151		B151		100/120				
D126		B126		120/140				
D107		B107		140/170				
D91		B91		170/200				
D76		B76		200/230				
D64		B64		230/270				
D54		B54		270/325				
D46		B46		325/400				



#### 2.4.1.4 Ligantes

Os superabrasivos são empregados na retificação por possuírem propriedades de dureza, tenacidade, resistência à abrasão e condutibilidade térmica. Essas propriedades são melhores aproveitadas dependendo do ligante empregado. A liga deve ser suficientemente forte para reter os grãos de CBN ou de Diamante, à medida que eles se desgastam e se reafiam por fratura ou atrito. Somente depois de ficarem pequenos demais para ter uma ação efetiva de corte, os cristais superabrasivos devem soltar-se e serem substituídos pelos cristais que emergem da liga [6].

##### 2.4.1.4.1 Ligantes Resinóides

As ligas resinóides são as mais empregadas na fabricação de rebolos superabrasivos. O rebolos de liga resinóides são obtidas através da prensagem a quente de resinas. Materiais de enchimento e o superabrasivo podem se deteriorar e perder a capacidade de retenção dos grãos se trabalharem em temperaturas acima de 250 °C. Estas ligas são as menos duras, proporcionando ao processo de retificação uma redução das forças de corte. São os ligantes atualmente ainda mais utilizados.

A Saint-Gobain Abrasivos Ltda, que fabrica os rebolos superabrasivos com a marca Winter [6], detém a tecnologia de fabricação de ligas resinóides para diversas aplicações, conforme exemplo abaixo [Tab.2]:

**Tabela 2** – Exemplo de tipos de ligas resinóides [6].

Denominação comercial	Aplicações	Tipo do abrasivo
K+888 Y	Operações com metal duro	Diamante
KSS Y	Operações com aço rápido	CBN

##### 2.4.1.4.2 Ligantes Vitrificadas ou cerâmicas

Por apresentar durezas superiores aos resinóides e pela sua natural porosidade, presta-se a altas taxas de remoção. Por esse motivo, esse tipo de liga tem crescido rapidamente no mercado de rebolos de CBN. As ligas vitrificadas combinam as características das ligas resinóides e das ligas metálicas, proporciona numa redução no

esforço de corte e uma elevada resistência ao desgaste. A ação robusta da liga vitrificada requer menos material na matriz do que das ligas com resina ou das metálicas, para reter os cristais superabrasivos, e ainda apresentam maior resistência de liga [14].

Os níveis de porosidade da matriz nos rebolos de liga vitrificada estão entre 10% e 25%, comparados com cerca de 2% na maioria dos rebolos resinóides e de liga metálica. Essa porosidade abre espaço para a formação de cavacos e para o fluxo do meio refrigerante. A porosidade induzida em rebolos vitrificados de CBN varia entre 20% e 30%. Tal porosidade permite acondicionamento dos rebolos em uma única etapa enquanto que os rebolos de liga de resina e os metálicos requerem o perfilamento e a afiação para deixar o rebolo concêntrico e mais a limpeza do perfil do rebolo para expor os grãos superabrasivos através da remoção do material da matriz ao redor dos cristais [14].

#### **2.4.1.4.3 Ligantes metálicos sinterizados**

Ligantes Metálicos sinterizados, ou apenas metálicos, são tipicamente feitos de bronze, cobalto e tungstênio, entre outros metais. Esses apresentam maior dureza que os ligantes resinóides e vitrificados e, conseqüentemente, apresentam maiores resistências ao desgaste (maior vida), mas com um maior esforço de corte. Nessas ligas, os cristais superabrasivos devem ser suficientemente robustos e tenazes, para resistir à fratura decorrente do impacto e suportar a degradação térmica causada pelas altas temperaturas no processo de fabricação, bem como, na aplicação, tendo em vista que as principais utilizações desse tipo de rebolos são a retificação de materiais, como vidro e pedra, e quando se tem grande exigência na manutenção de perfis agudos [6]. Para a fabricação de rebolos metálicos, os pós-metálicos são misturados em temperaturas inferiores, para o diamante, e mais elevadas, para o Nitreto de Boro Cúbico.

#### **2.4.1.4.4 Ligante metálico eletro-depositado**

Nesse processo, o ligante metálico eletro-depositado (ou galvânico), normalmente de Níquel, serve para a fixação de apenas uma camada de grãos abrasivos. Isto garante uma forte ancoragem dos grãos que podem ficar até 70 % expostos [14], garantindo grandes espaços para alocação de cavacos e, com isso, grande agressividade à ferramenta. Esses rebolos são denominados de camada única (Fig.9). A espessura da camada de níquel é de,

aproximadamente, 30%, variando até 70% da altura do grão, dependendo da aplicação e das características do processo. Por exemplo, um grão de superabrasivo (Dt ou CBN), tamanho D/B252, pode ter uma camada de níquel com espessura variando entre 100 a 125  $\mu\text{m}$ . Para esse processo de fabricação de rebolos, a superfície dos cristais superabrasivos deve ser limpa, para garantir uma adesão uniforme, e o cristal não deve ser eletricamente condutivo. Se o grão de superabrasivo for revestido com uma camada metálica, o processo de eletrodeposição galvânica resultará no fechamento total de espaços entre os grãos abrasivos, resultando em uma redução do desempenho do rebolo. Por esse motivo, os rebolos de liga galvânica contêm grãos superabrasivos sem revestimento [15]. O revestimento galvânico pode ser positivo ou negativo. Revestimento positivo é o mais empregado.

Mesmo que para uma seleção aprimorada do tamanho do grão, no revestimento galvânico positivo os grãos apresentam uma protusão bastante diversificada, levando a acabamentos ruins das peças produzidas. A medida que grãos mais profundos gastam, a qualidade das superfícies produzidas melhora. Para contornar este problema, os rebolos galvânicos positivos podem ser dressados por dressamento por contato (1 a 5  $\mu\text{m}$  de interferência com o rebolo dressador) [17]. No entanto, o elevado custo do dressamento, geralmente inviabiliza esta operação. Conseqüentemente os rebolos galvânicos são empregados principalmente em operações de desbaste.

Os rebolos com aplicações galvânicas negativas são produzidos para o dressamento de rebolos, brunidores de óxido de alumínio e carboneto de silício.

A liga de níquel eletro-depositado apresenta excelentes propriedades de retenção de grãos. Isso proporciona elevação da velocidade de corte de até 280 m/s [14], considerando que pesquisas revelam que é possível chegar até 500 m/s [16]. A vida termina quando a camada abrasiva estiver consumida.

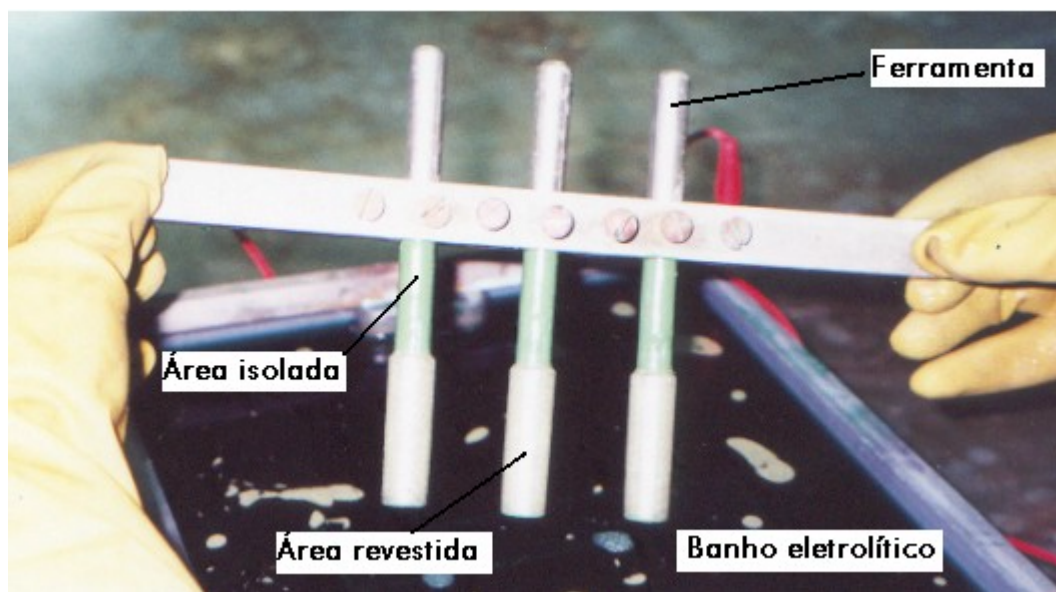


Figura 9 – Processo de deposição galvânica [6].

#### 2.4.1.5 Concentração

A concentração é a quantidade, em peso, de grãos superabrasivos na unidade de volume [Tab.3]. Uma concentração de  $4,4 \text{ Kt/cm}^3$  é dita como sendo 100% [Tab.3]. Ela é geralmente expressa em  $\text{kt/cm}^3$  ( $1\text{Kt} \sim 0,2\text{gr.}$ ) e indica qual percentual de grãos abrasivos forma a camada abrasiva. A escolha de uma maior concentração implica em uma maior quantidade de grãos atuando sobre a peça e em um melhor acabamento superficial. Entretanto, os espaços entre os grãos ficam menores, prejudicando a remoção de cavacos e aumentando as temperaturas, as forças de retificação e a camada termicamente afetada pelo calor [6].

Tabela 3 – Concentrações padrão para rebolos de DT e CBN [6].

Diamante	CBN	$\text{Kt/cm}^3$
C50	V120	2,2
C75	V180	3,3
C100	V240	4,4
C125	V300	5,5

### 2.4.2 Condicionamento de rebolos Superabrasivos

O recondicionamento de rebolos superabrasivos é mais difícil de ser executado devido à elevada dureza do material abrasivo, o qual desgasta rapidamente os dressadores estáticos, e também porque leva a um alisamento da superfície do rebolo [7]. Por isso, faz-se necessária a utilização de dois processos normalmente distintos de recondicionamento: o perfilamento e a afiação do rebolo [9,10].

As funções do perfilamento são as de dar forma ao rebolo, para fazê-lo girar com o mínimo de erros de batimentos e para dar aos bordos um perfil especial, capaz de reproduzir a forma desejada [18]. Além disso, o perfilamento também deve promover uma renovação da camada de grãos abrasivos para o corte. Como a camada de grãos abrasivos cegos de Diamante ou de CBN é removida, normalmente, junto com o material ligante que os ancora, o rebolo perde em poder de corte. Os métodos de perfilamento mais utilizados são os que empregam ferramentas dotadas de cinemática própria, como com rebolos de carboneto de silício, blocos ou rolos de aço, rolos de esmagamento ou discos diamantados [7].

Na afiação, por sua vez, é gerada uma determinada exposição dos grãos abrasivos acima do ligante através da remoção do mesmo. Esse processo é necessário principalmente em rebolos com ligantes resinóides para produzir a porosidade indispensável ao armazenamento do cavaco durante a retificação. Em rebolos com abrasivos convencionais, a porosidade natural dos mesmos dispensa a operação de afiação. O método usual para afiação de rebolos superabrasivos utiliza barras abrasivas de coríndon. Também encontram-se aplicações jatos abrasivos ou rolos de aço com abrasivos soltos pressionados sobre o rebolo através da ação do fluido de corte [17].

### 2.4.3 Fluidos de corte e refrigeração no processo de retificação

Os fluidos refrigerantes desempenham uma função muito importante no processo de retificação. Um bom fluido ou um fluido inadequado pode fazer com que a operação seja um sucesso ou um fracasso. A qualidade e a quantidade do fluido refrigerante influencia na qualidade da peça usinada, na rugosidade, na tolerância dimensional e no custo operacional e ambiental. Por essas razões, a escolha de um fluido deve ser estudada com

bastante atenção, devendo-se optar pelo produto mais adequado para as condições de trabalho consideradas.

Funções dos fluidos refrigerantes na retificação:

- Proporcionar uma lubrificação na interface entre a peça e o rebolo.
- Manter uma uniformidade de temperatura na área de trabalho. Mais importante que reduzir a temperatura da peça é mantê-la em uma temperatura constante [6].
- Remoção do cavaco produzido na área de trabalho, evitando que o arraste/compressão do mesmo risque a peça e feche os poros do rebolo, provocando maior número de dressagem ou limpeza.

Os agentes refrigerantes e os fluidos de corte na retificação devem ser analisados sob diversos aspectos [19]:

#### 2.4.3.1 Propriedades dos fluidos de corte e refrigeração

O calor gerado durante uma operação de retificação desenvolve-se principalmente pelo atrito entre peça e rebolo, pelo trabalho de separação do material, bem como pela energia gasta no auto-dressamento do rebolo durante a operação [fig.2].

O atrito deve ser encarado como um processo energético superficial; isto é, quanto menor a energia específica na camada superficial do material a ser retificado em relação ao rebolo, tanto menores são as forças envolvidas no processo. O fluido de corte e refrigeração tem, portanto, a função de baixar a energia na camada superficial na usinagem.

Dessa forma, conforme o tipo de material, podem ser usados diversos fluidos refrigerantes, sendo o mais comum a água com diferentes aditivos, emulsões à base de água com adição de óleos minerais ou sintéticos, bem como óleos minerais puros e sintéticos.

#### 2.4.3.2 Água com aditivos diversos

A água tem a vantagem de dissipar quantidades relativamente grandes de calor, uma vez que tem um calor específico de aproximadamente 1 Kcal/Kg.K e uma condutibilidade

térmica de 0,5 Kcal/mh.K. No entanto, não é adequada para a redução da energia da camada superficial da maioria dos materiais.

Através de aditivos compostos como carbonato de sódio e nitreto de sódio pode-se obter melhorias.

#### **2.4.3.3 Emulsões de água com óleos minerais ou óleos sintéticos**

Emulsões proporcionam vantagens de redução da energia da camada superficial do material com elevado coeficiente de calor específico e condutividade térmica da água. O teor de material emulsificante e sua composição determinam as propriedades específicas da emulsão como agente de refrigeração e de lubrificação.

Nas emulsões para as operações de retificação, deve-se usar água limpa neutralizada, com um pH de aproximadamente 7 e com um teor de cloro de 150 mg/litro. A dureza total da água deve ser de 10 a 20 °dH. Uma dureza abaixo de 5 °dH proporciona um mau efeito refrigerante. Uma dureza elevada (acima de 25°dH) pode gerar emulsões instáveis e conduzir a corrosões na máquina e nas peças usinadas.

O teor relativamente baixo de emulsificante e o elevado teor de óleo mineral dá origem a uma emulsão de aspecto leitoso. Um aumento de emulsificante e uma redução no teor de óleo geram uma transparência cada vez maior na emulsão.

#### **2.4.4 Fluídos de refrigeração e de corte**

Óleo puro com agente de refrigeração e de corte tem a grande vantagem de aumentar o poder lubrificante na área de contato entre peça e rebolo. Assim obtém-se uma redução das forças de corte e, portanto, uma redução no calor gerado no processo de retificação.

Como desvantagem podemos citar o calor específico bem menor de 0,45 Kcal/Kg.K e a menor condutibilidade térmica de 0,12 Kcal/mh.K.

Nos óleos utilizados para operações de retificação são adicionados aditivos para reduzir especialmente o atrito desenvolvido no ponto de corte e, conseqüentemente, o calor resultante. Os aditivos EP (extrema pressão) formam, na área de contato entre a peça e o

rebolo, camadas de proteção que reduzem o atrito. Essas camadas podem resistir à extremas pressões. Os materiais mais empregados de EP são cloro, enxofre e fósforo.

Os óleos sulfurosos possuem excepcional resistência à compressão, ao passo que óleos clorados ou sulfo-clorados se destacam pelo fato de reagirem com a superfície da peça e desenvolvem elevada resistência à compressão. Estes são usados na usinagem de aços inoxidáveis e ligas de titânio.

Misturas de óleos minerais graxos (éster), ou chamados de impregnados graxos, têm melhores propriedades de formação de película e maior molhabilidade, bem como uma maior resistência à pressão.

#### **2.4.5 Óleos sintéticos de corte e refrigeração**

Fluidos de corte sintético, na maioria das vezes, não são a base de óleos minerais. Frequentemente baseiam-se em substâncias orgânicas (por exemplo: glicol).

No campo dos fluidos de corte sintéticos, procuram-se caminhos através dos quais os efeitos ainda não estão suficientemente esclarecidos. Alguns fluidos de corte sintéticos devem, através da ionização na área de corte, gerar uma redução no desenvolvimento de calor. Outros devem, via componentes polares positivos, gerar uma atração dos materiais resistentes a altas pressões, formadores de película sobre a superfície metálica carregada negativamente, e assim baixar o atrito e o desenvolvimento de calor.

#### **2.4.6 Comparação entre fluídos refrigerantes**

A tabela 4 mostra, com base nos tipos de fluidos refrigerantes, as propriedades que afetam o regimento e o custo. Nessa tabela pode-se verificar que as propriedades do óleo integral são superiores aos demais fluidos refrigerantes mesmo tendo uma capacidade de troca de calor ruim. Isso é observado por seu maior coeficiente de lubrificação, reduzindo o atrito do rebolo sobre a peça. Também pode obter uma maior eficiência na lubrificação com uma maior pressão de alimentação nos bicos de refrigeração. Mesmo tendo um preço de aquisição maior, na aquisição do óleo integral, isso pode ser compensado pelo menor custo com a filtragem e pelos menores custos com a troca do fluido, pois este permite o seu uso por tempo indeterminado [19], necessitando apenas ser completado seu volume por



perdas no processo. Há casos de usuários que ficaram por vinte anos sem efetuar a troca do óleo integral.

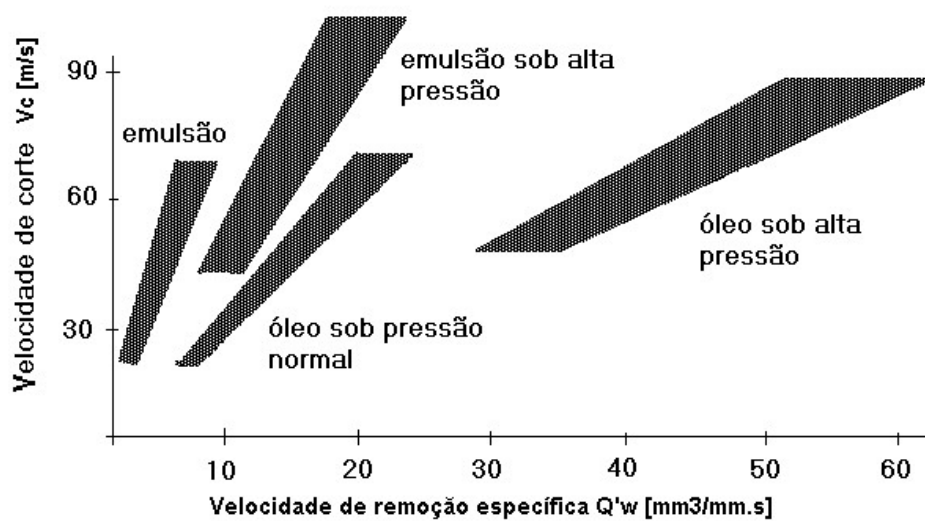
**Tabela 4** – Comparação entre propriedades de fluídos refrigerantes [20].

Propriedades	Sintéticos	Semi-sintéticos	Emulsões	Óleo Integral
Troca de calor	Excelente	Bom	Regular	Ruim
Lubrificação	Ruim	Regular	Bom	Excelente
Estabilidade	Bom	Regular	Ruim	Excelente
Filtração	Excelente	Bom	Regular	Excelente
Efeitos ambientais	Excelente	Bom	Regular	Bom
Custos	Excelente	Bom	Regular	Regular
Vida do rebolo - G	Ruim	Regular	Bom	Excelente

#### 2.4.7 Recomendações para o emprego de fluídos refrigerantes

O uso adequado do fluido refrigerante acarreta inúmeras vantagens no processo de retificação, tais como:

- Redução da camada termicamente afetada pelo calor
- Aumento da vida do rebolo
- Aumento da velocidade de corte
- Aumento da velocidade de remoção



**Figura 10** – Recomendação conforme Studer [19].

Conforme o fabricante de máquinas retificadoras Studer [19], a figura 10 fornece recomendações para o emprego de diversos tipos de fluidos refrigerantes, em função da velocidade de remoção e da velocidade de corte.

#### 2.4.8 Vantagens no emprego do óleo integral

Para se obter um alto rendimento na retificação com rebolos de CBN, recomenda-se o uso preferencial do óleo integral. Os fluidos refrigerantes, a base de água, produzem vapor a altas temperaturas no ponto de contato entre o rebolo e a peça retificada. Esse vapor d'água ataca o Borazon (CBN) decompondo-o (Tab.5) [3,20]. A formação de óxido de boro ( $B_2O_3$ ) na superfície do grão de CBN forma uma camada protetora que evita uma posterior oxidação e, conseqüentemente, sua deterioração. Porém, o óxido de boro ( $B_2O_3$ ) é solúvel em água e o fenômeno da oxidação continua, provocando a deterioração dos grãos de Borazon, atacando em primeiro lugar as arestas de corte, acelerando o desgaste do rebolo e, conseqüentemente, diminuindo sua vida.

**Tabela 5** – Reações químicas do Nitreto de Boro com refrigerante a base de água [3,20].

a)	$2 BN + 3 H_2O$	$\longrightarrow$	$B_2O_3 + 2 NH_3$
b)	$4 BN + 3 O_2$	$\longrightarrow$	$2 B_2O_3 + 2 N_2$
c)	$B_2O_3 + 3 H_2O$	$\longrightarrow$	$2 H_3BO_3$

O óleo integral elimina a decomposição do Borazon associada à formação de vapor da água a altas temperaturas, diminuindo o calor gerado pelo atrito do rebolo sobre a peça.

#### 2.4.9 Vida do rebolo em função do fluido refrigerante

Os ataques físicos e químicos, sobre os grãos abrasivos, levam a um desgaste do gume de corte e, portanto, influenciam na vida do rebolo. O gráfico abaixo [Fig.11] evidencia o comportamento da vida de um rebolo de CBN na retificação de aço temperado com condições de retificação constantes e diferentes tipos de fluidos refrigerantes. A relação  $G$ , que é a divisão entre o volume retirado da peça e o volume gasto do rebolo, evidencia o melhor comportamento da vida do rebolo quando é empregado o óleo de corte integral.

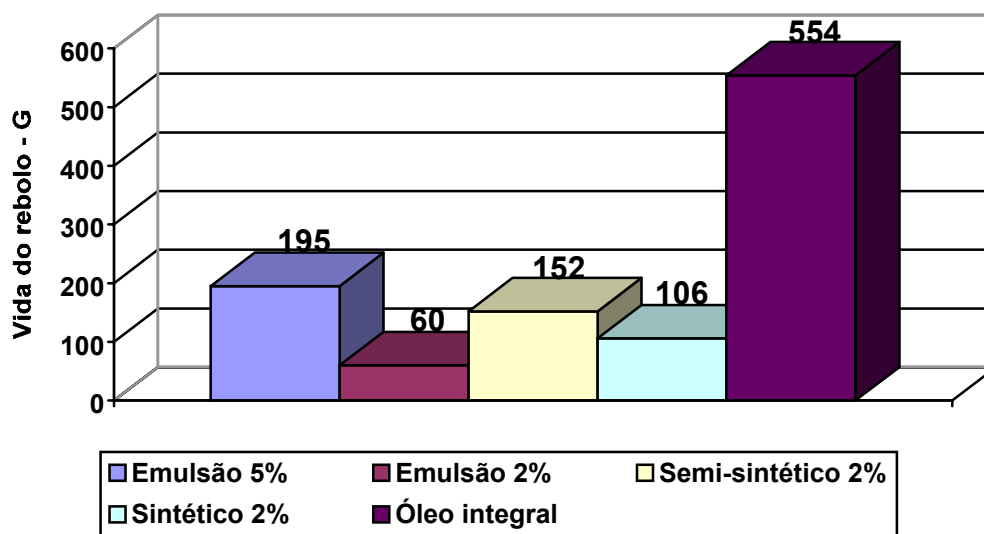


Figura 11 - Vida do rebolo em função do tipo de fluido refrigerante [20].

#### 2.4.10 Pressão e vazão do fluido refrigerante

Os sistemas de refrigeração para retificadoras convencionais estão dimensionados para trabalhar com pressões do fluido na faixa de 2 a 6 bar e vazões da ordem de 25 l/min [6]. Para o emprego de retificadoras a alta velocidade, são requeridos para cada operação projetos específicos para o sistema de refrigeração.

Com o aumento da velocidade de corte, há o aumento proporcional da dificuldade de penetração do fluido refrigerante sobre a névoa formada por ele mesmo no processo de retificação. Quanto mais próximo do rebolo estiver essa névoa, maior é a tendência dela girar com a mesma velocidade tangencial do rebolo. Desta forma, surge a necessidade de aumentar a eficiência da troca de calor no ponto de atrito entre rebolo e peça. Isto é obtido através da melhoria do sistema de refrigeração com aumento da pressão do fluido refrigerante, com a introdução de bicos de limpeza e a otimização do projeto do perfil dos bicos de refrigeração bem como de seu posicionamento. Dessa forma, a vida dos rebolos superabrasivos é maior com o aumento da pressão do fluido refrigerante. Máquinas retificadoras modernas, como réticas Junker, para operações de eixo de comando de válvulas, trabalham com altas pressões da ordem de 12 a 20 bar (Fig.12) [20,33]. Além disso, pode-se aumentar a eficiência do corte mantendo os poros do rebolo limpos. Para

isso, é necessário empregar bicos especiais com altíssima pressão do fluido refrigerante da ordem de 20 a 50bar [20,33].

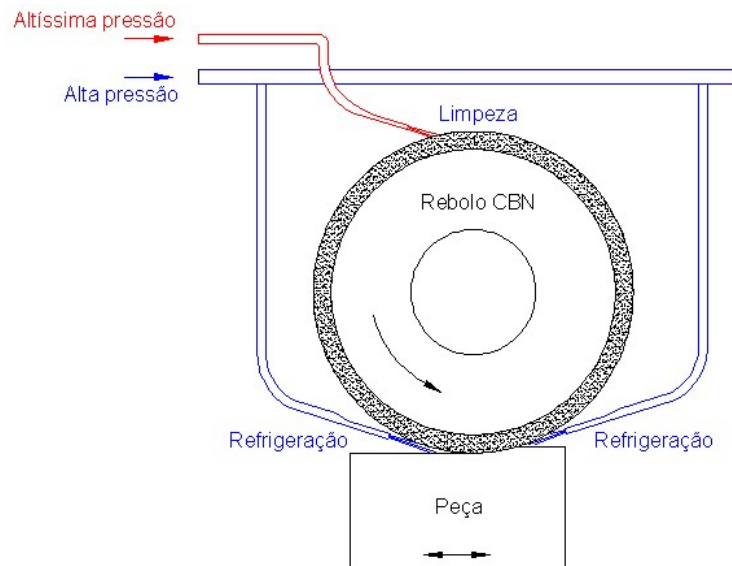


Figura 12 – Tubeiras de limpeza e refrigeração [20].

### 2.4.11 Retificação a altas velocidades

A busca pela excelência em qualidade e produtividade no mercado de autopeças impulsionou, nos últimos 20 anos, a pesquisa e o desenvolvimento de máquinas-ferramentas mais velozes e dinamicamente mais estáveis. O processo de retificação a altas velocidades de materiais endurecidos ou macios, empregando rebolos superabrasivos, oferece excelente potencial para produzir peças de boa qualidade com alta produtividade e com aumento da vida do rebolo [14].

Na década de 80, máquinas retificadoras com velocidades de corte na faixa de 80 m/s, trabalhando com rebolos de CBN com ligas vitrificadas, eram consideradas excepcionais. Pesquisas revelam que é possível chegar a 500 m/s com corpos com características geométricas especiais [16], mas, para muitos autores, a retificação a altas velocidades está na faixa entre 100 e 200 m/s [14].

M.J.Jackson [14], propõe a divisão da retificação de altas velocidades em três campos:

1. Retificação de alta velocidade com rebolos de CBN.
2. Retificação de alta velocidade com rebolos de óxido de alumínio.
3. Retificação com rebolos de óxido de alumínio em conjunto com técnicas de dressagem contínua (retificação CD).

Altas espessuras equivalentes de cavaco entre 0,5 e 10  $\mu\text{m}$  [Fig.13] são um aspecto característico de retificação de alta velocidade. Em uma grande proporção das aplicações de retificação de alta velocidade empregam-se rebolos de CBN. Uma característica essencial dessa tecnologia é que a performance do CBN é utilizada quando são empregadas altas velocidades de corte.

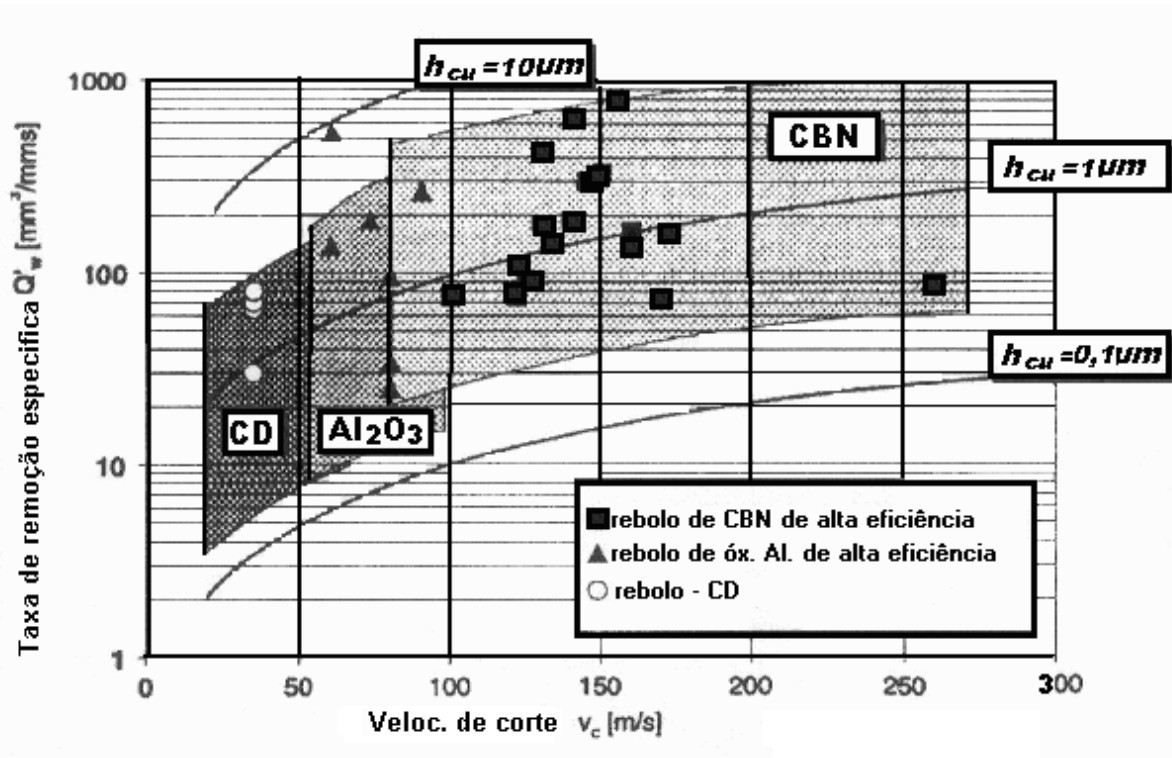


Figura 13 – Taxa de remoção para altas velocidades de corte [14].

#### 2.4.11.1 Base teórica para retificação a altas velocidades

Como o grão abrasivo não possui uma geometria definida, a análise do mecanismo de corte na retificação é feita por métodos estatísticos. A espessura média de cavaco não deformado,  $h_{cu}$ , é dependente da densidade estatística das arestas cortantes,  $C_{stat}$ , e das variáveis geométricas e cinemáticas (equação 2.1) [3,14]:

$$h_{cu} = k \cdot \left[ \frac{1}{C_{stat}} \right]^\alpha \left[ \frac{v_w}{v_s} \right]^\beta \left[ \frac{a_e}{d_{eq}} \right]^\gamma \quad (2.1)$$

onde  $v_w$  é a velocidade da peça,  $v_s$  a velocidade do rebolo,  $a_e$  a profundidade de corte,  $d_{eq}$  o diâmetro equivalente do rebolo, e  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são maiores do que zero. Baseado nesta relação, deduz-se que um aumento na velocidade de corte, assumindo as outras condições constantes, resultará em uma redução na espessura do cavaco não-deformado. Com isso, como há uma menor retirada de material por volta do rebolo, há uma redução na força de corte, levando à vantagens esperadas pela retificação que é caracterizada pela redução nas forças de usinagem, no desgaste do rebolo e na rugosidade da superfície da peça.

Conseqüentemente, aumentar a velocidade do rebolo pode levar a uma melhoria da qualidade da peça ou a um aumento da produtividade. Infelizmente, essa tendência não é verificada com a temperatura. Com o aumento da velocidade de corte,  $V_c$ , conseqüentemente, há um aumento da energia cinética do rebolo  $E_c$  (equação 2.2), onde  $M$  é a massa do rebolo e  $V_c$  é a velocidade periférica.

$$E_c = \frac{M * (V_c)^2}{2} \quad (2.2)$$

Com isto, a quantidade de energia introduzida na peça tende a ser aumentada (considerando as taxas de remoção constante) e conseqüentemente aumentará a camada termicamente afetada pelo calor. Quando a taxa de remoção de material é também aumentada, a força tangencial, que é crescente, resulta em um aumento maior na potência de retificação. Porém, a quantidade de energia térmica introduzida na peça é menor do que na situação inicial quando se tem o mesmo volume de peça usinada, apesar da velocidade de corte e da taxa de remoção de material serem maiores. Essas considerações mostram que a produtividade da usinagem pode ser aumentada usando retificação de alta velocidade sem, no entanto, ter que aceitar efeitos térmicos indesejáveis em componentes retificados. Nesse caso, a ação do refrigerante e a natureza do grão abrasivo são de extrema importância para dissipar o calor gerado e com isso garantir o acabamento e a íntegra da superfície da peça retificada, bem como a vida do rebolo.

#### 2.4.11.2 Rebolos para altas velocidades de retificação

Rebolos de CBN para retificação de alta velocidade têm requisitos especiais em relação à resistência à fratura e ao desgaste. Boas características de amortecimento, alta rigidez e boa condutibilidade térmica são também desejáveis. Essas ferramentas, normalmente, consistem em um corpo de alta resistência mecânica e em uma camada abrasiva relativamente fina, ligada ao corpo por um adesivo de alta resistência. A conveniência do CBN como um material abrasivo para usinagem de alta velocidade de materiais ferrosos é atribuída a sua extrema dureza e sua durabilidade térmica e química [14].

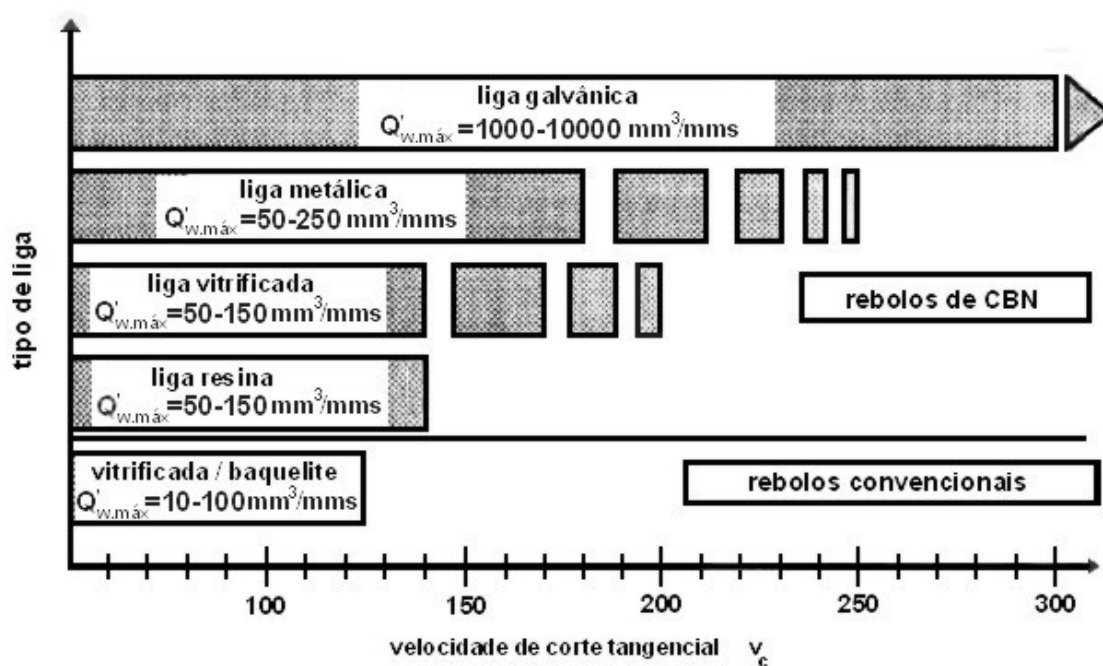


Figura 14 – Tipos de ligantes para altas velocidades de corte [14]

Altas velocidades de corte são atingíveis acima de tudo com sistemas de ligas metálicas (Fig.14). Um método que usa tais sistemas de ligas é a eletro-deposição galvânica. Nesta, os rebolos são produzidos com uma única camada de material grão abrasivo de CBN. A liga de níquel eletro-depositada apresenta excelentes propriedades de retenção de grãos. Isso proporciona uma exposição dos grãos abrasivos e grandes espaços para cavacos, conforme visto no capítulo 2.

A alta rugosidade das superfícies cortantes dos rebolos CBN galvânicos tem efeitos desvantajosos. A alta rugosidade é causada devido a pontas de grãos expostas, resultado de diferentes formas e diâmetros de grãos.

Sistemas de ligas multicamadas para rebolos CBN incluem ligas de metal sinterizadas, ligas resinóides e ligas vitrificadas. Ligas de metálicas multicamadas possuem alta dureza de liga e resistência ao desgaste. Perfilar ou afiar essas ferramentas são processos complicados, devido à alta resistência mecânica das ferramentas. Ligas de resina sintética permitem uma ampla faixa de adaptação para características de ligas. Contudo, essas ferramentas requerem também um processo de afiação após o perfilamento. O potencial para aplicação prática de ligas vitrificadas deve ainda ser explorado por completo. Em conjunto com corpos convenientemente desenvolvidos, novos desenvolvimentos de ligas



permitted velocities of up to 200 m/s. In comparison with other types of wheels, vitrified wheels allow easy reprofiling and at the same time have high levels of resistance to wear. In contrast to impermeable resins and metal wheels, the porosity of the vitrified wheel can be adjusted in a wide range by varying the formulation and the manufacturing process. As the structure of the CBN wheel of a vitrified wheel results in a subsequent increase in chip space after dressing, the grinding process is simplified, or can be eliminated in numerous applications.

The selection of the appropriate type of vitrified CBN wheel for high speed grinding is more complicated than for aluminum oxide wheels. The size of the abrasive grain of CBN depends on the specific metal removal rate, the surface roughness required and the equivalent diameter of the wheel.

In addition to the need to choose the appropriate wheel system for the application, the resistance of the wheel body to high cutting velocities must be improved. In the case of very high cutting velocities, the conventional wheel design, involving a rectangular body and a hole, frequently leads to excessive and irregular expansion of the body and fracture of the abrasive layer. To eliminate the possibility of wheel failure at high velocities, the material and the geometry of the wheel body must be capable of handling high cutting velocities. Another objective of the wheel body design is the reduction of the magnitude of the centrifugal forces, optimizing the wheel body shape without compromising operational safety. Excessive stress in the wheel body must be avoided and the smallest possible expansion of the body is tolerated. A reduction in mass is also necessary to shift the natural critical frequencies of the system in the direction of higher angular velocities. Developments in wheel design for high speed grinding have focused on redesigning and optimizing the wheel body shape for vitrified CBN and electroplated wheels [16,21,14].

#### **2.4.11.3 Máquinas retificadoras para alta velocidade**

The advantages of high speed CBN grinding can only be fully utilized if the machine-tool is adapted for operation at high cutting velocities. To achieve extremely high cutting velocities, the wheel and bearings must operate at speeds of the order of 20,000 rpm. The motor-wheel system must

funcionar com extrema precisão e mínima vibração para minimizar o nível de forças dinâmicas de processo. Conseqüentemente, um alto nível de rigidez é necessário para a máquina-ferramenta. Também é necessário um balanceamento de rebolos de alta velocidade usando técnicas de balanceamento dinâmico em altas velocidades de operação. Essas técnicas são necessárias para que a qualidade da peça e a vida útil da ferramenta sejam preservadas.

Outra consideração importante é que o nível de potência de giro é necessário quando o aumento na velocidade angular se torna considerável. A potência total necessária é composta da potência de corte,  $P_c$ , e da perda de potência,  $P_l$  (equação 2.3):

$$P_{\text{total}} = P_c + P_l \quad (2.3)$$

A potência de corte é o produto da força tangencial de retificação pela velocidade de corte (equação 2.4):

$$P_c = F_t * v_c \quad (2.4)$$

A perda de potência de giro é constituída pela potência perdida no eixo,  $P_L$ , e pelas perdas de potência causadas pelo líquido refrigerante,  $P_{KSS}$ , e pela lavagem do rebolo,  $P_{SSP}$ , então (equação 2.5):

$$P_l = P_L + P_{KSS} + P_{SSP} \quad (2.5)$$

As medidas de força mostradas na figura 15 confirmam o efeito da velocidade de corte na redução da potência de corte. Contudo, a potência perdida aumenta significativamente. A potência de retificação,  $P_c$ , aumenta quando a velocidade de corte aumenta e todos os outros parâmetros de usinagem permanecem constantes. No entanto, isso significa que a grande potência, requerida em velocidades máximas de corte, é advinda do forte aumento de potência causado pela rotação do rebolo, do fornecimento de líquido refrigerante e da lavagem do rebolo [14,51].

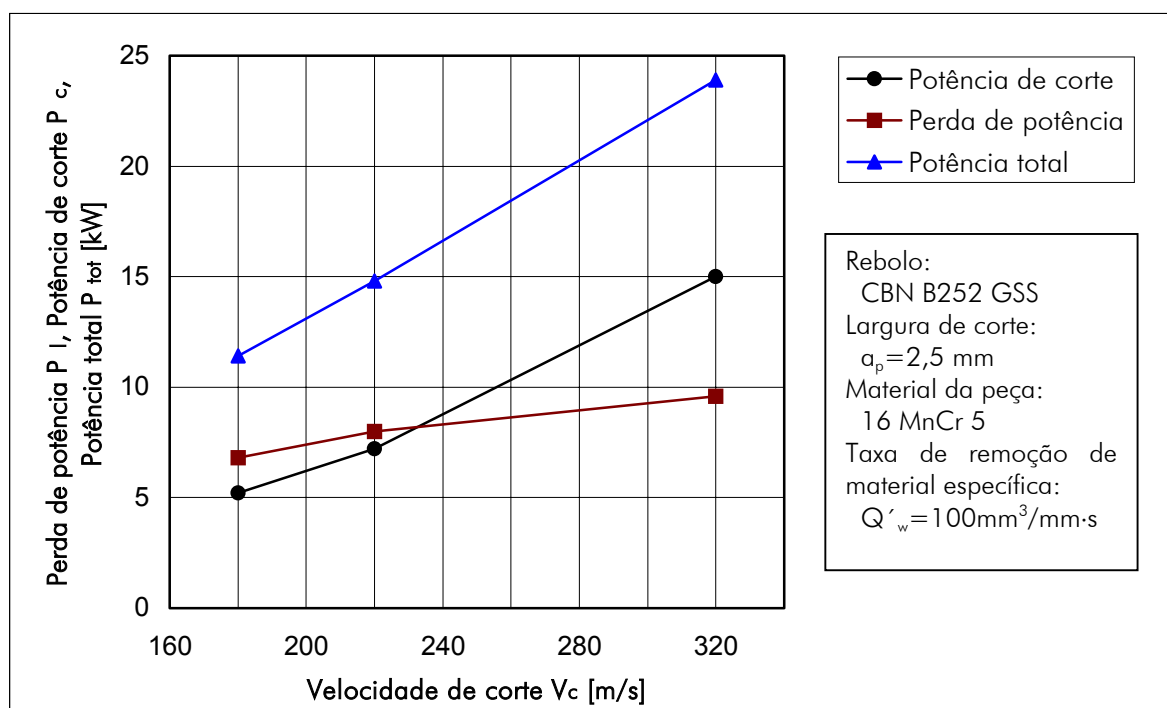


Figura 15 – Potência requerida de corte com o aumento da velocidade de corte [14].

A quantidade e a pressão do líquido refrigerante fornecido ao rebolo e ao processo de lavagem do rebolo são um foco de atenção de projetistas de máquinas-ferramenta. A perda de potência associada à rotação do rebolo é complementada por perdas devido ao fornecimento de líquido refrigerante e à lavagem do rebolo. As perdas dependem de parâmetros de usinagem, o que implica que as configurações da máquina e o fornecimento de líquido refrigerante devem ser otimizados para a retificação de alta velocidade.

Além da vantagem de reduzir, consideravelmente, a potência requerida para a retificação, a otimização do sistema de refrigeração também oferece benefícios ecológicos como resultado da redução da quantidade de líquido refrigerante utilizada. Existem vários métodos de fornecimento de líquido refrigerante tais como o bocal de fluxo livre, que é usado convencionalmente, o bocal de base, que assegura “lubrificação em quantidade reduzida”, e o bocal de mistura, que assegura “lubrificação em quantidade mínima”. O objetivo em comum é assegurar que um fornecimento adequado de líquido refrigerante esteja presente na interface rebolo-peça. Os sistemas diferem substancialmente em relação à sua operação e à quantidade de energia necessária para fornecer o líquido refrigerante.

Um bocal de base, ou um fornecimento através do rebolo, proporciona o direcionamento do líquido refrigerante direto na zona de contato rebolo-peça. Uma redução

substancial no fluxo volumétrico pode ser atingida desse modo. Em comparação ao bocal de base, o fornecimento através do rebolo requer projetos e processos de produção de rebolos e fixações mais complexos. Uma vantagem desse sistema de fornecimento é sua independência em relação a um processo de retificação particular [14]. Ambos os sistemas envolvem uma redução drástica nas pressões de fornecimento, pois o rebolo provoca aceleração do líquido. Uma redução mais eficaz na quantidade de líquido refrigerante resulta em uma “quantidade mínima” fornecida, chegando a vários mililitros de líquido refrigerante por hora. Como o efeito de refrigeração é reduzido, bocais dosadores são usados exclusivamente para lubrificar a zona de contato. Sistemas de lubrificação para rebolos de retificação de alta velocidade foram revistos por Treffert [22] e Brinksmeier [23].

#### **2.4.11.4 Fusos para alta velocidade**

Fusos de alta velocidade são unidades compactas de alta velocidade para serem montadas sobre a máquina ferramenta e são constituídos por mancais de rolamento ou magnéticos e equipamentos periféricos de controle. Em função do tipo de mancal, esses podem ser classificados em mancal de rolamento ou mancal magnético.

##### **2.4.11.4.1 Fusos de mancal de rolamento**

O estado atual de desenvolvimento mostra que já existem fusos de alta velocidade com rolamento de esferas para usinagem de alta velocidade. Dentre os vários modelos do fabricante de fusos GMN podemos citar o modelo HC 170 que pode trabalhar a velocidade de 40.000 rpm com 40 kW de potência [24]. A firma UVA, fabricantes de máquinas de ultraprecisão, desenvolveu um fuso de alta velocidade com mancais de esfera modelo EU4-150, para trabalhar a 150.000 rpm com potência de 1,6 KW [25]. Esses equipam as máquinas retificadoras UVA's que são empregadas nas operações de retificar furos de bicos injetores. A única desvantagem encontrada nesse tipo de fuso está na vida do rolamento, que deve ser trocado com a frequência necessária em função da qualidade da peça.

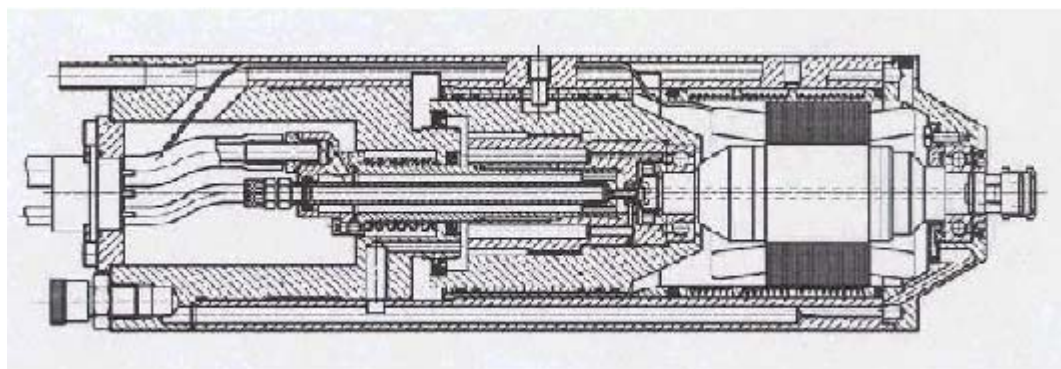


Figura 16 – Fuso de mancal de rolamento UVA modelo EU4-150 [25].

#### 2.4.11.4.2 Mancais magnéticos

Os mancais magnéticos agem através da suspensão do eixo-rotor do fuso dentro de um campo magnético gerado entre magnetos opostamente colocados (Fig.17).

Em princípio, como não há nenhum contato metal-metal enquanto o campo magnético está atuando, não há atrito, não há necessidade de lubrificação, há pouca geração de calor e rigidez.

Cada magneto tem um circuito elétrico composto de um amplificador de potência, um microprocessador e um sensor de posição. Quando o sensor detecta que o eixo-rotor distanciou-se do seu magneto associado, o microprocessador aumenta a corrente no magneto trazendo o eixo-rotor para mais perto. Com a colocação dos magnetos em posições opostas, os sensores mantêm o rotor continuamente centralizado.

A centralização no sentido radial é obtida por dois pares de magnetos que circundam o eixo-rotor exercendo uma força magnética no mesmo. Um mancal magnético em separado posiciona o eixo axialmente [26].



Figura 17 – Fuso com mancal magnético IBAG [42].

## 2.5 Normas de segurança para rebolos em geral

A norma ABNT NB33 e PB26 reúne as informações pertinentes às dimensões; características e conceitos sobre marcação; tipos e segurança no uso de rebolos em geral, que estão baseadas na ANSI B7, nos Estados Unidos; e a DAS e FEPA, na Europa [6,29].

De uma forma geral, a segurança na aplicação de rebolos depende do fabricante do rebolo, do usuário e do fabricante da máquina retificadora. Dessa forma, quando se evidencia a responsabilidade de cada um dos envolvidos, pode-se concluir que a operação de remoção de material com o emprego de rebolos é uma das operações mais seguras dentro dos processos de usinagem [30]. Abaixo são enumeradas algumas destas responsabilidades:

### I. Responsabilidade do fabricante

- Produzir rebolos com maior resistência à ruptura possível compatível com a aplicação a qual são destinados.
- Manter um rigoroso controle de qualidade para garantir a segurança para o usuário, indicando a máxima velocidade de trabalho.
- Orientar o usuário na melhor escolha do produto e em seus parâmetros de aplicação.
- Providenciar embalagens e transporte adequados para que o rebolo chegue ao seu destino em perfeitas condições de uso.
- Desenvolver constantemente melhores produtos buscando a melhoria contínua.

### II. Responsabilidade do fabricante da máquina retificadora

- Projetar e construir máquinas retificadoras adequadas com maiores fatores de segurança.
- Construir flanges e sistemas de montagem de resistência mecânica adequada.
- Projetar dispositivos na máquina, como carcaça de proteção e portas de segurança, pensando sempre na segurança do operador.

### III. Responsabilidade do usuário

- Examinar o material recebido, conferindo se não foi danificado no transporte.
- Manter uma rígida disciplina no manuseio, estocagem e transporte até a máquina retificadora, observando as recomendações do fabricante de rebolos.
- Avaliar periodicamente o estado das máquinas retificadoras, velocidades, elementos de transmissão, protetores, etc.
- Treinar o operador a operar as máquinas retificadoras, tendo a consciência de que o elemento mais importante é a segurança.

Para que um reboło atinja seu maior desempenho em termos de segurança e qualidade da peça no processo de retificação, é preciso que ele atenda a três condições básicas:

- a. Sua montagem na máquina retificadora deve ser isenta de defeitos de fabricação ou erros de montagem no flange, como trincas, quebras e lascamentos atingíveis através do teste de segurança.
- b. Que no processo de retificação sejam evitados esforços centrífugos próximos a resistência a ruptura, evitando trabalhar com velocidades próximas ao limite indicado pelo fabricante.
- c. Evitar o desbalanceamento dinâmico que junto com os esforços centrífugos, os quais crescem com o aumento da velocidade tangencial, criam solicitações sobre o fuso da máquina retificadora e elevam os níveis de vibrações do sistema causando redução da vida dos mancais. Também o desbalanceamento causa trepidações sobre a peça que, por sua vez, provocam o surgimento de ondulações através do movimento da mesa da máquina retificadora o que resulta em um acabamento ruim da peça, bem como em dificuldades em manter as tolerâncias dimensionais [34].

Para satisfazer as condições acima citadas, os fabricantes de abrasivos seguem recomendações de teste de segurança e os fabricantes de máquinas retificadoras desenvolveram dispositivos de balanceamento dinâmico para reduzir os níveis de vibrações em processo. Tal é a importância desse assunto neste trabalho, que se dedica este capítulo ao tema vibrações e balanceamento de rotores conforme se vê a seguir.

### 2.5.1 Recomendações para teste de segurança de rebolos

Partindo do princípio que não existem rebolos irrompíveis (inquebráveis) e que várias podem ser as causas de quebra de um rebolo na fabricação, esses devem ser submetidos a testes de segurança no fabricante. Deve-se informar ao usuário qual é a velocidade máxima de trabalho. A norma americana ANSI B7 solicita que todos os rebolos sejam testados a 1,5x velocidade de trabalho. Já a norma europeia DAS solicita que seja feito um primeiro lote de amostra e que essas sejam testadas a 1,32x velocidade de trabalho sem causar nenhum dano às amostras, que não podem ser comercializáveis. Os rebolos que tiverem as suas amostras aprovadas, deverão ser testados a 1,1x velocidade de trabalho [34].

O fabricante de rebolos Saint-Gobain Ltda, que produz os rebolos superabrasivos de marca Winter, garante a qualidade de seus produtos testando suas amostras a 1,7x velocidade de trabalho. Os rebolos são comercializados após teste de 1,1x da velocidade de trabalho. A fabricante de rebolos Winter também recomenda que sejam usados os EPIs (Equipamentos de Proteção Individual), que os rebolos sejam inspecionados antes de serem montados e após a montagem não excedam velocidade máxima, bem como que seja inspecionado a montagem do flange e o acoplamento do rebolo, além de evitar bater o rebolo e armazená-lo em locais apropriados, entre outros cuidados [29].

## 2.6 – Desbalanceamento estático e dinâmico de rotores

Um rotor perfeitamente balanceado é aquele cuja massa se distribui uniformemente em torno do seu eixo de rotação. Isso equivale a dizer que existe a coincidência entre o eixo de rotação e o eixo principal de inércia do rotor. Desconsiderando-se as forças que causam a rotação deste rotor e que o sustentam, nenhuma outra força age sobre os seus mancais quando se encontra em movimento giratório. Assim, nenhum tipo de vibração pode ser detectado [34,35].

Esse rotor é meramente teórico, uma vez que por menores que sejam as tolerâncias de fabricação de um componente e por mais homogêneos que sejam os materiais utilizados em sua fabricação, sempre haverá uma desuniformidade na distribuição de massa, causando um desbalanceamento.

Havendo um excesso de massa de um lado do rotor, a força centrífuga atuante sobre esse lado mais pesado supera a força centrífuga atuante sobre o lado oposto, forçando



então o lado mais leve na direção do lado mais pesado, sendo a força resultante a causadora da vibração.

A força centrífuga causadora da vibração é, em suma, causada pela excentricidade do centro de gravidade do rotor, quando de sua rotação. Tal força é dada pela equação 2.6.

$$F = m \varepsilon \omega^2 \quad (2.6)$$

Onde  $m$  é a massa do rotor,  $\varepsilon$  é a excentricidade ou a distância do centro de gravidade ao eixo de giro do rotor e  $\omega$  é a velocidade angular em radianos por segundo. Essa força é contrabalançada pela soma das reações que surgem nos mancais do rotor. A magnitude das mesmas depende da posição relativa entre centro de gravidade e mancais.

### 2.6.1 Desbalanceamento estático

O desbalanceamento estático surge quando o eixo principal de inércia de um rotor encontra-se deslocado, no entanto, paralelo em relação ao eixo de rotação do mesmo, como mostrado na figura 18. A distância entre o centro de gravidade (CG) e o eixo de rotação – a excentricidade - origina a força centrífuga quando da rotação do rotor. No caso do desbalanceamento estático, a massa de desbalanceamento e o CG encontram-se no mesmo plano normal ao eixo de rotação, conforme figura 18.a. Um rotor com duas massas de desbalanceamento iguais e eqüidistantes com relação CG (Fig.18.b) caracteriza também um desbalanceamento estático, uma vez que o efeito de ambas é equivalente ao efeito de uma massa localizada no plano do CG.

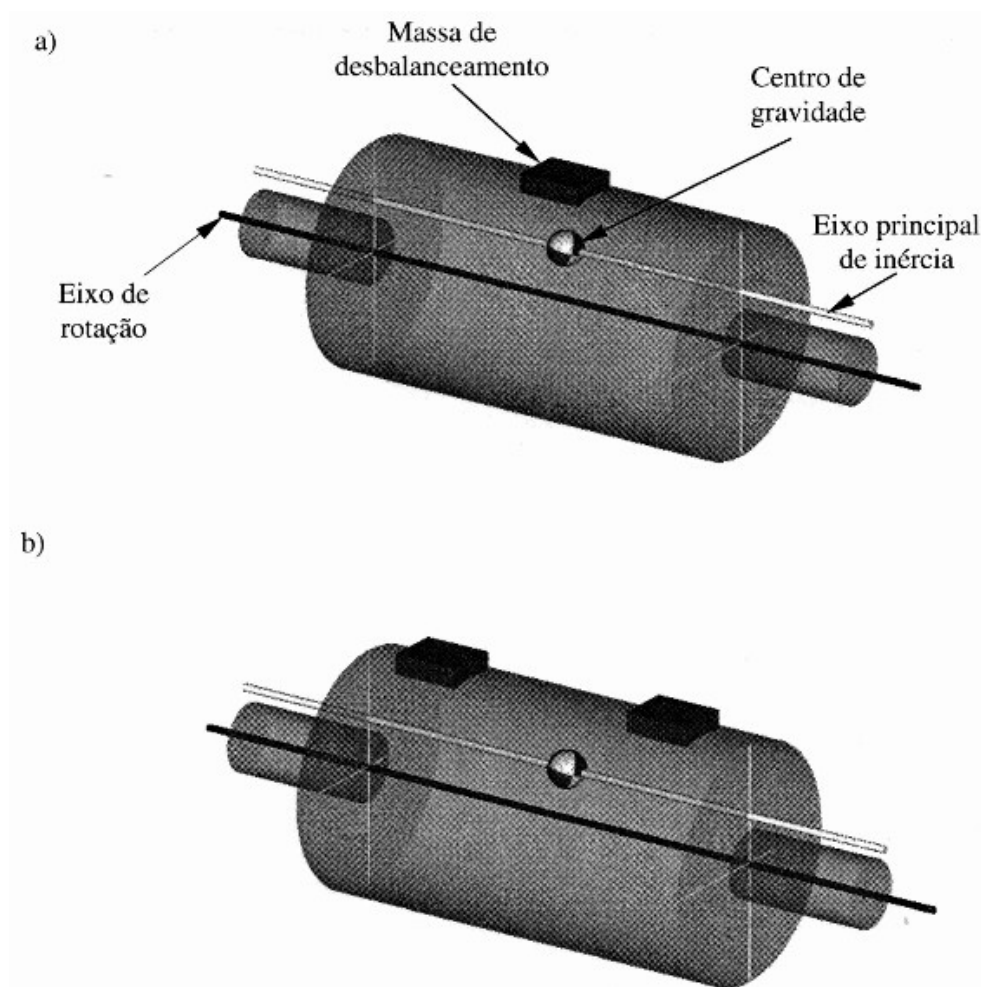


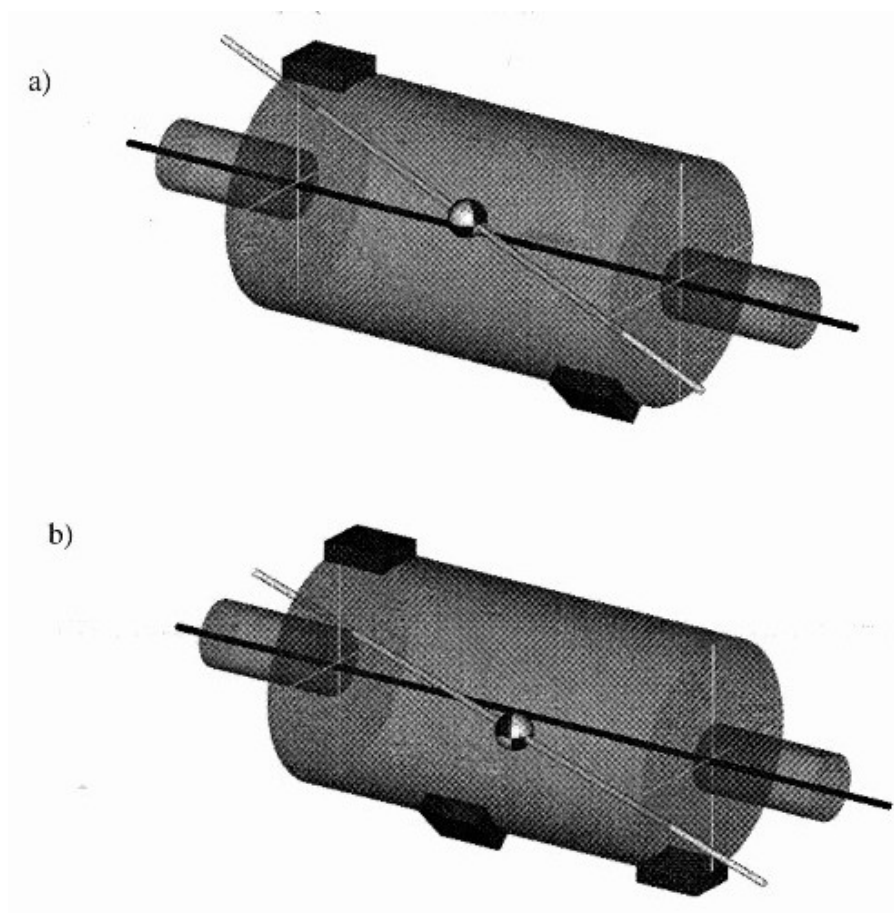
Figura 18 - Desbalanceamento estático [34,35]

A eliminação desse tipo de desbalanceamento é obtida movendo-se o centro de gravidade em direção ao eixo de rotação do rotor. Isso é feito através da adição ou da retirada de massa do rotor, de forma que a força radial, causada por essa adição ou pela retirada, seja igual em módulo, mas de direção oposta à força causada pela excentricidade do CG.

### 2.6.2 Desbalanceamento dinâmico

O desbalanceamento dinâmico ocorre quando o eixo principal de inércia não encontra o eixo de rotação. Esse é o tipo de desbalanceamento mais freqüente. As massas de desbalanceamento nesse caso encontram-se deslocadas de um ângulo diferente de  $180^\circ$ , como mostrado na figura 19. A figura 19b mostra um binário de desbalanceamento combinado com um desbalanceamento estático deslocados de um ângulo diferente de

180°, o que resulta em um desbalanceamento dinâmico. Como nos dois tipos anteriores de desbalanceamentos, o dinâmico também só pode ser corrigido com massas de correção em pelo menos dois planos perpendiculares ao eixo de rotação.



**Figura 19** - a) Desbalanceamento dinâmico; b) Binário de desbalanceamento combinado com balanceamento estático deslocados de ângulo diferente de 180° [34,35]

### 2.6.3 - Tipos de balanceamento

Dois são os tipos de balanceamento, já comentados anteriormente: balanceamento em um e balanceamento em dois planos.

Balanceamento em um plano é o tipo de balanceamento em que é necessária a adição de somente uma massa de balanceamento no plano perpendicular ao eixo de rotação e que contém o CG. Esse procedimento é adequado somente à compensação de um desbalanceamento estático, uma vez que, neste caso, os eixos principais de inércia e da rotação já se encontram paralelos. O balanceamento em um plano tem a capacidade de deslocar o eixo de inércia em direção ao eixo de rotação, sem, no entanto, ter a capacidade de girar um com relação ao outro.

O balanceamento em dois planos é o procedimento necessário à compensação de desbalanceamentos do tipo quase-estático, binário e dinâmico. Nesse balanceamento, também chamado de balanceamento dinâmico, é necessária a adição de massas de balanceamento em dois planos diferentes. Tal procedimento permite que, com as devidas massas de balanceamento, o eixo principal de inércia sofra uma rotação com relação ao eixo de rotação e que o CG seja deslocado de encontro ao eixo de rotação.

Mais informações sobre a descrição dos equipamentos usada para balanceamento podem ser encontradas nos catálogos dos fabricantes [35,36], conforme referências bibliográficas no capítulo 10.

#### **2.6.4 - Recomendações e normas para balanceamento**

As normas DIN-ISO 1940 e ABNT NB 66 apresentam diagramas obtidos a partir de valores experimentais que relacionam parâmetros ligados ao balanceamento com vários casos de utilização. O diagrama mais conhecido é o apresentado na figura 20, que relaciona a qualidade de balanceamento com o desbalanceamento residual máximo e com a máxima rotação do rotor [37].

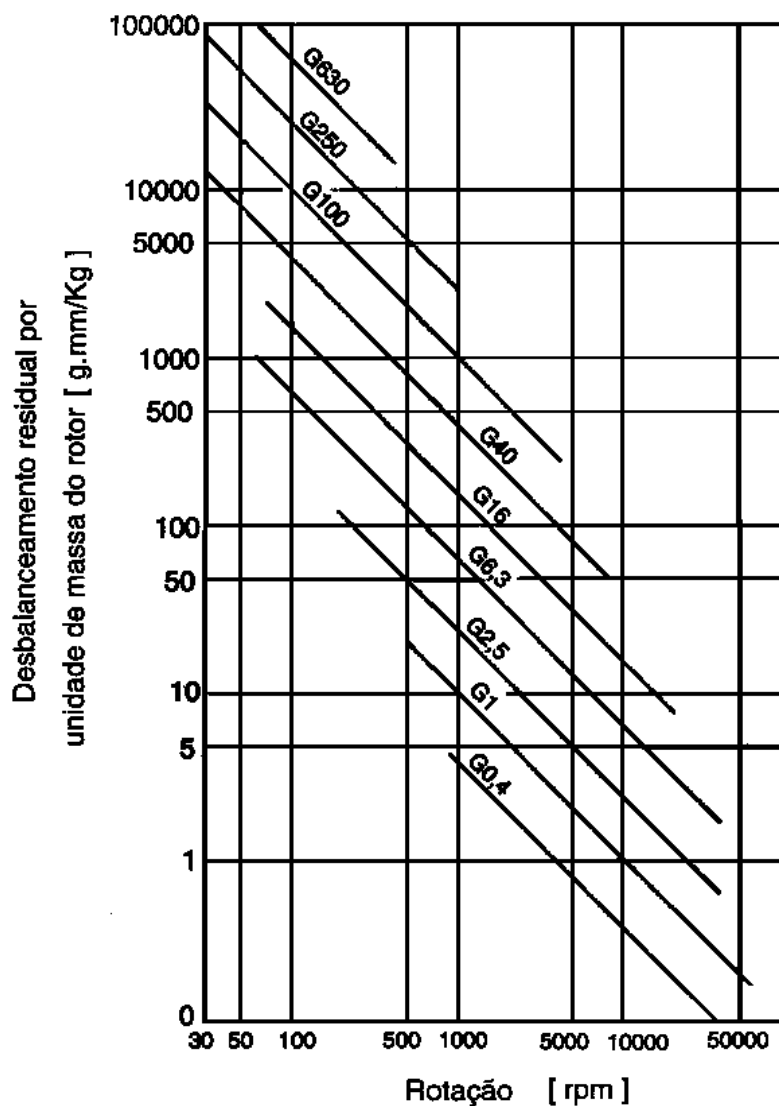


Figura 20 - Desbalanceamento residual para diferentes qualidades de balanceamento [37]

O parâmetro G, chamado de qualidade do balanceamento, corresponde à velocidade linear do centro de gravidade de um elemento girante em torno de seu eixo de rotação. Assim, a qualidade de balanceamento G 2,5, por exemplo, indica que o centro de gravidade de um rotor deve girar, no máximo, com uma velocidade linear de 2,5 mm/s em torno do eixo de rotação. O parâmetro G é função da velocidade angular  $\omega$  e da excentricidade, segundo a equação 2.7.

$$G = e \cdot \omega \tag{2.7}$$

O desbalanceamento residual  $U$  é dado pelo produto entre a massa do rotor (em gramas) e a excentricidade, ou seja, distância (em milímetros) entre o centro de gravidade do rotor e seu eixo de rotação (equação 2.8). O desbalanceamento residual significa o quanto o balanceamento pode se afastar do ideal. O eixo das ordenadas do diagrama da figura 20 representa o desbalanceamento residual máximo por unidade de massa do rotor (em kg), que pode também ser interpretado simplesmente como a excentricidade máxima em milímetros, multiplicada por 1.000, como apresentado na equação dimensional (equação 2.9).

$$U = e \cdot m \quad (2.8)$$

$$U/m = [\text{mm}] \cdot [\text{g}] / [\text{kg}] = [\text{mm}] \cdot 1000 \quad (2.9)$$

A relação entre qualidade de balanceamento  $G$  e desbalanceamento residual máximo  $U$  pode ser obtida a partir das equações 2.7 e 2.8.

$$e = U/m = G/\omega$$

$$U = m \cdot G/\omega \quad (2.10)$$

Pode-se perceber através da equação 2.10, que, quanto maior a velocidade angular e quanto menor a massa, menor é o desbalanceamento residual máximo para uma mesma qualidade de balanceamento  $G$ . Na prática, no entanto, a DIN-ISO 1940 não pode ser aplicada a casos nos quais são exigidas altas rotações ou altas qualidades de balanceamento [37].

Assim, por exemplo, segundo a equação acima, um fuso com massa de 13 kg, que deva girar a uma rotação de 30.000 rpm e apresentar qualidade de balanceamento  $G2,5$ , deve apresentar um desbalanceamento residual máximo de 10 g·mm. Esse valor de desbalanceamento residual pode ser conseguido com equipamentos de balanceamento disponíveis no mercado. A mesma qualidade de balanceamento para um fuso, com massa de 2 kg, que deva girar a 50.000 rpm, corresponde a um desbalanceamento residual de

0,9 g-mm, o que é praticamente impossível de ser medido. Sendo assim, geralmente a norma DIN-ISO é usada para rotações abaixo de 20.000 rpm ou para massas maiores que 5 kg [37].

### 2.6.5 - Desbalanceamento causado por ferramentas

Após o balanceamento do fuso de uma máquina-ferramenta pelo próprio fabricante, um nível de desbalanceamento residual perfeitamente aceitável é atingido. No entanto, a fixação de uma ferramenta a este fuso pode vir a ser problemática. A fixação de uma ferramenta prejudica as características dinâmicas do fuso, uma vez que abaixa a frequência do primeiro modo de ressonância, devido ao aumento do comprimento da porção em balanço e do aumento da massa do fuso. Além disso, a própria ferramenta possui um desbalanceamento que repercute na vibração de todo o sistema fuso-ferramenta [37].

Problemas causados por mudanças nas características dinâmicas do fuso são levados em conta já na fase de projeto, de forma que não são críticos. Problemático, no entanto, é o desbalanceamento da ferramenta, que além de causar forças radiais, origina também momentos fletores, que devido ao fato da ferramenta estar em balanço, não podem ser desconsiderados. O desbalanceamento causado pela ferramenta pode ter duas origens: falta de simetria na distribuição de massa da própria ferramenta e erro de posicionamento da ferramenta com relação ao fuso.

Ferramentas possuem massas relativamente pequenas, de forma que o desbalanceamento residual para altas rotações é muito pequeno. No entanto, uma ferramenta pode ser considerada parte do fuso, sendo a massa do sistema a soma das massas deste e da ferramenta. Assim, a aplicação da norma DIN-ISO com relação à ferramenta é, se não problemática, no mínimo, discutível [37].

A figura 21 mostra o desbalanceamento residual admissível para várias qualidades de balanceamento para uma ferramenta com massa de 1,5 kg, enquanto que a figura 21.b mostra curvas de qualidade de balanceamento G para várias massas de ferramenta.

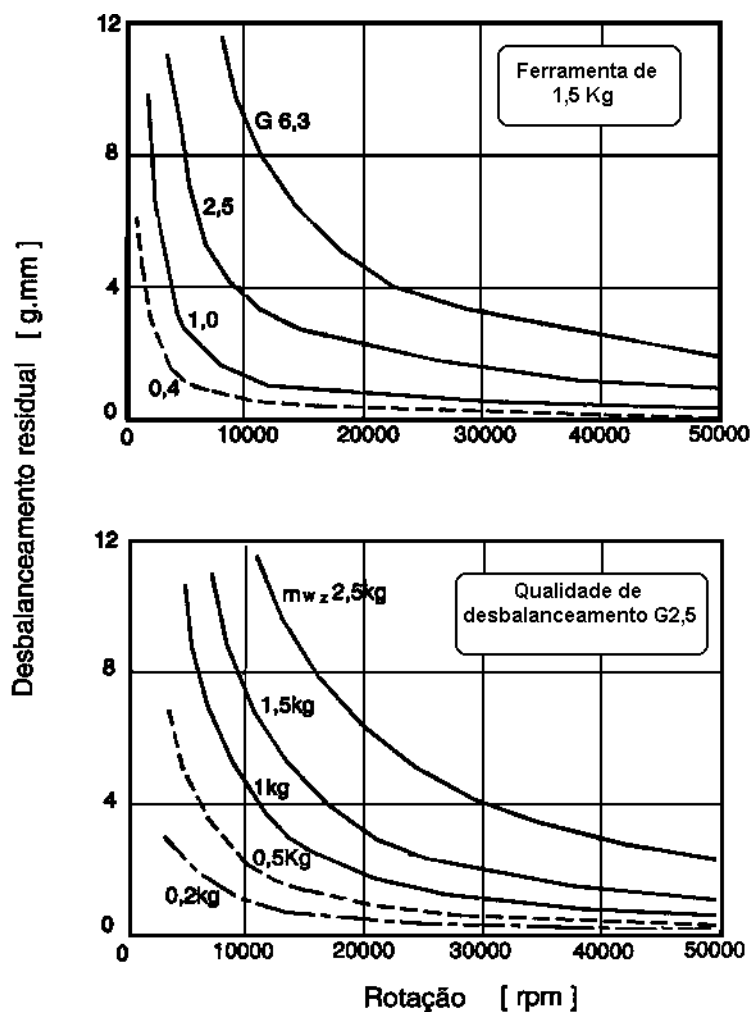


Figura 21 - Desbalanceamento residual [37]: a) Para uma ferramenta de 1,5 Kg e para diferentes qualidades de balanceamento; b) Para  $G = 2,5$  e para diferentes massas de ferramenta.

Visando minimizar os problemas causados pelo desbalanceamento da ferramenta, vários procedimentos de balanceamento podem ser adotados. A figura 22 mostra, com relação à rotação, o batimento de uma haste presa a um mandril balanceado de três modos diferentes. A linha contínua representa o batimento da haste para o mandril balanceado fora da máquina. A uma rotação de 20.000 rpm o batimento chegou a 50  $\mu\text{m}$ , embora o batimento estático fosse de apenas 5  $\mu\text{m}$ .



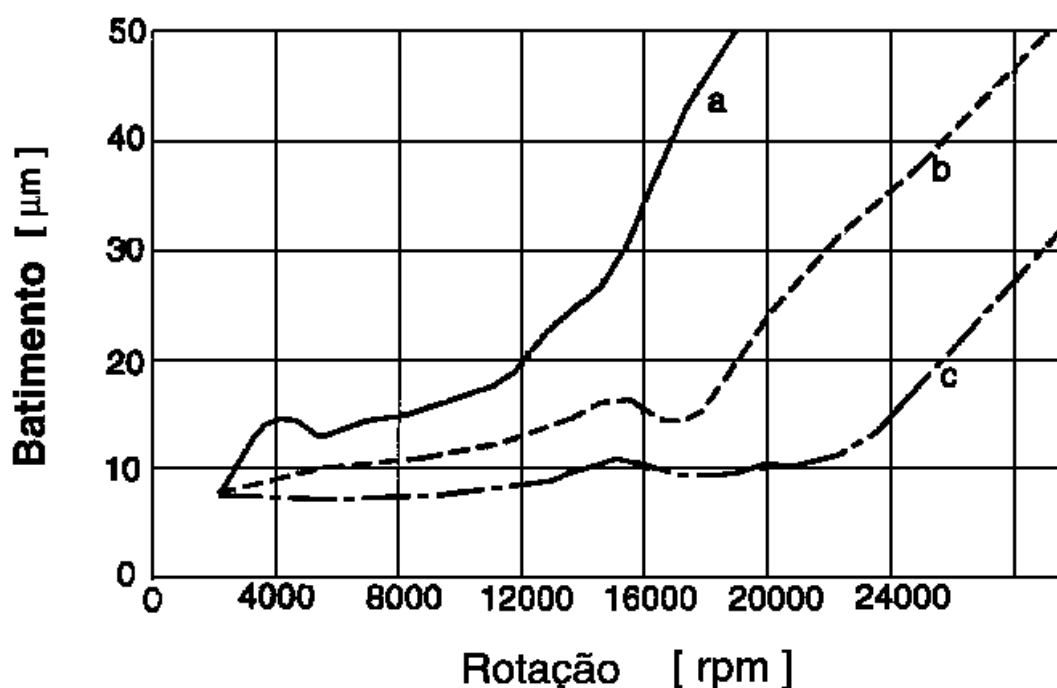


Figura 22 - Batimento em função da rotação para [37]: a) Mandril balanceado fora da máquina; b) Mandril balanceado na máquina; c) Mandril balanceado em dois planos fora da máquina.

Com o balanceamento do sistema mandril-fuso efetuado na própria máquina, representado pela linha tracejada, pode-se notar que o batimento à rotação de 20.000 rpm é de 22  $\mu\text{m}$ . O aumento mais abrupto do batimento começa a uma rotação maior do que no primeiro caso, em cerca de 17.000 rpm.

O terceiro caso mostra o batimento da haste para o mandril balanceado em dois planos. O batimento a 30.000 rpm é muito inferior ao dos dois primeiros casos e o aumento abrupto do batimento ocorre somente aos 22.000 rpm, permanecendo abaixo dessa rotação praticamente constante.

Pode-se perceber que o balanceamento em dois planos da ferramenta é o procedimento mais eficiente para a eliminação de vibrações. No entanto, esse procedimento é também o mais caro, devido à maior sofisticação do equipamento necessário. Resultados quase tão bons, quanto os obtidos nessa última alternativa, podem ser alcançados através do balanceamento posterior na máquina de um mandril estaticamente pré-balanceado,

utilizando-se um equipamento de balanceamento portátil. Tal procedimento traz ainda a vantagem de eliminar o desbalanceamento causado por falta de precisão radial no acoplamento entre mandril e fuso. Desvantagem, no entanto, do uso da própria máquina enquanto efetuado o balanceamento, é o fato de parar a produção, aumentando-se assim o tempo improdutivo da máquina.

A segunda causa de desbalanceamento é a falta de precisão radial de fixação da ferramenta no fuso. Um desbalanceamento adicional surge quando o eixo de simetria da ferramenta não coincide com o eixo de rotação do fuso. Dois tipos de cones são normalmente usados em máquinas-ferramentas: o cone de flange tipo V (ou cone ISO como é mais conhecido) e o cone vazado ou HSK (do alemão: Hohlschaftkegel) [25]. Testes feitos com cones do tipo ISO e com cones HSK mostram que o erro posicionamento na fixação de ambos é de cerca de 2  $\mu\text{m}$ . Diferenças aparecem, no entanto, depois de certo tempo de uso, onde os cones ISO apresentam erros de 5  $\mu\text{m}$ , ao passo que os erros dos cones HSK quase não sofrem alteração [37].

## 2.7 Vibrações de rotores

A usinagem de metal ou qualquer outro material é, invariavelmente, acompanhada por vibrações entre a peça e a ferramenta. Essas vibrações podem ser de diversos tipos e apresentam variadas origens.

### 2.7.1 Tipos de vibrações

Vibrações podem se apresentar basicamente sob duas formas [37]: vibrações livres e vibrações forçadas. Vibrações livres são aquelas que se manifestam sem a presença de uma força externa. Normalmente surgem quando um sistema elástico sofre um deslocamento ou é impressa uma velocidade que pode ser resultantes de um impacto.

Vibrações que surgem em conseqüência da aplicação de forças externas ao sistema são denominadas vibrações forçadas. Estas por sua vez, podem ser randômicas ou periódicas. Por vibrações periódicas se entende a vibração causada pela aplicação de uma força de excitação em intervalos regulares de tempo, ao passo que randômicas são as vibrações cuja força de excitação não apresentam essa regularidade.

Vibrações periódicas, cuja força de excitação pode ser descrita por uma função trigonométrica, são chamadas de vibrações harmônicas.

### **2.7.2 Origem das vibrações**

As vibrações podem ter origem em uma ou em mais fontes: vibração externa à máquina-ferramenta, vibrações geradas pela própria usinagem, falta de homogeneidade na peça, corte interrompido e vibrações causadas pela máquina-ferramenta [39].

O nível de vibração máximo ou tolerável, ou seja, a máxima amplitude de vibração em um processo de usinagem, depende da aplicação. Na usinagem de desbaste, o que determina o nível de vibração tolerável é principalmente o efeito que a vibração exerce sobre a vida da ferramenta. Em operações de acabamento, a qualidade superficial e a precisão dimensional são os parâmetros que determinam o nível máximo de vibrações [39].

#### **2.7.2.1 Vibrações externas à máquina**

Vibrações externas à máquina-ferramenta, geralmente geradas por outras máquinas (prensas, motores, compressores ou outras máquinas-ferramentas), são transmitidas pelo solo e pelas suas fundações. Esse tipo de vibração contém um espectro de frequência muito amplo, de forma que é pouco provável que a frequência natural de algum componente de uma máquina-ferramenta não esteja contida nesta ampla faixa de frequência. Assim, esse componente pode apresentar altos níveis de vibrações [39].

A transmissão deste tipo de vibração pode ser evitada quando a máquina que a origina, ou a máquina na qual vibrações indesejáveis são detectadas, é isolada através de isoladores de vibração instalados em suas fundações.

#### **2.7.2.2 Vibrações regenerativas**

Vibrações regenerativas ou auto-excitadas não são causadas por forças externas, mas sim causadas e mantidas por forças geradas pelo próprio corte do material pela ferramenta. Tais vibrações têm forte efeito negativo sobre a vida da ferramenta e sobre a qualidade da superfície usinada, além de serem acompanhadas por um alto nível de ruído. As vibrações regenerativas afetam a produtividade do processo, uma vez que, em muitos

casos, para serem eliminadas, faz-se necessária a diminuição da taxa de remoção de material [39,40].

### 2.7.2.3 Vibrações causada pela máquina

Vibrações causadas pela máquina surgem tanto em acionamentos de componentes dotados de movimento rotativo (fusos, mesas rotatórias) quanto em acionamentos de componentes com movimento de translação (movimentos de avanço). Essas vibrações podem se apresentar sob duas formas já descritas anteriormente: forçadas e livres. Vibrações forçadas são ocasionadas freqüentemente por uma força de excitação periódica. Nesse tipo, se enquadram as vibrações causadas por rotação de massas desbalanceadas, acionamentos por engrenagens e correias, rolamentos com irregularidades e por forças periódicas, sejam elas senoidais ou não, nos próprios motores de acionamento.

Vibrações livres, causadas por uma perturbação ou excitação em um momento inicial, não persistindo nos momentos seguintes, são o resultado de choques ou do movimento de massas desbalanceadas alternantes, como por exemplo, a inversão do sentido de movimento dos pistões de um motor a combustão ou a parada brusca da mesa de uma fresadora.

### 3 OBJETIVO DO TRABALHO

O emprego dos superabrasivos, tais como Diamante e CBN [3], tem crescido rapidamente na indústria de transformação de materiais, através dos processos de retificação. Esses são reconhecidos por sua superior dureza, resistência à abrasão e alta condutibilidade térmica em relação aos abrasivos convencionais [3]. A indústria metal mecânica emprega os rebolos superabrasivos com o objetivo de reduzir tempos de fabricação e, por consequência, de aumentar a produtividade, de reduzir os custos de fabricação, de manter estável a qualidade dos produtos fabricados em série e de reduzir os níveis de contaminação do meio ambiente.

Os rebolos com liga galvânica são conhecidos por possuírem um poder de remoção bastante grande, uma vida útil satisfatória, bem como a possibilidade de recuperação do corpo, se o mesmo não estiver danificado (redeposição). Isso possibilita uma otimização nos tempos de fabricação de peças seriadas, bem como uma redução nos custos de processo de retificação. Por possuírem algumas características de construção específicas, podem ser empregados para retificação de alta velocidade.

O corpo de aço é empregado na fabricação de rebolos superabrasivos de liga galvânica, pois se deseja características como resistência mecânica e uma forte ancoragem dos grãos de superabrasivos na deposição galvânica. No entanto, os rebolos com corpo de aço trazem alguns inconvenientes como: dificuldades no balanceamento, elevado peso próprio, inércia, problemas de desgaste do mancal da máquina retificadora, bem como ruídos na operação de retificação.

Analisando o estado de desenvolvimento tecnológico da deposição galvânica de grãos superabrasivos (DT e CBN) sobre um substrato de alumínio e as propriedades físico-químicas do mesmo como resistência mecânica, alta condutibilidade térmica, baixo peso específico, concluí-se que o uso de corpos de alumínio trará grandes vantagens ao processo de retificação com rebolos galvânicos, em relação ao corpo de aço. O coeficiente de troca de calor do alumínio é, aproximadamente, quatro vezes superior ao do aço, proporcionando uma redução do fluxo do calor para a peça, permitindo maiores taxas de remoção e, portanto, menores tempos de retificação, e por consequência, maior produtividade. Também seu módulo de elasticidade é cerca de três vezes maior e com isso

há uma redução dos níveis de vibrações e ruídos no processo de retificação. Seu peso específico é cerca de três vezes menor do que o do aço e isso proporciona à operação de retificação uma redução do tempo de preparação da máquina retificadora através da redução do uso de talhas, bem como a redução dos riscos de acidente ao operador ou ao próprio rebolo.

O objetivo deste trabalho é o de avaliar o comportamento de um rebolo de CBN com ligante galvânico com corpo de alumínio submetido a esforços térmico e mecânico através de ensaios numéricos e práticos e através desses resultados proporcionar ao usuário de ferramentas de corte superabrasivas uma redução nos custos de fabricação pela redução dos tempos de preparação (set-up) e dos tempos principais da máquina retificadora, bem como garantir a estabilidade das peças retificadas (CPK e CMK).

Pretende-se obter, com o resultado deste trabalho, informações tecnológicas que permitam afirmar se é possível a substituição de corpos de aço por corpos de alumínio no processo de deposição galvânica na retificação de peças de perfis retos ou complexos. Para tal, será feita uma análise numérica através da simulação de um corpo de alumínio de formato B1- 3A1- 75 - 6 – 16 (Fig. 28) a alta velocidade, objetivando avaliar a expansão sofrida pelo aumento da velocidade tangencial, bem como avaliar o comportamento do sistema de fixação proposto para o flange de fixação e arraste de rebolos em mandril tipo HSK.

Para avaliar o comportamento térmico e mecânico da deposição galvânica sobre o corpo de alumínio, vamos testar o rebolo B1-S-14F1- 400 - 7 - 3,5 -127 B64 GSS A (Fig. 35) na operação de abertura de canais com retificadora plana de mergulho (Fig. 34) empregando o aço DIN Mn Cr S5 (tab. 16) temperado e beneficiado com 60 HRc a baixas e elevadas velocidades de corte conforme tabelas de 26 a 29.

## 4 ESTUDO DO PROBLEMA

Após 17 anos de trabalho na indústria de transformação de materiais com processos de usinagem, sendo estes constituídos por oito anos na empresa Robert Bosch Ltda, situada na Cidade Industrial de Curitiba, sob o cargo de Planejador de Processos Especiais e assessor gerencial para assuntos relacionados a usinagem com ferramentas de geometria definida e não-definida, e mais nove anos na empresa Winter, hoje denominada Saint-Gobain Abrasivos Ltda, atuando como Engenheiro de desenvolvimento de Produtos e Assistência Técnica em toda região sul do Brasil, pude avaliar, ao longo desses anos, as dificuldades encontradas com o emprego de rebolos de abrasivos convencionais e superabrasivos. Em particular, nos chamam a atenção as dificuldades, as necessidades e o potencial do emprego dos rebolos de grãos superabrasivos ligados galvanicamente sobre um corpo de aço. Essas ferramentas são empregadas em quase todos os processos de retificação, desde uma retificação interna com rebolos de diâmetro 0,5 mm até rebolos para desbaste de eixos de comando com dimensões de 600 mm. A possibilidade da retificação cilíndrica e plana com perfis relativamente complexos também é uma realidade de uso desses rebolos na indústria, embora traga a inconveniência de produzir rugosidades relativamente altas.

O campo de aplicação de ferramentas de liga galvânica superabrasiva é bastante amplo. No entanto, as operações de retificação que empregam corpos de aço estão limitadas pelo próprio corpo de aço. Dificuldades no balanceamento, peso próprio, inércia, desgaste do mancal da máquina retificadora e a troca de calor na retificação são razões para o estreito emprego desse tipo de reboło na indústria de peças seriadas.

Assim foram identificados alguns exemplos de aplicação de rebolos superabrasivos ligados galvanicamente que trazem suas limitações de processo ao usuário.

### 4.1 Exemplos de operações com rebolos galvânicos de corpo de aço

O corpo de aço é empregado porque possui características importantes tais como resistência mecânica, condutibilidade térmica e uma perfeita ancoragem dos grãos de superabrasivos. Enumerou-se um exemplo de operação com rebolos de Diamante de liga

galvânica em corpo de aço, três exemplos de operações com rebolos de CBN também em corpo de aço e um quinto exemplo o qual é usado um rebole de CBN de liga resinóide onde pode ser implementada essa nova tecnologia, com ganhos substanciais em produtividade sendo este, um dos objetivos deste trabalho.

#### 4.1.1 Retificação de lonas de freio

Rebolos de diamante de liga galvânica são amplamente empregados na operação de retificação de lonas de freio (Fig.23), com os parâmetros de processo conforme tabela 6.

Através do emprego de rebolos de grãos de diamante de liga galvânica, há uma otimização no uso do material da lona de freio (resina), bem como uma otimização do processo. Como se trata de uma sobrematerial bastante grande, vide tabela 6, essa sobra de material (cavaco) teria de ser descartada. Com o uso de rebolos convencionais os grãos de Carboneto de Silício (SiC) contaminam essa sobra de material, impossibilitando seu reaproveitamento, pois danificariam o cubo de freio de veículos em geral. Com o uso de rebolos de diamante há o completo reaproveitamento desse material base, pois os grãos de diamante sofrem apenas o desgaste do gume de corte (micro-desgaste). Isso proporciona o uso integral desse material de base que novamente pode ser sinterizado evitando grandes quantidades de descarte de material contaminado na natureza que, mesmo que soterrados em aterros próprios, seriam de enorme risco ao meio ambiente.

Nessa operação são empregados 12 segmentos abrasivos que juntos formam um único rebole do tipo 6A2 (vide FEPA), de diâmetro de 560 mm, com peso de 350 Kg e cujos segmentos pesam cerca de 41 Kg (Fig.23). Essa operação foi desenvolvida pela empresa Fras-le de Caxias do Sul, em parceria com a empresa Saint-Gobain Abrasivos Ltda.

Os rebolos galvânicos com grãos de diamante aplicados em operações de retificar lonas de freio (telhas) têm uma vida de aproximadamente 8.000.000 de lonas de freios sem a necessidade de acondicionamento. Rebolos de carboneto de silício (SiC), empregados em um passado não muito distante, necessitavam ser dressados a cada 250.000 lonas. Embora o custo de aquisição seja mais interessante para os rebolos de carboneto de silício a análise do custo benefício revelou que há uma redução de custos de 25% quando avaliado o custo com a aquisição do rebole e o custo com a parada de máquina para troca de ferramenta. Além disso, há um ganho substancial da produtividade através redução da freqüência das



parada de máquina para realizar a troca do rebolo. Nessa operação o tempo de parada de máquina é da ordem de 15 min devido à inércia de seu peso do conjunto de 350 Kg. Isso leva a um aumento dos tempos mortos, a um aumento dos tempos de preparação da máquina (set-up), trazendo grande dificuldade na montagem e desmontagem do rebolo na máquina retificadora.

**Tabela 6** – Parâmetros de retificação para operação de retificar lonas de freio:

Peça:	Lona de Freio			
Material:	Liga de Asbesto			
Operação:	Retificar diâmetro Externo			
Máquina:	Retífica Lateral de Lonas			
Refrigerante:	À seco			
Rebolo:	<b>B1S - 6A2S - 560,50 - 305 D1001 S E</b>			
Condições de Retificação:	Velocidade De Corte:	$V_c$	m/s	58
	Rotação:	$n_s$	rpm	2.000
	Profundidade de Corte:	$a_z$	mm	1
	Velocidade de Avanço:	$V_f$	m/min	3
	Velocidade de remoção:	$Q'_w$	mm <sup>3</sup> /mm.s	50

Além disto, os problemas de vibrações e ruídos causados por desbalanceamentos do sistema são um inconveniente ao processo, sendo foco de diversas ações para otimização.



**Figura 23** – Rebolo de diamante de liga galvânica para lonas de freio

Analisando todos os fatos acima, pode-se concluir que, com o emprego desses segmentos com corpo de alumínio haverá, uma otimização do processo através da redução do peso do sistema flange mais rebolo e de melhorias na vida do fuso e dos rolamentos, bem como uma redução nos níveis de vibração e ruído, devido ao menor módulo de elasticidade do alumínio.

#### 4.1.2 Retificação de cames de eixo de comando - virabrequim

A operação de retificação de cames de eixo de comando de virabrequins, empregada pela fábrica da Sussin Franciscuti em Caxias do Sul, foi desenvolvida em parceria com a firma JUNKER AG e com a firma Saint-Gobain Abrasivos Ltda (Fig. 24). Nessa operação, são empregados dois rebolos, sendo um de desbaste (Fig. 24.1), um de acabamento com ligante vitrificado (Fig.24.3) e um terceiro também de liga galvânica denominado disco de dressagem (Fig.24.2).

O alvo deste trabalho está no rebolo de desbaste de liga galvânica e corpo de aço, conforme figura 24. As condições de retificação, para essa operação, são descritas na tabela 7. O rebolo empregado tem diâmetro de 450 mm por 31mm de largura com peso próprio de cerca de 36 kg e sua montagem na máquina é feita através de talha.

Materiais empregados para eixo de comando são muito sensíveis ao calor e é comum o surgimento de micro-trincas no perfil do came após a retificação final. Essas micro-trincas podem ter sido originada pelo calor excessivo gerado na operação de desbaste, devido ao aquecimento da camada limite por falta de refrigeração na interface entre a peça e o rebolo, e incrementada por uma deficiente absorção do calor gerado pelo corpo de aço do rebolo. Nesses casos, bicos especiais de alta pressão são necessários para a limpeza e refrigeração do rebolo. Essa tendência de trincas é verificada nos aços para rolamento DIN 100 Cr 6, AISI 1050 e AISI 52100, empregados no projeto dessas peças.

Tabela 7 – Parâmetros de retificação para desbaste de eixo virabrequim.

Peça:	Eixo de Comando - virabrequim			
Material:	SAE 1055			
Dureza:	58 a 62 HRc			
Operação:	Preparar para Retífica Final			
Maquina:	Retifica de Eixo de Comando JUNKER			
Refrigerante:	Óleo Integral			
Rebolo:	S – 1A1 – 450 – 31 – 127		B126 GSS E (rebolo nr.1)	
Condições de Retificação:	Velocidade De Corte:	$V_c$	m/s	120
	Rotação:	$n_s$	rpm	5.100
	Profundidade de Corte:	$a_z$	mm	0,2
	Veloc. Avanço Radial:	$V_f$	mm/min	300
	Velocidade de remoção:	$Q'_w$	mm <sup>3</sup> /mm.s	1,0

Por se tratar de um rebolo relativamente pesado, há a necessidade de se fazer a troca com o auxílio de uma talha. Além disso, em função do processo (desbaste e acabamento) há a necessidade de desacelerar e novamente acelerar o rebolo, levando a perdas de produção com tempos mortos, devido a sua inércia. Acredita-se que, com o emprego de rebolos galvânicos com corpo de alumínio, permita otimizar esse processo através da redução da inércia, proporcionando a redução dos tempos mortos do processo e uma melhoria na qualidade da peças, reduzindo os problemas térmicos na camada limite e, por conseqüência, melhorando a qualidade e produtividade da operação.

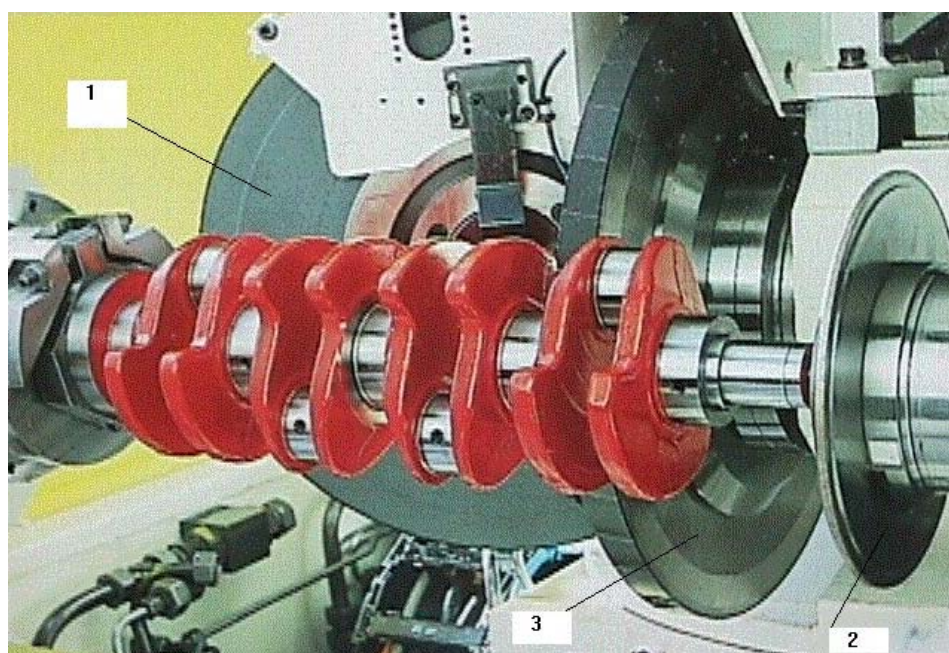


Figura 24 - 1) Rebolos de CBN de liga galvânica de corpo de aço, 2) Disco dressador e 3) Rebolo de CBN de liga vitrificada.

### 4.1.3 Retificação de mancais de eixos de comando de válvulas

A operação de retificação de mancais de eixos de comando descrita na tabela 8 foi desenvolvida na fábrica da Opel, em Vienna-Aspern, na Áustria, em parceria com o fabricante de máquinas Mikrosa Multimat (Fig.25) [41].

**Tabela 8** – Parâmetros de retificação para mancais de eixo de comando de válvulas [41].

Peça:	Eixo de Comando de Válvulas			
Material:	GGG-70			
Dureza:	Sem Tratamento térmico			
Operação:	Retificar mancais			
Maquina:	Retifica Centerless de mergulho – Mikrosa			
Refrigerante:	Óleo Integral			
Rebolo:	S – 1A1 – 500 – 36 – 305                      B252 GSS E			
Condições de Retificação:	Velocidade De Corte:	$V_c$	m/s	90
	Rotação:	$n_s$	rpm	3.500
	Profundidade de Corte:	$a_z$	mm	3,6
	Veloc. Avanço Radial:	$V_f$	mm/min	340
	Velocidade de remoção:	$Q'_w$	mm <sup>3</sup> /mm.s	20

Nesta operação, é empregado um conjunto de sete rebolos de 500 mm de diâmetro, com espessura maior 36 mm, perfazendo um total de 380 Kg. Além da dificuldade da montagem do conjunto na máquina retificadora, sendo necessário o emprego de uma talha, sua inércia é muito grande necessitando de sistema de freio para poder parar todo o conjunto após sua vida. Se a nova tecnologia proposta for empregada - rebolo galvânico com corpo de alumínio - reduzir-se-á o peso próprio do conjunto para 1/3 do peso total, ou seja, para cerca de 130 Kg, facilitando a troca e proporcionando uma redução proporcional no tempo de desaceleração do conjunto até sua parada por completo.

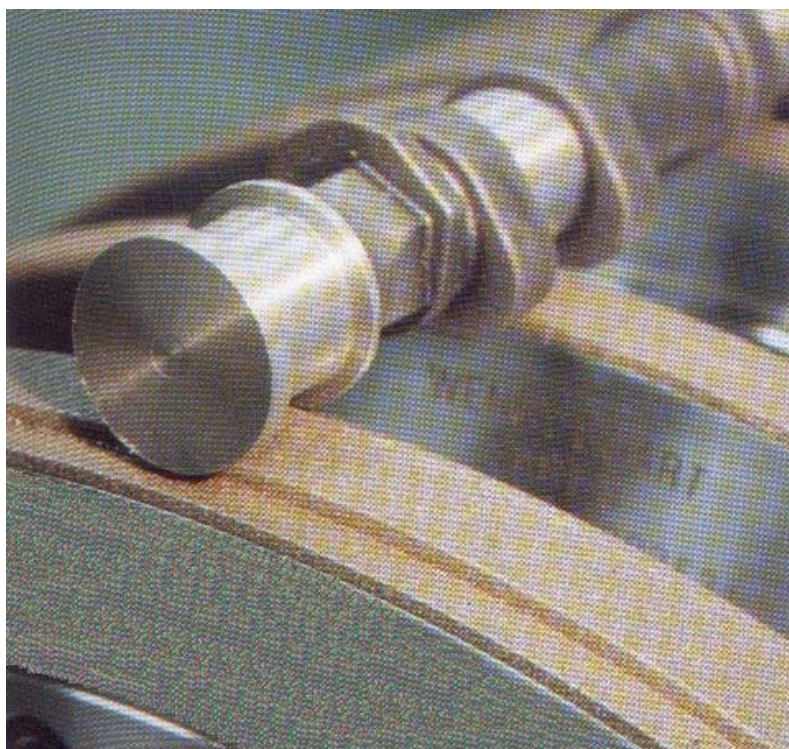


Figura 25 – Rebolos de CBN de liga galvânica para mancal de eixo de comando [41].

#### 4.1.4 Retificação de rasgo de pistão

Essa operação se refere à operação de abertura de rasgo de pistões (Fig.26) de bombas injetoras em aço DIN 100 Cr6 com 62 HRc em retífica plana de mergulho totalmente fechada, com os parâmetros descritos na tabela 9. Para essa operação, são empregados rebolos de CBN com liga de resina e corpo de alumínio. O critério de fim de vida é o desgaste dos cantos do perfil do rebole que limita sua vida causando paradas freqüentes para a troca do rebole. Se essa troca não ocorrer na freqüência predeterminada, esse rebole, já desgastado, poderá introduzir na peça tensões de retificação que poderão acarretar em danos à camada limite através do surgimento de queimas e trincas de retificação. Após a recuperação do perfil, esse rebole retorna novamente para a máquina retificadora, fechando um ciclo de afiação.

Tabela 9 – Parâmetros de retificação para abertura de rasgo de pistão.

Peça:	Pistão			
Material:	100 Cr 6			
Dureza:	60 +/- 2 HRc			
Operação:	Abrir rasgo			
Maquina:	Retifica Cilíndrica Junker			
Refrigerante:	Óleo Integral			
Rebolo:	S – 14A1 – 40 – 3 – 10		B126 KSS RYA V240	
Condições de Retificação:	Velocidade De Corte:	$V_c$	m/s	110
	Rotação:	$n_s$	Rpm	52.500
	Profundidade de Corte:	$a_p$	Mm	2
	Veloc. Avanço Radial:	$V_f$	mm/min	0,9
	Velocidade de remoção:	$Q'_w$	mm <sup>3</sup> /mm.s	2

Se empregarmos nessa operação a nova tecnologia proposta por este trabalho - rebolo galvânico de corpo de alumínio - acreditamos que o grande poder de remoção da liga galvânica, aliada à performance do corpo de alumínio, trará um grande retorno ao usuário em qualidade e produtividade.

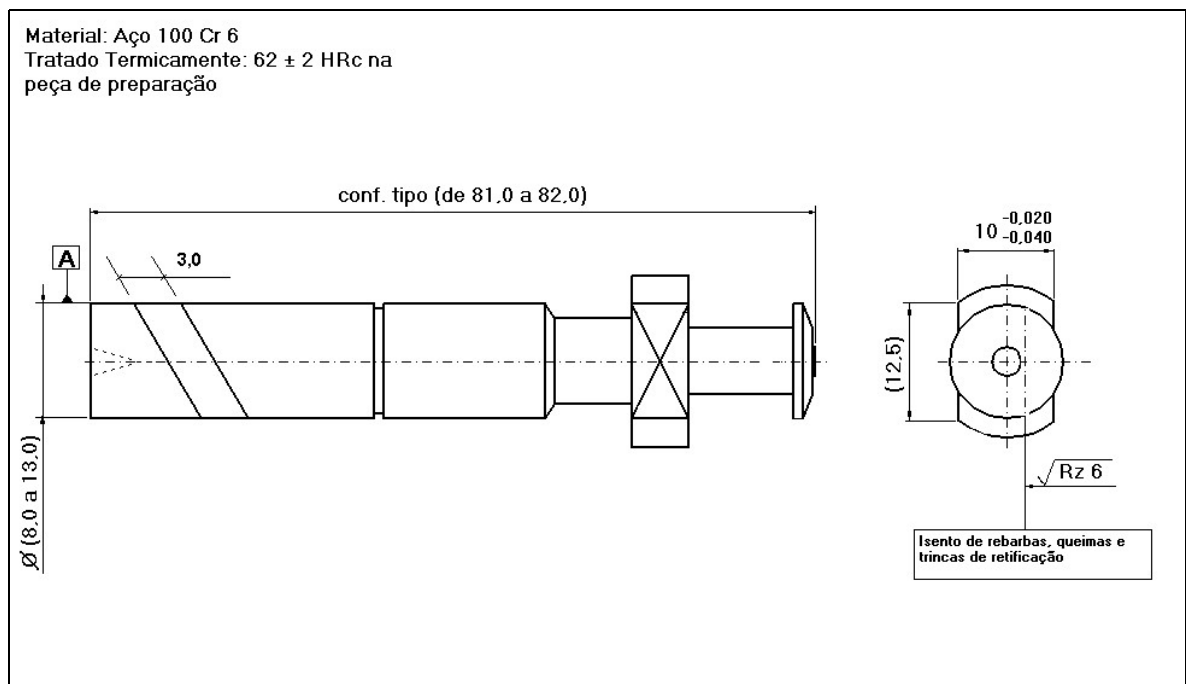
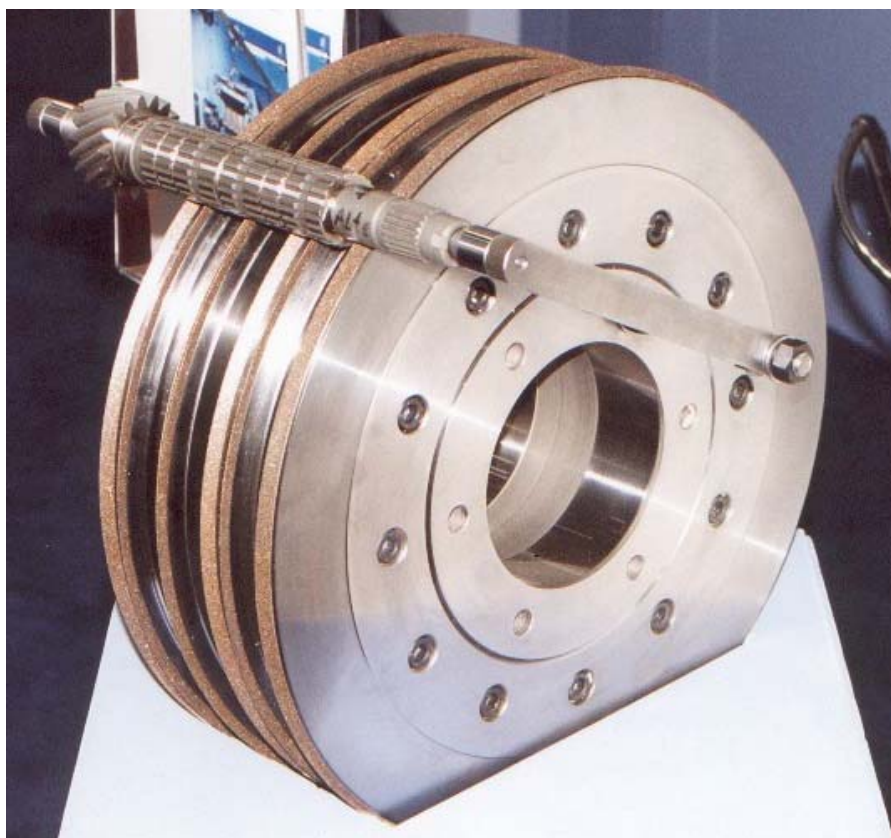


Figura 26 – Pistão de bombas injetoras.

#### 4.1.5 Retificação dos mancais de eixos de engrenagens

Nessa operação, de retífica de mancais de eixo engrenagem, é empregado um conjunto de rebolos de CBN de liga galvânica de corpo de aço, conforme figura 27. Cada rebolo executa uma determinada operação de espessura e de tamanho de grão apropriado. Esse conjunto é formado por quatro rebolos de 500 mm de diâmetro por aproximadamente 15 mm de espessura, com um peso aproximado de 156 kg.

Para que esse conjunto seja montado na máquina retificadora, é preciso empregar uma talha, pois seu peso próprio assim o exige.



**Figura 27** – Conjunto de rebolos de CBN para retificação de mancais de eixos de engrenagens.

#### 4.2 Análise do problema

Analisando os exemplos citados anteriormente, pode-se afirmar que estas e diversas outras operações de retificação podem ser melhoradas através da otimização do projeto do rebolo e, por conseqüência, melhorar a qualidade e a produtividade do produto retificado.

A otimização do projeto do rebolo requer novas formas geométricas, tolerâncias dimensionais mais fechadas e a troca do material para a confecção do corpo do rebolo.

É objetivo deste trabalho testar um material substituto para o corpo de aço em operações que empreguem, ou que possam empregar, rebolos de liga galvânica. Para tal, é preciso utilizar um material que agregue as vantagens do corpo de aço, tais como: alta resistência mecânica, ancoragem dos grãos superabrasivos na deposição galvânica, alta condutibilidade térmica e baixo peso específico.

A tecnologia de deposição galvânica em corpo de alumínio é pouco divulgada, mas já é dominada, e seu emprego ainda não está sendo utilizado a nível comercial. Atualmente, esta tecnologia é empregada para experimentos de rebolos à altas (200 m/s) e à altíssimas velocidades (500 m/s) [14,16,22,29].

O objetivo deste trabalho é tornar esta tecnologia conhecida e implementá-la na produção fabril no estado atual de desenvolvimento das máquinas retificadoras atuais, já que as vantagens em termos de qualidade e produtividade, no processo fabril, são inúmeras.

#### 4.2.1 Propriedades físico-químicas do alumínio

A tabela 10 proporciona uma comparação das propriedades físico-químicas da liga de alumínio (Alcoa1060) do fabricante Alcoa [12] em relação à liga de aço carbono (SAE 1020) e ao cobre puro. Deve-se evidenciar que uma das principais características físicas das ligas de alumínio, em relação as de aço carbono, é o seu baixo peso específico. Essa chega a ser 3,3 vezes inferiores que as ligas de cobre e 2,9 vezes inferiores que as ligas de aço. Isso proporciona a redução do peso próprio do rebolo com conseqüente redução dos tempos de preparação da máquina retificadora (set-up), a redução dos desgastes de elementos de máquinas como fusos e rolamentos e a redução dos riscos de acidente com o operador e com a camada abrasiva.



**Tabela 10** – Propriedades do alumínio em relação ao aço e ao cobre [12,13].

Propriedades Físicas	Unidades	Alumínio (1060)	Aço (1020)	Cobre (Puro)
Peso específico x 10 <sup>3</sup>	(Kg/mm <sup>3</sup> )	2,71	7,86	8,96
Temperatura de fusão	(°C)	655	1500	1083
Condutibilidade elétrica	(%IACS a 20°C)	62	14,5	100
Condutibilidade térmica a 25 °C	(W/m.K)	234	52	394
Coef. de dilatação térmica linear	(20 a 100 °C)	23,6 10 <sup>-6</sup>	11,7 10 <sup>-6</sup>	16,5 10 <sup>-6</sup>
Módulo de elasticidade	(Mpa)	69.000	205.940	110.325
Expansão térmica a 20 °C	(cm/cm/°C)	11,7x10 <sup>-6</sup>	22,5x10 <sup>-6</sup>	16,2x10 <sup>-6</sup>
Tensão de ruptura	(N/mm <sup>2</sup> )	270	415	

A condutividade térmica do alumínio é 4,3 vezes mais alta do que a do aço e mais alta do que qualquer outro tipo de material, com exceção do cobre e da prata. Isso proporciona um corte mais frio no ato da retificação, pois uma maior taxa de calor fluirá para o corpo de alumínio, evitando que as temperaturas geradas no processo aqueçam a peça e afetem a camada limite, principalmente na retificação de aços alta liga, tratadas termicamente acima de 60 HRc. Seu módulo de elasticidade é três vezes menor que o do aço, e 1,6 vez menor que o do cobre. Isso possibilita uma redução dos níveis de vibração, melhorando o acabamento da peça, bem como uma redução dos níveis de ruídos no processo de retificação.

#### 4.3 Vantagens no emprego de corpos de alumínio na operação de retificação

As vantagens do emprego do corpo de alumínio, em relação ao corpo de aço carbono, sobre os custos do processo de retificação no emprego de rebolos superabrasivos são enumeradas abaixo:

- **Maior estabilidade no processo de fabricação (CEP)**, através da redução da camada termicamente afetada pelo calor, evitando queimas e trincas de retificação. Isso melhora, portanto, a qualidade da peça de trabalho.
- **Redução dos tempos de troca de ferramenta (set-up)**, através da redução da inércia do rebole (redução do peso próprio).

- **Redução dos tempos principais da operação de retificação**, através do aumento da velocidade de remoção proporcionada pelo maior fluxo de calor gerado para o corpo do rebolo, reduzindo a taxa de transferência de calor para a peça.
- **Redução dos níveis de vibração e dos ruídos**, através do seu menor módulo de elasticidade em comparação com os corpos de aço.
- **Redução dos esforços de corte e maior vida do rebolo**, em função da possibilidade do emprego de altas velocidades de retificação.
- **Maior segurança ao operador**, através da redução do peso próprio do rebolo.

Pelas razões acima, acredita-se que as vantagens enumeradas justificam o emprego do alumínio como material do corpo de rebolos superabrasivos de liga galvânica, pois esse reúne as características do aço aliado à redução do peso do corpo do rebolo no processo de retificação. Para comprovar essas vantagens, efetuou-se um plano de trabalho cujos resultados permitem avaliar o comportamento dos rebolos de liga galvânica com corpo de alumínio para baixas e altas velocidades de retificação.

## 5 ANÁLISE NUMÉRICA

O objetivo da análise numérica é avaliar o comportamento de um corpo de alumínio de forma geométrica 3A1 de 75 mm de diâmetro (Fig.28) em termos de expansão e análise de tensões nos furos de fixação e de arraste quando submetido à alta velocidade.

Sabe-se que as conseqüências de um rebolo girando a altas velocidades podem ser dramáticas. Por isso, neste trabalho, foram usados recursos de simulação numérica antes da realização dos experimentos.

### 5.1 Expansão de um corpo otimizado

Para corpos cilíndricos com furos concêntricos girando a uma determinada velocidade periférica, as maiores tensões estão localizadas no furo de fixação e no diâmetro externo [14].

Segundo o trabalho de König e Ferlemann [14], para um projeto de um corpo otimizado em comparação com um formato do corpo 1A1, pode-se reduzir a expansão radial do furo em até 80% e a expansão do diâmetro externo em até 30% e, portanto, a redução das tensões na mesma ordem de grandeza. Com isso, concluímos que, para trabalhar com altas velocidades, a expansão do diâmetro externo e do furo devem ser minimizadas.

Para rebolos de corpo de alumínio, com revestimentos de CBN com ligante galvânicos, a tensão crítica é radial e é determinada pela resistência à tração do corpo de alumínio. Se a expansão do corpo for relativamente grande, a camada de abrasivo poderá sofrer tensões de cisalhamento e com isso causar micro-trincas na camada. Com a ação cíclica das forças de corte, no processo de retificação, essa camada poderá sofrer uma ruptura (ruína ou falha), levando riscos à operação e, o que é mais grave, ao operador da máquina-ferramenta.

#### 5.1.1 Modos de ruína

Para que não ocorra a ruína em uma peça (equipamento ou dispositivo), este deve ser dimensionado de modo que não ocorra nenhum dos possíveis modos de falha. Existem

diferentes processos que levam à deterioração e à inutilização de um corpo (deformação plástica, fadiga, fratura, fluência, corrosão, desgaste, etc). Estes modos de falha podem ser classificados em falhas de vida curta e em danos acumulados.

- Falhas de vida curta: nesta, o tempo entre a falha e a ruína completa é bastante curto e pode ser causada pela excessiva deflexão elástica, pela excessiva deformação plástica, por instabilidade elástica (flambagem), pela instabilidade plástica (estricção), pela grande deformação plástica e pela súbita fratura (fratura dúctil).
- Danos acumulados de modo localizado: estes danos podem ser causados por fadiga, fluência localizada e corrosão sob tensão.
- Danos acumulados em toda a peça ou em uma parte: geralmente causados por fluência generalizada, corrosão e erosão.

A predominância de um ou de outro processo depende da geometria do componente (espessura, presença de fendas, etc.), do material e das condições de serviço (solicitações mecânicas, temperatura e atmosfera envolvente). O modo de ruína que ocorre é o que tem melhores condições, isto é, o mais fácil de acontecer nas condições existentes.

### 5.1.2 Avaliação da possibilidade de falha ou ruína

A falha acontece porque as solicitações são superiores à resistência do material. Assim, se existir risco de ruína, devem-se reduzir as solicitações no componente ou mesmo utilizar um material mais resistente.

Para avaliar a possibilidade de ocorrência de um modo de falha ou ruína, é necessário calcular as condições existentes em cada ponto do material (tensões, deformações, temperatura, etc) ou pelo menos nos pontos supostos críticos, a partir das solicitações exteriores, das condições ambientais (temperatura e atmosfera) e da geometria do componente. Para este cálculo, podemos empregar abordagens analíticas, numéricas ou experimentais. A abordagem analítica é disponibilizada através do estudo da resistência dos materiais, enquanto que a abordagem numérica é fornecida através do método dos elementos finitos e a experimental através do uso de extensômetros.

## 5.2 Expansão de um corpo cilíndrico (abordagem analítica)

Conforme o trabalho de Akinori (1996), a expansão de um corpo cilíndrico pode ser calculada como um disco simples e, de acordo com a teoria da elasticidade, a expansão pode ser representada da seguinte forma (equação 6.1) [42].

$$u = \frac{\gamma \cdot \omega^2}{4 \cdot E \cdot g} (1 - \nu) \cdot r^3 \quad (6.1)$$

Onde  $u$  é a expansão do diâmetro do rebolo,  $\gamma$  é o peso específico,  $\omega$  é a velocidade angular,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $E$  é o módulo de elasticidade,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $r$  é o raio do corpo.

## 5.3 Simulação numérica (MEF)

A simulação numérica é uma ferramenta que permite avaliações da tensão e deformação através do método de elementos finitos (MEF). Os programas mais conhecidos que permitem aplicar este método para análise de diferentes situações físicas são: COSMOS, NASTRAN, MARC, ABACUS, ANSYS e ADINA. O procedimento acontece por meio da divisão do corpo sólido em elementos (malhas) triangulares ou quadriláteros, assimétricos ou harmônicos, de 3, 4 ou 8 nós com objetivo de possibilitar as avaliações das tensões equivalentes de Von Mises [Fig.30], bem como, as deformações com o aumento da rotação [Fig.33].

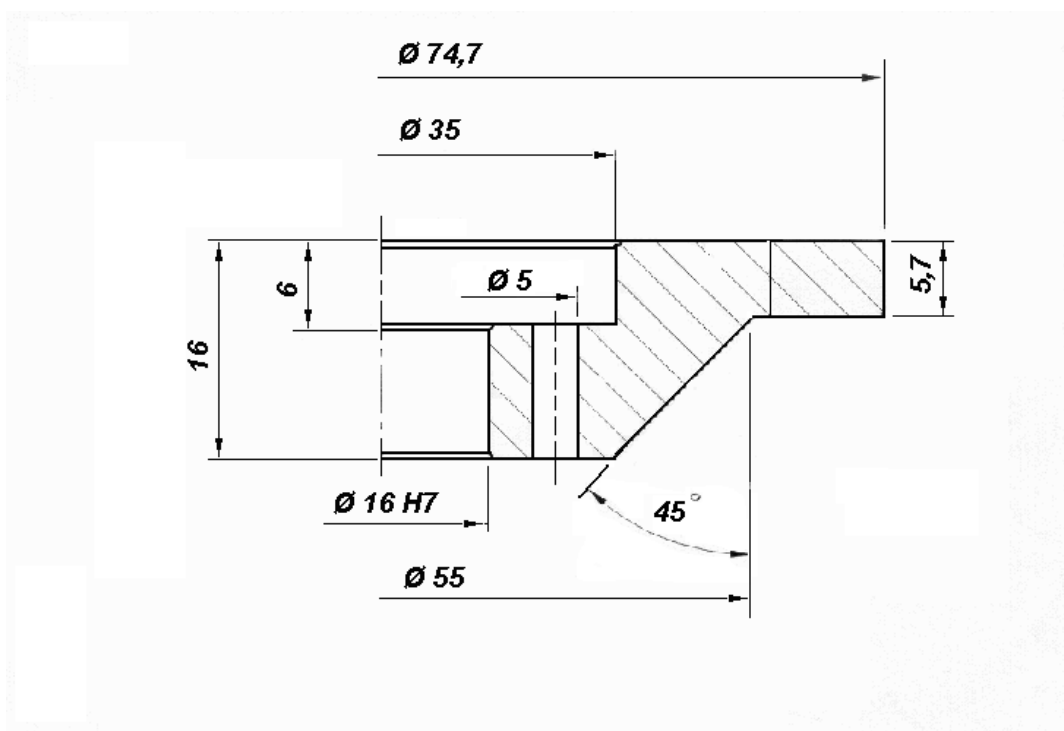
### 5.3.1 Formato do corpo de alumínio para modelação numérica

O critério de escolha do formato do corpo de alumínio, para simulação numérica, foi definido pelos formatos mais freqüentes empregados nos processos de retificação em geral. Na tabela 11, enumeraram-se os processos mais usuais e os formatos de corpos mais empregados nos processos de retificação em geral (vide figura 8).

**Tabela 11** – Formas de corpos mais empregados nas operações de retificação [5,6,50].

Tipo de Operação	Formato do Corpo
Retificação cilíndrica externa	1A1 e 14A1
Retificação cilíndrica interna	1A1e 1A1W
Retificação plana tangencial	1A1 e 14A1
Retificação plana de mesa rotativa	6A2 e 11A2
Afiação de ferramentas estáticas	4A2, 6A2, 12A2, 6 <sup>A</sup> 9, 12C9, 12V2 e 14U1
Afiação de ferramentas rotativas	1A1, 14A1, 4A2, 12A2, 12C9, 14F1 e 12V2

Com o objetivo de avaliar o comportamento de tensões e deformações para os diversos tipos de formatos de rebolos mais empregados, conforme a tabela 11, empregou-se um formato de rebolo que englobasse os diversos formatos acima em um único corpo [Fig.8]. Esse tipo, conforme figura 28, foi denominado de 3A1. Acredita-se que, analisando os resultados da tensão e da deformação desse formato de corpo, pode-se expandir os resultados para os diversos formatos de corpos mais empregados nas diversas operações de retificação com rebolos de superabrasivos.

**Figura 28** – Corpo de formato B1- 3A1- 75 - 6 - 16

### 5.3.2 Parâmetros empregados na simulação numérica

O objetivo principal dessa simulação numérica é avaliar o comportamento da tensão e da deformação de um corpo de liga alumínio submetido a altas velocidades. Dessa forma, vamos fazer a simulação numérica para o formato 3A1 (Fig.28), a uma rotação de 40.000 rpm ou 160 m/s. Para tanto foi construído um modelo sólido, utilizando um programa de CAD (Solid-Work) (Fig. 29). Posteriormente, este foi importado para o ANSYS, realizando assim a simulação numérica com os parâmetros de entrada relacionados na tabela 12.

**Tabela 12**– Parâmetros de entrada para análise no ANSYS.

Parâmetros de entrada	Unidades	Valores
Módulo de elasticidade	Gpa	69
Coeficiente de Poisson		0,32
Peso específico	Kg/m <sup>3</sup>	2,71 x 10 <sup>3</sup>
Limite de escoamento	Mpa	255
Velocidade angular	Rpm	40.000

### 5.3.3 Critério de falha

O critério de falha empregado foi o critério de Von Mises, que afirma que o corpo falha quando chega ao seu limite de escoamento. Na figura 29, é apresentado o corpo do rebolo em perspectiva, dividido em malhas com 736 nós.

ELEMENTS

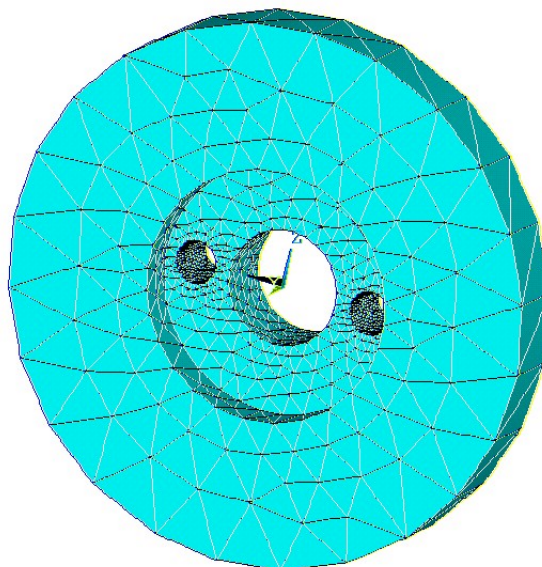
ANSYS  
OCT 3 2001  
10:03:51  
PLOT NO. 1

Figura 29 – Corpo do rebolo em perspectiva dividido em malhas.

#### 5.4 Análise de tensões

Como já foi citado, o objetivo da simulação numérica é avaliar a expansão e as tensões atuantes em um corpo de alumínio de formato 3A1 (Fig.28), submetido a altas velocidades. Com os resultado dessa simulação numérica, pode-se avaliar o comportamento dessa expansão para outros formatos de corpo de rebolos empregados em diversas operações de retificação (Tab.11). Também vamos avaliar, através dos critérios de Von Misses, as tensões atuantes nesse corpo, quando submetido a altas velocidades, e com isso avaliar o sistema de fixação proposto.

A forma de fixação do rebolo simulado é do tipo furo de localização ou centralização e furos de arraste ou de torque (Fig.28).

Os resultados mostrados na figura abaixo revelam que as maiores tensões estão nos furos de arraste. Os valores de tensão encontrados foram de 166 MPa para uma rotação do rebolo de 40.000 rpm ou uma velocidade tangencial do rebolo de 160 m/s.



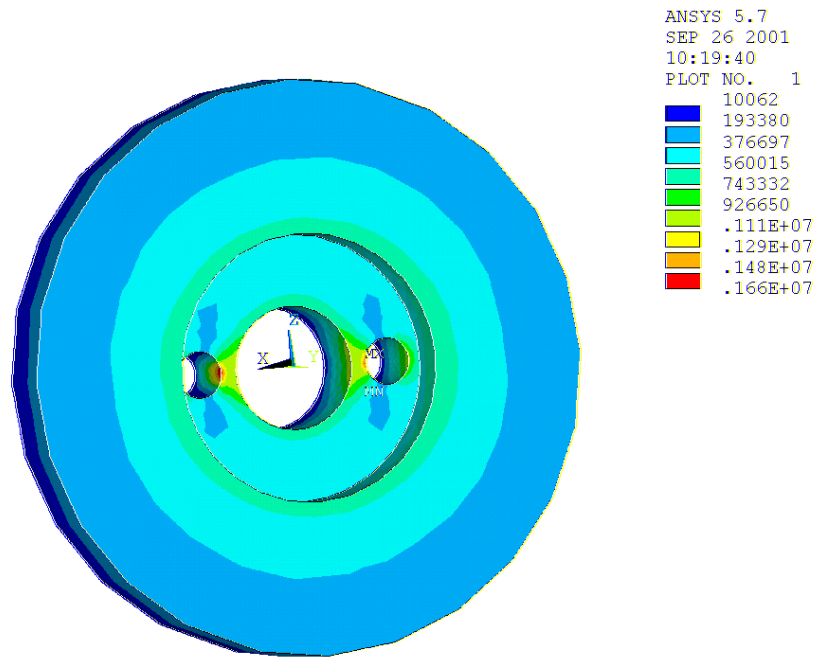


Figura 30 – Tensões de Von Misses em MPa (vista frontal)

O limite de escoamento do alumínio é de 255 MPa (Tab.12) e as máximas tensões, nos furos de arraste, são da ordem de 166 MPa. Portanto, empregar-se-á um coeficiente de segurança de cerca de 1,50 (50%), quando elevamos esse corpo a 40.000 rpm ou 160 m/s.

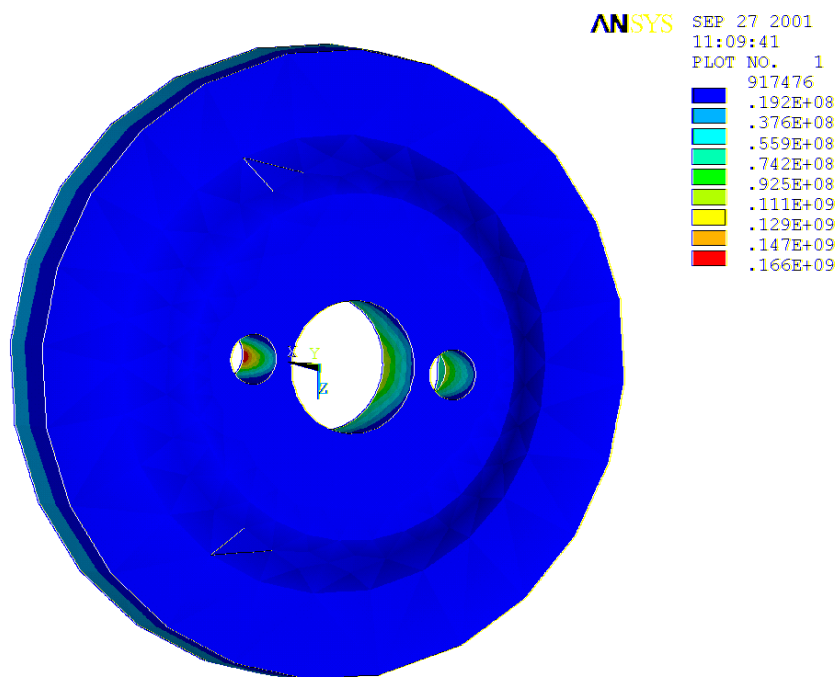


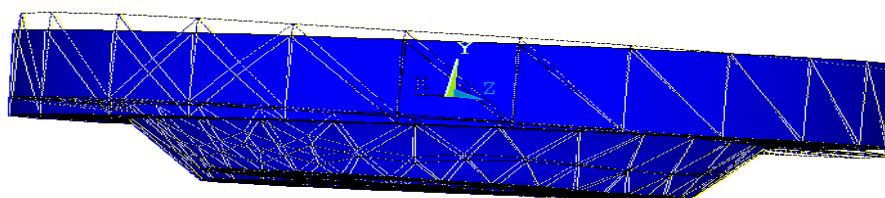
Figura 31 – Tensões de Von Misses em MPa (vista inferior)

### 5.4.1 Resultados da expansão

Os valores da expansão são apresentados na tabela 13. Os deslocamentos nodais revelam quanto o rebolo expande, em coordenadas cilíndricas, quando acelerado à velocidade de 40.000 rpm (Fig.32). Conforme a tabela abaixo, o nó de nº 21 apresenta uma expansão no eixo X da ordem de 0,164 mm e os nós de nº 650 e 648 apresentaram uma retração na direção Y e Z da ordem de 0,197 mm e 0,427 mm, respectivamente.

**Tabela 13** - Valores absolutos de máximos deslocamentos nodais em coordenadas cilíndricas

Nó	21	650	648
Valores	UX = 0.16416E-03 m	UY = -0.19713E-03 m	UZ = -0.42785E-04 m



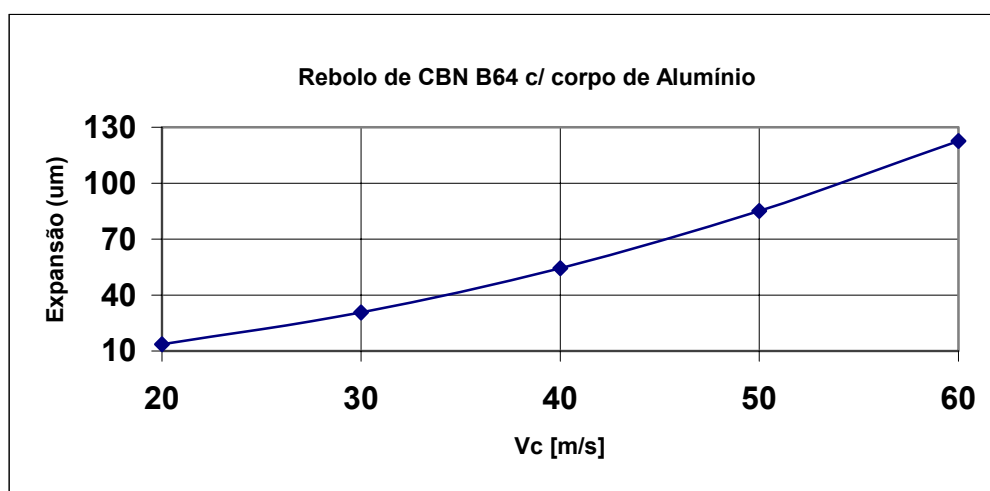
**Figura 32** – Corpo deformado em perspectiva (deslocamentos nodais)

### 5.5 Expansão teórica do rebolo empregado nos experimentos

Através da equação 6.1 e com os dados da tabela 14, pode-se calcular o valor da expansão teórica ' $u$ ' sofrida pelo corpo do rebolo (Fig.33) submetido aos experimentos.

**Tabela 14** – Expansão teórica sofrida pelo corpo do rebolo empregado nos experimentos.

$V_c$ (m/s)	20	30	40	50	60
$N_s$ (rps)	15,92	23,88	31,83	39,80	47,77
$u$ (mm)	0,0136	0,0306	0,0544	0,0851	0,1226

**Figura 33** – Expansão teórica sofrida pelo corpo do rebolo empregado nos experimentos.

## 6 MATERIAIS E MÉTODO

Os experimentos foram planejados para serem realizados com os recursos existentes no LMP (Laboratório de Mecânica de Precisão) da UFSC. Planejava-se o emprego do centro de usinagem NBH 65 da Tyssen-Hüller, equipado com fuso de alta frequência de mancal magnético para altas velocidades, e com recursos desenvolvidos e fornecidos por empresas interessadas nos resultados deste trabalho. Infelizmente, mesmo com todos os esforços dentro e fora do LMP, não foi possível obter sucesso em tempo hábil na manutenção deste mancal de alta frequência para trabalhar com altas velocidades de corte (160 m/s), na realização dos experimentos. Dessa forma, os experimentos foram realizados a baixas e elevadas velocidades de corte (20 a 60 m/s) na operação de abertura de canal em retífica plana de mergulho, usando procedimentos e recursos de medições existentes na empresa Robert Bosch Ltda, conforme descritos abaixo.

### 6.1 Tipo de processo empregado



Figura 34 - Operação de abertura de canal com retífica plana.

Empregou-se a operação de abertura de canal com o processo de retificação plana de mergulho exemplificado na figura 34. Esse tipo de processo exige solicitações térmicas e mecânicas bastante significativas sobre o rebolo, pois a abertura deste canal é realizada com corte em cheio, conforme figura 34 e tabela 17.

### 6.1.1 Descrição da operação

A peça a ser retificada (Fig.36) é fixada através de um dispositivo que está fixo à mesa da máquina retificadora. Esse dispositivo permite um giro de 90° após o movimento de avanço de ida da mesa e ao retornar pode também abrir novos rasgos. Os canais da peça são abertos pelo deslocamento longitudinal da mesa da máquina retificadora tanto na ida como no retorno da mesa, proporcionando a abertura de quatro canais, no deslocamento de ida e quatro canais no deslocamento de retorno. Dessa forma, o movimento de ida é no sentido discordante e o de retorno no sentido concordante. Essa máquina trabalha com rebolos que transferem o perfil dos canais para a peça. A forma geométrica dos canais é transferida para o rebolo de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) através de um rolo dressador diamantado, construído com tolerâncias do perfil de cerca de 25% da tolerância da peça. Esse rolo recupera o perfil do rebolo e em cada peça retificada, a máquina automaticamente compensa a perda do diâmetro do rebolo com um incremento na altura da mesa, para manter a peça na dimensão desejada.

## 6.2 Projeto e especificação do rebolo de CBN

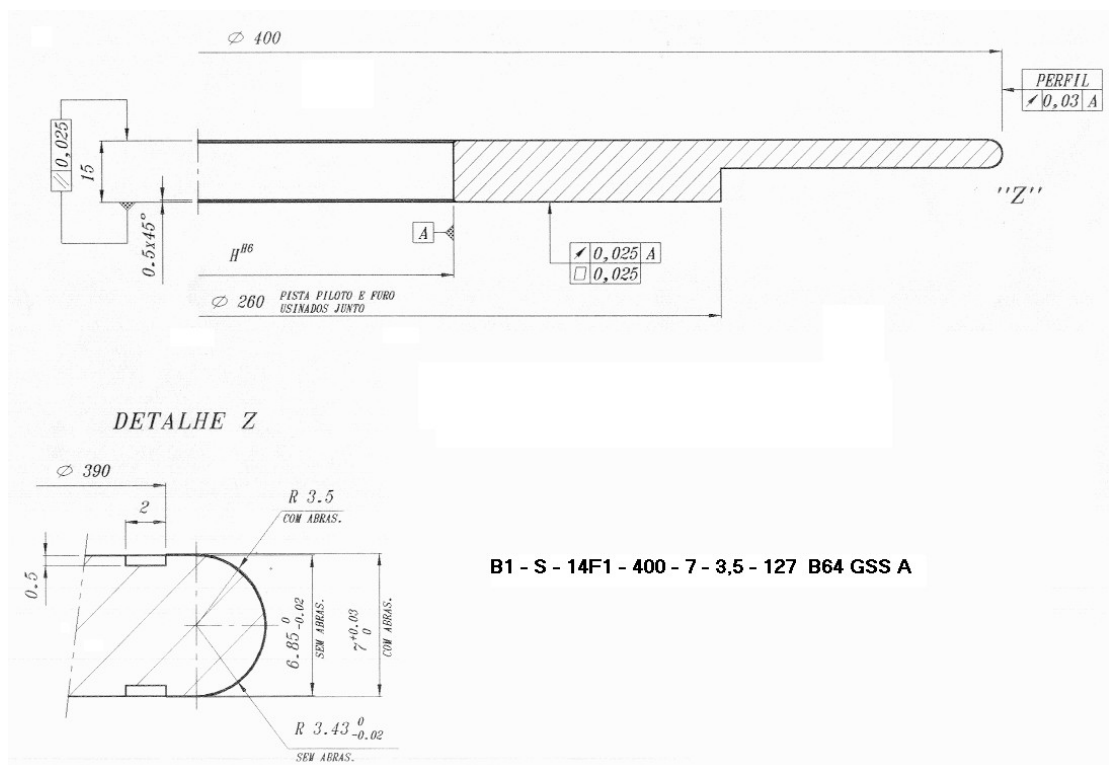
O rebolo foi especificado visando atender as solicitações térmicas e mecânicas mais críticas possíveis tendo em vista os objetivos dos experimentos e a rugosidade exigida na peça após essa operação. Para tanto, optou-se por um grão abrasivo classificado como fino, que limita a sua capacidade de remoção, em função da exposição do grão abrasivo na camada de níquel e, portanto, gera grandes esforços térmicos e mecânicos. Esse grão escolhido foi o B64, com uma exposição do grão de 50 % sobre a camada de deposição de níquel (Tab.15). Por se tratar de um rebolo com o processo de deposição galvânica, e, portanto, não é perfilado na própria máquina (a não ser pelo processo “touch-dressing” [17]), esse deve ser construído com características especiais de forma geométrica do corpo. Planeja-se uma pista piloto (Fig. 35), que é construída de tal forma que o furo e o diâmetro

externo estão concêntricos a ela, garantindo assim resoluções centesimais no batimento diâmetro externo, reduzindo desbalanceamentos e vibrações.

**Tabela 15** – Especificações do rebolo B64 GSS A.

Forma e Dimensões (mm)		Material do corpo	Peso (Kg)	Tipo de grão	Tamanho do grão ( $\mu\text{m}$ )	Ligante	Processo
Forma	14F1	Alumínio 50011175	2,920	Borazon (CBN)	64	Níquel	Galvânico (GS)
Diâmetro	400						
Espessura	7						
Raio	3,5						
Furo	127						

Também o diâmetro externo de 400 mm foi planejado para elevar a velocidade de corte até 60 m/s permitindo assim, através do potenciômetro de corrente elétrica, variar a velocidade corte do rebolo a baixas e elevadas velocidades de corte.



**Figura 35** – Projeto do rebolo B64 GSS A.

### 6.3 A peça

A peça empregada é denominada suporte do rolete (Fig. 36), que é um dos componentes da Bomba Injetora Bosch tipo VE. Essa peça, ao final do processo, deve apresentar oito rasgos, sendo retificados quatro no deslocamento de ida da mesa e quatro rasgos no deslocamento de retorno da mesma, dividida por um ângulo de 30°. A especificação de rugosidade deve ser de  $Rz \leq 4 \mu\text{m}$  e forma de linha de  $\leq 8 \mu\text{m}$ .



Figura 36 – Peça de preparação e retificação final.

#### 6.3.1 Material da peça

Tabela 16 – Material da peça.

Material	Material n°	Micro-estrutura de fornecimento	Dureza
16 Mn Cr S 5	DIN 1.7139	Ferrita e perlita lamelar, sem bainita	$60 \pm 2 \text{ HRc}$ .
Composição química (% em peso)	Variação	Composição química (% em peso)	Variação
C	0,12 até 0,21	Si	Max. 0,43
Mn	0,96 até 1,35	Cr	0,75 até 1,15
P	Max. 0,04	S	0,015 até 0,040

### 6.3.2 Forma e dimensão dos canais

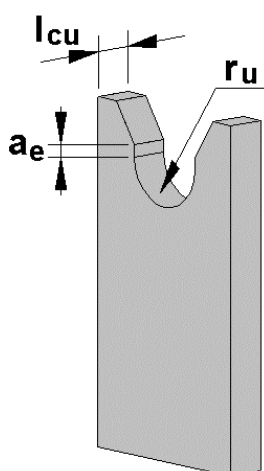


Tabela 17 – Sobrematerial retirado na operação atual.

Operação	$R_u$ (mm)	$l_{cu}$ (mm)	$a_e$
Preparação	3,00	3,10	0,00
Final	3,50	3,10	0,20

Figura 37 – Variáveis envolvidas.

### 6.4 A máquina retificadora empregada

Nesses testes, foi empregada uma máquina retificadora plana de mergulho, de produção denominado ABA-600 modelo FV600. As características da máquina retificadora são descritas na tabela 18.

Tabela 18 – Especificações da retificadora ABA 6000 modelo FV600.

Potência nominal (KW)	Amperagem (A) $C_c$	Voltagem (V)	Rotação máxima (rpm)
17	43	440	3.800

### 6.5 Fluido de refrigeração empregado

O fluido refrigerante empregado foi o ECOCUT HSG 915, do fabricante FUCHS [43]. Esse é um óleo integral especificado para altas velocidades de retificação, especialmente usado para abertura de canais em aços tratados termicamente, com elevada dureza e na fabricação de ferramentas de corte, como na abertura de canais de brocas, machos, alargadores de aço rápido (HSS), etc.

Esse é composto, basicamente, de óleo parafínico e aditivos especiais que reduzem substancialmente a formação de névoa, mesmo em altas velocidades de corte (Tab.20).



Não contém metais pesados, cloro e enxofre. Segue padrões internacionais quanto à preocupação com o meio ambiente e com o operador da máquina e os envolvidos.

Outra característica dessa operação é que a máquina é inteiramente fechada, possibilitando uma vazão bastante grande com uma baixa pressão do fluido refrigerante, conforme tabela 19 e figura 38.



Figura 38 – Bomba de fluido refrigerante de baixa pressão e alta vazão.

### 6.5.1 Condições de refrigeração

Tabela 19 – Pressão e vazão do fluido refrigerante ECOCUT HSG 915.

Pressão de refrigeração (bar)	Vazão (L/h)	Vazão (L/min)
2	45.000	750

### 6.5.2 Características do fluido refrigerante empregado

**Tabela 20** – Especificação do fluido refrigerante ECOCUT HSG 915 [43].

Ensaio	Método	ECOCUT HSG 915
Densidade a 20/4°C	ASTM D 1298	0,870
Ponto de fulgor °C	ASTM D 92	190
Viscosidade eSt	ASTM D 445	15
Nº de Neutralização mg KOH/g	ASTM D 974	0,05
Nº de Saponificação mg KOH/g	ASTM D 94	21
Corrosão em lâmina de cobre	ASTM D 130	1a
Calor específico	Kcal.kg/°C	0,5
Código do produto		36710

### 6.6 Balanceamento estático

Após a fixação do reboło no flange faz-se necessário corrigir o desbalanceamento inerente da montagem através do balanceamento estático. Para corrigir esse desbalanceamento é necessário empregar equipamentos denominados balanceadores estáticos de rebolos (Fig.39) vide 2.6.1.

O desbalanceamento surge quando o eixo principal de inércia do reboło, onde esta o centro de gravidade (CG), encontra-se deslocado em relação ao eixo de rotação do mesmo (Fig.18). A parte mais pesada do conjunto reboło e flange, pela ação da gravidade, ficará equilibrada na parte de baixo do reboło. Em qualquer posição que se girar o conjunto, este tenderá a parar na parte inferior. O flange de fixação, além de proporcionar a fixação na máquina retificadora, aloja também os contra-pesos necessários para fazer o balanceamento. O balanceamento é feito através de quatro divisões marcadas a 90° sendo que a referência é a "linha de centro gravitacional". O balanceamento é obtido através do deslocamento dos contra-pesos até que se consiga o equilíbrio do conjunto em qualquer posição angular.

No emprego de rebolos galvânicos, o ajuste do balanceamento não é o suficiente, pois esse não será reconicionado (dressado). O reboło pode estar balanceado, mas não

concêntrico. No caso de rebolos dressáveis, ou perfiláveis, a operação de dressagem será o suficiente para ajustar a concentricidade. Mas, no caso de rebolos galvânicos, o recondicionamento não é empregado e, por isso, faz-se a necessidade de um ajuste fino através da pista piloto (Fig. 35), com o emprego de relógio comparador milesimal.



Figura 39 – Balanceamento estático.

### 6.7 Exame visual de queima

O exame de queima é feito para detecção de queimas de retificação sobre a superfície da peça retificada após o processo de abertura do canal. O objetivo desse é o de revelar se houve, ou não, o comprometimento da camada limite ou zona termicamente afetada pelo calor (Fig.40). Este exame é feito visualmente através do contraste de cores, após a seqüência de lavagem e ataque de Nital ( $\text{HNO}_3$  e álcool), sobre a peça a ser avaliada conforme processo descrito abaixo:

- 1) Lavar com desengranxante e escova apropriada.
- 2) Lavar com álcool e soprar o ar com o objetivo de acelerar a secagem da peça.
- 3) Fazer o ataque de nital até que a peça fique na cor cinza escura.
- 4) Lavar com água para retirar o excesso de nital.
- 5) Lavar novamente com álcool e assoprar para acelerar a secagem da peça.
- 6) Fazer novamente o ataque de nital, agora com uma maior velocidade, para clarear a peça, que está na cor cinza escura.
- 7) Lavar com água para retirar o excesso de nital.
- 8) Lavar com álcool e secar a região na qual será examinada a queima.
- 9) Aplicar líquido neutralizador com o objetivo de evitar que a peça sofra o processo de fragilização pelo hidrogênio.
- 10) Mergulhar em óleo para evitar oxidação das peças
- 11) Fazer o exame visual de queima.

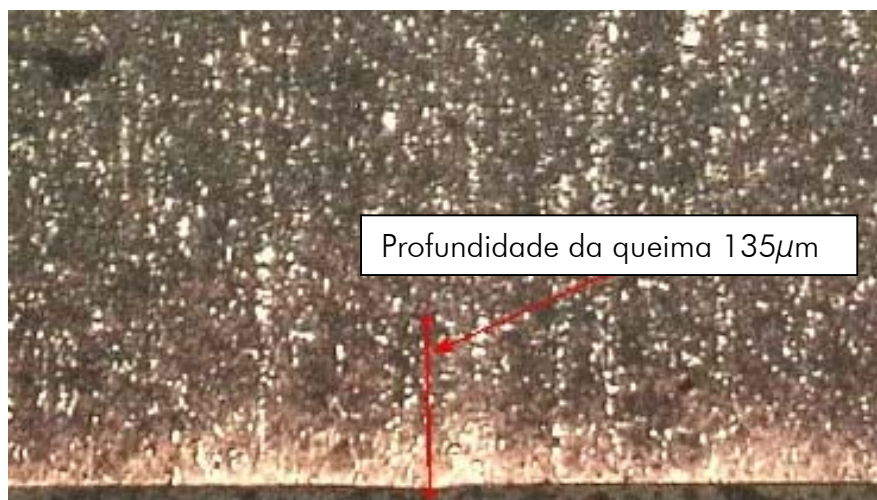


Figura 40 – Exemplo de camada afetada pelo calor[44].

### 6.8 Os meios de medição e fotográfico empregados

Vários foram os meios de medição empregados para coletar os dados necessários para a realização dos experimentos e para a avaliação dos resultados. Esses são descritos conforme abaixo.

### 6.8.1 Alicate de efeito Hall

O Alicate de efeito Hall modelo ET-3800 (Fig.41) é um amperímetro digital e foi empregado para a leitura da corrente elétrica consumida pelo motor da máquina retificadora quando da abertura dos rasgos. As características deste aparelho são descritas na tabela 21.



Figura 41 – Amperímetro de efeito Hall modelo ET-3800.

Tabela 21 – Especificação técnica do amperímetro modelo ET- 3800.

Modelo	Resolução	Incerteza de medição
ET-3800	0,10 A	$\pm (2,5\% + 3)$

### 6.8.2 Rugosímetro

O rugosímetro empregado, para medir rugosidades em Rz, foi o “Perthometer” modelo S6P do fabricante Mahr & Perthen. Suas características são descritas conforme tabela 22.

**Tabela 22** – Especificações técnicas do rugosímetro S6P da Mahr & Perthen.

Processador	Apalpador	Unidade de avanço	Incerteza de medição
S6P	RHT-3-50 Ponta de $r=5\mu\text{m} \times 90^\circ$	PRK	$\pm 10\%$

### 6.8.3 Aparelho de formas geométricas

A forma geométrica a ser examinada é a circularidade e, para esse fim, foi empregado o aparelho de medição de formas, ou circularímetro, “formtester” MMQ3 do fabricante Mahr & Perthen (Fig.42). As características técnicas desse aparelho de medição são descritas na tabela 23.

**Figura 42** – Circularímetro modelo MMQ3 da Mahr & Perthen.**Tabela 23** – Especificações do circularímetro MMQ3.

Processador	Apalpador	Coluna de medição	Incerteza de medição
F2P (4000 pontos/ rot)	T2W Deslocamento $\pm 1\text{mm}$ Força 0,05 – 0,08 N	MMQ3	Erro radial $0,1\ \mu\text{m}$ Erro axial $0,05\ \mu\text{m}$ (na mesa)

### 6.8.4 Microscópio

Para avaliação dos micro-desgastes dos grãos de CBN, bem como para a avaliação da camada termicamente afetada pelo calor, foi empregado um microscópio da marca Olympus, modelo PME-3, com características técnicas conforme tabela 24.

**Tabela 24** – Especificações do microscópio modelo PME-3.

Modelo	Ocular	Objetiva	Câmera fotográfica
PME3 -111B/ -312 B	10 x (graduada)	5, 10, 20, 50 e 100	Polaróide e digital

### 6.8.5 Aparelho usado para medir vibrações

O aparelho empregado para medir níveis de vibrações foi o VIBROPORT 30, do fabricante SCHENCK, mostrado na figura 43 e especificações técnicas conforme tabela 25.



**Figura 43** – Aparelho usado para medir vibrações VIBROPORT 30.

**Tabela 25** – Especificações do aparelho VIBROPORT 30.

Modelo	Frequência de medição	Incerteza de medição
VIBROPORT 30	2 Hz a 5 kHz	$< 1\% \pm 1$ dígito



## 7 PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO

Para avaliar o comportamento térmico e mecânico da deposição galvânica sobre um corpo de alumínio e o seu comportamento dinâmico, em termos de desbalanceamento radial, planejou-se fazer os experimentos de retificação do aço DIN 16 Mn Cr S5 temperado e beneficiado com 60 HRc na operação de abertura de rasgo com o rebolo de CBN de liga galvânica de corpo de alumínio. Para tal, inicialmente fez-se o balanceamento e o ajuste da concentricidade (Fig.39 e 46), conforme descrito no capítulo 6. Os grãos abrasivos (Fig. 44) serão fotografados antes e depois dos experimentos, os níveis de vibrações serão medidos com a máquina em vazio (somente com o sistema hidráulico ligado) e os experimentos serão executados conforme planejados nas tabelas 26 a 29.

Para a realização dos experimentos, deve-se fazer algumas alterações no processo, pois não havia a necessidade da operação de dressagem e tão pouco a compensação automática da mesa sobre a peça. Para tal, contamos com o departamento de manutenção mecânica, que retirou o rolo dressador, seguindo as instruções de montagem e desmontagem através do aquecimento do rolo e do resfriamento do eixo. A inibição da compensação automática da profundidade de dressagem sobre a peça foi conseguida através do desligamento do motor, que proporciona o incremento de compensação da dressagem, evitando assim a compensação automática da subida da mesa da máquina retificadora, o que evitou possíveis acidentes.

### 7.1 Retificação do aço DIN 16 Mn Cr S5

O objetivo deste teste é avaliar o comportamento térmico e mecânico do rebolo, em termos de consumo de energia elétrica (amperagem "A") em baixas e elevadas velocidades de corte, bem como avaliar o tipo de desgaste (micro ou macro-desgaste) do grão abrasivo de CBN, a camada termicamente afetada pelo calor, a rugosidade e a forma geométrica da peça retificada.

Neste trabalho, assumimos que quanto maior o consumo de energia maior serão os esforços de corte ( $F_nS/F_tS$ ) sobre o rebolo e, por consequência, sobre a peça a ser retificada.

Conforme evidenciado no capítulo 2, os maiores esforços mecânicos sobre o rebolo ocorrem em baixas velocidades de corte " $V_c$ ", para uma taxa de remoção específica e constante " $Q'_w$ ". Portanto, para se tirar conclusões sobre o comportamento mecânico do rebolo, será suficiente variarmos a velocidade de corte de 20 a 60 m/s, bem como a velocidade de remoção específica de 8 a 16 mm<sup>3</sup>/mm.s, na execução desses experimentos. Para isso, o teste de retificação do aço 16 Mn Cr S5 temperado e beneficiado com 60 HRc foi dividido em quatro experimentos conforme tabelas 26 a 29 abaixo.

I. Experimento N° 1

**Tabela 26** – Parâmetros de retificação para o experimento de n° 1.

N	$V_c$ (m/s)	$ae$ (mm)	$l_{cu}$ (mm)	$V_w$ (mm <sup>3</sup> )	$v_f$ (mm/s)	$Q_w$ (mm <sup>3</sup> /s)	$Q'_w$ (mm <sup>3</sup> /mm.s)
1	20	0,10	3,10	6,18	9,15	56,55	8,08
2	30	0,10	3,10	6,18	9,15	56,55	8,08
3	40	0,10	3,10	6,18	9,15	56,55	8,08
4	50	0,10	3,10	6,18	9,15	56,55	8,08
5	60	0,10	3,10	6,18	9,15	56,55	8,08

II. Experimento N° 2

**Tabela 27** – Parâmetros de retificação para o experimento de n° 2.

N	$V_c$ (m/s)	$ae$ (mm)	$l_{cu}$ (mm)	$V_w$ (mm <sup>3</sup> )	$v_f$ (mm/s)	$Q_w$ (mm <sup>3</sup> /s)	$Q'_w$ (mm <sup>3</sup> /mm.
1	20	0,20	3,10	6,88	9,15	62,95	8,99
2	30	0,20	3,10	6,88	9,15	62,95	8,99
3	40	0,20	3,10	6,88	9,15	62,95	8,99
4	50	0,20	3,10	6,88	9,15	62,95	8,99
5	60	0,20	3,10	6,88	9,15	62,95	8,99

## III. Experimento N° 3

**Tabela 28**– Parâmetros de retificação para o experimento de n° 3.

N	V <sub>c</sub> (m/s)	a <sub>e</sub> (mm)	l <sub>cu</sub> (mm)	V <sub>w</sub> (mm <sup>3</sup> )	v <sub>f</sub> (mm/s)	Q <sub>w</sub> (mm <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>w</sub> (mm <sup>3</sup> /mm.s)
1	20	0,20	3,10	6,88	16,85	115,93	16,56
2	30	0,20	3,10	6,88	16,85	115,93	16,56
3	40	0,20	3,10	6,88	16,85	115,93	16,56
4	50	0,20	3,10	6,88	16,85	115,93	16,56
5	60	0,20	3,10	6,88	16,85	115,93	16,56

## IV. Experimento N° 4

**Tabela 29** – Parâmetros de retificação para o experimento de n° 4.

N	V <sub>c</sub> (m/s)	a <sub>e</sub> (mm)	l <sub>cu</sub> (mm)	V <sub>w</sub> (mm <sup>3</sup> )	v <sub>f</sub> (mm/s)	Q <sub>w</sub> (mm <sup>3</sup> /s)	Q' <sub>w</sub> (mm <sup>3</sup> /mm.s)
1	20	0,10	3,10	6,18	16,85	104,13	14,88
2	30	0,10	3,10	6,18	16,85	104,13	14,88
3	40	0,10	3,10	6,18	16,85	104,13	14,88
4	50	0,10	3,10	6,18	16,85	104,13	14,88
5	60	0,10	3,10	6,18	16,85	104,13	14,88

**7.2 Análise do desgaste do grão abrasivo**

Como já foi verificado no capítulo 2, os rebolos de grãos superabrasivos com revestimento galvânico são de camada única. Portanto, o desgaste deste tipo de reboło somente é verificado através do micro desgaste do grão. Se existir um macro desgaste, verificado por desprendimento do grão de CBN da camada abrasiva, este revelará uma

falha na deposição galvânica e com isso poderá se concluir que o rebolo proposto não resiste aos esforços térmicos e mecânicos propostos pelos experimentos. Para tal avaliação, o grão de CBN será fotografado antes e após o ensaio. Planeja-se fotografar, se não o mesmo grão de CBN, pelo menos o grão de CBN de região próxima. Isso permitirá a avaliação da forma do desgaste e o valor desse desgaste após os ensaios. Para tal, foi feita uma marcação de referência no corpo do rebolo, identificando a região a ser fotografada (Fig. 44).



Figura 44 – Marca de referência para avaliação de micro e macro-desgaste do grão.

### 7.3 Balanceamento estático e ajuste da concentricidade do rebolo

Como já vimos anteriormente os rebolos de grãos superabrasivos, com revestimento galvânico, não permitem serem reconicionados (ou dressados) da mesma forma que os rebolos convencionais ( $Al_2O_3$  e CSi). Dessa forma, planejamos o balanceamento estático e o ajuste da concentricidade iniciando já no projeto do rebolo através da construção de uma pista piloto que é concêntrica com o furo e a camada externa galvânica (Fig. 35). Isso nos permite fazer o balanceamento estático com a flange fora da máquina retificadora (Fig.39) e ajustar a concentricidade do rebolo com ele montado no eixo da máquina com a ajuda de um relógio comparador (Fig. 46), de um apador de ponta fixa e de um martelo de borracha,

tomando o cuidado de não mais girar o rebolo sobre a flange. Após o ajuste do batimento, procede-se a fixação dos parafusos seguindo uma sequência cruzada.



Figura 45 – Rebolo balanceado e fixado na máquina.



Figura 46 – Ajuste da concentricidade.

## 7.4 Influência dos parâmetros de retificação

Abaixo, segue a análise das influências da variação da velocidade de corte e da remoção específica sobre os esforços de corte e o acabamento da peça em termos de rugosidade.

### 7.4.1 Influência da velocidade de corte sobre os esforços de corte

Com o resultado do teste, pode-se analisar a influência no esforço de corte com o aumento da velocidade de corte " $V_c$ " para quatro distintas velocidades de remoção " $Q'_w$ ". Os esforços de corte são avaliados através da corrente elétrica consumida " $A$ " no processo de abertura do canal.

Sabe-se que, quanto maior a corrente consumida, maior será força de corte atuante no diâmetro externo do rebolo. Espera-se obter uma redução do consumo de corrente elétrica, com o aumento da velocidade de corte para uma velocidade de remoção constante, pois, como foi visto no capítulo 2, com o aumento da velocidade de corte, mantendo-se as demais variáveis constantes, (há uma redução da espessura média do cavaco " $h_{cu}$ "), portanto, é esperada uma redução das forças de corte envolvidas nesse processo de retificação.

### 7.4.2 Influência da velocidade de remoção sobre os esforços de corte

Nesse ensaio, também analisar-se-á a influência do aumento da velocidade de remoção específica " $Q'_w$ " sobre os esforços de corte. Os esforços de corte serão avaliados através da corrente elétrica consumida " $A$ " no processo de abertura do rasgo. Sabemos que quanto maior a corrente consumida maior será a força de corte atuante na periferia do rebolo. Da mesma forma, espera-se obter um aumento do consumo da corrente elétrica, com o aumento da velocidade de remoção, para uma velocidade de corte constante, pois, com o aumento da velocidade de remoção, mantendo as demais variáveis constantes, há um aumento da espessura equivalente do cavaco " $h_{cu}$ " e, portanto, um aumento das forças de corte envolvidas na abertura do rasgo pelo processo de retificação.

### 7.4.3 Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade

O processo de deposição galvânica, no aço ou no alumínio, traz uma característica particular desses rebolos na operação de retificação. Essa característica está relacionada à rugosidade. Os rebolos convencionais podem ser facilmente dressados e sua rugosidade será tanto menor quanto for o avanço de dressagem. Nos rebolos de grãos superabrasivos, uma vez determinado o tamanho de grão e confeccionado o rebolo, a rugosidade somente poderá ser otimizada através da velocidade de corte ou ainda pelo processo “touch-dressing” que não se aplicará neste trabalho. Como com o aumento da velocidade de corte “ $V_c$ ”, mantendo os outros parâmetros constantes, a espessura equivalente “ $h_{cu}$ ” é reduzida, portanto, espera-se uma redução da rugosidade da peça, a medida que há o aumento da velocidade de corte [51].

### 7.4.4 Influência da velocidade de remoção sobre a rugosidade

Com o aumento da velocidade de remoção específica “ $Q'_w$ ”, mantendo os demais parâmetros constantes, a espessura equivalente do cavaco “ $h_{cu}$ ” aumenta e, portanto, há uma tendência do aumento da rugosidade da peça retificada [47].

## 7.5 Exame visual de queimas

Quanto maior for a corrente consumida, maiores serão os esforços de corte sobre a peça, dessa forma, precisamos avaliar se há o comprometimento da camada limite (camada termicamente afetada pelo calor). Para tal, vamos fazer o exame visual de queima através do ataque de nital em 100% dos canais retificados, conforme processo descrito no capítulo 6 parágrafo 6.7.

## 7.6 Teste de vibrações

As vibrações produzidas por um rebolo desbalanceado em uma máquina retificadora são indesejáveis ao processo, podendo levar danos ao fuso da máquina retificadora, bem como problemas de acabamento à peça, como facetas e marcas de vibrações. A força centrífuga cresce com razão direta do quadrado da velocidade e, portanto, quanto maior a velocidade de corte, maiores serão os níveis de vibrações do rebolo e maiores as solicitações sobre o fuso e rolamentos. Dessa forma, o conjunto rebolo e flange devem ser

perfeitamente balanceados. A prática diz que os níveis de vibrações, para retificadoras de precisão, não devem ultrapassar velocidades de 0,2 (mm/s).



## 8 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

São apresentados abaixo os resultados obtidos através dos experimentos de retificação, bem como a análise numérica do comportamento do rebolo de CBN de corpo de alumínio ligado pelo processo galvânico, conforme projetado no capítulo 6 (Fig. 35).

Os experimentos de retificação foram realizados com o emprego do aço DIN 16 Mn Cr S5 temperado e beneficiado com dureza de 60 HRc. Empregou-se um rebolo de CBN com liga galvânica de corpo de alumínio em operação de retífica plana de mergulho, conforme apresentado também no capítulo 6. Esses experimentos foram realizados na empresa Robert Bosch Ltda, na região metropolitana de Curitiba.

A análise numérica foi realizada no **Grante** (Grupo de Análise e Projeto Mecânico) da UFSC, com um corpo de formato genérico 3A1 (Fig. 35) de liga de alumínio submetido a uma rotação de 40.000 rpm. O objetivo é avaliar sua expansão radial e axial, bem como avaliar o sistema de fixação proposto com o furo de localização e o furo de arraste ou de torque. Através desses resultados, pode-se entender o comportamento dos diversos formatos de rebolos conforme, classificação da norma FEPA.

### 8.1 Retificação do aço 16 Mn Cr 5

Abaixo são enumerados os resultados da influência da velocidade de corte " $V_c$ " e da velocidade de remoção " $Q'w$ " sobre a corrente elétrica consumida, medida em Amperes " $A$ ", o acabamento superficial da peça avaliada através da rugosidade " $R_z$ " e a forma geométrica da superfície retificada medida através da tolerância da forma de linha "[ $\cup$ ]", bem como, o macro e o micro-desgaste do grão abrasivo através de fotos efetuadas em microscópio e a análise metalográfica da camada limite resultante dos experimentos.

### 8.1.1 A influência da velocidade de corte sobre o consumo da corrente elétrica

Analisando o gráfico abaixo, podemos afirmar que os esforços de corte, avaliados através da corrente elétrica "A", são maiores quando o rebolo é submetido a baixas velocidades de corte " $V_c$ " e esses esforços são reduzidos à medida que a velocidade de corte aumenta, mantendo os demais parâmetros constantes. Isso se deve à redução da espessura média do cavaco " $h_{cu}$ ", à medida que a velocidade de corte aumenta. Conforme observado na figura 47, o maior consumo de corrente elétrica (11,70 A), foi à velocidade de 20 m/s, com a velocidade de remoção de 16,56 mm<sup>3</sup>/mm.s.

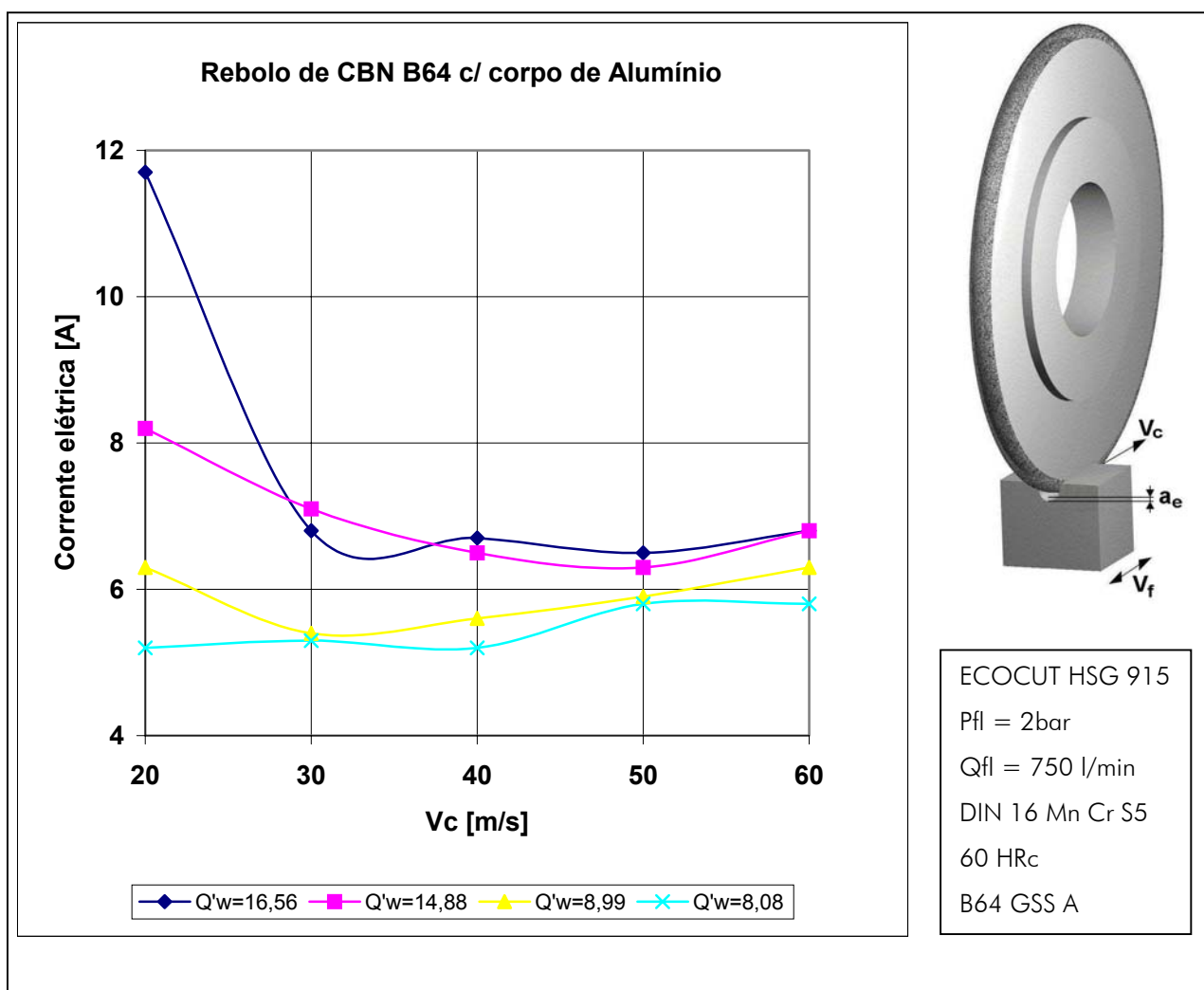


Figura 47 – Comportamento da Corrente elétrica com o aumento da Velocidade de corte.

Esses dados são resultados do experimento de número 3 (Tab. 28), onde o exame de ataque de nital revelou queimas na camada limite (camada termicamente afetada pelo

calor, comprometendo a qualidade da peça retificada, conforme evidenciado pela análise metalográfica (Fig. 55).

### 8.1.2 A influência da velocidade de remoção específica sobre o consumo da corrente elétrica

Com o aumento da velocidade de remoção " $Q'w$ " (Fig.48), há o aumento do consumo de corrente elétrica " $A$ ", evidenciando um aumento da força de corte " $F_c$ ", à medida que a velocidade de remoção específica é aumentada. Isso se deve ao aumento da espessura média do cavaco " $h_{cu}$ ", considerando os demais parâmetros constantes.

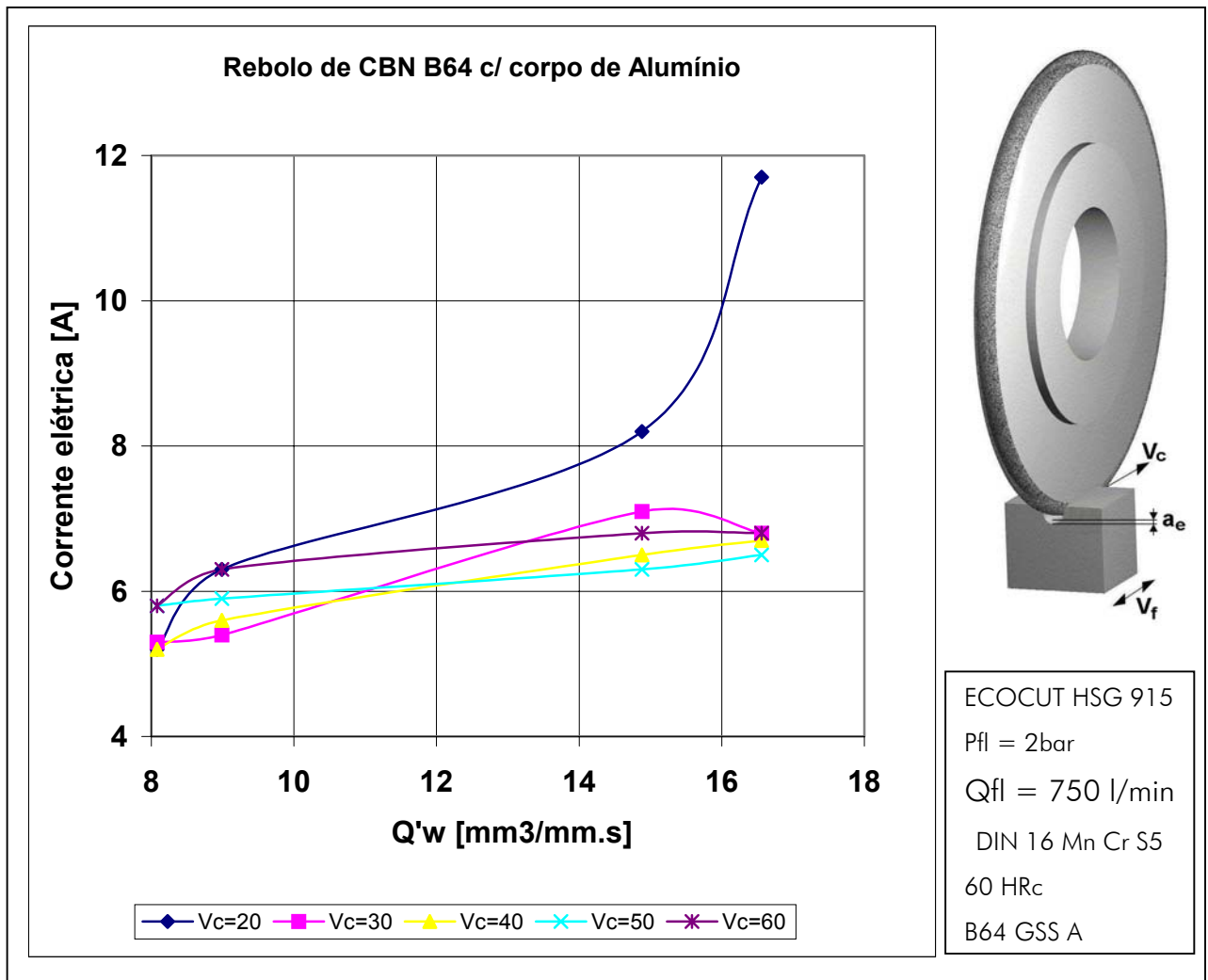


Figura 48 – Comportamento da Corrente elétrica com aumento da Velocidade de remoção.

### 8.1.3 A influência da velocidade de corte sobre a rugosidade da peça

O gráfico abaixo (Fig. 49) revela a queda da rugosidade "Rz", em função do aumento da velocidade de corte "Vc", sem a influência de qualquer dressagem, exceto o micro-desgaste natural dos grãos abrasivos de CBN. Isso é explicado pela redução da espessura média do cavaco " $h_{cu}$ ", considerando os demais parâmetros constantes.

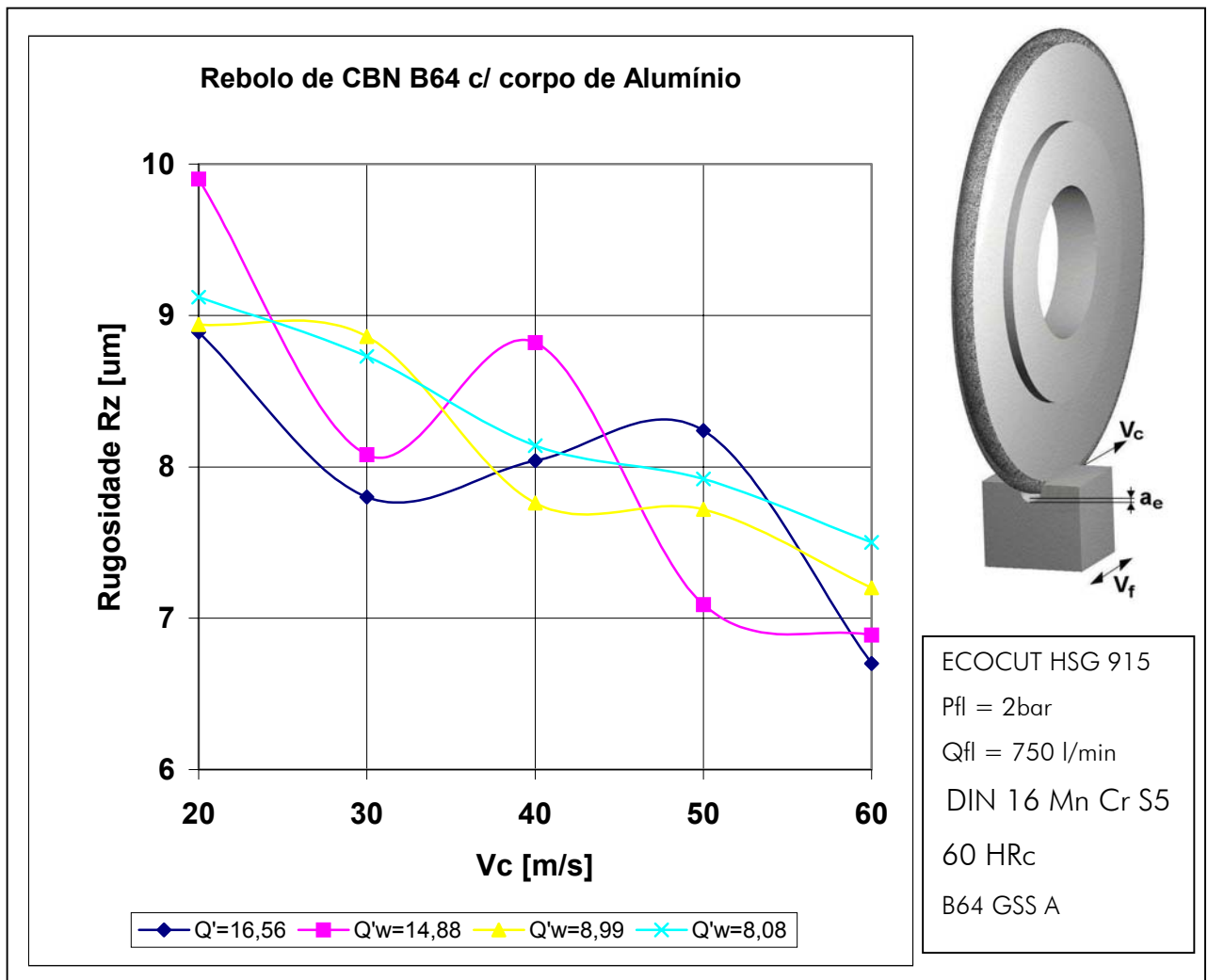


Figura 49 – Comportamento da Rugosidade com o aumento da Velocidade de corte.

### 8.1.4 A influência da velocidade de remoção específica sobre a rugosidade da peça

Pode-se observar, através do gráfico abaixo (Fig.50), que a rugosidade "Rz" varia muito pouco ao longo do incremento da velocidade de remoção específica "Q'w", mantendo-se os demais parâmetros constantes. Podemos dizer que as dispersões dos pontos crescem à medida que a velocidade de remoção aumenta. Isto se deve a um possível arredondamento dos grãos abrasivos, provocado por um micro-desgaste.

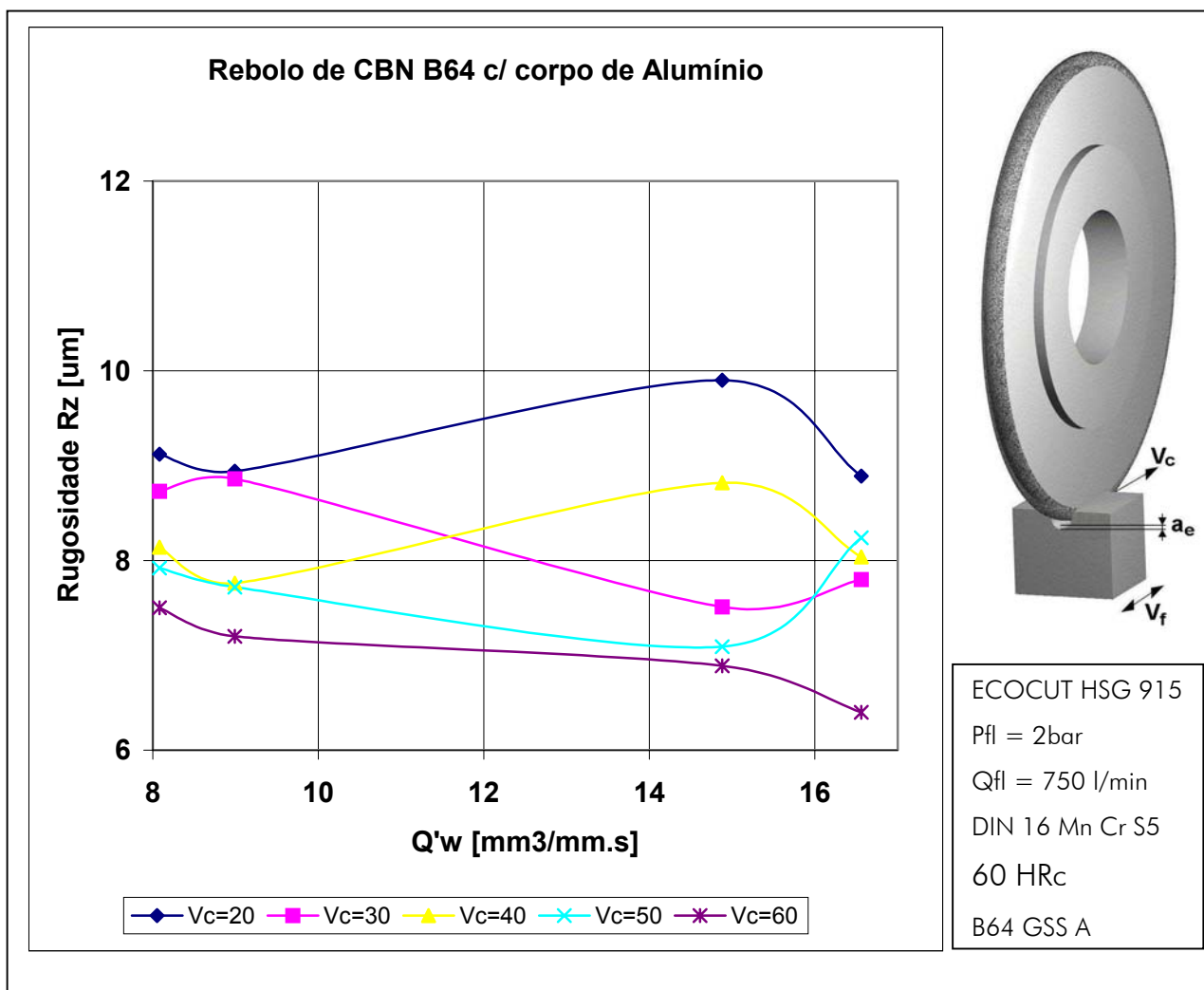


Figura 50 – Comportamento da Rugosidade com o aumento da Velocidade de remoção.

### 8.1.5 O balanceamento estático, a ajustagem do rebolo no flange e os níveis de vibrações

Através do procedimento de ajustagem, descrito no capítulo anterior (Fig. 45 e 46), o desbalanceamento do rebolo, montado sobre o flange, foi reduzido ao mínimo através do uso da pista piloto, com um ajuste do batimento radial dentro de  $5 \mu\text{m}$ . Com isso, foram reduzidos os níveis de vibrações no fuso (Fig. 51). Dessa forma, a curva de vibrações abaixo (Fig. 51) revela um pico de vibração a 40 m/s (1.910 rpm). Como se trata de uma faixa de velocidades, conclui-se que esse se deve a um possível desgaste de rolamento do fuso causado pelo uso do conjunto flange e rebolo desbalanceado anterior aos experimentos. Isso causará um erro de forma geométrica na peça, conforme pode ser visto na seção 8.1.6 (Fig. 52).

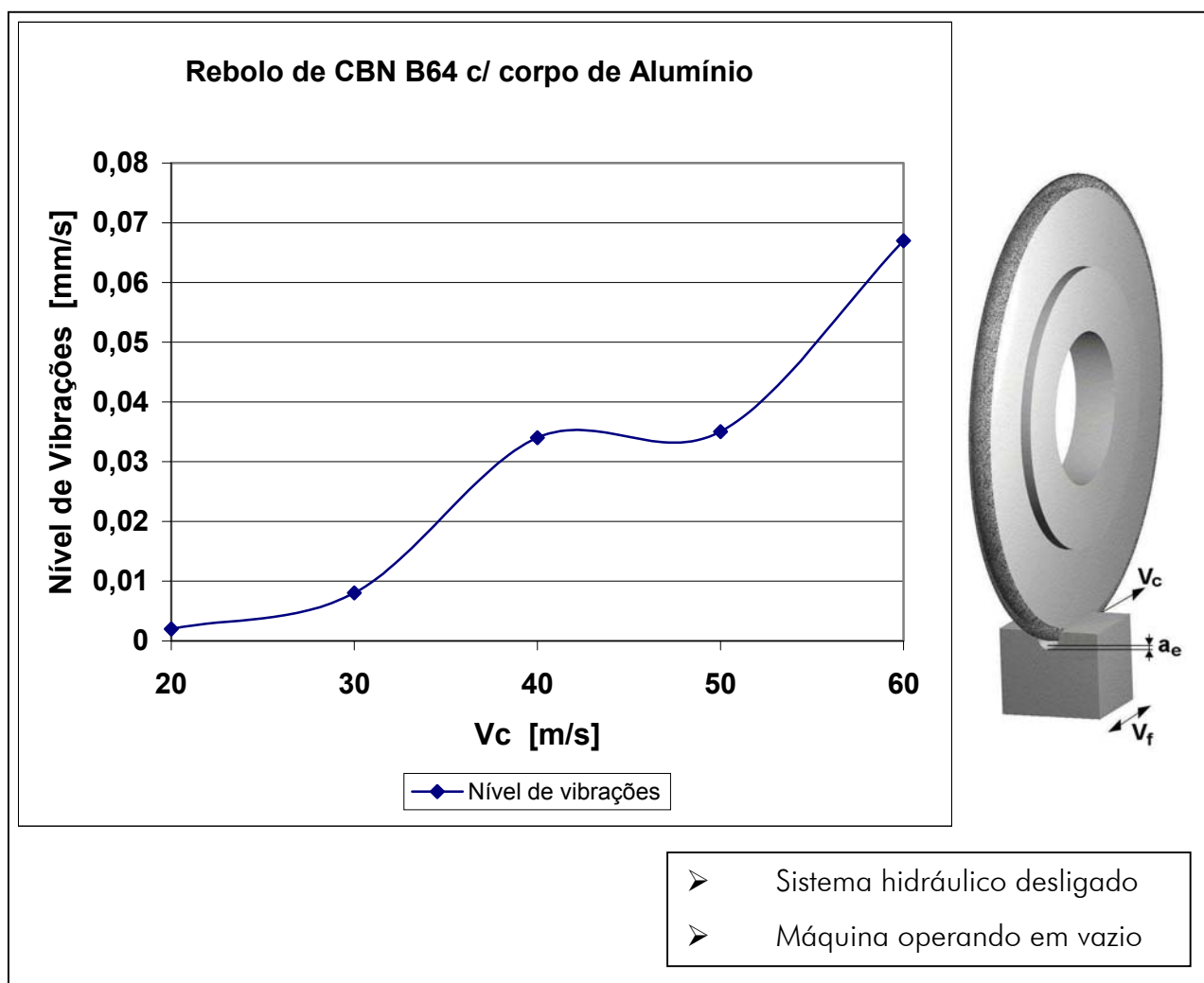


Figura 51 – Comportamento dos níveis de vibrações com a Velocidade de corte.

### 8.1.6 A influência da velocidade de corte sobre o erro de forma de linha "[U]"

No gráfico abaixo (Fig.52), se for eliminada a influência da vibração causada pelo desgaste do rolamento a 40 m/s, pode-se afirmar que os erros de formas tendem a ficar constantes com o aumento da velocidade de corte, "Vc", ou, se sofrerem um incremento, esse será o mínimo e causado pelo aumento da força centrífuga com o aumento da rotação do rebolo. O aumento da velocidade de corte tem como consequência uma redução da espessura média do cavaco " $h_{cu}$ " e, portanto, uma redução das forças de corte " $F_c$ " envolvidas, como foi visto na figura 47. No entanto, a força centrífuga cresce com o quadrado da velocidade e, se existirem folgas na máquina retificadora, essas serão evidenciadas através dos erros de formas geométricas na peça retificada.

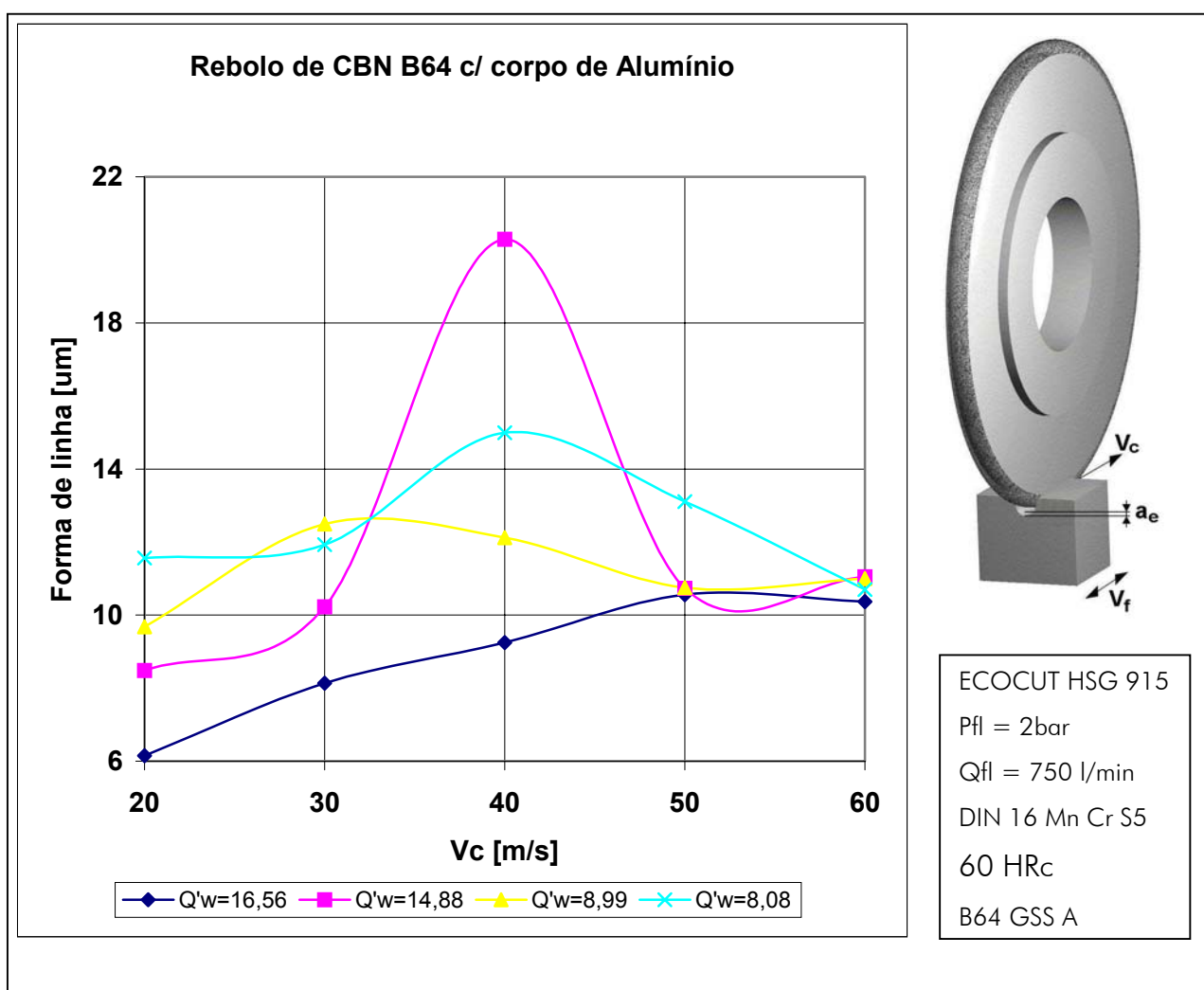


Figura 52 – Comportamento da forma de linha com o aumento da Velocidade de Corte.

### 8.1.7 A influência da velocidade de remoção sobre o erro de forma de linha “[U]”

Da mesma forma, se for eliminada a influência da vibração causada pelo desgaste do rolamento a 40 m/s, pode-se afirmar que os erros de formas tendem a se reduzir com o aumento da velocidade de remoção específica “ $Q'w$ ” (Fig. 53). Essa redução dos erros de forma é justificada pela eliminação de possíveis folgas da máquina retificadora com o aumento do esforço de corte “ $F_c$ ”. Isso é causado pelo aumento da espessura equivalente ao cavaco “ $h_{cu}$ ”, proporcionado pelo aumento da velocidade de remoção.

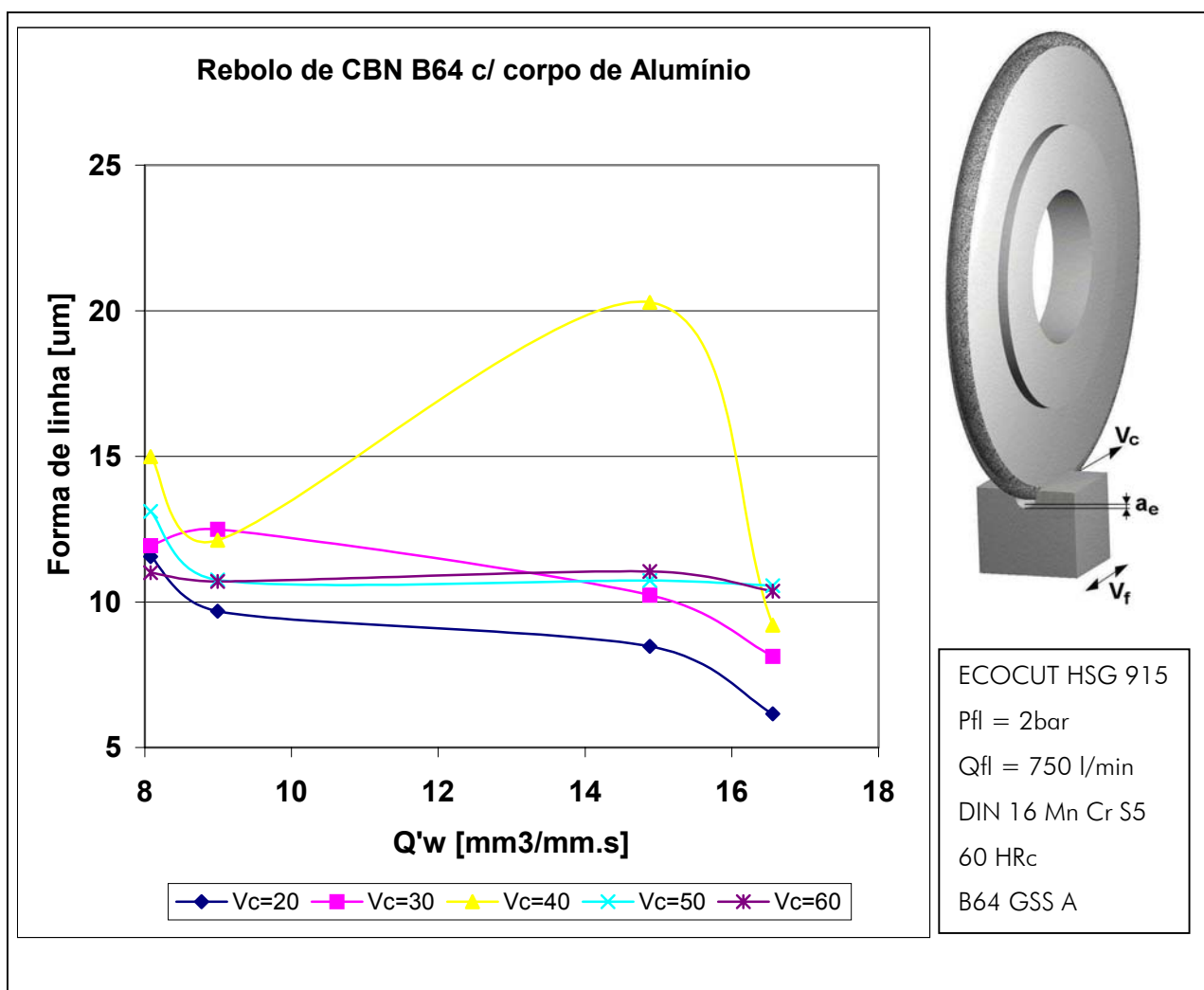


Figura 53 – Comportamento da forma de linha com o aumento da Velocidade de remoção



## 8.2 Análise da camada afetada pelo calor

O ataque de nital, em 100% das peças retificadas, revelou que a camada limite foi afetada pelo calor proveniente das altas taxas de retificação do experimento de número 3, conforme figura de número 47. Dessa forma, a peça danificada foi encaminhada ao laboratório de análise metalográfica, para avaliação da profundidade da camada afetada pelo calor com resultados descritos abaixo (Fig.54 e 55):

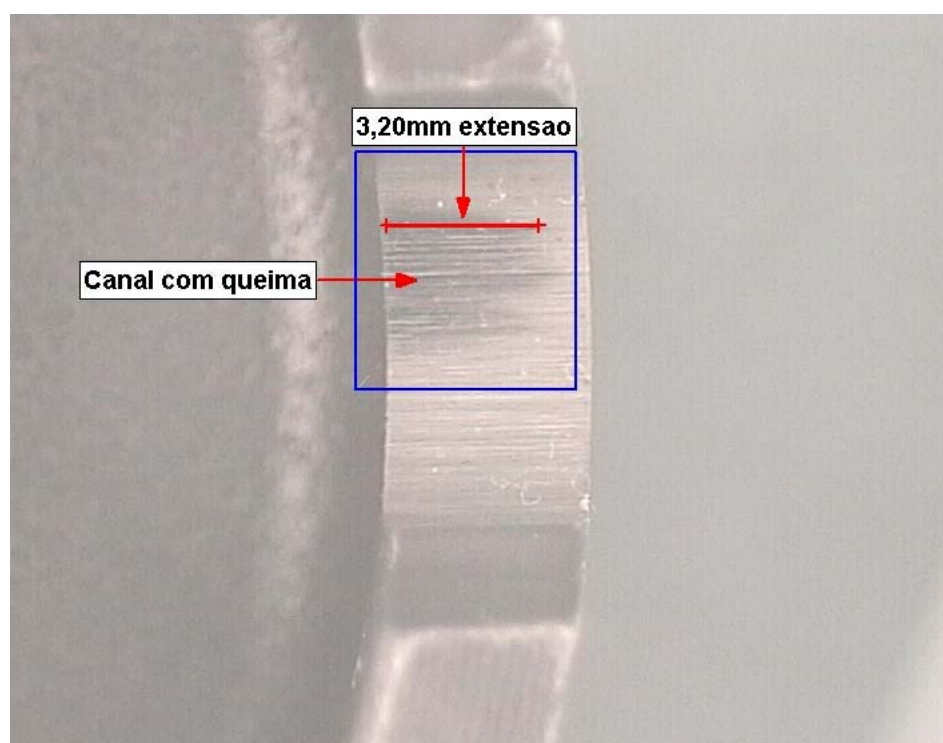


Figura 54 – Queima de retificação no experimento de nº 3.

### 8.2.1 Análise metalográfica

O resultado da análise metalográfica (Fig. 55) revelou que houve queima de retificação de extensão de 3,2 mm a uma profundidade de 0,3 mm. A análise também revelou que a profundidade da queima provoca uma retêmpera (amolecimento seguido de têmpera), a uma profundidade de 0,05 mm, seguida de um revenimento até a profundidade de 0,30 mm. Essa diferença de fases, causada pela retêmpera e martensita revenida com 0,30 mm de profundidade, pode levar ao surgimento de micro-trincas. Isso pode reduzir a vida do componente (peça) ou levar até a quebra da peça e, portanto, falha do componente da bomba, reduzindo a vida do produto. Essa peça é considerada, de imediato, como refugo do processo.

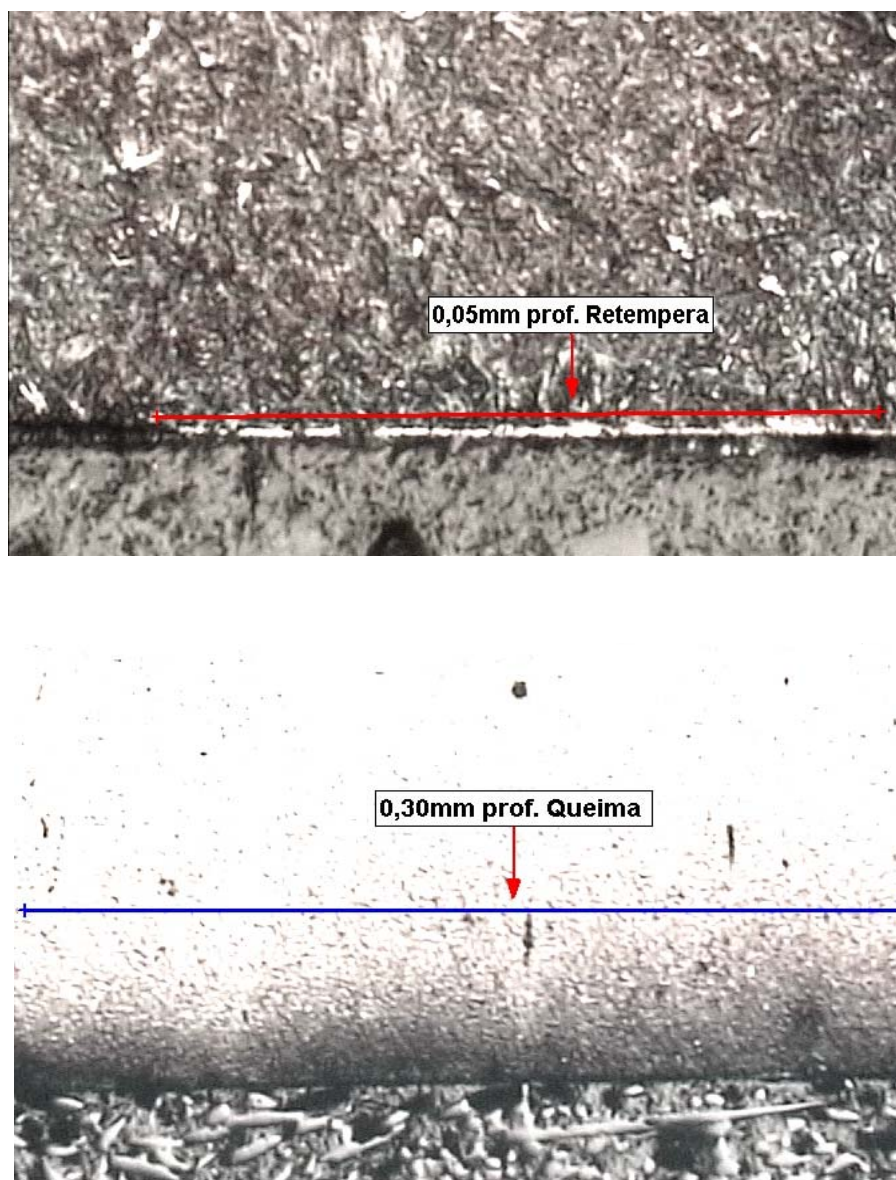


Figura 55 – Análise da camada limite

### 8.3 Análise da camada abrasiva

Após a retificação de 200 canais, o rebolo foi submetido a uma análise visual da camada abrasiva, com o objetivo de verificar se o ligante galvânico resistiu aos esforços térmicos e mecânicos sofridos na realização dos experimentos, bem como a uma análise dos desgastes sofridos pelo grão de CBN (Fig. 56 e 57). Para facilitar essa análise foram fotografadas regiões próximas (vide Fig. 44), antes e depois da execução dos experimentos, conforme mostrado abaixo. Essas possibilitaram a avaliação do macro-desgaste e micro-desgaste do grão de CBN.

### 8.3.1 Análise do macro-desgaste do grão de CBN

Como resultado da avaliação visual da camada abrasiva, não foi encontrado nenhum desprendimento de grão da matriz galvânica (Fig.56). Portanto, não foi caracterizado nenhum macro-desgaste do rebolo. Isso revela que o ligante galvânico resistiu aos esforços aos quais foi submetido. Também não foi encontrado nenhum empastamento entre grãos de CBN, revelando um corte macio e frio nos experimentos. Portanto, o rebolo resistiu aos esforços os quais foi submetido.

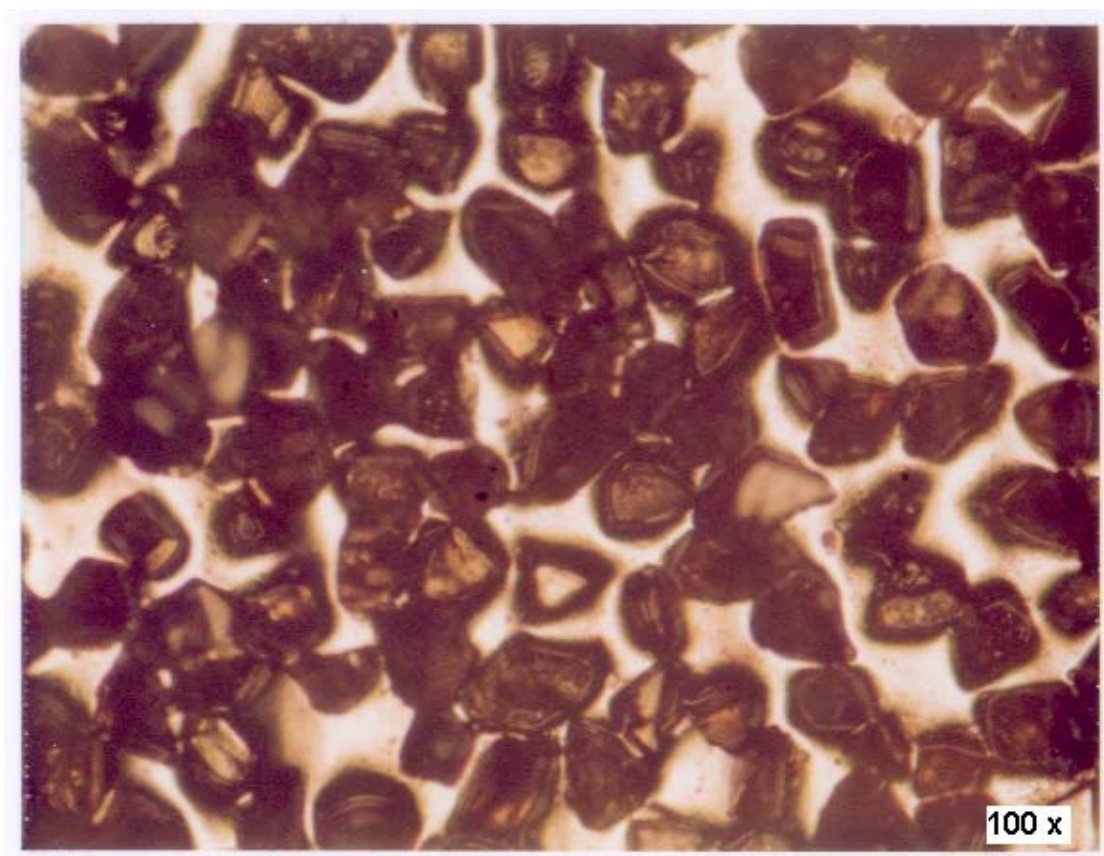


Figura 56 – Isenção de macro-desgaste do grão de CBN

### 8.3.2 Análise do micro-desgaste do grão de CBN

Embora seja muito difícil caracterizar o valor do micro-desgaste sofrido pelos grãos de CBN, pode-se, pelo menos, identificar os desgastes após a realização dos experimentos. A análise sobre as fotos abaixo (Fig.57 e 58) evidencia o micro-desgaste sofrido pelo grão de CBN após a retificação de 200 canais. Pode-se afirmar que os grãos apresentam micro-desgaste na faixa de 16  $\mu\text{m}$ . Uma parcela desse micro-desgaste é causada devido ao

desgaste por oxidação, em função das altas taxas de retificação empregadas principalmente no experimento de número 3, que são caracterizadas pelo arrendamento dos grãos de CBN. Uma outra parcela se deve ao micro-lascamento do grão de CBN, também causado pelos esforços de corte proporcionados pelos experimentos.

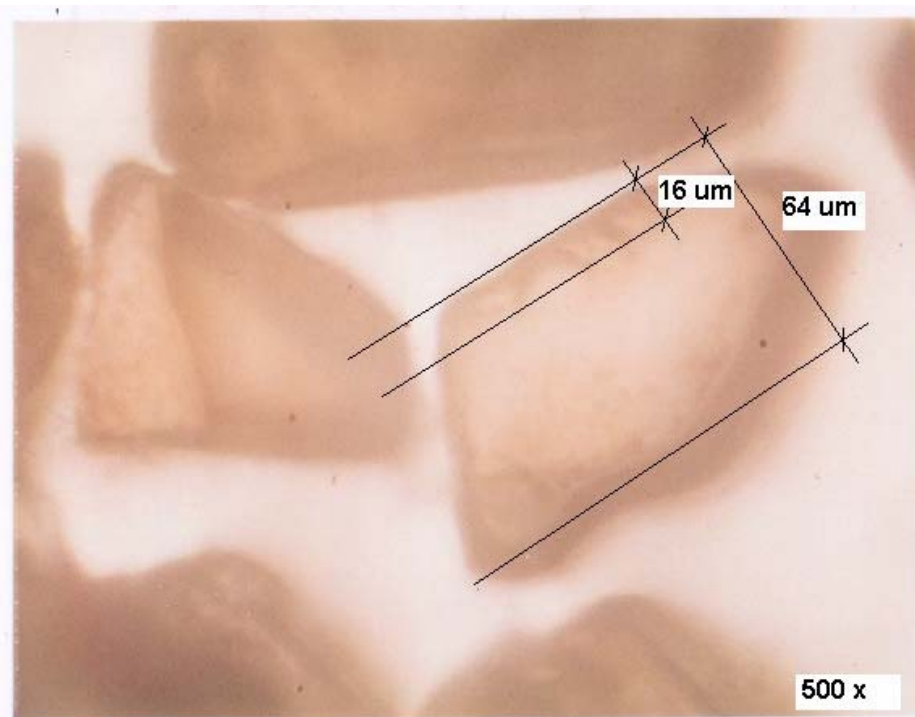


Figura 57 – Micro-desgaste do grão de CBN após os experimentos.



Figura 58 – Grão de CBN antes dos experimentos.

## 9 CONCLUSÕES

A aplicação de rebolos com grãos superabrasivos na indústria de peças seriadas, no uso em ferramentarias e na fabricação e afiação de ferramentas de corte, foram o foco deste trabalho. Após quase três anos de extensa pesquisa técnico-científica na área do desenvolvimento de ferramentas abrasivas para operações de retificação com rebolo superabrasivos de ligante galvânico e após diversos experimentos práticos realizadas em quase 17 anos de trabalho na área de usinagem com ferramentas de corte de geometria definida e não definida, pode-se verificar que há um campo de aplicação de rebolos de liga galvânica de altíssimas vantagens econômicas que não é atingido por limites técnicos do material do corpo (aço) empregado atualmente. Dessa forma, o desenvolvimento tecnológico proposto neste trabalho teve sempre como finalidade ajudar os técnicos e engenheiros que atuam nesta área a solucionar ou otimizar problemas de processos de retificação, com uma nova ferramenta denominada rebolos galvânicos de corpo de alumínio.

Ao término dos experimentos realizados e relatados nos capítulos anteriores, pode-se, neste capítulo, concluir e identificar as vantagens, as desvantagens e os limites de aplicação dessa nova ferramenta ou desse novo desenvolvimento tecnológico na área da retificação. Para facilitar o entendimento da conclusão deste trabalho, vamos nos basear nos resultados dos experimentos realizados, na análise numérica e nos limites do emprego dessa nova ferramenta.

Após a realização dos experimentos, pode-se concluir que os resultados tecnológicos sobre a peça retificada, em termos de tolerâncias de acabamento e de forma geométrica da superfície da peça, são muito próximos aos rebolos de corpo de aço, pois a disposição do grão abrasivo na camada abrasiva é uma característica do processo de deposição galvânica e independe do material do corpo do rebolo. Já as tolerâncias dimensionais são influenciadas pela expansão elástica e térmica inerente da velocidade de corte empregada no processo. Os rebolos com corpo de alumínio trazem algumas vantagens ao processo de retificação, como a maior troca de calor na operação, possibilitando um corte mais “frio”, reduzindo o percentual do fluxo de calor sobre a peça, protegendo assim a camada limite e, portanto, a peça. Além disso, o rebolo de corpo de alumínio permite trabalhar com maiores

velocidades que o corpo de aço, possibilitando assim a otimização de tempos do processo de retificação como visto no capítulo 2. É, entretanto, necessária a otimização do projeto e tolerâncias do corpo do rebolo, buscando minimizar os esforços resultantes do desbalanceamento e da expansão que são ampliados com o aumento da velocidade. Outra vantagem está no manuseio do operador quando da montagem, balanceamento, ajustagem e desmontagem do rebolo na máquina retificadora. O peso próprio é reduzido para 1/3 e, portanto, sua inércia é também reduzida, possibilitando a otimização dos tempos de processo para aceleração e desaceleração do rebolo. Além disso, os níveis de vibrações e ruídos são reduzidos em função do menor peso específico e do menor módulo de elasticidade na razão de 1/3 em relação ao do aço.

A análise numérica, feita sobre um formato 3A1 de corpo de alumínio (vide capítulo 5 e 8), mostra que os corpos de rebolos para diferentes processos de retificação sofrem diferentes expansões no sentido radial e axial e que essas dependem exclusivamente do projeto do corpo do rebolo, mas de forma geral pode-se afirmar que corpos de rebolos empregados em operações de retificação cilíndrica externa e interna e retificação plana tangencial sofrem expansões, predominantemente, radiais. Já as operações de retificação plana de mesa rotativa e as operações de fabricação e afiação de ferramentas de corte sofrem expansões radiais e axiais. A expansão sofrida pelo formato do corpo 3A1, quando submetido à alta velocidade (160 m/s), descrita no capítulo 8, seção 8.4.2, fornece um valor de expansão máxima de 427  $\mu\text{m}$ . Conforme discutido no capítulo 5, no caso de um corpo de rebolo de liga galvânica, a cama abrasiva à base de níquel poderá não acompanhar a expansão do corpo levando a tensões internas de cisalhamento. Essas tensões poderão causar micro-trincas e, como consequência, levar ao desprendimento da camada abrasiva do corpo do rebolo, o que seria drástico a essa rotação. Portanto, é preciso e é sugestão para próximos trabalhos, avaliar numericamente o comportamento do corpo de alumínio revestido com uma camada de níquel quando submetido a altas velocidades.

Quanto ao sistema de fixação proposto, os resultados mostrados no capítulo 8, seção 8.4.1, permitem afirmar que é plenamente possível trabalhar com o tipo de fixação de furo de localização e centragem e dois furos de arraste ou de torque proposto para as especificações deste projeto já que a análise, através do critério de Von Mises, forneceu um coeficiente de segurança de 1,5.

De uma forma geral, com os resultados obtidos, pode-se concluir que a deposição galvânica em corpo de alumínio resiste à baixas e elevadas velocidades de corte e que este material do corpo traz grandes benefícios aos processos de retificação em geral possibilitando o aumento da velocidade de remoção, a redução da inércia e facilitando o manuseio do rebolo pelo operador na montagem e desmontagem no fuso da máquina.

Para o emprego desses rebolos em altas e altíssimas velocidades de corte, é preciso otimizar o projeto do rebolo em termos do perfil do corpo e avaliar, através de análise numérica e experimentos, os resultados da expansão do corpo de alumínio em relação à camada de superabrasivo depositada através do processo eletrolítico para evitar possíveis danos ao processo como um todo.

## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KÖNIG, Wilfried. **Tornear, Fresar e Furar**. Tradução de Weingaertner, Walter. Florianópolis: UFSC, 1980. 409p. Título original: Fertigungsverfahren Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren.
- [2] KÖNIG, Wilfried. **Remoção**. Tradução de Weingaertner, Walter. Florianópolis: UFSC, 1980. 321p. Título original: Fertigungsverfahren Band 3: Erodieren.
- [3] KÖNIG, Wilfried. **Retificação, Brunimento e Lapidação**. Tradução de Weingaertner, Walter. Florianópolis: UFSC, 1980. 342p. Título original: Fertigungsverfahren Band 2: Schleifen, Honen, Läpen.
- [4] SCHROETER, R. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de geometria definida**. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Mecânica de Precisão, Florianópolis. Apostila.
- [5] HOLZ, R.; SAUER, J. **Schleifen mit Diamant und CBN**. Norderstedt: Winter-verlag, 1998. 172p.
- [6] WINTER, **Catálogo de rebolos**, Abril 1997. 57p.
- [7] BERTALAN, C. **Retificação com Rebolos de Nitreto de Boro Cúbico em Máquinas-Ferramentas Convencionais**. Florianópolis, 1997. 209f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Pós-graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina.
- [8] MORALES, D. **Análise e monitoramento da retificação do ferro fundido nodular com rebolos de nitreto de boro cúbico**. Florianópolis, 2002. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Pós-graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina.



- 
- [9] SCHUITEK, A. J.; SEVERIANO, A. C.; BELLOS, N. L. **Um caso bem-sucedido de uso de rebolos de CBN**. Máquinas e metais, p.112-125, Outubro 2001.
- [10] SCHUITEK, A.; SEVERIANO, A.; BELLOS, N. **Otimização de Processo de Retificação Utilizando Rebolos de CBN**. In: I Congresso Brasileiro de Engenharia Fabricação, 2001, Curitiba. ABCM, 2001.
- [11] BASTOS, F. **Retificação Cilíndrica externa para diferentes condicionamentos do rebolo de nitreto de boro cúbico**. Florianópolis, 1999. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Pós-graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina.
- [12] ALCOA, **Informações gerais**, Catálogo do fabricante. [s/d]
- [13] VLACK, V.; HALL, L. **Princípio de Ciência dos Materiais**. Tradução de Luiz P. C. Ferrão, São Paulo, 1970. 427p.
- [14] JACKSON, M.; DAVIS, C.; HITCHINER, M.; MILLS, B. **High-speed grinding with CBN grinding wheels – applications and future technology**. Journal of Materials Technology, p.78-88, 2001.
- [15] CARIUS, A. **Super-revestimentos para superabrasivos**. Máquinas e metais, p.92-101, Abril 1999.
- [16] KÖNIG, W., FERLEMANN, F. CBN. **Schleifscheiben für 500 m/s chnittgeschwindigkeit**. Industrial Diamond Review, p.242-251, Apr.1990.
- [17] LEME, S. **Dressamento por toque de rebolos de CBN**. Florianópolis, 1999. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Pós-graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina.

- 
- [18] STEMMER, E. **Ferramentas de corte II**. Florianópolis: Editora UFSC, 1992.
- [19] RENKER, H. **Fluídos de corte e refrigeração no processo de retificação**. Traduzido pela empresa Studer, São Paulo: Março 1976. 5p.
- [20] NOVOTECNIC. **La filtración en los procesos de rectificado con muelas de BORAZON**. Filtration news, 1993.
- [21] MEYER, H.; KLOCKE, F.; SAUREN, J.; FERLEMANN, F. **High-speed Grinding with CBN Wheels**. Manufacturing Engineering, p.67-72, Febr. 1989.
- [22] TREFERT, C. **Hochgeschwindigkeitsschleifen mit galvanisch gebundenen CBN-schleifscheibe**, Doctoral Thesis, Technische Hochschule Aachen, Germany, 1972.
- [23] BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMAN, M. **Friction, cooling, and lubrication in grinding**, Ann. CIRP 48 (1999) 581-598.
- [24] GMN, **Informações gerais**, Catálogo do fabricante. [s/d]
- [25] UVA, **Informações gerais**, Catálogo do fabricante. [s/d]
- [26] BOEIRA, A. **Fusos de alta velocidade**. Congresso dos Estudantes de Engenharia Mecânica, 2000.
- [27] SIMON, A. **Fusos de alta velocidade que usam mancais magnéticos**. Máquinas e metais, p.26-28, Abril 1991.
- [28] GEWEFA SPANNWERKZEUG, **Hydo-Dehspannfutter**, Abril 1998.
- [29] HITCHINER M. **O emprego da alta velocidade com rebolos de CBN**. Máquinas e metais, p.116-133, Setembro 2001.

- 
- [30] NUSSBAUM, G. **Rebolos & abrasivos, tecnologia básica**. 1 ed. São Paulo: Editora Icone, 1988. 503p.
- [31] MORALES, A. **Análise e monitoramento da retificação do ferro fundido nodular com rebolos convencionais**. Florianópolis, 2002. 126f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica), Pós-graduação em engenharia mecânica Universidade Federal de Santa Catarina.
- [32] GE SUPERABRASIVES, **Borazon CBN Guia de Seleção de Produtos**, Maio 1998. 15p.
- [33] MONICI, R. D.; BIANCHI, E. C.; DE AGUIAR, P. R. **Como e quando lubrificar e refrigerar no processo de retificação**. Máquinas e metais, p.104-115, Agosto 2001.
- [34] LAINE, H. M. **Detecção e correção do desbalanceamento em suportes de ferramentas**. Máquinas e metais, p.128-147, Maio 2001.
- [35] HOFMANN, **Auswuchten von Werkzeugen und Werkzeughaltern**, Hofmann Mess-und Auswuchttechnik GmbH & Co.
- [36] SCHENCK, **Dados técnicos**, Catálogo do fabricante. [s/d]
- [37] RONDÉ, U. **Auswuchten schnelllaufender Werkzeuge und Spindel**, Werkstatt und Betrib, München, v.128, p.983-990, Nov.1995.
- [38] STEIDEL, R. F. **An intruduction to Mechanical Vibrations**, 2.ed., New York: John Wiley & Sons, 1979,395p.
- [39] CREDE, C. E.; HARRIS, C.M. **Shock and Vibration Handbook**, vol. 1, Mc. Graw-Hill, 1991.
- [40] TOBIAS, S. A. **Machine-Tools Vibration**. London: Blackie and Son Lmt., 1965, 338p.

- 
- [41] HINZ, W.; HOTTEK, H.; ROTH, M. **Economic centerless grinding of camshafts with CBN**. *Industria diamond review*, p.183-187, 2/2000.
- [42] AKINORI, Y.; HWA-SOO, L. **Surface grinding with ultra high speed CBN wheel**. *Journal of Materials Processing Technology*, p.393-396, 1996.
- [43] FUCHS, **Informações técnicas**, Julho 1998.
- [44] WEINGAERTNER, W.; TABORGA, A.; TABORDA, D. **Damos térmicos na retificação**. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 2001, Uberlândia. UFU, 2001. v.14.p.335-343.
- [45] WECK, M. **Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 2**. Berlin, Springer, 1997.
- [46] NAKAZAWA, H. **Principles of Precision Engineering**. Translated by Ryu Takeguchi, Tokyo, 1994.
- [47] OLIVEIRA, J; SILVA, G. **Tópicos importantes na retificação de precisão**. *Máquinas e metais*, p.46 -52, Março 1990.
- [48] KOLB, U.; KAUFELD, M. **Balanceamento das ferramentas**. *Máquinas e metais*, p.62-75, Dezembro 2001.
- [49] VILLARES, **Composição Química de Aços**, Catálogo do fabricante, 1982.
- [50] JENNINGS, M. **Making short work of tool and cutter grinding**. *Industria Diamond review*, p.183-187, 3/2000.