

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

**DRESSAMENTO DE REBOLOS DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO
MICROCRISTALINO COM DRESSADORES FIXOS**

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

OLIVER ODEBRECHT

FLORIANÓPOLIS, NOVEMBRO DE 2003

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

DRESSAMENTO DE REBOLOS DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO MICROCRISTALINO COM
DRESSADORES FIXOS

OLIVER ODEBRECHT

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Mecânica** no **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica** da Universidade Federal de Santa Catarina

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

Prof. José A. Bellini da Cunha Neto, Dr. - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. João Carlos E. Ferreira, Ph.D. – Presidente

Prof. Márcio Celso Fredel, Dr.-Ing.

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

À minha família

Agradecimentos

Aos meus pais Heide e Eido por estarem presentes em todos os momentos importantes da minha vida. Aos meus irmãos Maike e Stefan que apoiaram todas as minhas idéias por mais absurdas que elas fossem. À minha filha Caren que teve o poder de conseguir monopolizar toda a minha atenção quando eu não estava trabalhando nesta dissertação.

À Erna, que trocou a fralda de duas gerações dos Odebrechts do Ribeirão Fresco, e aos Eggerts, para os quais eu jamais deixarei de ser um moleque.

Ao Programa de Pós-Graduação pelo apoio financeiro nas aquisições das imagens no microscópio eletrônico de varredura. À Dr. Kaiser do Brasil que, além do apoio financeiro, disponibilizou-me o tempo necessário para a realização deste trabalho. À Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge pelo fornecimento dos dressadores e à Winterthur Schleiftechnik pelo rebolo de óxido de alumínio microcristalino. À Zema pelas respostas rápidas quando houve dúvidas a respeito da operação da retificadora.

Ao professor Walter pela orientação, confiança, amizade e por ter respostas para todas às perguntas, por mais específicas que fossem. Ao professor Joel pela amizade e pela grande ajuda na análise estatística.

À Sherline por ter suportado o cheiro de clorofórmio durante as mais de 1.500 medições de rugosidade e pela ajuda para a conclusão deste trabalho. Ao Hélio e ao Paulo pela ajuda e pela agilidade em resolver os problemas. Ao alemão Christof que, mesmo relutante em aprender português, ajudou na realização dos ensaios. Aos professores Rolf pelos conselhos e ao Rodrigo pelas dicas. À Flávia e à Eliene pelas horas de conversa. À Guilhermina pela organização da biblioteca e ao Marco Paulo pela ajuda eletrônica.

Ao meu primo Daniel e família pela acomodação, filosofia e festas. Ao Jeca e família por me fazerem sentir à vontade em sua casa.

A todos do LMP, e fora dele, que me ajudaram na realização deste trabalho.

Resumo

Odebrecht, Oliver. **Dressamento de rebolos de óxido de alumínio microcristalino com dressadores fixos**. 2003. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis.

No processo de retificação ainda se percebe a maior atenção dada ao rebolo do que ao dressador. Em função disso, a falta de informações sobre o dressamento faz com que o rebolo não atinja seu máximo rendimento. O desenvolvimento de novos materiais, tanto para o rebolo como para o dressador, tornam maior o potencial do processo de retificação. Entretanto, os estudos e o conhecimento acerca do processo de dressamento são limitados, restringindo assim o crescimento do potencial do processo como um todo. Este trabalho tem como objetivo acrescentar algumas informações a esse tema. Para tanto, tomou-se como objeto de estudo um rebolo com o grão convencional da geração mais recente: o óxido de alumínio microcristalino, grão este conhecido pela difícil dressabilidade. No dressamento utilizaram-se três dressadores fixos. Cada um com um tipo diferente de diamante, cujos resultados, na indústria foram os melhores para esse rebolo. São eles: o diamante natural, o diamante monocristalino sintético e o diamante CVD (diamante obtido por deposição química à vapor). Utilizando-se uma retificadora cilíndrica externa controlada por CNC e corpos de prova de ferro fundido nodular, verificou-se a variação do desempenho do rebolo de óxido de alumínio microcristalino com o tipo de diamante usado no dressamento. Além disso, verificou-se o desgaste sofrido pelos diamantes. Todos os ensaios foram repetidos com um rebolo de óxido de alumínio comum e com um de carboneto de silício. Concluiu-se que os melhores resultados de acabamento e de manutenção do perfil do rebolo de óxido de alumínio microcristalino foram obtidos ao se dressar com diamante MCD (diamante monocristalino sintético), seguido do diamante CVD e do diamante natural. Também se constatou que o volume gasto do diamante segue essa mesma ordem, ou seja, o diamante MCD teve o menor volume gasto e o diamante natural o maior. Os resultados com o rebolo de SiC e com o de Al₂O₃ comum seguiram praticamente a mesma tendência do rebolo de Al₂O₃-MC no que se refere à variação da rugosidade com o volume usinado. Entretanto, há significativas diferenças nos quesitos desgaste do diamante e manutenção do perfil do rebolo.

Palavras-chave: retificação, dressamento, diamantes, óxido de alumínio microcristalino

Abstract

Odebrecht, Oliver. **Dressamento de rebolos de óxido de alumínio microcristalino com dressadores fixos**. 2003. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis.

In the grinding process it is still given more attention to the grinding wheel than to the dressing tools. Consequently, the lack of information about dressing makes it difficult to reach the maximum productivity of the grinding process. The development of new materials for the grinding wheel and for the dressing tool increase the potential of the grinding. This potential can only be reached if there is sufficient knowledge about the grinding and the dressing processes. This work deals about the dressing of conventional grinding wheels, specially the microcrystalline aluminium oxide (seeded gel) one. This grain is known as being difficult to dress. The work's test was made with three fixed dressing tool, each containing a different diamond with good results in the industry: the natural diamond, the synthetic single crystal diamond (MCD) and the chemically vapor-deposited diamond (CVD). It was used a cylindrical CNC controlled grinding machine and nodular iron cast pieces to verified the grinding differences by dressing the microcrystalline aluminium oxide grinding wheel with the three diamonds and analyzed the wearing of the diamonds too. Every test done with the microcrystalline aluminium oxide was repeated with a common aluminium oxide (Al_2O_3) and a silicon carbide (SiC) grinding wheel. The best results of piece roughness and maintenance of the seeded gel grinding wheel profile was obtained with the MCD diamond. The natural diamond had the worst results. It was also verified that the diamond wearing attend the following crescent sequence: MCD, CVD and natural diamond. Comparing the results obtained with the common Al_2O_3 and with the SiC grinding wheel to the seeded gel grinding wheel, there are differences specially in the diamond wearing and in the maintenance of the grinding wheel profile.

Keywords: grinding, dressing, diamonds, microcrystalline aluminium oxide

Sumário

Lista de figuras	10
Lista de tabelas	12
Lista de símbolos	13
1 INTRODUÇÃO	16
2 ESTADO DA ARTE	18
2.1 O processo de retificação	18
2.2 A tendência do mercado de abrasivos convencionais	20
2.3 Características do grão de óxido de alumínio microcristalino (Al₂O₃-MC)	22
2.4 Retificação com rebolos de óxido de alumínio microcristalino (Al₂O₃-MC)	25
2.5 Mecanismos de desgaste dos grãos abrasivos	27
2.6 Especificação de rebolos convencionais	28
2.6.1 O tipo de grão	28
2.6.2 O tamanho de grão	29
2.6.3 A dureza	30
2.6.4 O ligante	29
2.6.5 A porosidade	31
2.6.6 A estrutura do rebolo	31
2.7 Dressamento	32
2.7.1 Dressadores	37
2.7.2 Dressadores fixos	39
2.7.3 Dressamento com dressadores fixos	44
2.7.4 Dressamento de rebolos de Al ₂ O ₃ -MC com dressadores fixos	48
2.7.5 Desgaste de dressadores fixos e suas conseqüências	49
2.8 Diamantes para dressadores fixos	51
2.8.1 Diamantes naturais	53

2.8.2 Diamante sintético	56
2.8.3 Diamante policristalino sintético – PCD	57
2.8.4 Diamante monocristalino sintético – MCD	57
2.8.5 Diamante obtido por deposição química de vapor – diamante CVD	59
2.8.6 Escolha de diamantes para dressadores fixos	62
2.9 Retificação cilíndrica externa de mergulho entre pontas	63
2.10 Fluidos de corte	64
3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	67
3.1 Material ensaiado	67
3.2 Corpo de prova	67
3.3 Retificadora	68
3.4 Rebolos	69
3.5 Dressador	71
3.6 Fluido de corte	73
3.7 Parâmetros de corte	73
3.7.1 Parâmetros de corte no dressamento	73
3.7.2 Parâmetros de corte na retificação	74
3.8 Equipamentos de medição	76
3.8.1 Rugosímetro	76
3.8.2 Microscópio eletrônico de varredura	77
3.9 Metodologia para a realização do trabalho	77
3.9.1 Realização dos ensaios	77
3.9.2 Medição da rugosidade e do desgaste do rebolo	81
3.9.3 Medição do desgaste dos dressadores	84
4 RESULTADOS	88
4.1 Análise do desgaste do diamante do dressador	88
4.2 Análise da rugosidade e do fator G	90
4.2.1 Rebolo de Al ₂ O ₃ -MC	91

4.2.2 Rebolo de SiC.....	92
4.2.3 Rebolo de Al ₂ O ₃ comum	94
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	96
REFERÊNCIAS	99
ANEXOS	102

Lista de figuras

Figura 1: Regiões de deformação elástica e plástica na formação de cavaco	19
Figura 2: Redução de custos em processos de fabricação por usinagem	20
Figura 3: Variação do consumo de grãos convencionais	21
Figura 4: Produção do grão de óxido de alumínio microcristalino	23
Figura 5: Estrutura dos grãos de Al_2O_3 e de Al_2O_3 -MC	24
Figura 6: Diferenças no lascamento dos grãos de Al_2O_3 e de Al_2O_3 -MC	24
Figura 7: Influência do tipo de grão sobre as forças de corte e sobre o fator G	25
Figura 8: Porosidade	31
Figura 9: Composição de rebolos convencionais	32
Figura 10: Desgaste e dressamento do rebolo	34
Figura 11: Preparação e resultados a serem alcançados por rebolos	36
Figura 12: As formas de dressamento mais usuais	37
Figura 13: Influência da relação de velocidades e da penetração de dressamento sobre a rugosidade inicial do rebolo	39
Figura 14: Dressador fixo com diamante de ponta única	40
Figura 15: Dressador fixo com diamante lapidado	41
Figura 16: Dressador fixo aglomerado	42
Figura 17: Dressadores fixos tipo <i>fliese</i> com diamantes naturais	43
Figura 18: Dressadores fixos tipo <i>fliese</i> com diamantes sintéticos	44
Figura 19: Grau de recobrimento (U_d)	45
Figura 20: Características de dressamento com dressadores fixos	46
Figura 21: Rugosidade inicial do rebolo em função da velocidade de avanço axial e radial	46
Figura 22: Rugosidade inicial em função do avanço de dressamento e do perfil do diamante ... do dressador	49
Figura 23: Rugosidade inicial em função do avanço de dressamento e do raio de curvatura do diamante do dressador	50
Figura 24: Condutividade térmica dos diferentes tipos de diamante	53
Figura 25: Célula unitária do diamante	54
Figura 26: Dureza dos grãos abrasivos com o aumento da temperatura	56
Figura 27: Estrutura do diamante policristalino (PCD)	57

Figura 28: Corte de bastões a partir de uma matriz de diamante MCD.....	58
Figura 29: Processo para a síntese do diamante MCD.....	58
Figura 30: Planos preferenciais de deslizamento dos diamantes naturais e sintéticos.....	59
Figura 31: O diamante CVD	60
Figura 32: Processos de obtenção de filmes de diamante pelo processo CVD.....	61
Figura 33: Retificação cilíndrica externa de mergulho perpendicular e inclinado entre pontas..	63
Figura 34: Conversão e distribuição de energia na zona de corte.....	65
Figura 35: Influência do fluido de corte no processo de retificação	66
Figura 36: Corpo de prova	68
Figura 37: Retificadora cilíndrica externa e interna da Zema Zselics	69
Figura 38: O dressador do ensaio.....	71
Figura 39: Apresentação esquemática de um diamante natural tipo grão de arroz.....	72
Figura 40: Perfil e largura efetiva do diamante natural.....	72
Figura 41: Medidas dos diamantes sintéticos do ensaio	72
Figura 42: Rugosímetro.....	76
Figura 43: Método para a medição da rugosidade e do desgaste radial do rebolo.....	78
Figura 44: Corpo de prova para o rebolo de Al ₂ O ₃ comum.....	79
Figura 45: Corpo de prova para rebolos de Al ₂ O ₃ -MC e de SiC	80
Figura 46: Exemplo de medição de rugosidade	82
Figura 47: Exemplo de medição do desgaste radial.....	83
Figura 48: Medição das imagens do desgaste do diamante	85
Figura 49: Volume desgastado do diamante	86
Figura 50: Rugosidade e lascamento na vista superior do diamante	87
Figura 51: Evolução de $R_a \times V'_w$ no ensaio com o rebolo de Al ₂ O ₃ -MC	91
Figura 52: Fator G do rebolo de Al ₂ O ₃ -MC dressado por cada diamante	92
Figura 53: Evolução de $R_a \times V'_w$ no ensaio com o rebolo de SiC	93
Figura 54: Fator G do rebolo de SiC dressado por cada diamante.....	93
Figura 55: Evolução de $R_a \times V'_w$ no ensaio com o rebolo de Al ₂ O ₃ comum.....	94
Figura 56: Fator G do rebolo de Al ₂ O ₃ comum dressado por cada diamante	95

Lista de tabelas

Tabela 1: Propriedades físicas dos grãos abrasivos	23
Tabela 2: Tamanho de grão	29
Tabela 3: Grau de dureza dos rebolos	30
Tabela 4: Limites construtivos dos rebolos convencionais.....	32
Tabela 5: Terminologia e objetivos do condicionamento de rebolos	36
Tabela 6: Características dos diferentes tipos de diamante.....	52
Tabela 7: Comparação das propriedades do diamante com outros grãos abrasivos	55
Tabela 8: Características dos rebolos do ensaio.....	70
Tabela 9: Parâmetros de corte no ensaio de retificação	75
Tabela 10: Resumo dos ensaios	81
Tabela 11: Código das medições.....	82
Tabela 12: Rugosidade da topografia dos diamantes no ensaio com o rebolo de Al_2O_3 -MC	88
Tabela 13: Rugosidade da topografia dos diamantes no ensaio com o rebolo de Al_2O_3 comum.	89
Tabela 14: Rugosidade da topografia dos diamantes no ensaio com o rebolo de SiC.....	90

Lista de símbolos

A	[mm ²]	Área lateral do desgaste do diamante
Al ₂ O ₃	[-]	Óxido de alumínio
Al ₂ O ₃ -MC	[-]	Óxido de alumínio microcristalino
CVD	[-]	Deposição química à vapor
E _c	[J]	Energia de corte
F	[N]	Força de corte
F _{ns}	[N]	Força normal sobre o grão
F' _n	[N/mm]	Força normal específica
F _t	[N]	Força tangencial de corte
F' _t	[N/mm]	Força tangencial específica
F _{ts}	[N]	Força tangencial sobre o grão
G	[-]	Relação de remoção
HK	[-]	Dureza Knoop
M	[-]	Média das medições
MCD	[-]	Diamante monocristalino sintético
P _c	[kW]	Potência de corte
PCD	[-]	Diamante policristalino sintético
Q	[l/min]	Vazão de fluido de corte
Q _{wd}	[mm ³ /mm]	Taxa de remoção no dressamento
Q' _w	[mm ³ /mm.s]	Taxa de retificação específica
R	[mm]	Raio da ponta do diamante
R _a	[μm]	Rugosidade média aritmética
R _{aa}	[μm]	Rugosidade inicial do rebolo
R _{aaS}	[-]	Impressão do perfil total do rebolo
R _{a1}	[μm]	Rugosidade do primeiro degrau
R _{a2}	[μm]	Rugosidade do segundo degrau
R _{a3}	[μm]	Rugosidade do terceiro degrau
R _{a4}	[μm]	Rugosidade do quarto degrau
R _{ts0}	[μm]	Rugosidade inicial

R_z	[μm]	Rugosidade média da peça
S	[μm]	Desgaste radial do rebolo
SiC	[-]	Carboneto de silício
T_μ	[μm]	Penetração de início de corte
U_d	[-]	Grau de recobrimento
V_B	[%]	Volume relativo de ligante
V_K	[%]	Volume relativo de grãos
V_P	[%]	Volume relativo de poros
V_s	[mm^3]	Volume de desgaste do rebolo
V_w	[mm^3]	Volume usinado
V'_w	[mm^3/mm]	Volume específico de usinagem
a	[mm]	Aresta da base do triângulo
a_p	[mm]	Largura efetiva do rebolo
a_{ed}	[mm]	Profundidade de dressamento
b	[mm]	Altura do triângulo
b_d	[mm]	Largura efetiva do dressador
d_w	[mm]	Diâmetro da peça
f_{ad}	[mm]	Avanço axial no dressamento por rotação do rebolo
h_{cu}	[μm]	Espessura de cavaco não deformada
$h_{c\text{ueff}}$	[μm]	Espessura efetiva de usinagem
i_d	[-]	Número de passes no dressamento
n	[-]	Número de medições
n_s	[min^{-1}]	Rotação do rebolo
n_{sd}	[min^{-1}]	Rotação do rebolo no dressamento
n_w	[min^{-1}]	Rotação da peça
q	[-]	Relação de velocidades
q_d	[-]	Relação de velocidades no dressamento
s	[-]	Desvio padrão
t_c	[s]	Tempo de corte
v_c	[m/s]	Velocidade de corte
v_{cd}	[m/s]	Velocidade de corte no dressamento
v_{fad}	[mm/s]	Velocidade de avanço axial no dressamento
v_{fr}	[mm/s]	Velocidade de avanço radial

v_{frd}	[mm/s]	Velocidade de avanço radial no dressamento
v_{ft}	[mm/s]	Velocidade de avanço tangencial
v_R	[m/s]	Velocidade periférica do rolo dressador
v_{sd}	[m/s]	Velocidade do rebolo no dressamento
v_w	[m/s]	Velocidade periférica da peça
Δr_s	[mm]	Desgaste radial do rebolo
α	[Grau]	Ângulo de perfil
α	[Grau]	Ângulo primário entre dressador fixo e rebolo
β	[Grau]	Ângulo secundário entre dressador fixo e rebolo
γ	[%]	Confiabilidade
η	[Grau]	Ângulo de penetração
λ_c	[mm]	Comprimento de <i>cut-off</i>

1 INTRODUÇÃO

A tendência da indústria metal-mecânica é de fabricação de lotes cada vez menores e com tempos de entrega cada vez mais reduzidos. Além disso, a competitividade do setor aumenta, assim como aumenta a exigência de peças com melhor acabamento e precisão. Nesse contexto, quem conseguir reduzir os custos de produção tem as melhores chances de se impor no mercado. Quando se trata da fabricação de peças endurecidas de grande precisão, parte dos custos e do tempo de fabricação freqüentemente recaem sobre a operação de retificação.

Com o intuito de melhorar o acabamento da superfície usinada e operar com maiores velocidades de corte na retificação de peças endurecidas é necessário que haja o desenvolvimento das ferramentas existentes, além das variáveis do processo. Atenção especial deve ser dada ao abrasivo, ao ligante do rebolo e à ferramenta de dressamento.

O grão abrasivo convencional de maior expressão na retificação de materiais ferrosos ainda é o óxido de alumínio, também conhecido por coríndon. Como alternativa nessas aplicações, o superabrasivo de CBN faz exigências extremas à máquina-ferramenta e às condições de trabalho. O emprego de rebolos de CBN exige altas taxas de remoção, obtido com pouco dressamento e baixos tempos improdutivos. Além disso, o emprego de CBN exige retificadoras rígidas e que permitam grandes velocidades de corte. O processo é pouco flexível e as ferramentas são extremamente caras.

Na fabricação de lotes pequenos a médios, onde se requerem processos flexíveis, o emprego de CBN é desvantajoso, levando a um impasse. Os fabricantes de rebolos reconheceram esse impasse e desenvolveram uma ferramenta cujo emprego é mais flexível que o rebolo de CBN e que ao mesmo tempo permite melhor performance que os rebolos de óxido de alumínio. Estes novos rebolos são constituídos de grãos abrasivos de óxido de alumínio microcristalino, também conhecido por óxido de alumínio Sol-Gel e óxido de alumínio sinterizado.

Os rebolos de óxido de alumínio microcristalino apresentam resultados de retificação muito bons, mas constata-se a dificuldade de dressá-los. Esta dificuldade vem sendo verificada principalmente em empresas de pequeno a médio porte que utilizam, na sua grande maioria, dressadores fixos. Em muitos casos a dificuldade de dressamento é tal que o rebolo não atinge os resultados econômicos esperados. Muitas vezes não se tem conhecimento de que modificando os parâmetros no dressamento, ou mesmo mudando o tipo de dressador, é possível alterar os resultados de dressamento e, conseqüentemente, os resultados de retificação.

Além dos dressadores fixos tradicionais que empregam diamantes naturais, estão chegando ao mercado nacional os dressadores com diamantes sintéticos, que abrem novas perspectivas para o dressamento de rebolos de óxido de alumínio microcristalino.

O objetivo deste trabalho foi o de verificar a influência de dressadores fixos, com diferentes tipos de diamante, no resultado de retificação de rebolos de óxido de alumínio microcristalino ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MC}$). Também se verificou a influência desses mesmos dressadores em um rebolo de óxido de alumínio comum (Al_2O_3) e num de carboneto de silício (SiC), para efeito de comparação. Para tanto foram utilizados os três tipos de diamantes que mostraram os melhores resultados na indústria: o diamante natural, o diamante sintético monocristalino (MCD) e o diamante obtido por deposição química de vapor (diamante CVD).

O tamanho de grão e o ligante desses rebolos eram iguais. A dureza foi especificada pelo fabricante de cada rebolo em função do processo de fabricação e do material a ser retificado.

O material usinado foi o ferro fundido dúctil GGG70, sendo que há dois motivos principais para a sua escolha: a sua larga aplicação em processos de retificação na indústria e as informações disponíveis sobre a retificação desse material, encontradas em duas dissertações feitas anteriormente no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP). Exemplificando, com o GGG70 são fabricados virabrequins e eixos de comando de válvulas.

O processo escolhido para a realização dos ensaios foi a retificação cilíndrica externa de mergulho. Esse processo é muito empregado na indústria e permite realização dos ensaios com um menor número de variáveis.

A retificadora era controlada por CNC e possuía os requisitos para a realização de um processo seguro e com boa repetibilidade, garantida confiabilidade do processo e dos resultados.

Os parâmetros de usinagem empregados foram baseados nos encontrados na literatura e nos empregados na indústria.

O desempenho dos três tipos de dressadores foi avaliado em cada um dos rebolos. O volume usinado (V'_w) por par dressador e rebolo foi o mesmo, a fim de se avaliar a variação dos resultados em função do volume usinado.

Os resultados foram avaliados a partir da variação da rugosidade da peça com o volume usinado, do desgaste radial do rebolo e do desgaste do diamante do dressador.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 O processo de retificação

O primeiro processo de usinagem utilizado pela humanidade foi a usinagem abrasiva. Desde os primórdios esse processo já era empregado para a fabricação de utensílios, ferramentas e armas [10].

No processo de retificação o gume percorre uma trajetória definida para dentro da peça (figura 1). O ângulo entre o gume e a superfície da peça é muito pequeno no início, devido ao formato do gume, ao raio do rebolo e à penetração passiva. Inicialmente o gume penetra na peça levando a deformações elásticas do material. Em seguida inicia-se a fase de deformações plásticas. O material da peça é forçado para os lados formando uma espécie de rebarba. Além disso, o material pode ser forçado por debaixo do gume na direção da superfície de incidência [15; 16].

A formação do cavaco tem início no momento em que o gume penetra na peça numa espessura de cavaco não-deformada (h_{cu}) igual à penetração de início de corte (T_μ). No decorrer do processo uma parte do material da peça continua sendo forçada para as laterais, além de haver a formação de cavaco. A eficiência da remoção de material é determinada através do quanto da espessura de cavaco não-deformada (h_{cu}) é transformada em cavaco e o quão grande é a espessura efetiva de usinagem ($h_{cu\text{ eff}}$) [15; 16].

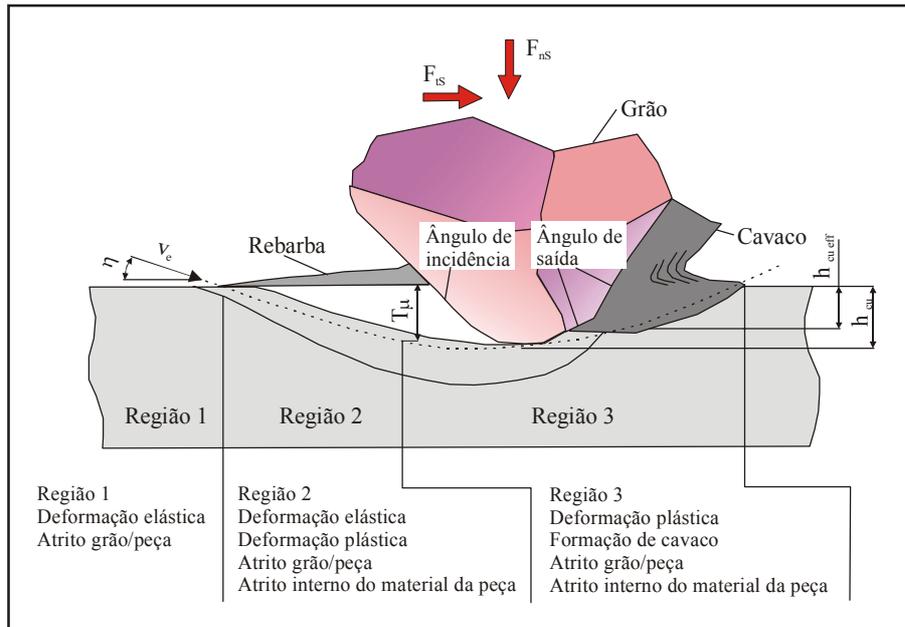


Figura 1: Regiões de deformação elástica e plástica na formação de cavaco [1; 23].

A retificação ainda é um dos processos de usinagem mais importantes na fabricação de precisão. Os prognósticos indicam que as aplicações de retificação tenderão a aumentar no futuro. O motivo para isso são as suas vantagens, que apenas poderão ser usufruídas se o processo for compreendido [10]. Dentre as vantagens pode-se citar:

- Elevada precisão dimensional da peça gerada;
- Elevada precisão de forma;
- Obtenção de alta qualidade de acabamento com qualidade pré-determinada;
- Usinagem de materiais duros e de difícil usinabilidade onde, com outros processos, seria muito mais demorado ou mesmo impossível de se realizar a operação;
- Alta segurança do processo [10].

2.2 A tendência do mercado de abrasivos convencionais

O aumento da produtividade e a redução de custos podem ser alcançados através da redução das etapas do processo de fabricação. Isso pode ser obtido de diversas maneiras. A figura 2 mostra um exemplo.

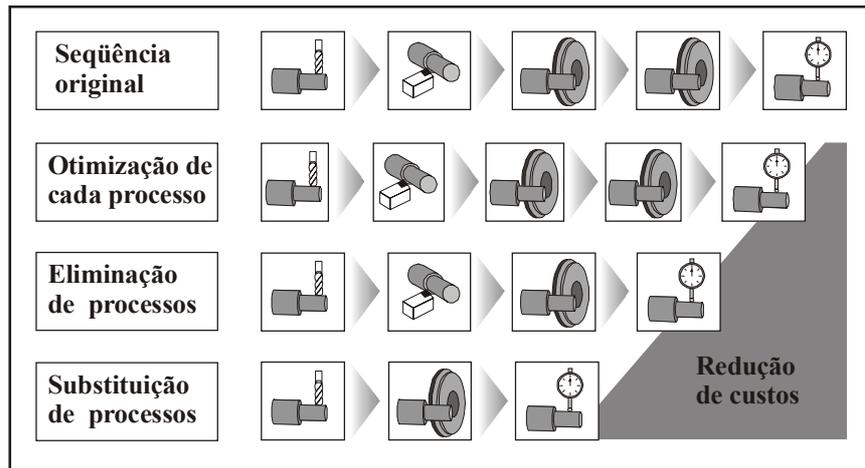


Figura 2: Redução de custos em processos de fabricação por usinagem [33].

Uma maneira de reduzir os custos do processo é a otimização de cada um dos processos. Outra forma é a eliminação de processos de fabricação. No exemplo da figura 2 reduziu-se a etapa de retificação de pré-acabamento e de acabamento por um único processo. Uma redução maior ainda pode ser obtida com a substituição de um processo em que dois ou mais processos são substituídos por um processo novo. Na figura 2, o processo de torneamento foi substituído pelo de retificação [33].

A fim de aumentar a rentabilidade dos processos de retificação foram desenvolvidos novos materiais de grão abrasivo e de ligante. Aumentou-se assim o potencial das ferramentas convencionais. Neste contexto pode-se destacar as vantagens tecnológicas dos grãos de óxido de alumínio microcristalino em relação aos óxidos de alumínio convencionais, que levam à redução de custos. O potencial desse material é verificado na diminuição dos tempos principais e secundários, através do melhor comportamento na usinagem e do seu melhor rendimento. A figura 3 mostra o crescimento do emprego do óxido de alumínio microcristalino e a diminuição do emprego do óxido de alumínio nobre nos processos de retificação cilíndrica externa e interna, plana e *center-less*. Embora esses dados se refiram a uma pesquisa feita no mercado alemão, pode-se tomá-los como uma tendência mundial [33].

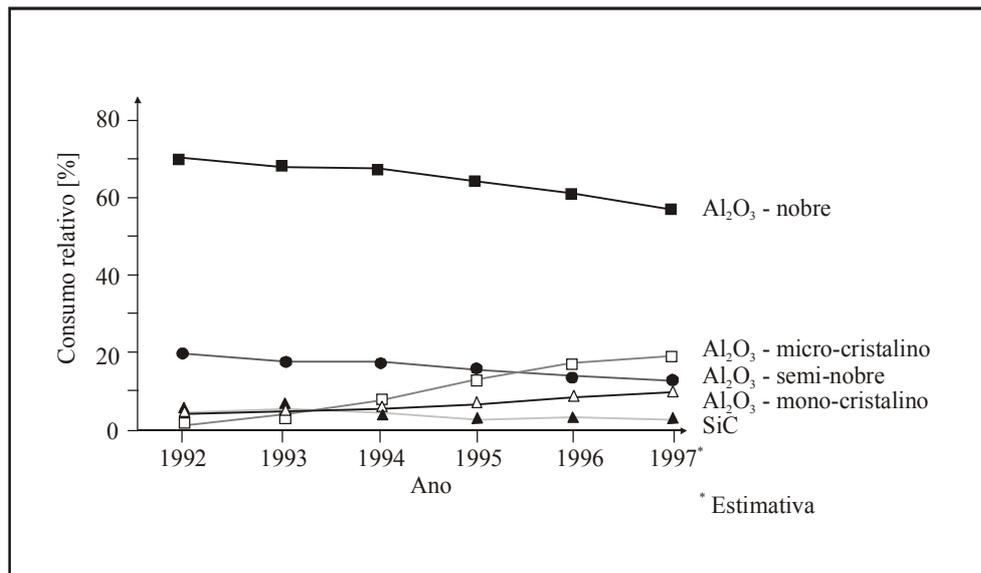


Figura 3: Variação do consumo de grãos convencionais [33].

Grãos convencionais do grupo dos óxidos de alumínio fundidos são caracterizados por grãos com quebra em forma de lasca. Isso ocorre pela sua estrutura com planos preferenciais de clivagem. De acordo com a pureza e as outras substâncias presentes no grão, integram esse grupo óxidos de alumínio de diferentes tipos, como o óxido de alumínio comum, seminobre, nobre, monocristalino, com zircônio etc. Desses, apenas os quatro primeiros são empregados em operações de retificação de precisão. O óxido de alumínio comum, seminobre, nobre e monocristalino apresentam uma qualidade crescente do grão. Sua dureza aumenta, a tenacidade diminui e os gumes são mais afiados [3; 15].

Os rebolos fabricados com óxido de alumínio fundido são de baixo custo, de fácil dressamento e manuseio, de alta flexibilidade e não requerem máquinas com boas características. A desvantagem é o lascamento imprevisível de grandes pedaços dos grãos monocristalinos de óxido de alumínio durante o processo, no sentido dos planos de deslizamento. Isso pode resultar em áreas do rebolo com características não-satisfatórias. Contudo, a resistência dos grãos ao lascamento pode ser aumentada com a adição de cromo ou titânio na sua fabricação. Esses aditivos bloqueiam a propagação de trincas [3; 15].

A tenacidade dos óxidos de alumínio aumenta com a adição de óxido de cromo. Outra alternativa para aumentar a tenacidade e influir no lascamento é o tratamento térmico do grão. Em temperaturas da ordem de 1.300°C são reparados danos como microtrincas, por difusão. Apesar disso, os principais resultados obtidos no aprimoramento dos grãos de óxido de alumínio fundidos

não passaram de melhora de pureza e modificação da forma do grão (bastões, esferas e esferas ocas). Os resultados desses aprimoramentos no processo de retificação levaram apenas a pequenos aumentos de rendimento em alguns casos específicos [15].

Esses aumentos de rendimento alcançados com rebolos convencionais de óxido de alumínio, de longe não se aproximaram dos possíveis de serem obtidos com grão abrasivo de CBN. Por outro lado, para que rebolos de CBN possam ser empregados deve-se dispor de uma retificadora com maior potência e rotação do fuso, maior rigidez, injeção eficiente de fluido de corte e um sistema de dressamento extremamente preciso, preferencialmente com sensor de contato integrado. Operando-se com máquinas que não preencham esses requisitos não se irão obter todas as vantagens tecnológicas e econômicas dos rebolos de CBN. Embora a aquisição de retificadoras otimizadas para operar com rebolos vitrificados de CBN esteja aumentando, a quantidade delas atualmente existente no mercado é pequena quando comparadas às retificadoras convencionais [3; 15; 29].

2.3 Características do grão de óxido de alumínio microcristalino

Fabricantes de materiais abrasivos reconheceram esta lacuna entre o potencial dos óxidos de alumínio convencionais e os de CBN, e desenvolveram o óxido de alumínio microcristalino ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{MC}$). Os grãos abrasivos de óxido de alumínio microcristalino ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{MC}$), ao contrário dos grãos convencionais de óxido de alumínio, que são obtidos por fundição, são obtidos pelo processo de sinterização a partir de uma solução em forma de gel. Daí as outras designações de grão Sol-Gel e óxido de alumínio sinterizado. O resultado é um grão policristalino cujos cristais tem diâmetros muito pequenos, entre 0,5 e 3 μm . Industrialmente esses grãos ainda são conhecidos pelos seguintes nomes, de acordo com o fabricante, Seeded Gel ou SG (Norton), Alodur (TCW), Cubitron 321 (3M) e Sapphire Blue (Norddeutsche Schleifmittelwerke) [3].

A matéria-prima para a fabricação do grão de óxido de alumínio microcristalino é uma solução feita a partir da mistura de pó de boehmita ($\text{AlO}(\text{OH})$) e água, denominada Sol. A essa solução são adicionados inibidores de crescimento de grão (MgO , ZrO_2 , TiO_2) ou formadores de núcleos de crescimento (Al_2O_3 e Fe_2O_3). O resultado esperado nos dois casos é o mesmo, ou seja, impedir a formação de grandes grãos no processo de sinterização. A transformação da solução em gel ocorre pela adição de um formador de gel como, por exemplo, ácido nítrico (HNO_3) ou nitrato de magnésio ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$). Dessa maneira, a água presente na solução passa a ter a consistência de gel, impedindo saturações localizadas e formação de aglomerados (torrões). Em seguida, ocorre a

evaporação do líquido da solução. O gel é secado, moído até um tamanho previamente determinado e sinterizado em temperaturas entre 1.100 e 1.400°C [3; 17]. Esse processo pode ser visualizado na figura 4.

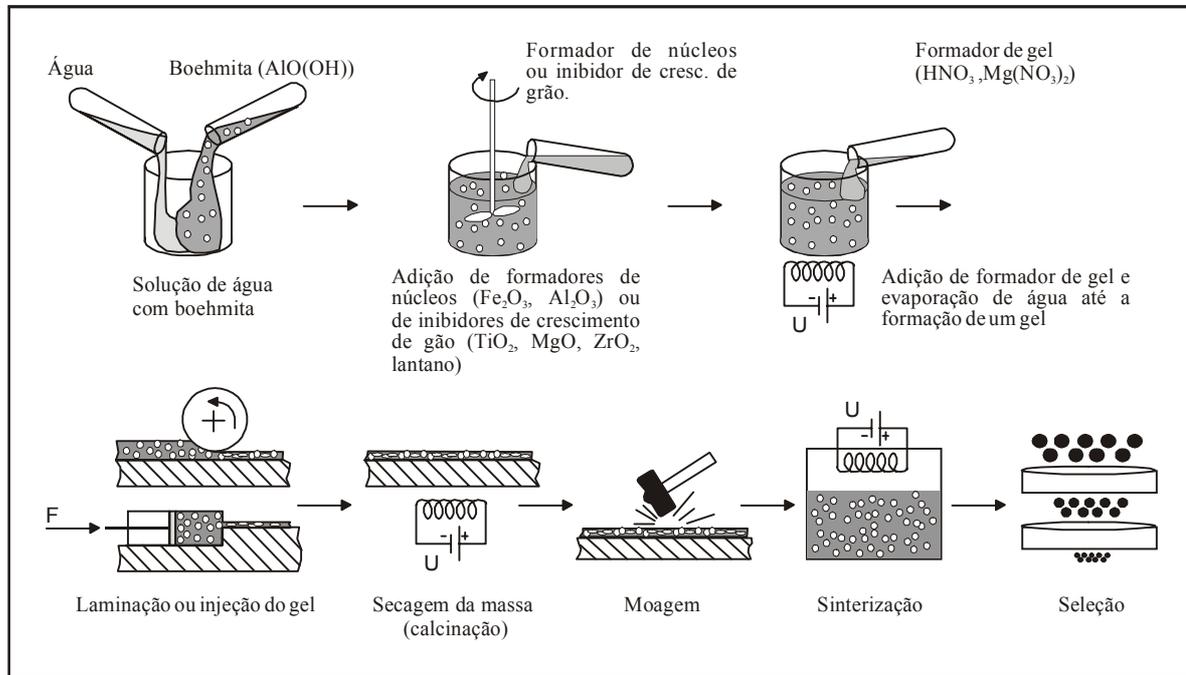


Figura 4: Produção do grão de óxido de alumínio microcristalino [1].

Comparando-se a matéria-prima empregada e o processo de fabricação, o custo para a fabricação dos óxidos de alumínio sinterizados é em torno de 10 vezes maior que o dos óxidos de alumínio fundidos. O custo final do rebolo chega a ser em torno de 5 vezes maior que os rebolos de óxido de alumínio fundidos. Entretanto, seu custo é compensado pelo aumento de produtividade [17].

Na tabela 1 pode-se ver a diferença de propriedades dos diferentes grãos abrasivos.

Tabela 1: Propriedades físicas dos grãos abrasivos [3].

Material	Propriedades físicas			
	Densidade [g/cm ³]	Dureza Knoop	Tenacidade à fratura K_{Ic} [MPa m ^{1/2}]	Coefficiente de atrito sobre aço endurecido
Óxido de alumínio	3,97	1.800 – 2.100	2,7	0,34
Óxido de alumínio microcristalino	3,87	2.100 – 2.400	3,5 – 4,3	0,19
Carboneto de silício	3,21	2.400 – 2.600	3,1	-
Nitreto de boro cúbico	3,47	4.200 – 5.400	3,7	0,19

A estrutura dos grãos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MC}$ em forma de pequenos cristais leva a maiores dureza e tenacidade em relação aos grãos de Al_2O_3 fundidos. Essa mesma estrutura determinará a diferença do tipo de quebra de grão entre os óxidos de alumínio fundidos e sinterizados. Nos grãos de óxido de alumínio fundido existem planos preferenciais de clivagem, que levam ao lascamento de grandes partículas dos grãos [8; 17].

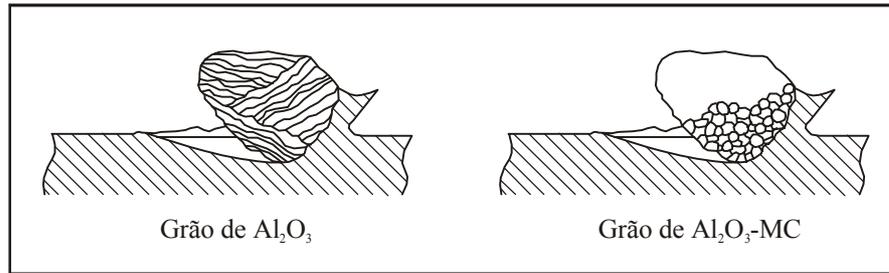


Figura 5: Estrutura dos grãos de Al_2O_3 e de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MC}$ [15; 29].

Nos grãos de óxido de alumínio sinterizados não existem esses planos preferenciais de clivagem (figura 5). Pequenas partículas gastas se desprendem do grão dando lugar a uma nova partícula afiada (figura 6). Dessa maneira o grão permanece afiado até o momento em que as forças sobre ele superam as forças que o mantêm fixado ao ligante [1]. O grão então se desprende do ligante e se solta do rebolo.

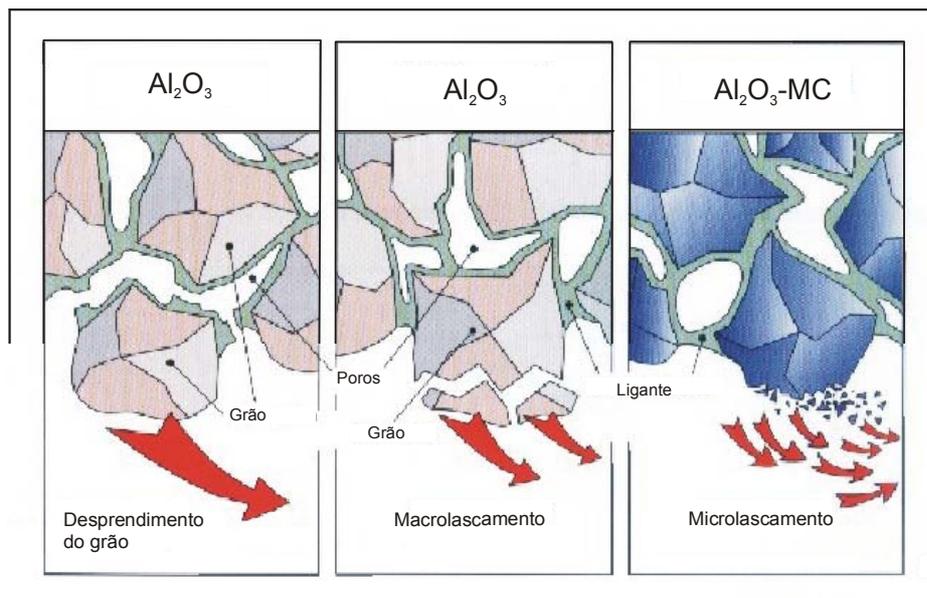


Figura 6: Diferenças no lascamento dos grãos de Al_2O_3 e $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MC}$ [8].

O grão de Al_2O_3 -MC é mais tenaz que o grão de óxido de alumínio fundido, e para que ocorra o microlascamento é necessário que as forças que agem sobre ele sejam extremamente elevadas [3].

2.4 Retificação com rebolos de óxido de alumínio microcristalino (Al_2O_3 -MC)

Alguns autores fundamentam os resultados positivos obtidos em processos de retificação com Al_2O_3 -MC no microlascamento do grão, resultando na sua auto-afiação. Em ensaios de retificação de um aço-ferramenta endurecido verificou-se um fator G significativamente maior desse grão em relação a um óxido de alumínio nobre (branco), principalmente quando se trabalha na usinagem com elevadas taxas de remoção (figura 7) [3].

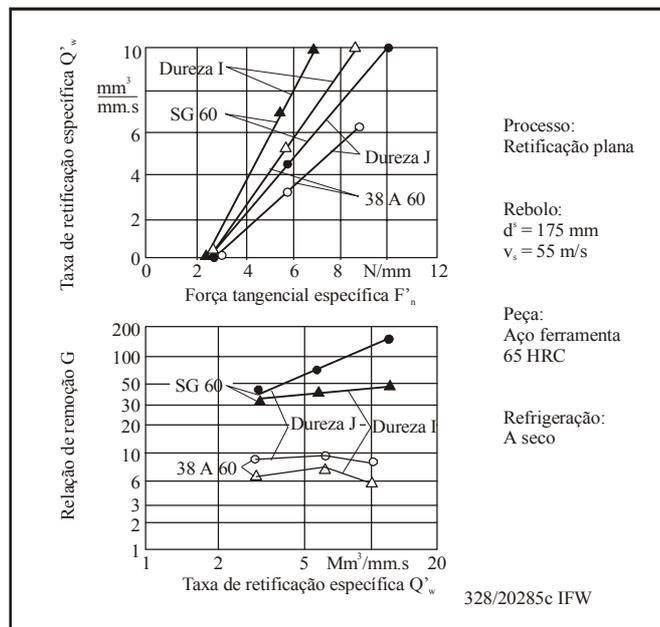


Figura 7: Influência do tipo de grão sobre as forças de corte e sobre o fator G [3].

Devido ao tipo de desgaste, em que partículas micrométricas se desprendem do grão, os gumes estão sempre afiados e, para uma mesma taxa de remoção, as forças de corte geradas por grãos de Al_2O_3 -MC são menores que as geradas por grãos de Al_2O_3 fundidos. Pelo fato dos gumes estarem sempre afiados, o atrito é menor. O atrito sendo menor, gera-se também menos calor e, conseqüentemente, o risco de danos térmicos na peça a ser retificada é menor. Espera-se, portanto, atingir maior rendimento com rebolos de Al_2O_3 -MC na retificação de materiais de difícil usinabilidade como, por exemplo, os aços-ferramenta com elevada taxa de carbonetos [3].

Na retificação interna de aço para rolamento (100Cr6) com dureza de HRC 60 constatou-se que o rebolo de Al_2O_3 microcristalino gerou forças de corte menores e maior fator G em relação ao Al_2O_3 monocristalino, com os mesmos resultados de acabamento da peça. Levando em consideração os critérios de influência térmica e rugosidade das peças, os rebolos de Al_2O_3 microcristalinos geraram taxas de usinagem de 15% a 30% maiores, juntamente com o aumento de 40% a 80% do fator G [3].

Com o uso de Al_2O_3 -MC também pôde-se aumentar o intervalo de dressamento de 30% a 800% em relação aos óxidos de alumínio fundidos, na retificação de comandos de válvula e de virabrequins. Além disso, pôde-se reduzir em 25% o tempo de usinagem apenas reduzindo a profundidade de dressamento, o que aumentou o rendimento do rebolo. Esse aumento de rendimento é resultado da grande tenacidade dos grãos e das poucas áreas irregulares na superfície do rebolo, decorrentes do pequeno tamanho das partículas dos grãos [3].

Na retificação interna e externa de pistas de rolamento de 100Cr6 com rebolos de Al_2O_3 -MC conseguiu-se reduzir os custos em torno de 17% a 28%. Na retificação de dentes de engrenagem feitos de 16MnCr5 cementado, a redução de custos é de 8% a 23%. O motivo disso é, por um lado, a baixa taxa de alisamento dos grãos, ou seja, a manutenção do poder de corte dos gumes, e de desprendimento de grãos inteiros e, por outro lado, a grande taxa de microlascamentos. O resultado é uma grande relação de remoção (fator G) e elevadas taxas de remoção. Entretanto, para que ocorra o microlascamento, é necessário que a carga sobre o grão seja alta [3].

Como já mencionado, alguns autores são da opinião de que o principal motivo dos resultados positivos alcançados pelos rebolos de Al_2O_3 -MC é o microlascamento. Entretanto, outros autores conferem o aumento de rendimento do Al_2O_3 -MC à elevada tenacidade do grão. Essa diferença de opiniões, e o fato de que nem sempre os rebolos com esse tipo de grão atingem o rendimento esperado, exige um aprofundamento no estudo do mecanismo de desgaste em nível microcristalino [3].

Resumidamente, os rebolos de óxido de alumínio microcristalino podem trazer as seguintes vantagens:

- Maior taxa de remoção e, como conseqüência, diminuição do tempo de processo;
- Maior vida do rebolo e, conseqüentemente, menor troca de rebolos;
- Processo com rendimento e forças de corte constantes;
- Manutenção do perfil e das condições de corte por mais tempo e, por isso, qualidade constante e maiores intervalos de dressamento [9].

2.5 Mecanismos de desgaste dos grãos abrasivos

O processo de retificação é caracterizado pela atuação simultânea de um grande número de gumes de geometria não-definida, em contato com a superfície da peça. A quantidade dos gumes em contato com a peça não pode ser determinada e é variável com o tempo. As forças e a temperatura do processo, a qualidade da superfície usinada resultante e os mecanismos de desgaste do grão são o resultado da sobreposição da ação destes gumes, cortando dimensões micrométricas [3; 15].

A determinação dos mecanismos de desgaste de grãos abrasivos e suas causas é um problema complexo devido à grande variação das condições de corte, das pequenas espessuras de cavaco e da geometria não-definida dos gumes. Devido às diferentes cargas sobre cada gume e às variações das propriedades físicas de cada grão surgem, na retificação, diferentes formas de desgaste como lascamentos e desprendimento de grãos do ligante, que podem ocorrer simultaneamente, e o alisamento do grão [3].

Os mecanismos de atrito, deformação plástica e elástica e de formação de cavaco geram grandes pressões e elevadas temperaturas na zona de contato. Tanto as influências químicas como as mecânicas e térmicas geram solicitações complexas sobre o grão. Por isso as propriedades de tenacidade e de dureza do material de corte podem variar com o tempo. A ação conjunta das cargas mecânicas, térmicas e químicas sobre o grão leva aos diferentes tipos de desgaste do grão e do ligante. A seguir serão apresentados os diferentes tipos de desgaste do grão abrasivo:

- Deformação plástica por compressão, podendo fazer com que a resistência dos óxidos de alumínio caia a um sexto da sua resistência à compressão já a uma temperatura de 1.200°C. O resultado é o arredondamento do grão e, conseqüentemente, o aumento do atrito.
- Desgaste abrasivo, ocasionado pelo atrito entre o grão e o material da peça. Através do atrito o grão vai se desgastando continuamente até o surgimento de desgaste em forma de platôs.
- Desgaste por adesão, ou seja, cavacos podem aderir ao grão. O rompimento dessas adesões pode levar consigo partículas do grão [3].
- Difusão e oxidação, ocasionadas por desgaste tribo-químico. Em elevadas temperaturas pode ocorrer a difusão de partículas do grão para a peça ou vice-versa. A oxidação pode ocorrer nas zonas adjacentes do gume quando a temperatura e a tendência à oxidação forem elevadas o suficiente. Essa forma de desgaste não surge em abrasivos de Al_2O_3 .

- Formação de fissuras, ocasionada pelas variações cíclicas térmicas e mecânicas elevadas. A formação da fissura gera o lascamento do grão e, por consequência, o surgimento de novos gumes.

Esses diferentes tipos de desgaste levam aos seguintes efeitos sobre o grão: formação de desgaste em forma de platôs, lascamento, rompimento de grãos inteiros do ligante e quebra do ligante quando as forças são superiores à resistência do ligante. A resistência do grão ao desgaste depende de suas propriedades físicas como a dureza, a tendência ao lascamento e a resistência química, a altas temperaturas, à erosão e à pressão [3].

A taxas de remoção Q'_w menores predomina o desgaste abrasivo e os microlascamentos, enquanto a taxas de remoção maiores sobressai o desgaste por macrolascamentos e o arrancamento de grãos inteiros do ligante [15].

2.6 Especificação de rebolos convencionais

A especificação é a informação mais importante do rebolo. De acordo com a aplicação podem variar 6 características principais. São elas: o tipo e o tamanho de grão, a dureza, o ligante, a porosidade e a estrutura do rebolo.

2.6.1 O tipo de grão

Embora existam grãos naturais, os rebolos utilizados industrialmente, com raras exceções, são feitos com grãos sintéticos. Os tipos de grãos mais importantes são:

- Óxidos de alumínio (Al_2O_3);
- Carboneto de silício (SiC);
- Nitreto de boro cúbico (CBN);
- Diamante sintético [8; 15; 25].

Os grãos de Al_2O_3 e de SiC são considerados grãos convencionais. Os grãos de CBN e de diamante super-abrasivos.

2.6.2 O tamanho de grão

A tabela 3 mostra o tamanho do grão em *mesh* e sua dispersão em micrometros, de acordo com o padrão DIN 69100. Grãos até 230 *mesh* são considerados macrogrãos e acima de 230 *mesh*, de microgrãos [9; 15; 25].

Tabela 2: Tamanho de grão [9].

Dimensão em <i>mesh</i>	Dimensão em mm de	até	Característica
8	2,83	2,00	Muito grande
10	2,38	1,68	
12	2,00	1,41	
14	1,68	1,19	
16	1,41	1,00	Grande
20	1,19	0,84	
24	0,84	0,60	
30	0,71	0,50	
36	0,60	0,42	Médio
46	0,42	0,30	
54	0,35	0,25	
60	0,30	0,21	
70	0,25	0,18	
80	0,21	0,15	

Dimensão em <i>mesh</i>	Dimensão em mm de	até	Característica
90	0,18	0,13	Pequeno
100	0,15	0,11	
120	0,13	0,09	
150	0,11	0,06	
180	0,09	0,05	
220	0,075	0,045	Muito pequeno
240	0,047	0,043	
280	0,038	0,035	
320	0,031	0,028	
400	0,018	0,016	
500	0,014	0,012	
600	0,010	0,008	
800	0,008	0,006	
1000	0,005	0,004	
1200	0,004	0,003	

A rugosidade resultante do processo de retificação depende mais do próprio processo de retificação e de dressamento do que do tamanho de grão do rebolo. Um rebolo com grão pequeno pode gerar uma rugosidade maior que um rebolo de grão maior, apenas se mudando os parâmetros de dressamento ou de retificação. Mesmo assim empregam-se grãos maiores para o desbaste e menores para operações de acabamento [9; 15; 25].

Rebolos com perfis, principalmente com raios pequenos, devem manter seus perfis pelo máximo de tempo possível. Para tanto se opta por grãos menores valendo a regra de quanto menor o tamanho de grão, por mais tempo se mantém o perfil e os cantos vivos, como as bordas, por exemplo [9; 15; 25].

2.6.3 A dureza

A dureza de um rebolo não se refere à dureza do grão, mas o quanto resiste o ligante à quebra ou ao desprendimento do grão. Em outras palavras, num rebolo mole o grão se desprende mais facilmente do que num rebolo duro. As letras de “A” à “Z” caracterizam o grau de dureza onde “A” é o tipo mais mole e “Z” o tipo mais duro. A tabela 4 mostra a divisão dos graus de dureza [9; 15; 25].

Além do ligante, o tamanho de grão e a porosidade também influenciam a dureza. Para se entender isso, pegam-se dois rebolos com o mesmo tipo de grão. O rebolo com grãos menores e poros mais finos é mais duro do que um rebolo com grãos e poros maiores [9; 15; 25].

Tabela 3: Grau de dureza dos rebolos [15].

Letra	Grau de dureza
A, B, C, D	extremamente macio
E, F, G	muito macio
H, I, J, K	macio
L, M, N, O	médio
P, Q, R, S,	duro
T, U, V, W,	muito duro
X, Y, Z	extremamente duro

2.6.4 O ligante

O tipo de ligante e a sua porcentagem no volume total do rebolo influenciam a dureza, a tenacidade e o poder de corte do rebolo. Os ligantes empregados em rebolos convencionais são os ligantes vitrificado e resinóide [9; 15; 25].

O ligante vitrificado é constituído de argila, feldspato e fundentes. A temperatura de queima dos rebolos nos fornos é de 1.000 a 1.350°C. Os rebolos vitrificados têm boa resistência a ataques químicos e não requerem cuidados especiais de armazenagem. Entretanto, deve-se evitar expô-los a elevadas trocas térmicas e impactos. É o principal ligante usado em rebolos para retificação de peças de metais ferrosos [9; 15; 25].

O ligante resinóide é composto de resinas fenólicas e outras substâncias que influenciam as propriedades do ligante. A resina é curada a cerca de 180°C. Esse ligante é menos susceptível a impactos que os ligantes vitrificados. Entretanto, deve-se evitar o uso de fluido de corte com pH inferior a nove e que atinja temperaturas acima de 28°C, o que pode levar à diminuição da resistência e da dureza do ligante. A estocagem por longo tempo também não é aconselhada [9; 15; 25].

2.6.5 A porosidade

A porosidade natural do rebolo em ligante vitrificado é caracterizada pelos números de 1 a 10. Quanto maior o número, mais porosa é a estrutura do rebolo (figura 8). A porosidade natural de um rebolo pode ser aumentada artificialmente ao se misturar formadores especiais de poros como parafina ou coque esferoidal. Essa porosidade artificial é caracterizada pelos números de 11 a 20 [9].

Os poros têm a função de transportar os cavacos gerados para fora da região de contato. Além disso, o volume de poros influencia a dureza e a estrutura do rebolo [15].

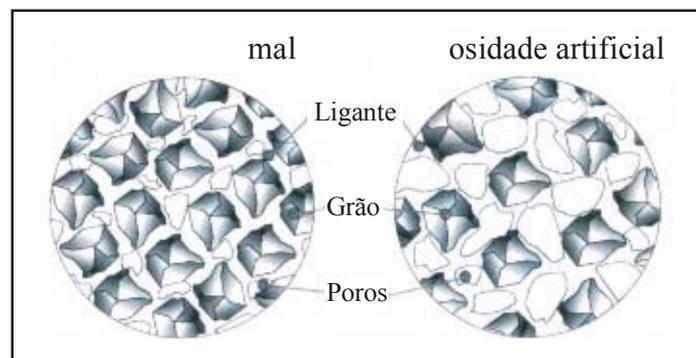


Figura 8: Porosidade [9].

2.6.6 A estrutura do rebolo

A figura 9 mostra um sistema de três coordenadas, sendo elas o volume de grão, de poros e de ligante dos rebolos convencionais. A área hachurada mostra os limites de composição das ferramentas abrasivas convencionais de estrutura normal. A fabricação de ferramentas abrasivas

com composição além dos limites da área hachurada é possível, mas apenas com técnicas especiais como, por exemplo, a prensagem a quente e a adição de formadores de poros [15].

A estrutura de um rebolo é caracterizada pela relação volumétrica entre grão, ligante e poros [15].

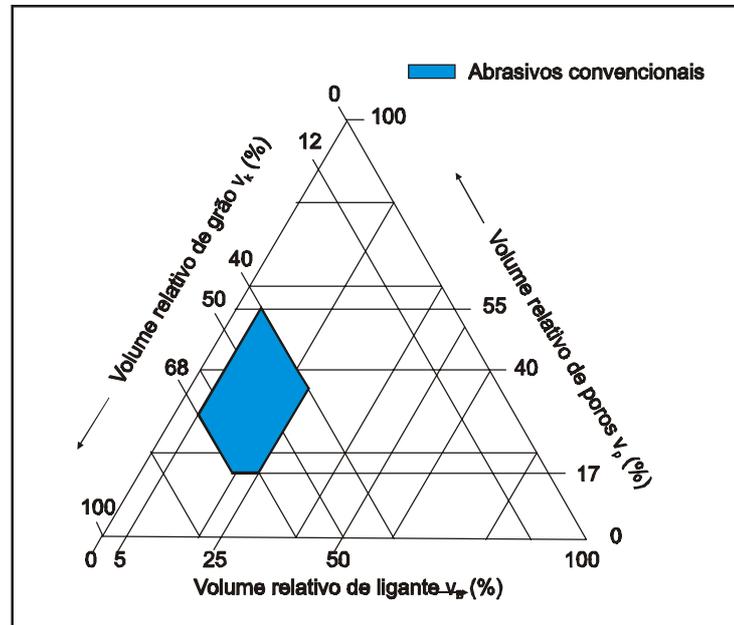


Figura 9: Composição de rebolos convencionais [15].

Os limites para rebolos convencionais podem ser vistos na tabela 7.

Tabela 4: Limites construtivos dos rebolos convencionais [15].

$V_{K\text{máx.}}$: 68%	$V_{B\text{máx.}}$: 25%	$V_{P\text{máx.}}$: 55%
$V_{K\text{mín.}}$: 40%	$V_{B\text{mín.}}$: 5%	$V_{P\text{mín.}}$: 17%.

2.7 Dressamento

Os rebolos geralmente não estão aptos para o corte quando entregues ao usuário ou após um determinado tempo de operação. Surgem erros macrogeométricos, como erro de circularidade, macrodesgaste, perda do perfil e ondulações que levam a problemas de processo ou a medidas fora da tolerância da peça (figura 10). Surgem também erros microgeométricos, ou seja, o gume se torna cego, o que leva ao aumento das forças de corte e da potência requerida pela máquina. Além disso, aumenta o perigo de danos estruturais na camada externa da peça. Devido a estas mudanças nas

características do rebolo, faz-se necessário o seu dressamento. O dressamento recondiciona o perfil macro e microgeométrico do rebolo [15].

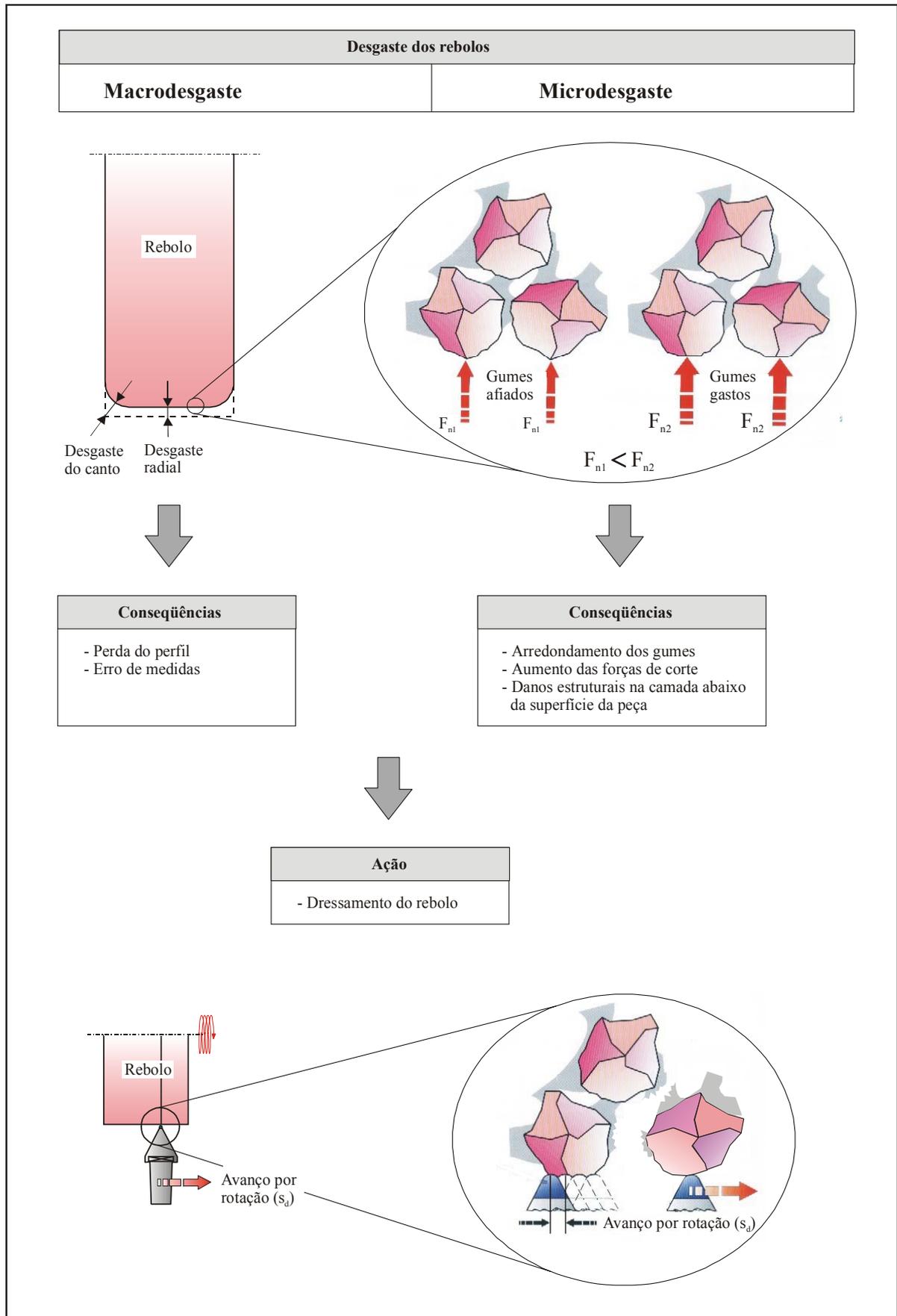


Figura 10: Desgaste e dressamento do rebolo [8; 15].

O objetivo da preparação dos rebolos, ou seja, o dressamento, é proporcionar características aos rebolos que satisfaçam as exigências para este poder entrar em operação e garantir suas medidas corretas, gumes afiados e poros abertos (figura 10). Dessa maneira permite-se que os resultados da retificação se mantenham os mais constantes possíveis. Os poros diante do gume servem para abrigar os cavacos arrancados, cavacos esses que são levados para fora das cavidades e do rebolo através do fluido de corte [2; 15].

O dressamento influi significativamente no rendimento do rebolo. Na produção de séries grandes, o dressamento é otimizado para a melhor adaptação do rebolo às exigências do processo. Em séries médias e pequenas é muito importante que o dressamento garanta as características do rebolo para usinar peças de diferentes perfis, materiais ou com acabamentos diferentes.

O termo dressamento engloba diferentes processos para a preparação de rebolos. São eles o perfilamento, a afiação e a remoção. O perfilamento dá ao rebolo a macroforma desejada, retirando os erros geométricos decorrentes do macrodesgaste. A afiação proporciona a capacidade de corte necessária aos gumes. A remoção, por sua vez, retira o empastamento, ou seja, restos de cavacos, de grãos e de ligante que se fixam nos poros da superfície ativa do rebolo [2; 15].

Nos rebolos vitrificados de diamante e de CBN, assim como nos convencionais (Al_2O_3 e SiC), a operação de perfilamento não apenas proporciona a forma geométrica desejada do perfil do rebolo, como fornece gumes afiados e cavidades suficientes, não sendo necessária a etapa de afiação. Nesse caso não se fala em perfilamento, afiação e remoção, mas apenas em dressamento [15].

Essa terminologia e os objetivos da preparação dos rebolos está apresentada na tabela 5.

Tabela 5: Terminologia e objetivos do condicionamento de rebolos [21].

Preparação do rebolo			
Processo	Montagem	Condicionamento	
		Dressamento	
	Balanceamento	Perfilamento	Afiação
Objetivos	Eliminação de: Desbalanceamento Excentricidade	Obtenção da macrotopografia	Obtenção da microtopografia: Recuo do ligante para o surgimento dos grãos Cavidade para cavacos

A figura 11 mostra, de uma maneira simplificada, como os rebolos devem se comportar, em processo, após o dressamento [21].

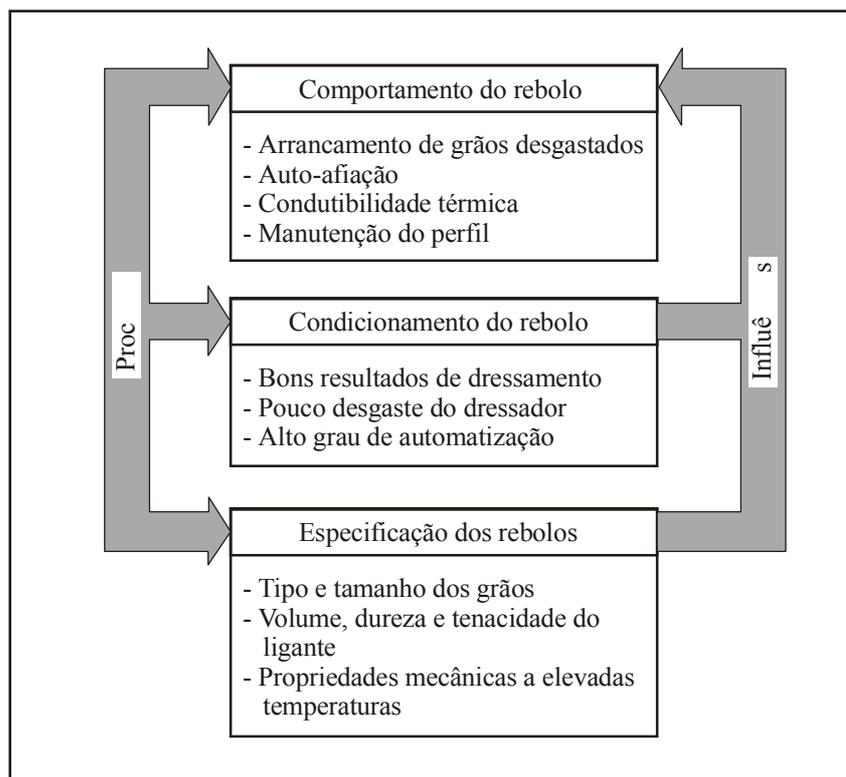


Figura 11: Preparação e resultados a serem alcançados por rebolos [21].

2.7.1 Dressadores

Os dressadores para rebolos convencionais são, com raras exceções, feitos de diamantes embutidos em uma matriz metálica. São diferenciados por dois grupos de dressadores: fixos e rotativos. Na figura 12 podem ser vistos os 4 princípios básicos de dressamento com dressadores diamantados [8; 15].

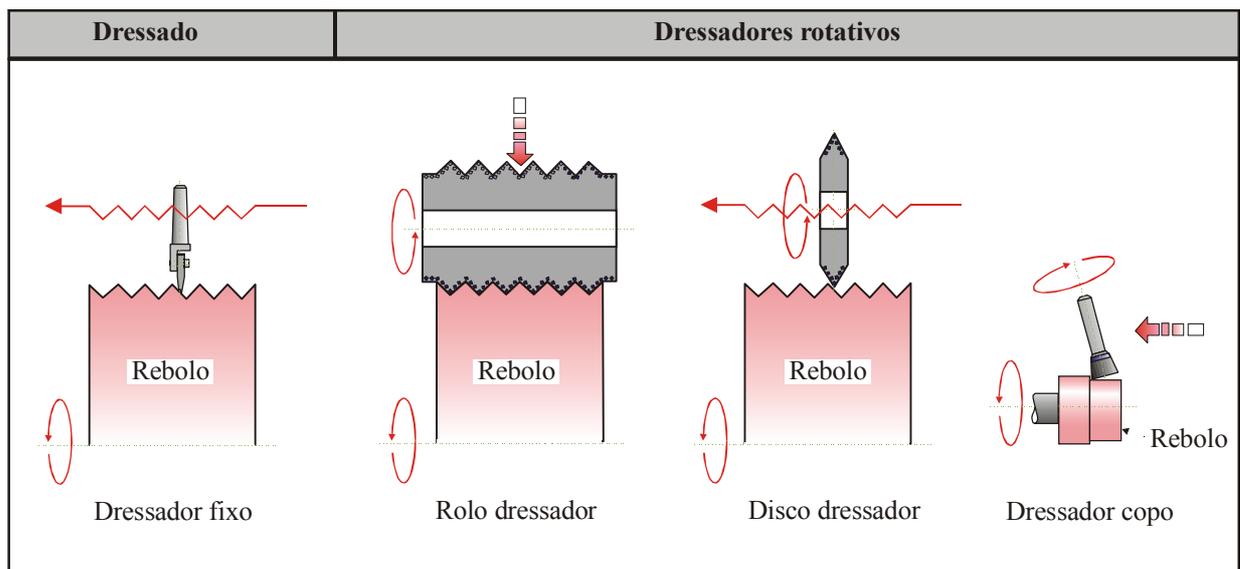


Figura 12: As formas de dressamento mais usuais [8].

Os dressadores fixos percorrem a superfície e o perfil do rebole no sentido axial, num movimento similar ao processo de torneamento. Esse movimento axial é feito em velocidade (v_{fad}) constante. O número de passes a cada dressamento é, em geral, de 2 a 3 e com profundidade de dressamento (a_{ed}) igual ou variável. O dressamento de perfis é feito através do comando numérico da máquina ou através de uma régua copiadora. Entretanto, alguns tipos de dressadores não podem ser empregados em certos tipos de perfis ou não podem ser empregados de nenhuma maneira quando o perfil do rebole é diferente do formato cilíndrico reto (1A1, ver anexo 2). A apresentação de cada um dos diferentes tipos de dressadores fixos será apresentada no item 2.7.2 [8; 15; 19].

Os dressadores rotativos tem um movimento adicional, o movimento de rotação do dressador. O rolo dressador possui o perfil da peça ou o perfil negativo do rebole e é apenas necessário que ele se movimente no sentido radial contra o rebole. O tempo de dressamento é curto, mas por ser um dressador feito especialmente para uma determinada peça acaba sendo restrito aos processos para a

fabricação seriada [15]. Aplicações típicas ocorrem na retificação de válvulas de motores à combustão interna, engastes de pás de turbinas de avião, na retificação de dentes de serra, canais de brocas e de machos de rosquear [8; 15].

Os discos dressadores são apropriados para a fabricação flexível, já que esse dressador não é dependente do perfil da peça. O perfil desejado é gerado através do comando numérico da retificadora. Além disso, os discos dressadores permitem atingir determinado grau de acabamento não possível de se atingir com os rolos dressadores. As desvantagens são o maior tempo de dressamento, em comparação com os rolos dressadores, e a necessidade de uma máquina mais complexa e, conseqüentemente, mais cara [6; 15]. Exemplos de aplicações dos discos dressadores são: eixo comando de válvula, virabrequins, retificação de dentes de engrenagem, roscas sem fim etc [6].

Os dressadores tipo copo são geralmente empregados na produção em série e apenas em rebolos cilíndricos retos, formato 1A1 [15]. A sua principal aplicação ocorre no dressamento de rebolos vitrificados de CBN para a retificação interna.

O dressamento de rebolos convencionais vitrificados com dressadores rotativos permite obter a estrutura desejada do rebole. Isso é possível porque se pode variar a rotação do dressador até atingir a velocidade relativa desejada entre dressador e rebole. Assim, obtém-se a agressividade requerida do rebole. A agressividade do rebole resultante do processo de dressamento é verificada na qualidade da primeira peça retificada após o dressamento e é denominada de rugosidade inicial (R_{ts0}), que quantifica a condição da superfície do rebole. Essa medida influencia nas forças, no desgaste do rebole (Δr_{swr}) e na rugosidade da peça (R_{zw}) [16]. A figura 13 mostra a variação da rugosidade inicial (R_{st0}) no dressamento concordante e discordante, variando-se a velocidade periférica do rolo dressador.

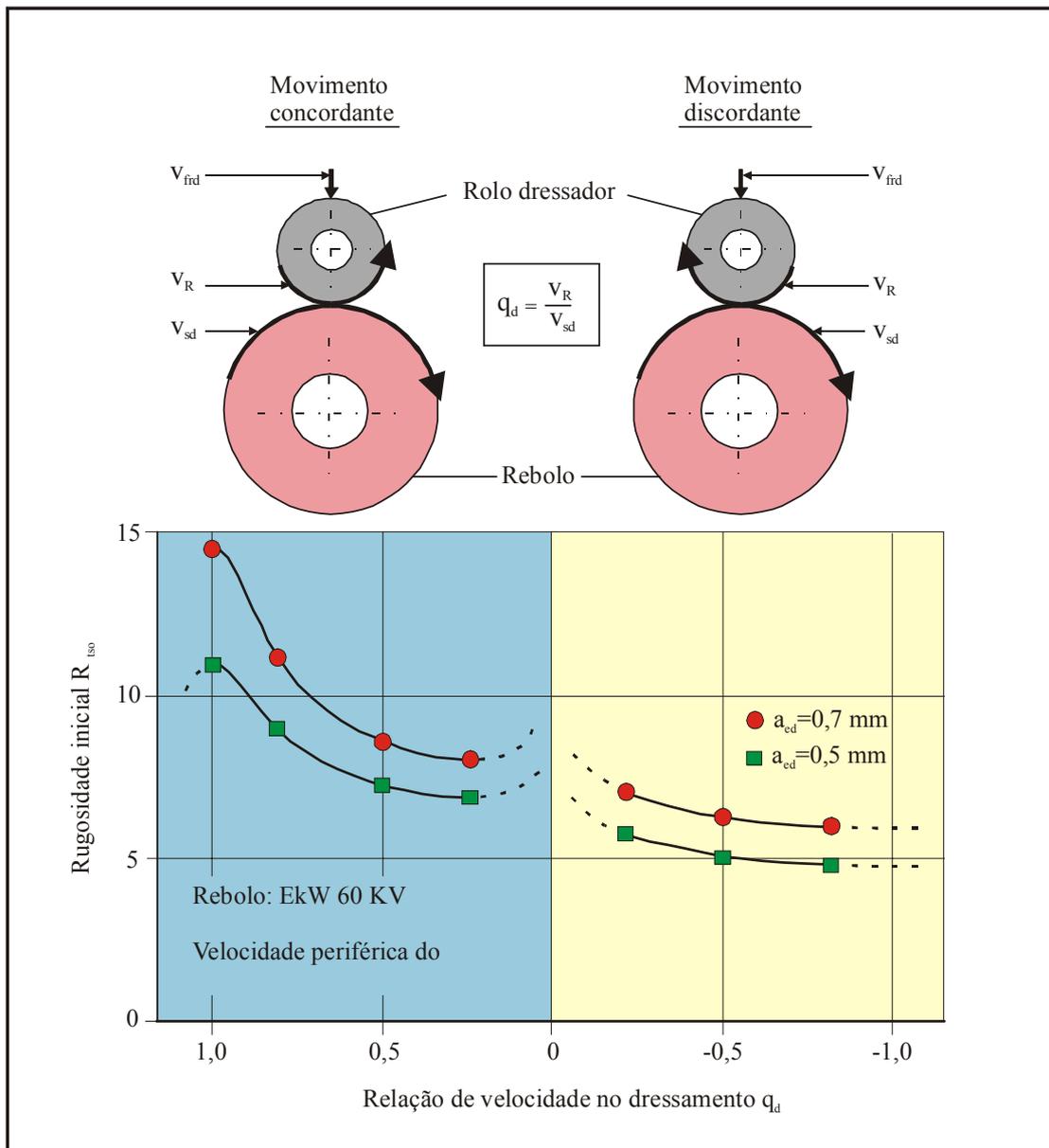


Figura 13: Influência da relação de velocidades e da penetração de dressamento sobre a rugosidade inicial do rebolo [8; 15]

2.7.2 Dressadores fixos

Entre os dressadores fixos existem três tipos básicos, sendo eles o dressador de diamante de ponta única, o dressador aglomerado e o dressador tipo *fliese* (ladrilho em alemão e cujo significado é dressador com diamantes dispostos em um plano). Cada um deles tem variações, principalmente no tipo de diamante empregado. Abaixo serão descritas rapidamente a aplicação e as variações de cada um desses dressadores.

O dressador de ponta única (figura 14) tem aplicação flexível e universal, podendo perfilar alguns perfis de rebolo. Ele contém um diamante natural de 1 a 6 pontas utilizáveis. Quando uma ponta gasta, retira-se o diamante por aquecimento e amolecimento da matriz metálica, vira-se o diamante de tal forma a expor uma nova ponta e fixa-se esse diamante de volta na matriz metálica por brasagem.

No momento em que o diamante sofre um desgaste pré-determinado, o dressador deve ser rotacionado em relação ao seu eixo axial. Dessa maneira uma nova região da ponta do diamante torna-se ativa. Para que isso seja possível, o dressador de ponta única é posicionado nos ângulos “ α ” e “ β ”, conforme a figura 14.

O dressador de ponta única é de baixo custo e os diamantes empregados são de qualidade variada. A qualidade do diamante aumenta com o aumento do número de pontas utilizáveis e com a isenção de trincas.

Esse dressador vem sendo substituído cada vez mais por dressadores aglomerados e pelo dressador *fliese*. Entretanto, são insubstituíveis em certas aplicações, principalmente quando se deseja uma boa qualidade da superfície retificada e, ao mesmo tempo, um rebolo com estrutura aberta da superfície ativa [8; 34].

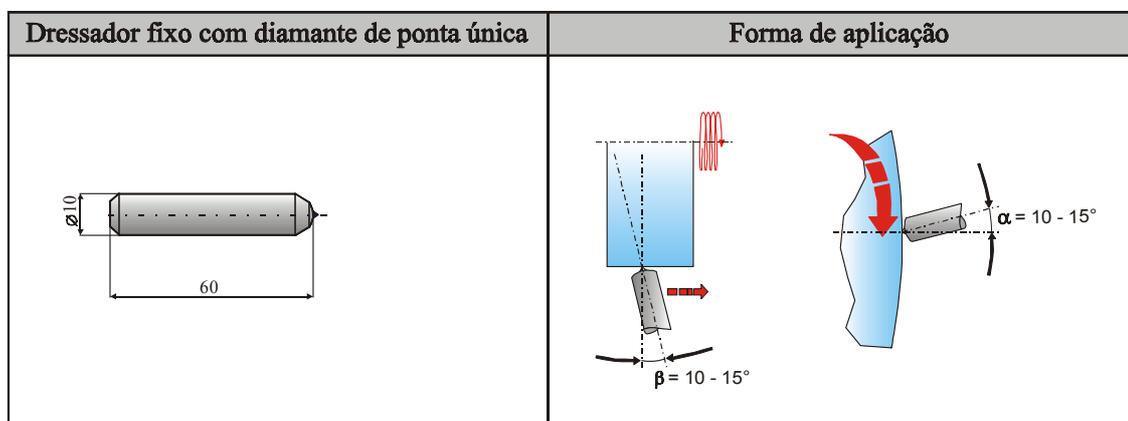


Figura 14: Dressador fixo com diamante de ponta única [7; 8; 34].

Em perfis onde não é possível utilizar os dressadores de ponta única e o *fliese*, geralmente em perfis estreitos e profundos, opta-se pelo dressador com diamante lapidado (figura 15) [34]. O diamante utilizado nesse dressador é grande, sempre de boa qualidade e caro, motivo pelo qual apenas é usado quando nenhum outro dressador fixo é tecnicamente viável. Lapidando esse

diamante, obtém-se um dressador com geometria definida, que mantém o perfil por bastante tempo e que pode ser relapidado.

O posicionamento do dressador com diamante lapidado em “ α ” e “ β ” tem como objetivo aumentar a vida do diamante (figura 15).

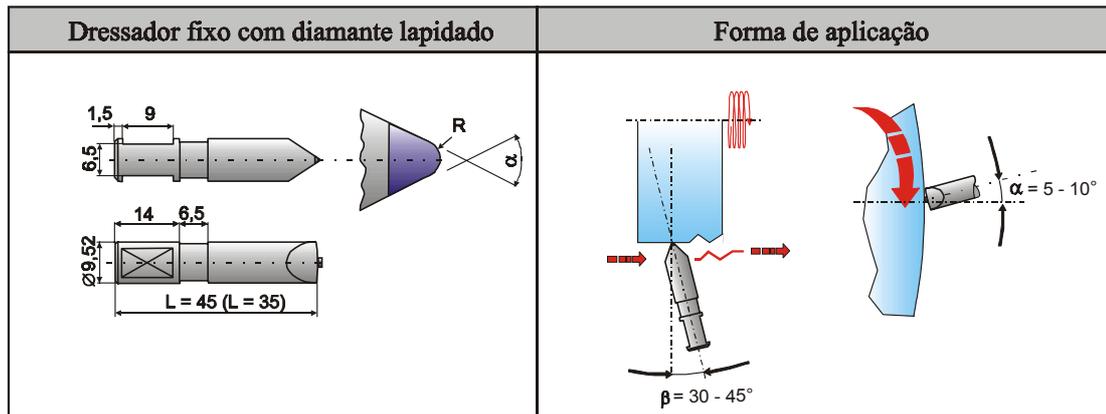


Figura 15: Dressador fixo com diamante lapidado [7; 8; 11; 34].

Os dressadores aglomerados (figura 16) são constituídos por pequenos diamantes naturais de forma irregular dentro de uma matriz metálica. Com esse dressador só é possível dresser num único plano como, por exemplo, perfis de rebolo retos (1A1 e 1V1 - anexo 2). Por isso sua aplicação se dá principalmente na retificação *center-less* e na plana, onde os rebolos empregados geralmente tem esse perfil. Por ser um dressador barato e ter um tempo de vida alto tem-se preferência em utilizá-lo, quando possível. Porém, não é possível variar muito a agressividade do rebolo com a variação dos parâmetros de dressamento. Portanto, não se pode garantir que esse dressador gere a rugosidade inicial otimizada em todos os rebolos empregados numa mesma retificadora. Geralmente tem-se dressadores aglomerados com ligante, tamanho e concentração de grãos diferentes, cada um para determinada especificação de rebolo ou de resultados desejados [7; 8; 34].

A principal desvantagem desse tipo de dressador é a má repetibilidade. O resultado do dressamento depende do contato de vários diamantes. No momento em que um diamante é arrancado da matriz, muda o tipo de contato com o rebolo e, conseqüentemente, o resultado do acabamento gerado por este rebolo [7; 34].

O arrancamento do diamante da matriz é normal e esperado, mas ocorre somente no momento em que seu gume arredonda e as forças sobre ele superam as forças que o mantém preso à matriz. Contudo, se a especificação do ligante não for a correta, o diamante não se desprende da matriz,

todos os diamantes em contato com o rebolo arredondam e não passam mais a abrir a estrutura do rebolo. Essa problemática também se percebe nos dressadores *fliese* com grãos de diamantes naturais, mas num nível menor, já que o número de diamantes expostos também é menor.

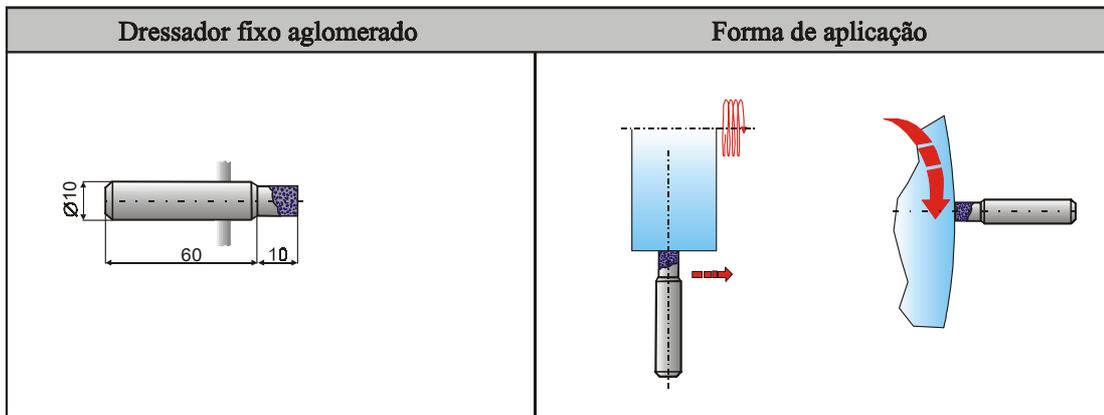


Figura 16: Dressador fixo aglomerado [7; 8; 34].

O dressador *fliese* é o dressador fixo mais versátil e com melhor relação custo/benefício. A sua largura efetiva pequena permite a obtenção de resultados semelhantes aos obtidos com os dressadores de ponta única. Contudo, a largura efetiva do dressador de ponta única (b_d) aumenta com o aumento do desgaste dos diamantes. Este fato restringe a aplicação de dressadores com diamantes de ponta única e de aglomerados onde se requerem resultados constantes em todos os dressamentos. Essa variação de b_d é pequena quando comparado o dressador *fliese* com os dressadores de ponta única e aglomerados [6; 34].

A agressividade do rebolo pode ser variada através da variação dos parâmetros de dressamento assim como ocorre com o dressador de ponta única. Em retificadoras com comando numérico pode-se inclusive dressar perfis precisos e pequenos raios, podendo-se substituir perfeitamente o dressador com diamante lapidado na maioria dos casos [8; 34].

Existem três variações desse dressador: o *fliese* com diamantes naturais, o *fliese* com diamantes em forma de grão de arroz (figura 17) e o *fliese* com diamantes sintéticos (figura 18) [6; 34].

O dressador tipo *fliese* com diamantes naturais é constituído por grãos de diamantes naturais dispostos em apenas um plano e fixos por uma matriz metálica. É aplicado, quando possível, no dressamento de rebolos perfilados substituindo de maneira econômica os dressadores de ponta única e o diamante lapidado [34].

O dressador com diamantes tipo grão de arroz, como o próprio nome diz, é constituído de diamantes em forma de grão de arroz, posicionados na matriz metálica conforme mostrado na figura 17. Garante-se dessa maneira uma largura efetiva (b_d) quase constante e, conseqüentemente, constantes parâmetros de dressamento. É empregado em operações que exigem elevada qualidade superficial e em processos automatizados [34].

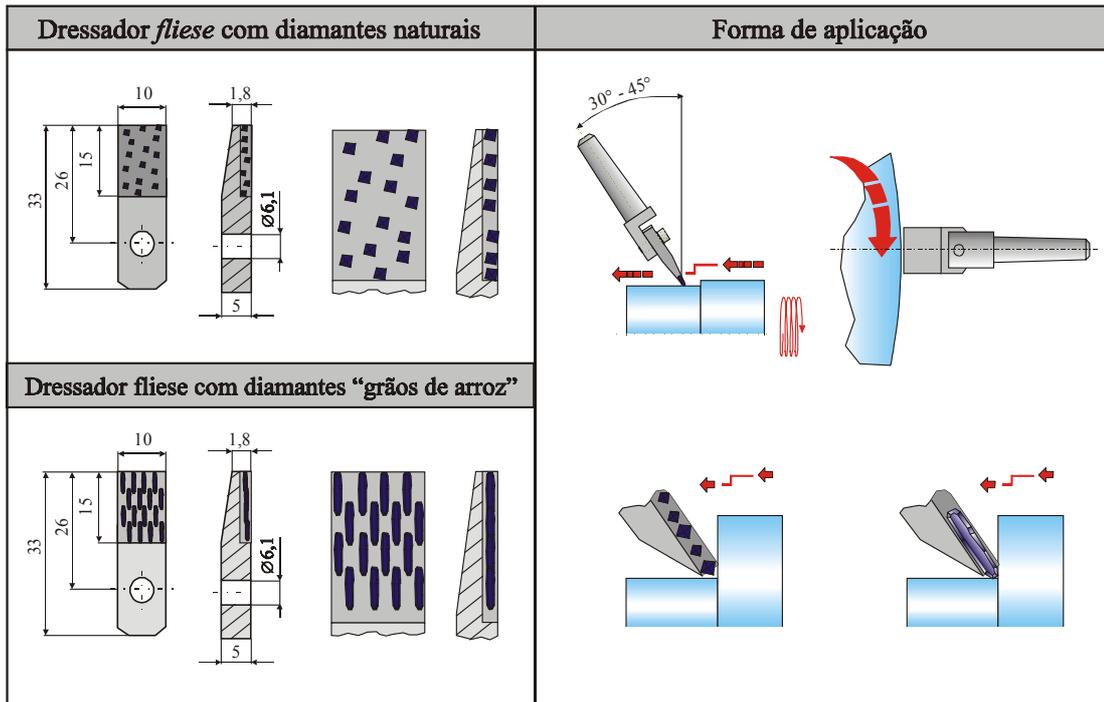


Figura 17: Dressadores fixos tipo *fliese* com diamantes naturais [8; 34]

O dressador *fliese* com diamante sintético tem aplicação similar ao *fliese* com diamantes naturais. Os bastões de diamantes são cortados a laser de um bloco, resultando em prismas uniformes, garantindo-se, assim, sempre a mesma área de contato. Devido a sua estrutura e a sua condutividade térmica maior que a do diamante natural, o diamante MCD (diamante monocristalino sintético, ver item 2.8.4) se mostrou excelente no dressamento de rebolos de óxido de alumínio microcristalino. Todavia, até o presente momento não foram encontradas, na literatura, informações sobre dressamento com diamantes sintéticos monocristalino e policristalino, e o diamante obtido por deposição química de vapor. Os resultados que se tem da experiência do fabricante de dressadores *fliese* com diamantes sintéticos DR. KAISER DIAMANTWERKZEUGE GmbH é de que o diamante MCD traz os melhores resultados no dressamento de rebolos de Al_2O_3 -MC, mas não

necessariamente é o que tem a melhor performance no dressamento de rebolos de Al_2O_3 fundidos [6].

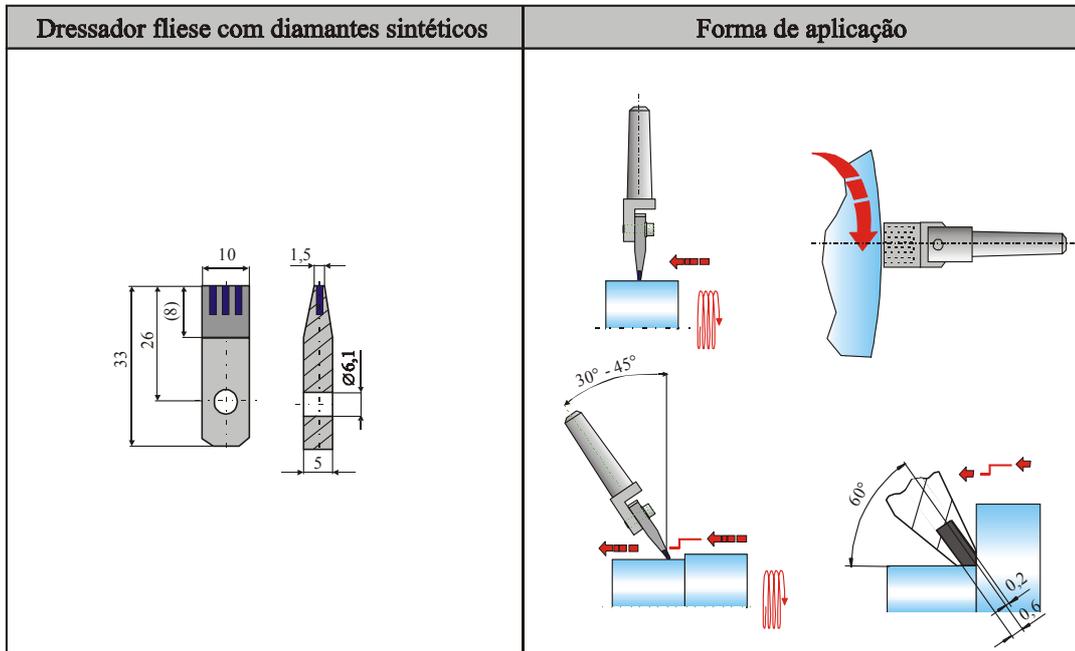


Figura 18: Dressadores fixos tipo *fliese* com diamantes sintéticos [6; 8]

2.7.3 Dressamento com dressadores fixos

Os parâmetros de dressamento exercem uma influência bem maior na geração da topografia do rebolo do que a variação da especificação do rebolo. O exemplo a seguir evidencia isso: num ensaio foram comparados rebolos de grãos de tamanhos extremamente diferentes, dressados com parâmetros grosseiros e sob as mesmas condições. Verificou-se que o rebolo com grão 400 (grão muito fino) apresentava uma rugosidade inicial 35% maior que no rebolo de grão 46 (grão médio). Variando os parâmetros de dressamento constatou-se uma mudança de até 700% da rugosidade inicial dos rebolos [19].

O resultado do dressamento é determinado pelos seguintes parâmetros de dressamento variáveis: a velocidade periférica do rebolo no dressamento (v_{cd}), a profundidade de dressamento (a_{ed}) e o avanço axial do dressador por rotação do rebolo (f_{ad}). A velocidade axial do dressador também pode ser expressa por v_{fad} em mm/s. O grau de recobrimento (U_d) é um parâmetro que influencia consideravelmente o processo de dressamento. Ele é determinado pela relação da largura efetiva do

dressador (b_d) e do avanço axial (f_{ad}), conforme a equação 1 [16]. Em outras palavras, o grau de recobrimento (U_d) determina o número de vezes que um ponto da superfície do rebolo entra em contato com a largura efetiva do dressador (b_d) durante um passe de dressamento. Quanto maior o for esse número, maior é o U_d e mais fina é a topografia resultante do rebolo [8].

$$U_d = \frac{b_d}{f_{ad}} = \frac{b_d \cdot n_{sd}}{v_{cd}} \quad (1)$$

A figura 19 mostra o exemplo de um grau de recobrimento (U_d) igual à 2 já que toda largura efetiva do dressador (b_d) entrou em contato com o rebolo após 2 rotações do mesmo.

Na prática são usados os seguintes valores referenciais de U_d , de acordo com Graf [8]:

- Desbaste: $U_d = 2 - 3$
- Retificação normal: $U_d = 3 - 4$
- Acabamento: $U_d = 4 - 6$
- Acabamento fino: $U_d = 6 - 8$

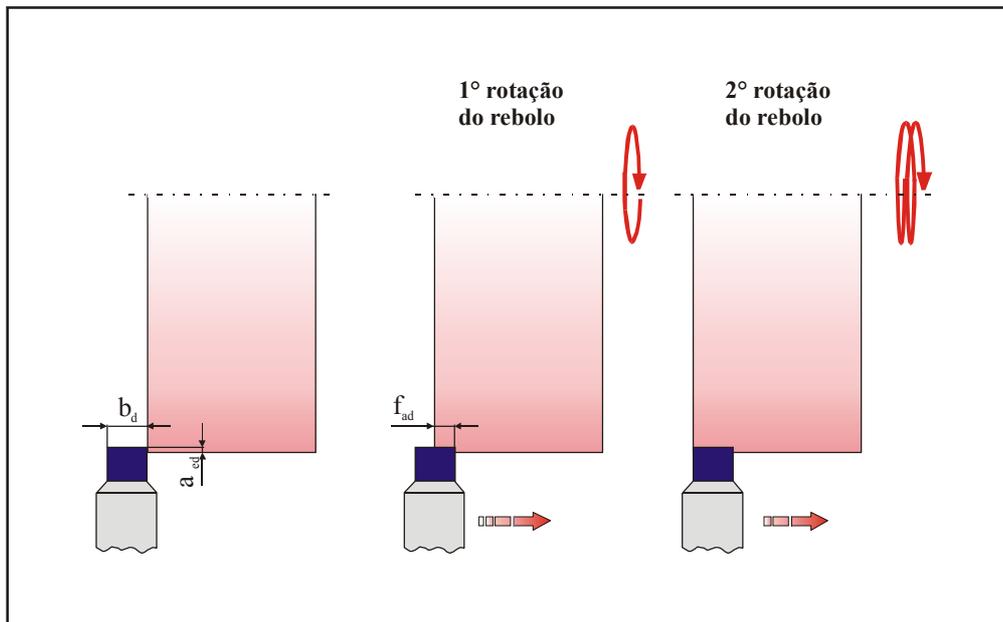


Figura 19 : Grau de recobrimento (U_d) [8].

A variação de U_d irá gerar uma rosca com passo maior ou menor na superfície do rebolo. O passo dessa rosca é igual ao avanço axial (f_{ad}). A figura 20 mostra dois exemplos de dressamento com um dressador lapidado e com um do tipo *fliese*, e o perfil da rosca gerada.

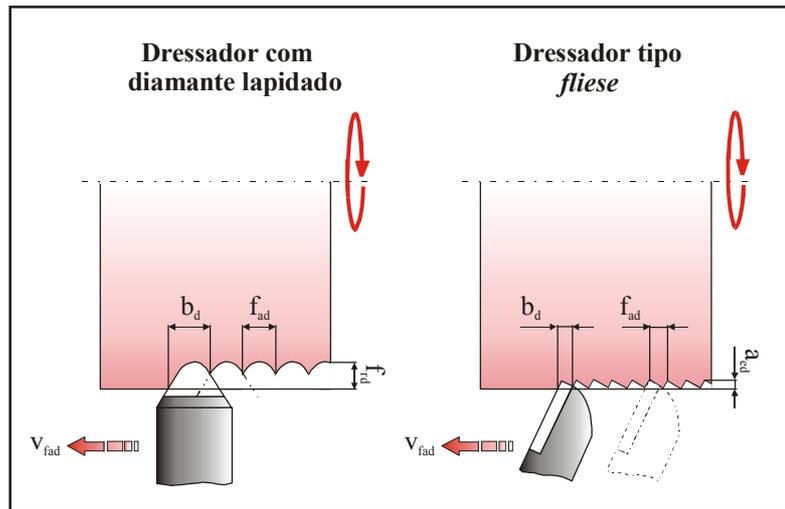


Figura 20: Características de dressamento com dressadores fixos [16].

O aumento da velocidade de avanço axial (f_{ad}) e da profundidade de dressamento (a_{ed}) levam ao aumento da rugosidade inicial (R_{ts0}), como mostra a figura 21.

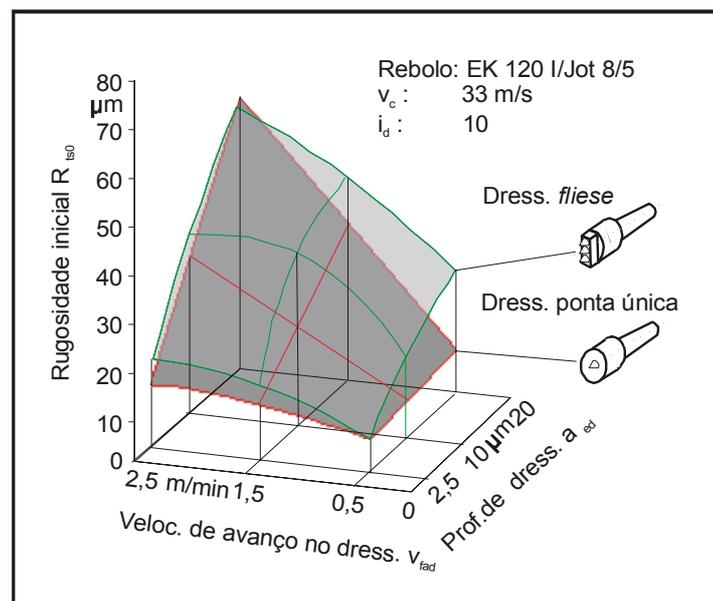


Figura 21: Rugosidade inicial do rebolo em função da velocidade de avanço axial e radial [19].

A influência da profundidade de dressamento é menor em velocidades de avanço axial baixas do que em altas. Além disso, a rugosidade inicial do rebolo sofre maior influência do avanço axial do dressador do que da profundidade de dressamento [19].

O número de passes (i_d) tem pouca influência sobre a topografia do rebolo. Mesmo assim, recomenda-se mais que um passe, já que a profundidade de corte programada pode ser diferente da profundidade de corte resultante e, desta maneira, levar a resultados ruins de dressamento. A profundidade de corte no dressamento pode ser menor que o programado devido à deformação do sistema rebolo / máquina / sistema de dressamento resultante das forças de dressamento. Optando-se por vários passes, observa-se num dado momento que o valor programado e o efetivo se aproximam. Além disso, os esforços sobre o dressador são menores, o que evita o lascamento ou o arrancamento de grãos inteiros do ligante [19].

O passe com profundidade praticamente igual a zero, em que a ponta do dressador apenas encosta no rebolo, leva à diminuição da rugosidade inicial do rebolo. Quando se dressa com profundidades de dressamento nessa ordem de grandeza, os grãos da superfície do rebolo não sofrem lascamento, mas são alisados. Isso faz com que se percam muitos gumes e o rebolo perca, em parte, o poder de corte. Além disso, a ponta do diamante gasta rapidamente [8].

A velocidade periférica do rebolo durante o dressamento (v_{cd}) tem pouca influência sobre a rugosidade inicial. Entretanto, o aumento de v_{cd} leva ao aumento da taxa de remoção no dressamento (Q'_{wd}). A taxa de remoção aumenta com o aumento de v_{cd} , não resultando em um aumento das forças de corte no dressamento, nem em vibrações que teriam como consequência o aumento de R_{ts0} [19].

O resultado do dressamento no processo de retificação será resumidamente descrito a seguir. Uma topografia grosseira de rebolo, com gumes expostos, mas em pequena quantidade, leva a baixas forças de corte. Os rebolos dressados dessa maneira grosseira geram peças com rugosidade elevada. Uma parte da influência do dressamento se perde com o desgaste do rebolo. Mesmo assim, após um grande volume de material usinado, percebem-se variações dos resultados de retificação variando-se os parâmetros de dressamento [19].

O processo de dressamento influencia diretamente nos custos do processo de retificação, já que tempo de dressamento chega a ser 10% do tempo total do processo. Por isso, é muito importante a utilização de parâmetros de dressamento adequados e a obtenção de resultados de dressamento reproduzíveis para a otimização do processo de retificação [19].

2.7.4 Dressamento de rebolos de Al_2O_3 -MC com dressadores fixos

A fim de que os rebolos de Al_2O_3 -MC demonstrem todo o seu potencial, o dressamento deve ao mesmo tempo abrir a estrutura, conferindo agressividade ao rebolo, e gerar a rugosidade desejada da peça, além de gerar peças com tolerâncias dentro do especificado. Realizar essa tarefa com o uso de dressadores fixos tem sido extremamente difícil.

Os principais problemas têm sido unir a agressividade do rebolo, rugosidade da peça, repetibilidade do processo e baixo desgaste do diamante do dressador. Essa problemática é parecida no dressamento de rebolos de Al_2O_3 fundidos, mas em menor escala. Além disso, no dressamento de rebolos de Al_2O_3 fundidos o lascamento do grão abrasivos é diferente em relação ao grão abrasivo de Al_2O_3 -MC. Por esse motivo, o contato entre grão abrasivo e diamante é diferente e, conseqüentemente, o resultado desse contato, ou seja, do dressamento também deve ser diferente. Disso resulta que há poucas chances da qualidade de dressamento de rebolos de Al_2O_3 -MC e Al_2O_3 fundidos ser igual com o uso de um mesmo diamante. Além disso, a forma de desgaste do diamante do dressador também muda.

Percebeu-se que o emprego do dressador aglomerado apenas teve sucesso em operações que objetivaram baixa remoção de material e baixa rugosidade. Pode-se citar, como exemplo, alguns casos de cilindros com excelente qualidade superficial retificados em retificadoras *center-less* de passagem.

Os dressadores de ponta única e o lapidado, embora confirmam a estrutura desejada ao rebolo e, conseqüentemente, a rugosidade esperada da peça, sofrem rápido desgaste devido à grande agressividade do abrasivo de Al_2O_3 -MC. Conseqüentemente, não é possível manter a repetibilidade de processo.

Já os dressadores do tipo *fliese*, além de gerarem as vantagens dos dressadores de ponta única, permitem a boa repetibilidade dos resultados da retificação. Nesse tipo de dressador os diamantes sintéticos mostraram os melhores resultados. A repetibilidade dimensional é melhor pela uniformidade das medidas dos bastões de diamante. Além disso, a interação entre os diamantes MCD e CVD com o grão abrasivo de Al_2O_3 -MC gera uma estrutura mais satisfatória do rebolo.

Um outro problema no dressamento de rebolos de Al_2O_3 -MC com dressadores fixos é o tipo de contato existente entre o grão abrasivo e o diamante do dressador. O choque causado entre o diamante do dressador fixo e o grão abrasivo de Al_2O_3 -MC pode danificar ou mesmo quebrar um ao

outro. Falta o movimento de rotação do dressador para permitir um dressamento “macio” e, assim, resultar numa superfície com um maior número de gumes e de poros.

Muitas operações de dressamento de rebolos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MC}$ ainda são realizadas com dressadores fixos, principalmente com diamantes naturais. O resultado não é satisfatório, mas ainda assim o resultado da retificação é, no geral, bem melhor em relação aos rebolos com abrasivos de Al_2O_3 fundidos. A otimização do processo de dressamento com dressadores fixos e a possibilidade de utilização de diamantes sintéticos nesses dressadores podem elevar ainda mais o potencial desses rebolos, além de aumentar a confiabilidade e melhorar a repetibilidade do processo [3; 28].

2.7.5 Desgaste de dressadores fixos e suas conseqüências

O desgaste dos dressadores é principalmente influenciado pelos parâmetros de dressamento. À medida que o diamante desgasta, sua geometria se modifica e, conseqüentemente, são geradas variações significativas nos resultado do dressamento. Por exemplo, o aumento da superfície de contato do dressador, ocasionado pelo desgaste, resultará numa topografia mais fina do rebolo, quando dressado com os mesmos parâmetros (figura 22). A modificação do perfil de dressadores tipo *fliese* com grãos de diamante natural também leva à variação da rugosidade inicial do rebolo, quando dressado com os mesmos parâmetros de corte (figura 23) [19].

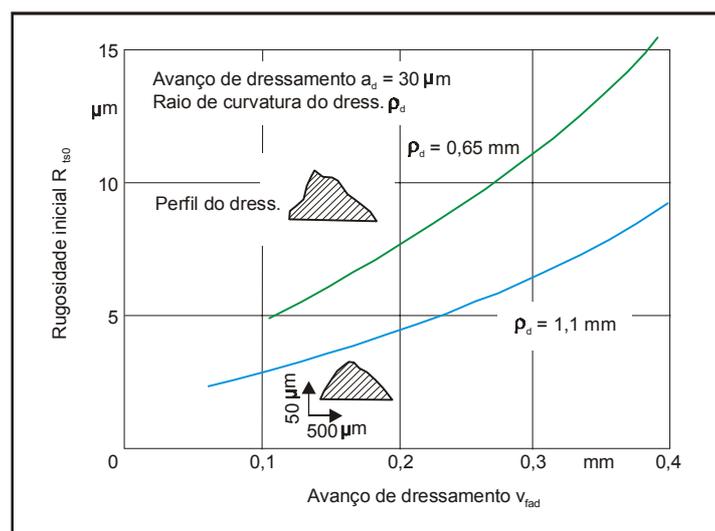


Figura 22: Rugosidade inicial em função do avanço de dressamento e do perfil do diamante do dressador [19].

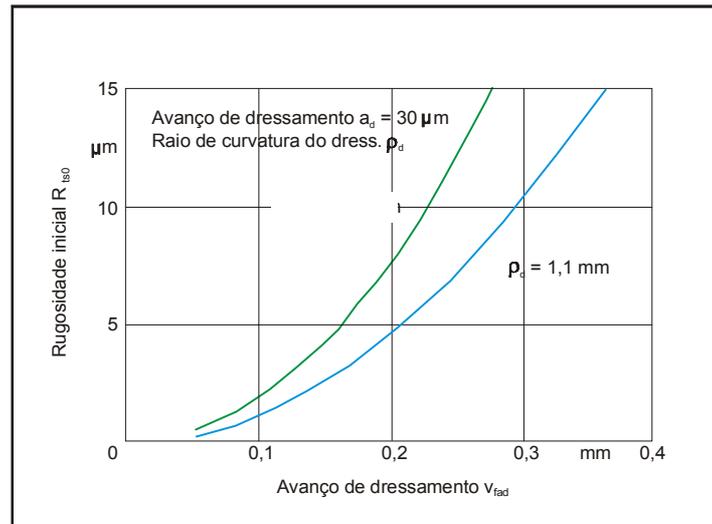


Figura 23: Rugosidade inicial em função do avanço de dressamento e do raio de curvatura do diamante do dressador [19].

Esses exemplos evidenciam que a geometria do dressador influencia nos resultados do dressamento. Portanto, não basta manter os parâmetros do processo constantes para se obter topografias reproduzíveis no dressamento [8; 19].

A largura efetiva (b_d) do dressador de ponta única e do lapidado aumenta com o desgaste do dressador, já que o raio de curvatura do diamante aumenta com o desgaste. A fim de manter o grau de recobrimento constante deve-se, nesse caso, diminuir o avanço axial. No dressador *fliese* com diamantes grão de arroz essa problemática também ocorre, mas em menor intensidade [6; 19].

Os dressadores *fliese* com grãos de diamantes naturais e os dressadores aglomerados apresentam uma forma de desgaste desejável. Quando os grãos de diamante em contato com o rebolo arredondam e perdem seu poder de corte, eles devem ser naturalmente arrancados da matriz. Isso ocorre devido ao aumento das forças atuando sobre eles. Dessa maneira, permite-se que os grãos com gumes afiados, situados na camada logo abaixo, possam atuar. Como resultado ocorre uma leve mudança do resultado de dressamento, o que é perceptível em processos de precisão. Por um outro lado, se os grãos gastos não forem arrancados, o dressador perde o poder de corte e não consegue mais abrir a estrutura do rebolo, passando praticamente a alisá-lo [8].

Verificou-se, na prática, a importância de que o contato entre os dressadores *fliese* com diamantes sintéticos e o rebolo ocorra de tal forma que o diamante apresente uma topografia rugosa. Essa característica leva a bons resultados de dressamento. Topografia lisa é sinal de que o diamante

não está conseguindo abrir a estrutura do rebolo, ou seja, está alisando-o. O rebolo por sua vez também está alisando o diamante do dressador por falta de agressividade.

Excetuando-se os dressadores aglomerados e *fliese* com grãos de diamante natural, podem ocorrer macrolascamentos do diamante, caso as forças sejam muito altas. Quando isso ocorre, o resultado do dressamento varia muito. O interessante é que dessa maneira são criados gumes afiados e, mudando-se os parâmetros de dressamento, os resultados podem ser excelentes. Por um outro lado, a repetibilidade do processo é baixa [8].

2.8 Diamantes para dressadores fixos

O diamante (do grego, adamos: indomável, inconquistável) é o mais duro material conhecido. No entanto, sua dureza varia conforme sua orientação cristalina. Por isso, há a possibilidade de se lapidar um diamante (menos nas direções dos eixos principais 100, 010 e 001) com outro diamante ou com pó de diamante, no qual, segundo a probabilidade estatística, aparecerão todas as durezas possíveis do diamante [23]. Ele é composto quase que totalmente de carbono, tendo como impurezas os seguintes componentes, em valores aproximados: nitrogênio 300 ppm, alumínio 10 ppm e boro 0,25 ppm [8].

Sua formação data de cerca de 2 a 4 bilhões de anos a partir de átomos de carbono que sob condições de pressões extremas e temperaturas elevadas, de 900 a 1300°C, cristalizaram-se na forma de diamantes. Aproximadamente 80% dos diamantes naturais não podem ser empregados como diamantes de joalheria, em decorrência de falhas internas, ou seja, trincas e da falta de uma pureza suficientemente elevada, caracterizada por uma cor não adequada. Esses diamantes estão à disposição da indústria como diamantes industriais, e suas propriedades são praticamente idênticas às dos diamantes sintéticos [15]. Entretanto, as impurezas encontradas nos diamantes naturais não surgem em diamantes sintéticos, levando a melhores propriedades destes [8].

As impurezas (nitrogênio, boro etc) encontradas nos diamantes naturais influenciam nas suas características e propriedades físicas. Os diamantes são classificados em quatro tipos (Ia, Ib, IIa e IIb), conforme o nível de impurezas [26]. A tabela 6 mostra as características dos quatro tipos de diamantes classificados.

Tabela 6: Características dos diferentes tipos de diamante [26].

		Tipo I			Tipo II	
		Ia	Ib		IIa	IIb
Abundância na natureza		~98%	~0,1%		1~2%	≅ 0%
Forma sintética		Não sintetizável	Pó	Monocristal	Monocristal	
Impurezas	Nitrogênio (ppm)	~2 x 10 ³ incrustações delgadas	10 ² ~ 10 ³ disperso	1 ~ 10 ² disperso	~ 1 elevada pureza	~ 1
	Outros (ppm)		metais solventes 10 ⁴ ~ 10 ⁵			Boro ~ 100
Cor		Transparente a amarelado	Verde à marrom	Amarelo	Transparente	Azul
Resistividade elétrica (Ω.cm)		10 ⁴ ~ 10 ¹⁶	10 ¹⁶	10 ¹⁶	10 ¹⁶	10 ~ 10 ⁴
		Isolante				
Condutividade térmica (cal/cm.s.°C)		2	2 - 4	5	5	

O diamante tem a melhor condutividade térmica de todos os materiais. Alguns tipos de diamante têm condutividade térmica cinco vezes maior que a do cobre (figura 24). O motivo disso é a elevada rigidez da estrutura do cristal. Porém, a presença de impurezas distorce a estrutura, levando à diminuição da condutividade térmica. A condutividade térmica do diamante diminui com o aumento do teor de nitrogênio [26].

A forma em que as impurezas se encontram na estrutura do cristal leva a variações da condutividade térmica. Existem duas formas de distribuição das impurezas no diamante. No tipo Ib as impurezas estão uniformemente dissolvidas, enquanto que no tipo Ia se encontram na forma de precipitados, o que diminui a condutividade térmica. No tipo Ib o nitrogênio se encontra disperso na forma de átomos substitucionais na estrutura [26].

Como mostrado na figura 24, os diamantes do tipo Ib têm maior condutividade térmica que os diamantes naturais do tipo Ia, no qual o nitrogênio se encontra precipitado na forma segregada. Os diamantes sintéticos do tipo Ib têm uma condutividade térmica similar à do raro diamante IIa, devido à baixa concentração de nitrogênio [26].

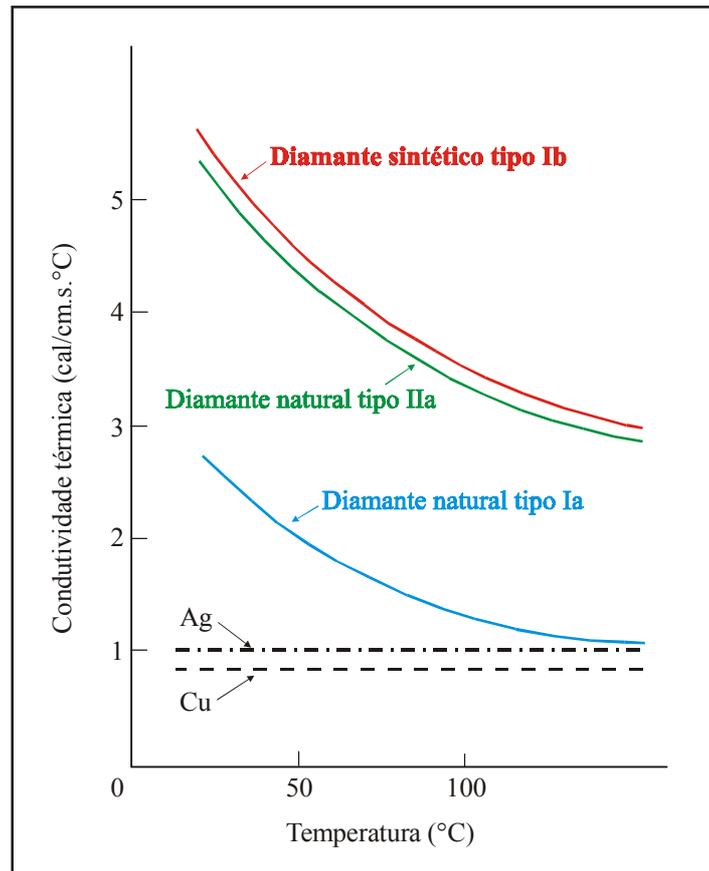


Fig. 24: Condutividade térmica dos diferentes tipos de diamante [26].

Todos os 4 tipos de diamantes são encontrados na natureza. Entretanto, a maioria é do tipo Ia, que contém centenas de ppm de nitrogênio e é empregado em dressadores tanto fixos como rotativos. O tipo Ib contém apenas dezenas de ppm de nitrogênio, o que lhe proporciona características físicas diferentes do tipo Ia, relacionadas a características óticas e de condutividade térmica, por exemplo [26]. Fora o tipo Ia e Ib, os outros tipos de diamantes não são usados em dressadores, seja na sua forma natural ou sintética [26].

2.8.1 Diamantes naturais

A estrutura de um grão de diamante é composta apenas por ligações covalentes. Os átomos de carbono formam uma estrutura cfc (cúbica de face centrada), sendo que há quatro outros átomos por célula unitária, que preenchem os espaços restantes (figura 25). Cada átomo de carbono está distanciado 0,154 nm do seu vizinho [1].

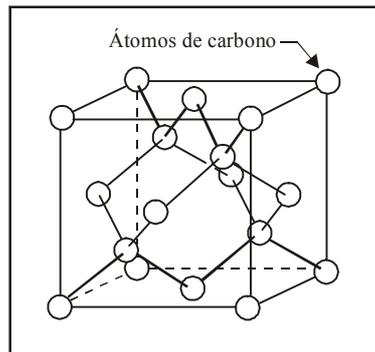


Figura 25: Célula unitária do diamante [1].

Essa estrutura atômica é que resulta nas excelentes propriedades dos diamantes, como a dureza Knoop de 6.500 a 8.800 HK, ou seja, o dobro que o CBN (nitreto de boro cúbico), o segundo material mais duro conhecido [8].

A dureza de grãos de óxido de alumínio (Al_2O_3) e de carboneto de silício (SiC) praticamente independem da orientação dos cristais. Já nos diamantes percebe-se uma grande dependência. Em relação às faces do octaedro, no plano 111, por exemplo, a dureza no plano 110 é 123% maior, e no eixo principal 100 é 138% maior [8].

O diamante também é o material de corte com a maior condutividade térmica, utilizado em ferramentas de geometria não-definida. O calor resultante na zona de corte é então rapidamente conduzido para o ligante [15].

A tabela 7 mostra valores de dureza Knoop, condutividade térmica, resistência ao desgaste e resistência à compressão do diamante comparativamente aos outros grãos abrasivos empregados em rebolos [8].

Tabela 7: Comparação das propriedades do diamante com outros grãos abrasivos [8].

Dureza Knoop			Resistência ao desgaste (Mohs Wooddell)		
Al ₂ O ₃		2.200	Al ₂ O ₃		9
SiC		2.700	SiC		14
CBN		4.500	CBN		37
Diamante		8.800	Diamante		43
Resistência à compressão (kg/mm²)			Condutividade térmica (Gcal.s.cm².C/cm)		
Al ₂ O ₃		58	Al ₂ O ₃		0,069
SiC		300	SiC		0,215
CBN		720	CBN		3,8
Diamante		1.065	Diamante		5,9

A dureza do diamante diminui com o aumento da temperatura. À 900°C o diamante grafitiza quando está sob baixas pressões e há oxigênio suficiente (figura 26). É possível aquecer o diamante acima de 900°C sem que ocorra sua grafitização, mas em atmosferas com quantidade baixa de oxigênio [15].

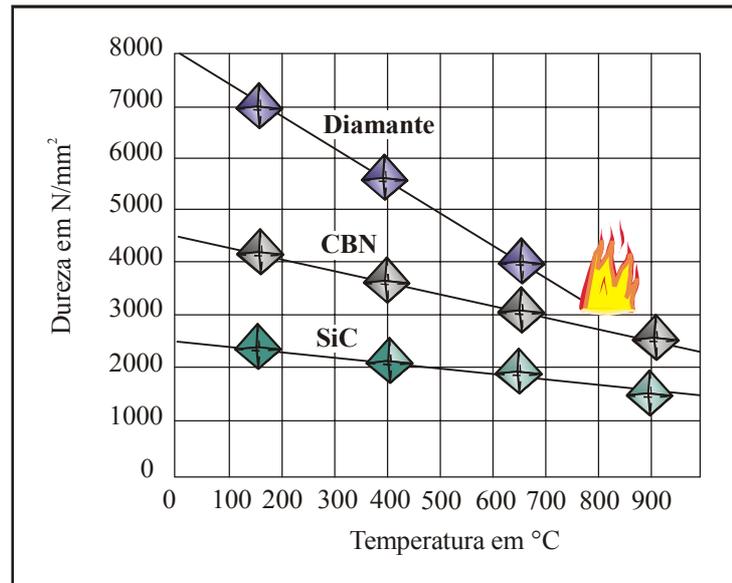


Figura 26: Dureza dos grãos abrasivos com o aumento da temperatura [8].

Os diamantes naturais considerados de uso industrial correspondem ao tipo Ia, conforme a tabela 6.

2.8.2 Diamante sintético

O diamante sintético é feito a partir de carbono, na forma de grafite, a pressões de 7 a 12 GPa, temperaturas da ordem de 1.600°C e com a adição de catalisadores especiais. Essa síntese foi realizada pela primeira vez com sucesso, em 1954, pela General Electric (EUA) [8].

A taxa de crescimento dos grãos de diamante pode ser variada através da variação da combinação de pressão, temperatura e condições químicas. Dessa forma, obtêm-se grãos de uso comercial em poucos segundos. A grande vantagem dos diamantes sintéticos em relação aos naturais é a possibilidade de alteração de certas propriedades, que se obtêm com a variação da taxa de crescimento. Além disso, os grãos formados têm propriedades muito próximas [15].

Os diamantes sintéticos correspondem ao tipo Ib da tabela 6.

2.8.3 Diamante policristalino sintético – PCD

O diamante policristalino conhecido por PCD (polycrystalline diamond) é formado pela sinterização de pó de diamante sintético com pó de cobalto e tungstênio (figura 27). Devido à disposição arbitrária dos diamantes, o diamante PCD é isotrópico e, por isso, não há plano preferencial de clivagem. Se um grão de diamante quebra ou é arrancado da matriz, as partículas adjacentes e subjacentes impedem a continuação da fissura. Mesmo que a isotropia confira ao diamante PCD uma elevada resistência ao desgaste, o diamante natural é mais duro. A dureza Knoop do diamante PCD é de HK 5.500, enquanto que a do diamante natural está na faixa de HK 6.500 a 8.800 [8].

Existem praticamente três diferentes tamanhos comerciais de grão de diamante PCD (0,002; 0,001 e 0,025 mm). Em dressadores opta-se pelo grão maior de 0,025 mm. Os grãos menores são utilizados em ferramentas de geometria definida, como insertos para torneamento e fresamento [8].

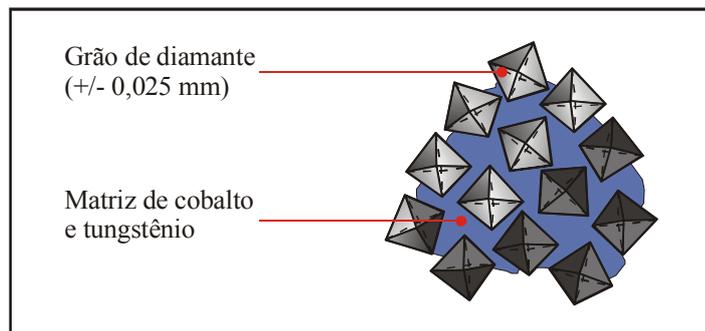


Figura 27: Estrutura do diamante policristalino (PCD) [8].

2.8.4 Diamante monocristalino sintético – MCD

O diamante MCD (monocrystalline diamond) é um diamante monocristalino obtido sinteticamente e corresponde ao tipo Ib da tabela 6. Do bloco resultante do processo de fabricação são cortados, a laser, os bastões (empregados em dressadores) ou insertos (empregados no torneamento) (figura 28) [8; 26].

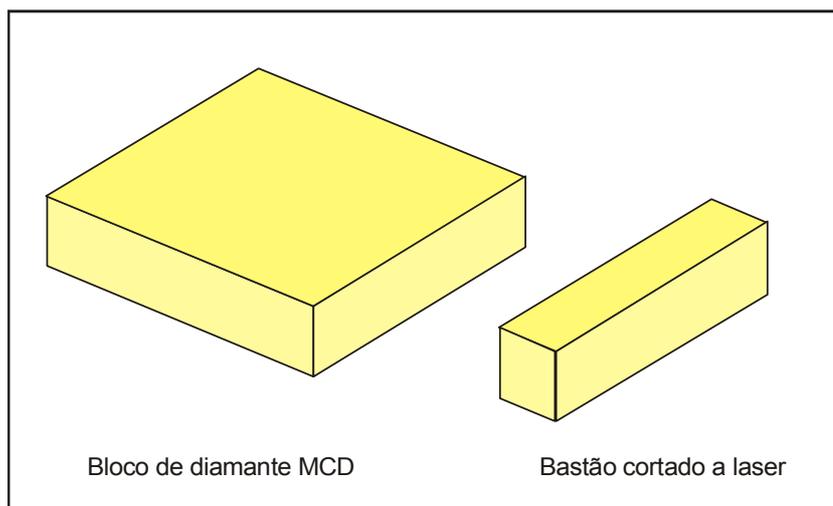


Figura 28: Corte de bastões a partir de uma matriz de diamante MCD [8].

A síntese do MCD ocorre a pressões da ordem de 7 GPa e em temperaturas acima de 1.300°C. A figura 29 mostra, de forma esquemática, o equipamento empregado pela SUMITOMO ELECTRIC para a obtenção desse diamante [26].

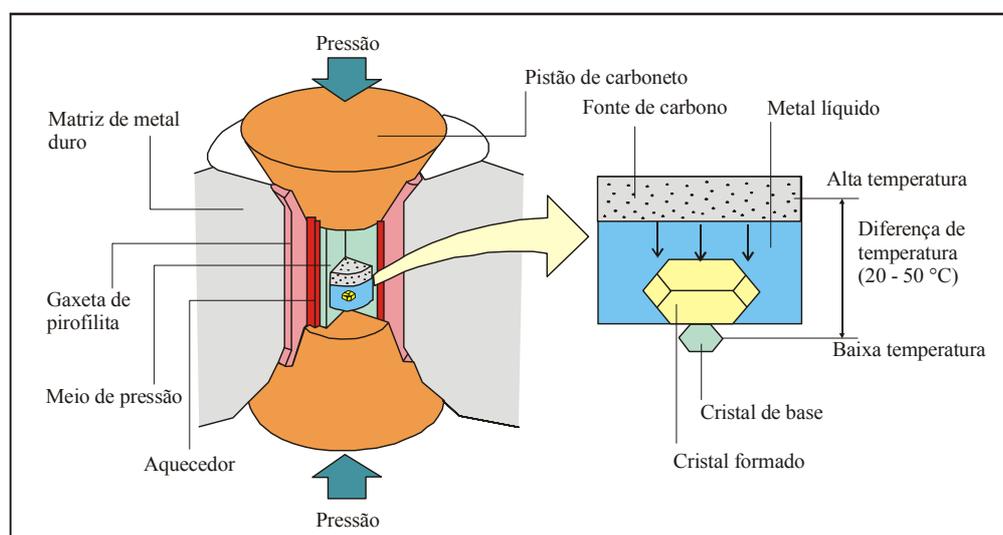


Fig. 29: Processo para a síntese do diamante MCD [26].

Um gradiente de temperatura é criado no interior do aquecedor que faz com que o carbono se desloque da parte superior e mais quente para a parte inferior e mais fria, através do metal liquefeito. Esse processo permite que um diamante se forme (nucleie) e cresça sobre um cristal de diamante de base (ver figura 29, à direita). A pureza do diamante formado depende das matérias-

primas e do banho de metal, ambos de alta pureza. Além disso, o processo deve ser controlado a fim de manter as condições de síntese constantes durante um longo período de tempo [26].

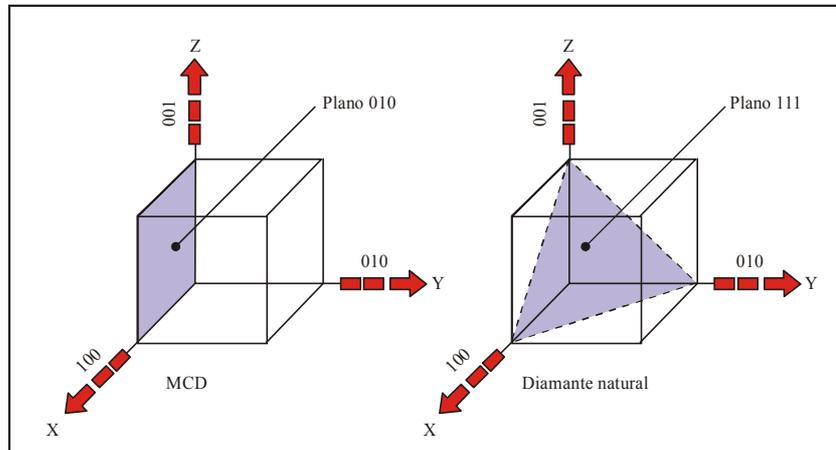


Figura 30: Planos preferenciais de clivagem dos diamantes naturais e sintéticos [8].

Enquanto o plano preferencial de clivagem do diamante natural é 111 no sistema cúbico, no diamante MCD esse plano é 010, como pode ser visto na figura 30. Essa característica faz com que o diamante MCD seja praticamente livre de tensões internas, o que aumenta o tempo de vida no dressamento. Além disso, a resistência contra lascamentos é grande pelo fato de não haver uma superfície de clivagem preferencial aparente e a condutividade térmica do diamante MCD ser maior que a do diamante natural [8].

2.8.5 Diamante obtido por deposição química de vapor – diamante CVD

O diamante obtido pelo processo CVD (chemical vapor deposition), que corresponde ao tipo Ib da tabela 6, é formado pela ativação de gases contendo carbono a alta temperatura e baixa pressão. Nessa condição o carbono precipita na forma de microgrãos de diamante sobre um substrato, geralmente uma placa de silício (figura 31). Assim, esses grãos precipitam e se fixam sobre os grãos já formados, criando um filme de diamante. Esse é, portanto, um diamante policristalino e, embora seja do tipo Ib, a condutividade térmica é menor em relação ao diamante MCD já que, além de também ser do tipo Ib, é um diamante monocristalino. O tempo e as condições do processo determinam o tamanho do grão formado e, conseqüentemente, as características do filme de

diamante. Pode-se obter desde filmes de diamante CVD para aplicação em ferramentas, cuja coloração é preta, até filmes transparentes. O tempo gasto para a criação de filmes transparentes de diamante CVD é muito longo e utilizado somente para aplicações especiais, como em janelas para ambientes de temperatura elevada como fornos, por exemplo [12; 13; 22].

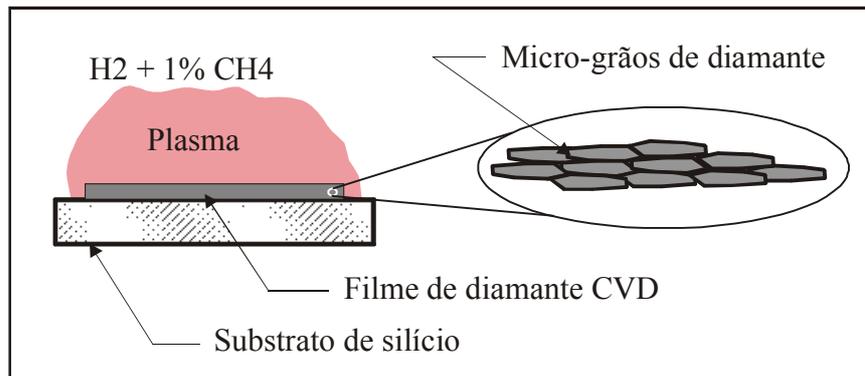


Figura 31: O diamante CVD.

O filme é cortado da mesma maneira como o diamante MCD, ou seja, a laser.

A ativação do gás, que consiste na dissociação de suas moléculas em íons e elétrons, pode ser realizada de várias maneiras. Entre elas estão os processos de filamento quente (temperatura entre $500 - 950^{\circ}C$ e pressão de 10 hPa e 200 hPa), plasma por microondas (figura 32), tocha de oxiacetileno e jato de plasma por corrente contínua onde a temperatura está entre 800 e $1.200^{\circ}C$ (figura 32) [12; 13; 22].

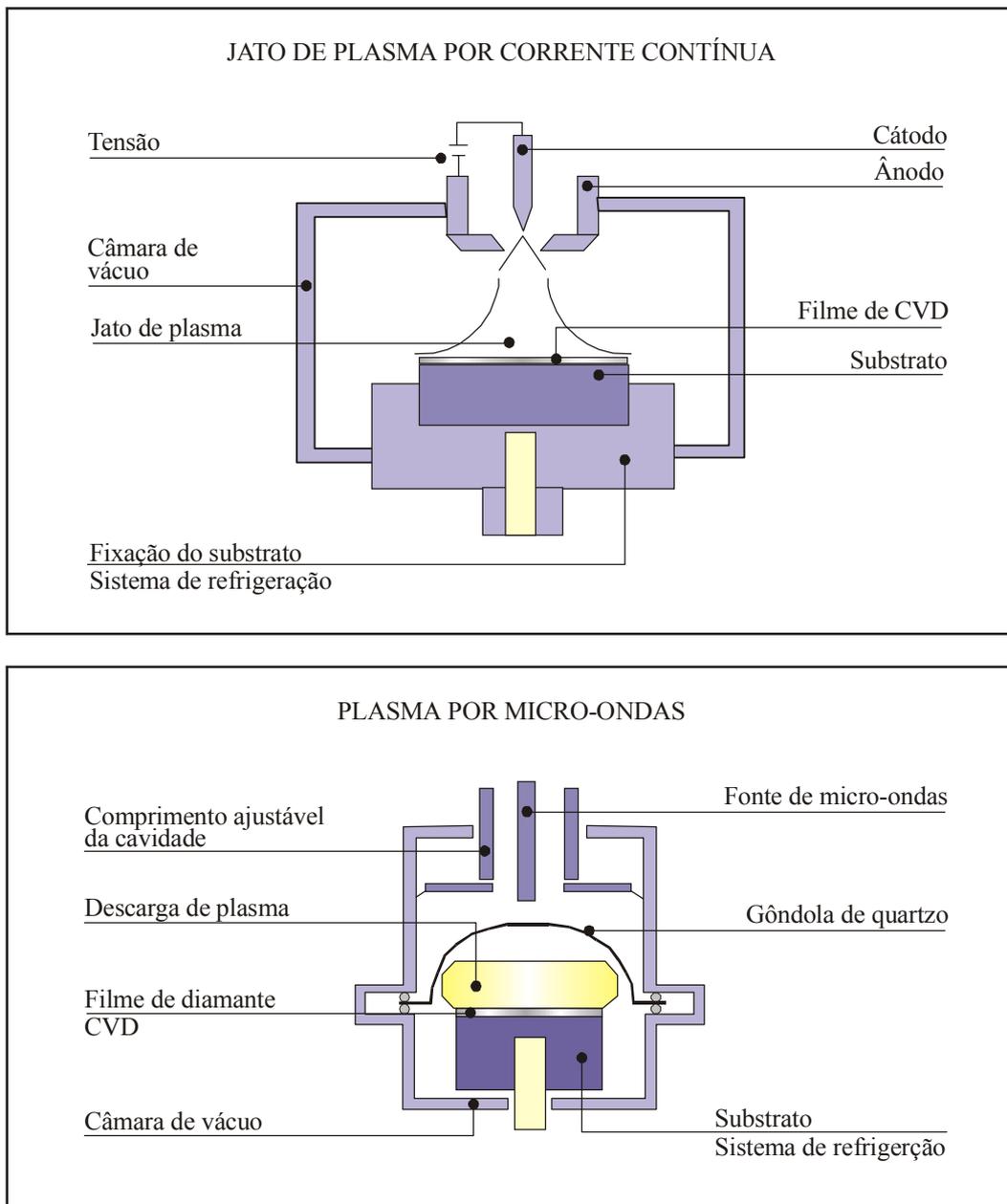


Figura 32: Processos de obtenção de filmes de diamante pelo processo CVD [22].

O CVD, por ser um processo relativamente novo para a obtenção de diamante, ainda é pouco difundido, principalmente pelo seu elevado custo em relação ao diamante natural e PCD, e pelo pouco conhecimento de suas vantagens por parte da indústria. Atualmente vem sendo empregado principalmente em pastilhas, tanto na forma de revestimento como na forma de inserto. No entanto, numa pesquisa realizada no ano de 2002 na Alemanha, constatou-se que na grande maioria dos fabricantes de ferramentas, o volume de vendas relativas a ferramentas com diamante CVD era de menos de 1%. Porém, na fabricação de dressadores de precisão, principalmente de rolos

dressadores, o diamante CVD vem tendo grande aceitação. Isso se deve às boas propriedades para o dressamento e à queda dos preços desses diamantes com o aumento do volume requisitado pelo mercado [30].

2.8.6 Escolha de diamantes para dressadores fixos

A escolha entre diamante natural ou sintético (MCD, PCD e CVD) em dressadores fixos depende de fatores como a especificação do rebolo, a qualidade da superfície a ser retificada, o tempo de dressamento e o perfil do rebolo a ser dressado [28].

Nos rebolos de Al_2O_3 -MC os melhores resultados foram obtidos com o diamante MCD. O diamante CVD também apresentou bons resultados, mas sempre inferiores ao diamante MCD. O diamante PCD não se mostrou apropriado para o dressamento desse tipo de rebolo [6].

O diamante natural é aplicado em todos os rebolos, inclusive no rebolo de óxido de alumínio microcristalino. A grande maioria dos dressadores fixos é constituída de grãos de diamante natural, sendo que seu grande problema é a variação do resultado de dressamento quando um grão de diamante se solta da matriz (em dressadores aglomerados e *fliese*) ou quando o diamante desgasta aumentando a área de contato (em dressadores de ponta única). Conseqüentemente, ocorre uma variação do contato entre o dressador e o rebolo, ou seja, a variação do grau de recobrimento (ver item 2.7.2).

Com o desgaste, a largura ativa dos diamantes de dressadores aglomerados e *fliese* com diamantes naturais aumenta e as forças sobre ele crescem a ponto de arrancá-los da matriz. Quando isso não acontece, todos os grãos em contato com o rebolo têm o gume arredondado e, conseqüentemente, não conseguem abrir a estrutura do rebolo, alisando sua superfície. Isso geralmente ocorre quando a especificação da matriz é dura demais. Por um outro lado, se os grãos com gumes gastos são arrancados da matriz no momento desejado, o que é esperado, não ocorre o problema da falta de poder de corte, mas a variação da largura ativa continua sendo inevitável [6; 7; 19; 34].

Os diamantes de dressadores de ponta única tem a largura ativa aumentada com o desgaste, o que leva à variação dos resultados de dressamento. Já um diamante natural de boa qualidade, que pode ser cortado e lapidado para adquirir as formas de um bastão uniforme, a partir de um diamante grão de arroz, por exemplo, acaba sendo economicamente inviável. É neste caso que os diamantes sintéticos têm sua grande vantagem. Como têm o formato de um prisma de seção quadrada, o

contato com o rebolo será sempre o mesmo, desde que não haja macrolascamentos. Assim, o grau de recobrimento será sempre o mesmo até o desgaste total do bastão de diamante. Essa característica faz com que o processo seja mais estável, permitindo sua automatização [6; 7; 8; 26].

2.9 Retificação cilíndrica externa de mergulho entre pontas

A retificação cilíndrica externa é empregada em peças radialmente simétricas e é subdividida de acordo com a fixação da peça (entre pontas ou “*center-less*”) e dos movimentos de avanço (avanço radial ou longitudinal do rebolo, na retificação cilíndrica externa entre pontas, e avanço radial do rebolo ou avanço longitudinal da peça, na retificação cilíndrica externa “*center-less*”) [15].

Na retificação cilíndrica de mergulho entre pontas, as peças são fixadas e centradas entre pontas pelas suas faces, e acionadas através de um arrastador. Nesse processo o rebolo apenas mergulha radialmente na peça em rotação (figura 33). Por regra, o movimento entre peça e rebolo é discordante. Os vetores da velocidade periférica do rebolo (v_c) e da peça (v_w) têm sentidos opostos na zona de contato [15].

Uma variação desse processo é a retificação de mergulho inclinado (figura 33, à direita). O eixo longitudinal do rebolo é inclinado em relação ao eixo longitudinal da peça. Dessa maneira pode-se retificar de uma só vez as superfícies cilíndricas e a face radial de um lado da peça [14; 15].

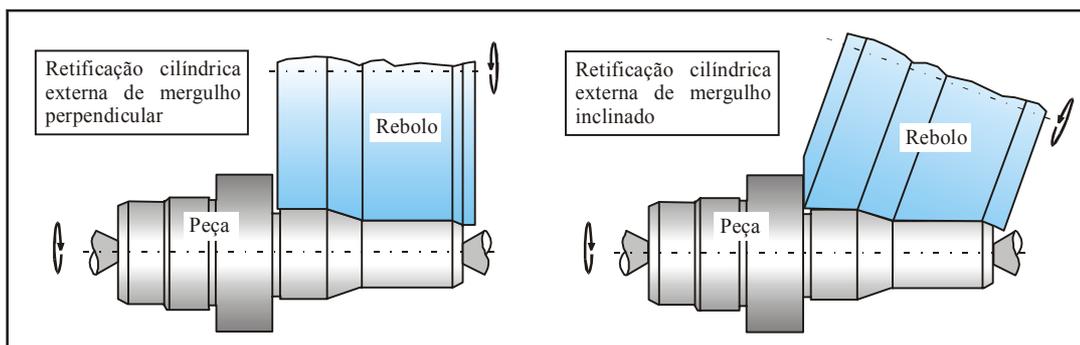


Figura 33: Retificação cilíndrica externa de mergulho perpendicular e inclinado, entre pontas [15].

Percebe-se que através dessa variação há ganho de tempo no processo e que o comprimento de contato na parede é menor em relação ao mergulho perpendicular. Dessa maneira, o risco de danos térmicos na peça é menor. Por isso, recomenda-se a retificação de mergulho inclinado em peças com grandes diferenças de diâmetro entre as superfícies cilíndricas e as paredes.

As equações 2 e 3 para o cálculo do volume usinado (V_w) e da taxa de remoção (Q'_w) são apresentadas a seguir:

$$V_w = \pi \cdot d_w \cdot \frac{z}{2} \cdot b_d \quad (2)$$

$$Q'_w = \frac{\pi \cdot d_w}{t_c} \cdot \frac{z}{2} = \pi \cdot d_w \cdot v_{fr} = \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot n_w = a_e \cdot v_w \quad (3)$$

Da mesma maneira pode ser determinada a taxa de remoção (Q'_w) para a retificação cilíndrica externa de mergulho inclinado. Entretanto, deve-se levar em consideração as grandes variações de diâmetro que a peça poderá apresentar [14; 15].

2.10 Fluidos de corte

Os fluidos de corte têm duas funções principais: a lubrificação, para diminuir o atrito entre a ferramenta e a peça, e a refrigeração, para a retirada de energia térmica da zona de contato. O efeito de lubrificação reduz o atrito e diminui a ação térmica provocada pelo atrito, o que por sua vez diminui a temperatura da interface rebolo e peça na raiz do cavaco. A quantidade de deformação plástica diminui e o corte de material inicia para uma penetração de início de corte T_μ menor, aumentando a eficiência do processo. O efeito de lubrificação é mais pronunciado em velocidades de corte v_c altas e o efeito de refrigeração em baixas velocidades de corte [14; 15; 16].

As suas funções secundárias são diminuir o desgaste da ferramenta, melhorar o acabamento, diminuir as chances de influência térmica na peça, transporte de cavaco, limpeza e proteção contra corrosão da retificadora [14; 15; 16].

A retificação é um processo crítico devido à quantidade de energia térmica gerada em função da grande área de contato por volume de material removido, da elevada velocidade de corte e da pequena espessura de cavaco. O calor é gerado por duas formas:

- Por atrito, cujo aumento é proporcional ao aumento da velocidade de corte;
- Por deformação plástica na região de formação de cavaco.

A energia total gerada no processo é função da potência e do tempo de usinagem. Já a potência gasta no processo é função da força tangencial e da velocidade de corte, como mostrado nas equações 4 e 5 [15]:

$$E_c = P_c \cdot t_c \quad (4)$$

$$P_c = F_t \cdot v_c \quad (5)$$

A energia mecânica dispendida no processo é resultado do produto do comprimento total usinado e dos componentes das forças nessa direção. Na zona de corte e de atrito, a energia mecânica é transformada, na maior parte, em energia térmica. Isso ocorre devido a deformações plásticas, ao corte do material, ao atrito do cavaco com o ligante, com as superfícies de incidência e de saída [3; 4; 5; 18].

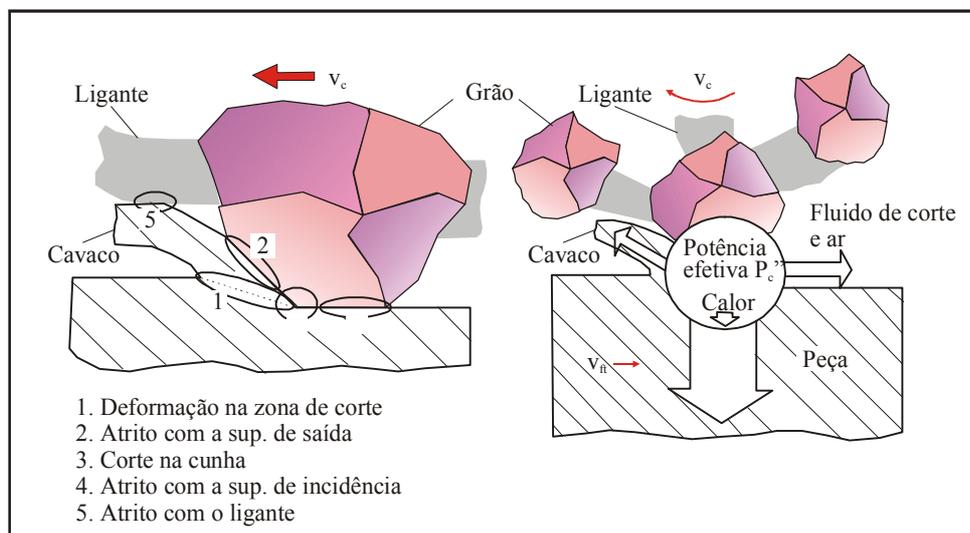


Figura 34: Conversão e distribuição de energia na zona de corte [3].

O transporte de calor ocorre através de três mecanismos:

- Transporte de calor para a peça e para a ferramenta;
- Transferência de calor da ferramenta ou da peça para o fluido de corte;
- Convecção do ar e do fluido de corte que passa pela zona de corte (figura 34) [3].

É difícil quantificar o calor transferido para a peça, para o cavaco, para a ferramenta, para o fluido de corte e para o ar. Contudo, a maior parte vai para a peça. A consequência disso é que podem ocorrer modificações das propriedades do material, como modificações na microestrutura, na dureza e das tensões residuais. Já que a retificação é um processo de acabamento, ou seja, a superfície gerada e a camada logo abaixo dela são as superfícies funcionais finais, as propriedades da camada abaixo da superfície retificada são determinantes para a resistência da peça. Por isso,

deve-se evitar as modificações da estrutura da camada superficial através de transferências satisfatórias do fluxo de calor [3; 15].

Os óleos minerais como fluido de corte reduzem o atrito e, assim, diminuem a geração de calor e o desgaste. As emulsões, compostas de água e, normalmente, menos de 10% de óleo solúvel, por terem maior calor específico permitem maiores transferências de calor para a mesma diferença de temperatura [3; 15].

A variação dos parâmetros de corte pode influenciar na geração de calor, no tempo de atuação do calor e na quantidade de calor transferida à ferramenta, à peça e aos cavacos. Através da correta combinação entre fluido de corte e parâmetros de usinagem pode-se conseguir o lascamento dos grãos no momento desejado, o que tem como resultado a diminuição do atrito na superfície de saída e de incidência do grão. Já a quantidade de calor transportada pelos cavacos é limitada pela elevada potência consumida no processo e devido à pequena quantidade de cavaco que é gerada [3; 15].

Em testes realizados com um rebolo de óxido de alumínio microcristalino foram comparados os resultados obtidos com óleo mineral e emulsão (figura 35). Os resultados de desgaste radial do rebolo e da rugosidade da peça foram melhores com o uso de óleo mineral. Até um volume específico de $300 \text{ mm}^3/\text{mm}$ tanto a força tangencial específica como a força normal específica são menores com o uso de óleo mineral. A partir desse ponto o uso de emulsão gera forças menores [3].

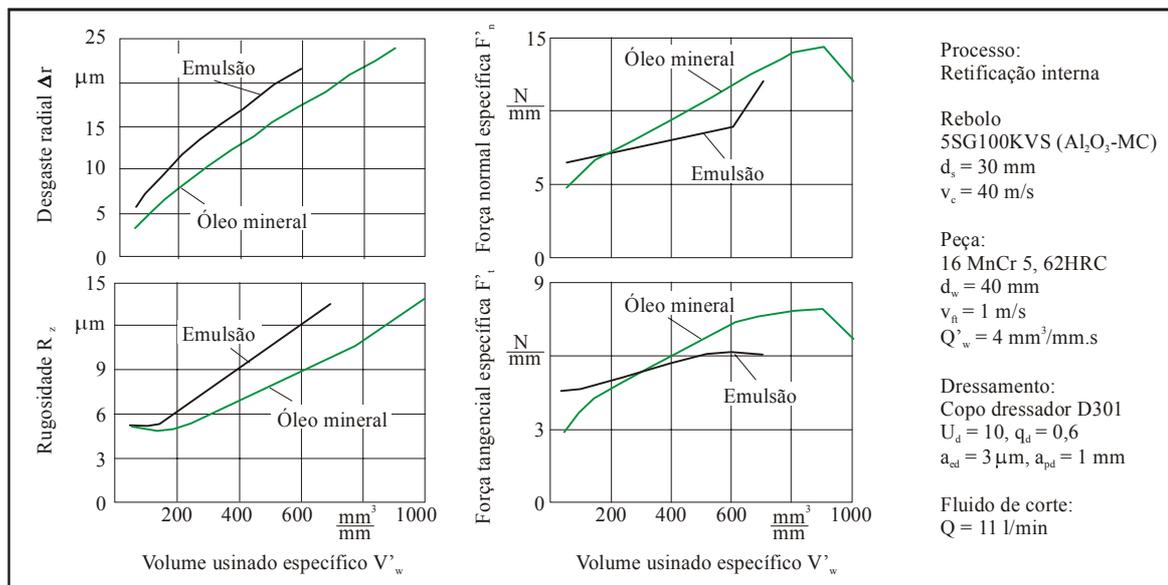


Figura 35: Influência do fluido de corte no processo de retificação [3].

3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Material ensaiado

O material ensaiado foi o ferro fundido dútil GGG70 fornecido pela fundição Tupy. Em sua composição química (% em peso) constam os seguintes elementos [27]:

Fe: 94,66%

C: 3,10%

Si: 1,71%

Mn: 0,53%

O limite de ruptura à tração está situado entre 733 e 784 MPa e o limite de escoamento é de 495 MPa.

3.2 Corpo de prova

Conforme mostrado na figura 36, os corpos de prova foram torneados num diâmetro de 60 mm e comprimento de 160 mm. O ressalto do diâmetro de 40 mm e largura de 20 mm serviu apenas para facilitar a montagem do arrastador.

As medidas, tanto de diâmetro como de comprimento, foram escolhidas em função do número de ensaios a ser realizado por rebolo, e do diâmetro externo dos rebolos. O diâmetro das peças tinha que ser o maior possível para impedir que o porta-rebolo alcançasse o fim de curso. O perigo de que isso acontecesse se deveu ao fato de que dois dos rebolos ensaiados já se encontravam no LMP antes do início do trabalho, bem como seus diâmetros externos eram pequenos para o porte da retificadora.

A dureza média do material era de 22 HRC, sendo que a dureza diminui da periferia para o núcleo. A camada externa tem maior dureza pelo fato de ter uma velocidade maior de resfriamento na fundição, o que comprova que existiu menos tempo para a decomposição da cementita [27].

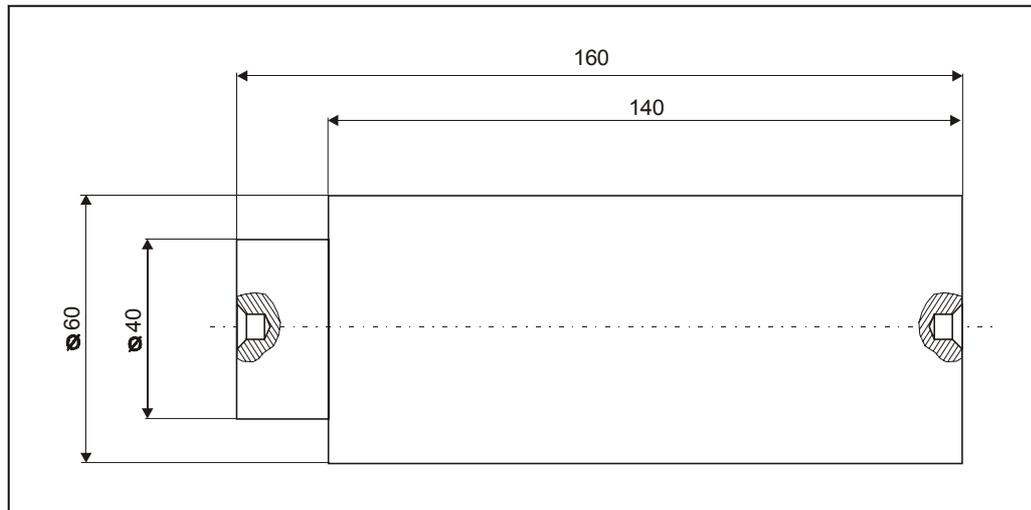


Figura 36 – Corpo de prova

3.3 Retificadora

Os ensaios foram realizados numa retificadora cilíndrica externa e interna modelo Pratika Flexa-600L, do fabricante brasileiro Zema Zselics (Figura 37).

Os eixos X e Z são guiados por guias hidrostáticas e acionados por servo-motores e fusos de esferas recirculantes de grande precisão.

O modelo do comando numérico (CNC) é um 840-D da Siemens, Alemanha. A máquina possui um sistema de reconhecimento de contato rebolo-peça e rebolo-dressador por emissão acústica do fabricante Sensis, Brasil.

O comprimento máximo da peça a ser retificada é de 600 mm e o diâmetro máximo é de 275 mm. As dimensões padrão do rebolo para as quais essa retificadora foi projetada é de diâmetro de 406 mm e a largura de 50 mm. A potência da máquina é de 7,5 HP.



Figura 37 – Retificadora cilíndrica externa e interna da Zema Zselics.

3.4 Rebolos

A especificação e as dimensões dos três rebolos utilizados nos ensaios são mostradas na tabela 8. Os rebolos de óxido de alumínio comum e de carboneto de silício foram fabricados pela Norton do Brasil e o rebolo de óxido de alumínio microcristalino pela suíça Winterthur AG. As dimensões, o tamanho de grão e o ligante são iguais nos três rebolos, mas muda o tipo de grão e a dureza do rebolo.

Tabela 8 – Características dos rebolos do ensaio.

Especificação e medidas do rebolo	38A60MVH RT 304.8x12.7x127	39C60MVH RT 304.8x12.7x127	93A60H8V RT 304.8x12.7x127
Abrasivo	38A - Óxido de alumínio comum (Al ₂ O ₃)	39C - Carboneto de silício (SiC)	93A - Óxido de alumínio microcristalino (Al ₂ O ₃ -MC)
Granulometria	60	60	60
Dureza	M	M	H
Estrutura	-	-	8
Ligante	VH - Vitrificado	VH - Vitrificado	V - Vitrificado
Diâmetro externo (mm)	304,8	304,8	304,8
Largura (mm)	12,7	12,7	12,7
Diâmetro do furo (mm)	127	127	127
Rotação máxima (min ⁻¹)	2.070	2.068	3.130
Velocidade de corte máxima (m/s)	33	33	50
Perfil	1A1	1A1	1A1

O rebolo de óxido de alumínio microcristalino era composto de uma mistura de 30% de grãos de óxido de alumínio microcristalino e 70% de grãos de óxido de alumínio nobre.

O formato dos três rebolos era o 1A1 (Anexo 2).

3.5 Dressador

Os três dressadores utilizados foram fabricados e fornecidos pela Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge no formato de um *fliese*, no entanto, com apenas um diamante. A haste era do tipo cone morse 1 (CM1) e a inclinação do diamante em relação à haste era de 12° (figura 38).

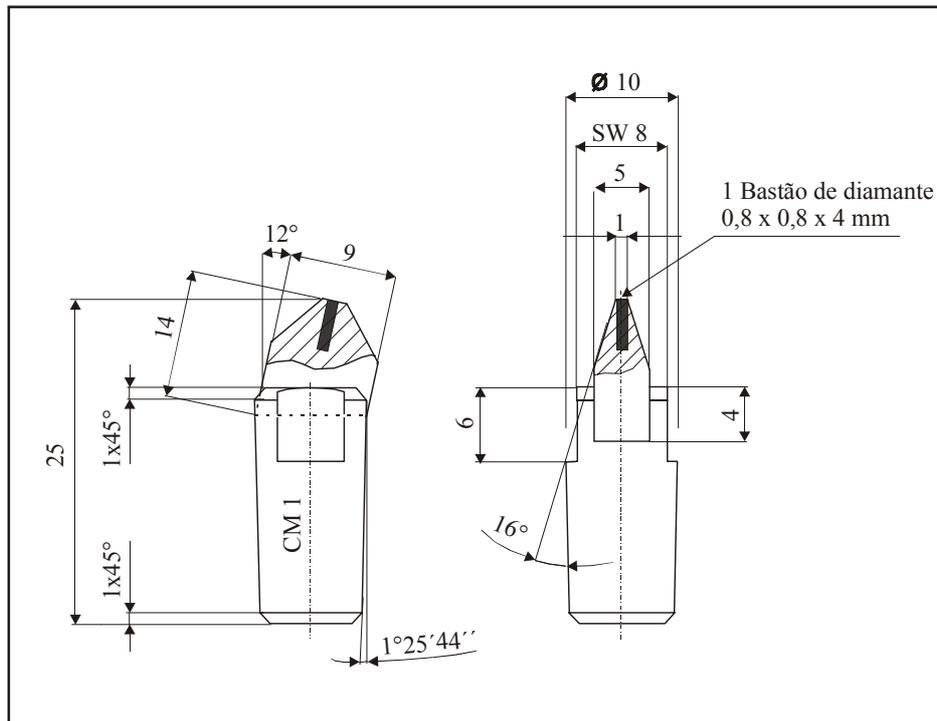


Figura 38 – O dressador do ensaio [6].

Cada dressador continha um diamante: o diamante natural, o diamante monocristalino sintético (MCD) e o diamante obtido por deposição química de vapor (diamante CVD).

O formato do diamante natural era do tipo grão de arroz (figura 39) e sua largura efetiva (b_d) era de aproximadamente 0,8 mm. Para se obter essa medida mergulhou-se a ponta do dressador no rebolo em rotação e, em seguida, retificou-se uma peça cilíndrica em mergulho. O contorno da parte retificada da peça foi medida no rugosímetro e a partir dessa medição extraiu-se a largura efetiva do diamante natural (figura 40).

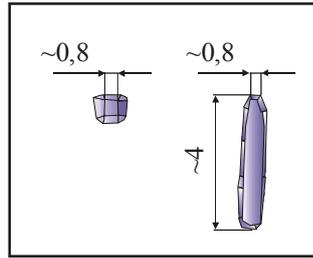


Figura 39 – Apresentação esquemática de um diamante natural tipo grão de arroz.

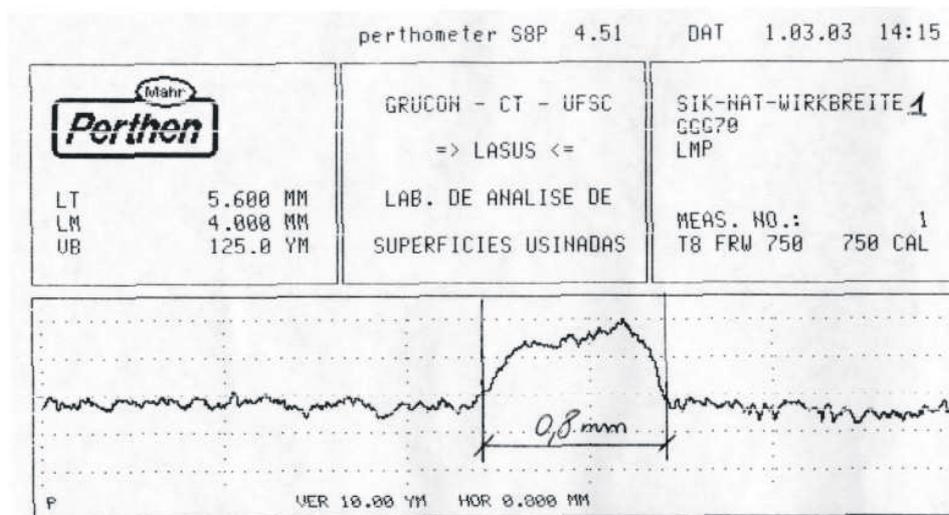


Figura 40 – Perfil e largura efetiva do diamante natural.

Os diamantes CVD e o MCD eram bastões com seção transversal quadrada de 0,8 x 0,8 mm e comprimento de 4 mm (figura 41). Como esses diamantes são cortados a laser a partir de um disco, garantiu-se a uniformidade das medidas. A largura efetiva (b_d) desses diamantes era, então, de 0,8 mm.

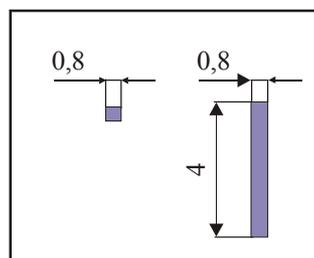


Figura 41: Medidas dos diamantes sintéticos do ensaio.

3.6 Fluido de corte

O fluido de corte utilizado nos ensaios foi o óleo sintético solúvel em água, marca Ecocool MH6000, fornecido pela Fuchs do Brasil. A concentração da emulsão empregada foi de 3%.

3.7 Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte estabelecidos para os ensaios, tanto no dressamento como no processo de retificação, eram valores de referência encontrados nos manuais dos fabricantes de dressadores e de rebolos.

A verificação de resultados de usinagem com a variação dos parâmetros de corte não foi um dos objetivos deste trabalho. Portanto, os parâmetros de corte foram mantidos constantes.

3.7.1 Parâmetros de corte no dressamento

O avanço axial no dressamento (f_{ad}) é calculado através da equação 6.

$$f_{ad} = \frac{b_d \times n_s}{u_d} \quad (6)$$

A largura efetiva (b_d) dos 3 diamantes testados era de 0,8 mm, como visto no item 3.5. Optou-se por trabalhar com a rotação dos rebolos um pouco abaixo do máximo especificado pelo fabricante, por medida de segurança. Abaixo se pode ver o valor da rotação usada no ensaio para cada rebole e o máximo especificado.

Rebolo de Al_2O_3 :	$n_s = 1.879 \text{ min}^{-1}$	(máx. é $n_s = 2.067 \text{ min}^{-1}$)
Rebolo de Al_2O_3 -MC:	$n_s = 2.819 \text{ min}^{-1}$	(máx. é $n_s = 3.132 \text{ min}^{-1}$)
Rebolo de SiC:	$n_s = 1.879 \text{ min}^{-1}$	(máx. é $n_s = 2.067 \text{ min}^{-1}$)

O grau de recobrimento escolhido foi $U_d=3$ o que é o indicado para uma retificação normal (ver o item 2.7.3). Desses valores resultaram as seguintes velocidades de avanço do dressador, em função de cada rebolo:

Rebolo de Al_2O_3 :	$f_{ad} = 501 \text{ mm/min}$
Rebolo de Al_2O_3 -MC:	$f_{ad} = 751 \text{ mm/min}$
Rebolo de SiC:	$f_{ad} = 501 \text{ mm/min}$

3.7.2 Parâmetros de corte na retificação

Na retificação cilíndrica externa de mergulho há três parâmetros de corte a serem definidos: a velocidade de corte (v_c), o avanço radial (v_{fr}) e a velocidade de rotação da peça (v_w).

A velocidade de corte utilizada é resultante da rotação, conforme o item 3.7.1, e do diâmetro externo dos rebolos (304,5 mm), resultando nos seguintes valores aproximados:

Rebolo de Al_2O_3 :	$v_c = 30 \text{ m/s}$;
Rebolo de Al_2O_3 -MC:	$v_c = 45 \text{ m/s}$;
Rebolo de SiC:	$v_c = 30 \text{ m/s}$.

O desgaste do diamante é muito pequeno. Então, para se obter um desgaste mensurável, dressou-se uma quantidade muito maior que a necessária a fim de se limpar e se abrir a estrutura do rebolo antes de cada novo ensaio. Enquanto seria suficiente uma profundidade total de dressamento entre 0,1 e 0,2 mm, optou-se por 0,4 mm entre cada ensaio. Assim, além de garantir uma superfície completamente limpa do rebolo e sem influências do ensaio anterior, propiciou-se um desgaste do diamante que pudesse ser medido no microscópio eletrônico de varredura. Com a mesma finalidade dressou-se uma profundidade total de 1 mm antes da realização de cada bateria de três ensaios, com cada par de rebolo e de diamante e 0,8 mm ao final dessa bateria.

A velocidade de avanço longitudinal foi sugerida pelo fabricante da retificadora no momento da aprovação da máquina no LMP, com base nos valores usados na indústria. No processo de aprovação da retificadora também foram utilizadas peças de ferro fundido GGG70. Os avanços de desbaste, de semi-acabamento e de acabamento podem ser vistos na tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros de corte no ensaio de retificação.

Especificação e medidas do rebolo	38A60MVH RT 304.8x12.7x127	39C60MVH RT 304.8x12.7x127	93A60H8V RT 304.8x12.7x127
Abrasivo	38A - Óxido de alumínio comum (Al ₂ O ₃)	39C - Carboneto de silício (SiC)	93A - Óxido de alumínio microcristalino (Al ₂ O ₃ -MC)
Rotação (min ⁻¹)	1.879	1.879	2.819
Velocidade de corte (m/s)	30	30	45
Avanço de desbaste (mm/min)	0,6	0,6	0,6
Avanço de semi-acabamento (mm/min)	0,4	0,4	0,4
Avanço de acabamento (mm/min)	0,08	0,08	0,08

A velocidade de rotação da peça foi determinada com base na relação de velocidades periféricas entre o rebolo e a peça (Equação 7). Essa relação é importante para a comparação de processos em que as velocidades periféricas do rebolo e da peça são diferentes. Assim, fixa-se uma relação de velocidades (q) para todos os processos, podendo-se assim comparar os seus resultados independente das velocidades escolhidas [15].

$$q = 60 \cdot \frac{v_c}{v_w} = \frac{n_s \cdot d_s}{n_w \cdot d_w} \quad (7)$$

Graf [9] fornece os seguintes valores de referência para q :

- Acabamento fino: $90 > q > 120$
- Acabamento: $q = 90$
- Desbaste: $60 > q > 90$

Optou-se pela relação de velocidades $q = 90$, já que se pretendeu trabalhar numa situação entre o acabamento e o desbaste. O resultado foi:

- Rebolo de Al_2O_3 e de SiC: $v_w = 20$ m/min
- Rebolo de Al_2O_3 -MC: $v_w = 30$ m/min

3.8 Equipamentos de medição

3.8.1 Rugosímetro

As medições de rugosidade foram realizadas num rugosímetro Perthometer S8P fabricado pela Feinprüf Perthen GmbH, Alemanha (figura 42).

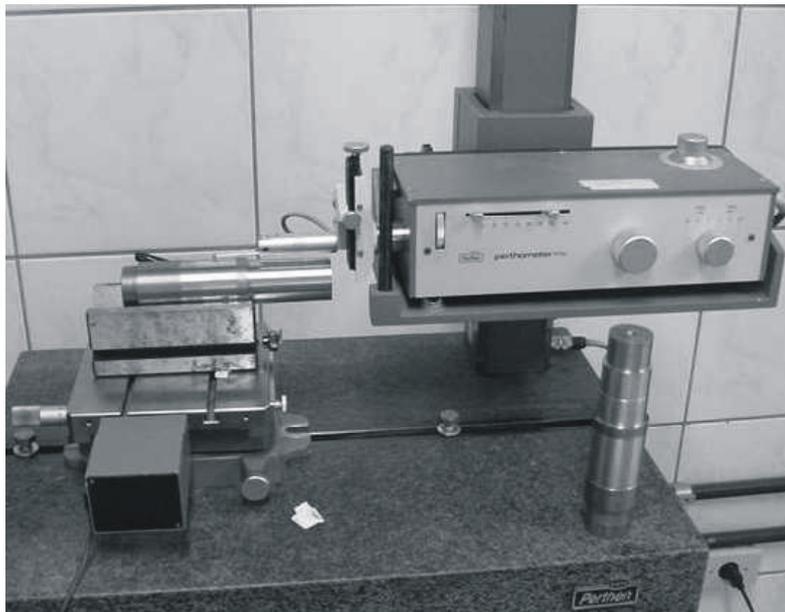


Figura 42 - Rugosímetro

O apalpador com ponta de diamante possuía um ângulo de ponta de 90° e raio de ponta de $5 \mu\text{m}$. De acordo com o fabricante, o erro do equipamento é de $\pm 2\%$.

As medições foram realizadas conforme Brunner [3], que se baseou, para isso, na norma DIN 4768.

3.8.2 Microscópio eletrônico de varredura

Para realizar a medição do desgaste do diamante do dressador e da topografia do diamante após os dressamentos foi necessária a utilização do microscópio eletrônico de varredura modelo XL-30, fabricado pela Philips, e disponível no Laboratório de Materiais (LABMAT). Esse microscópio permite uma ampliação mínima de 11 e máxima de 300.000 vezes, para esse tipo de análise.

3.9 Metodologia para a realização do trabalho

Inicialmente será mostrada a metodologia básica para a realização dos ensaios para, em seguida, entrar-se nos seus pormenores. Finalizando, será descrita a metodologia de medição dos corpos de prova e dos diamantes dos dressadores.

3.9.1 Realização dos ensaios

A determinação do desgaste do rebolo foi realizada através de um método indireto, ou seja, retificou-se apenas com a metade da largura do rebolo de modo que a outra metade não estivesse em contato com a peça. Após a retificação de um volume pré-estabelecido com a parte ativa do rebolo, retificou-se uma região da peça utilizando-se a largura inteira do rebolo. O volume retificado nesta região era muito pequeno em relação ao volume retificado durante o ensaio de desgaste, de forma que o desgaste que o rebolo sofreu em sua largura total pôde ser desprezado nesta etapa. Dessa forma o perfil do rebolo foi transferido para a peça, podendo ser medido no rugosímetro. A diferença entre o diâmetro gerado pela largura do rebolo, que foi empregada na retificação do volume V_w , e o diâmetro gerado pela largura do rebolo, que apenas foi utilizado no final, explicita o desgaste radial do rebolo (Δr_s). A figura 43 mostra o método utilizado.

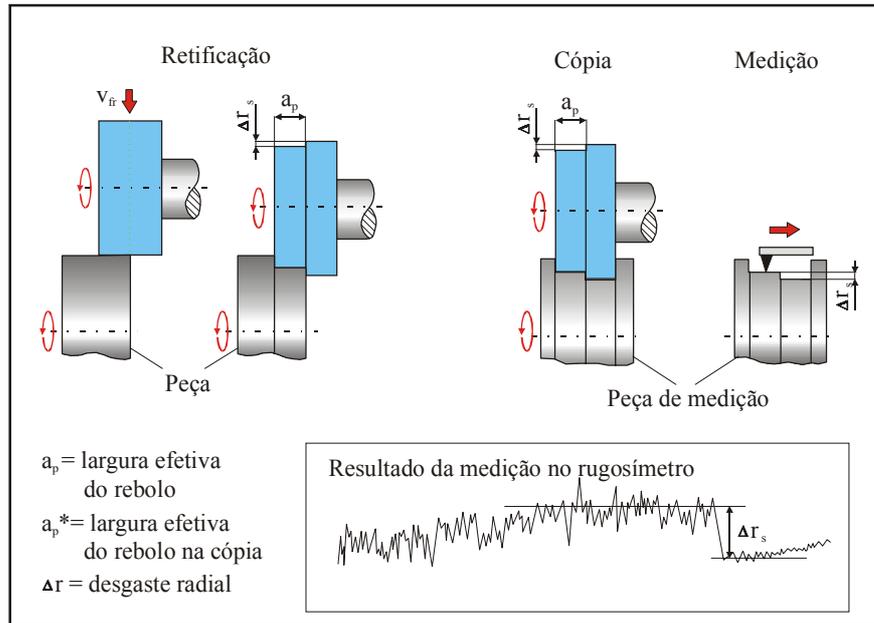


Figura 43: Método para a medição da rugosidade e do desgaste radial do rebolo [3].

Através do desgaste radial do rebolo (Δr_s) pôde-se calcular a relação de remoção (o fator G), como mostrado pela equação abaixo (equação 8) [15]:

$$G = \frac{V_w}{V_s} = \frac{V'_w}{\pi \cdot d_s \cdot \Delta r_s} \quad (8)$$

A relação de remoção quantifica o volume gasto do rebolo, na usinagem de um determinado volume de material da peça. Quanto maior o fator G, menor é o gasto de rebolo na usinagem, quer dizer, o perfil do rebolo se mantém por mais tempo. Baixo fator G indica alto desgaste do rebolo na retificação e, dessa maneira, o perfil se perde mais rápido e cai a repetibilidade do processo. Assim, o fator G serve para analisar a variação do perfil do rebolo com o volume usinado.

A montagem do rebolo na retificadora é demorada principalmente pelo fato de, a cada troca, ser necessário o balanceamento estático do rebolo. Esse balanceamento pode levar de poucos minutos até horas, dependendo da experiência do operador. Por esse motivo, optou-se por realizar primeiro todos os ensaios com um rebolo variando os três dressadores e, em seguida, os ensaios com os outros dois rebolos.

A fim de se medir a variação da rugosidade com o volume específico de usinagem (V'_w), retificou-se de tal maneira a gerar degraus na peça, como mostrado na figura 44. Todos os degraus

foram retificados com a metade da largura do rebolo para que no final se pudesse obter o desgaste radial. Em cada um desses degraus obteve-se a média da rugosidade R_a . A altura dos degraus foi dimensionada de tal forma que a metade inativa do rebolo não tivesse contato com o degrau retificado no mergulho anterior (mesmo para o desgaste mais acentuado da parte ativa do rebolo).

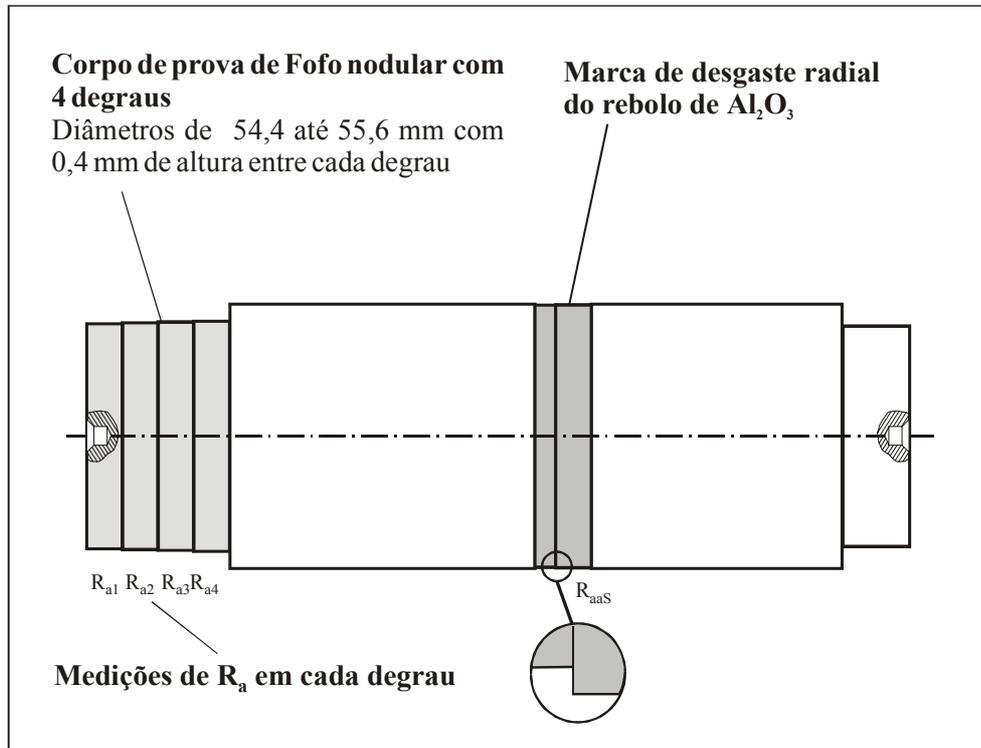


Figura 44 – Corpo de prova para o rebolo de Al_2O_3 comum.

A figura 44 também mostra as impressões do perfil da largura total do rebolo, adequadas para a medição do desgaste radial. Essa região é denominada de “RaaS”. Obteve-se dois diâmetros nesta operação. O diâmetro menor se refere à parte que não foi empregada no ensaio de desgaste e tem as características do rebolo logo após o dressamento. Neste diâmetro foram realizadas as medições de rugosidade que se referem à rugosidade inicial do rebolo.

Em testes preliminares constatou-se que a retificação de um volume de $V'_w=1.800 \text{ mm}^3/\text{mm}$ era suficiente para que se obtivesse um degrau grande o bastante que tornasse sua medição confiável, o que correspondia de três a quatro degraus no corpo de prova.

Para otimizar o uso de corpos de prova, os ensaios com o rebolo de Al_2O_3 -MC e de SiC foram realizados num mesmo corpo de prova (figura 45).

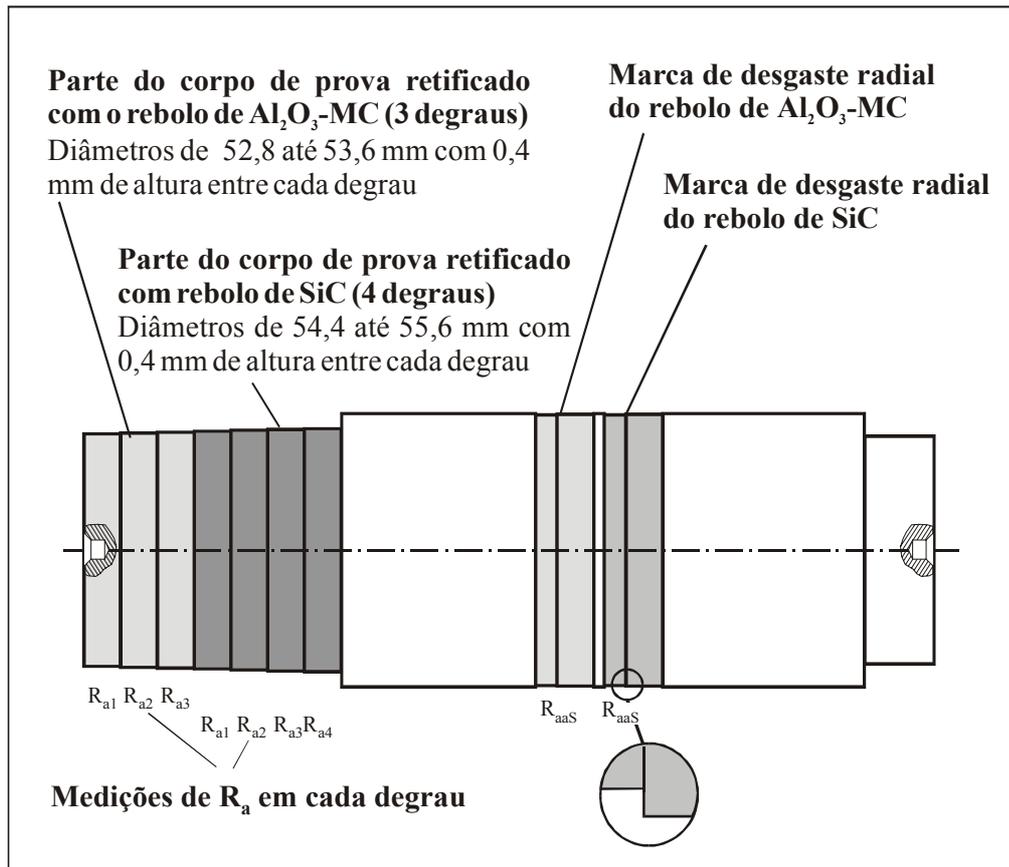


Figura 45 – Corpo de prova para rebolos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MC}$ e de SiC.

A fim de se garantir a confiabilidade dos resultados, o ensaio com cada par rebolo e dressador foi realizado três vezes. A tabela 10 mostra resumidamente como foram realizados os ensaios.

Tabela 10 – Resumo dos ensaios.

Ensaio	Rebolo	Dressador	Degraus	V'_w (mm ³ /mm)
1	Al ₂ O ₃	natural	4	1.813
2	Al ₂ O ₃	MCD	4	1.813
3	Al ₂ O ₃	CVD	4	1.813
4	SiC	natural	4	1.813
5	SiC	MCD	4	1.813
6	SiC	CVD	4	1.813
7	Al ₂ O ₃ -MC	natural	3	1.806
8	Al ₂ O ₃ -MC	MCD	3	1.806
9	Al ₂ O ₃ -MC	CVD	3	1.806

- Repetição do ensaio = 3 vezes
- Total de ensaios = 27
- a_{ed} antes de cada ensaio = 100 x 0,01 mm
- a_{ed} entre as repetições do ensaio = 40 x 0,01 mm
- a_{ed} após cada ensaio = 80 x 0,01 mm

3.9.2 Medição da rugosidade e do desgaste do rebolo

Para obter informações do comportamento da rugosidade média R_a como função do volume usinado V_w , foi medida a rugosidade em cada um dos degraus retificados. De acordo com Messer [19], para a obtenção de um valor de rugosidade com 95% de confiabilidade são suficientes 7 medições de rugosidade ao longo do perímetro de cada degrau. Desta recomendação resultaram 882 medições de rugosidade nos 99 degraus gerados e nas 27 marcas de desgaste do rebolo.

Para garantir o acesso seguro a cada medição no momento da análise dos resultados, cada medição recebeu um código conforme mostrado na tabela 11. Esse código se encontra no canto superior esquerdo de cada registro de medição (figura 46).

Tabela 11 – Código das medições.

• Ko-MKD-3-1-3-5					
Rebolo	Dressador	Grau de recobrimento (u_d)	Repetição do ensaio	Degrau	Medição
Ko = Al₂O₃ SiC = SiC SiK = Al ₂ O ₃ -MC	MKD CVD Nat = Natur-diamant	3	1	1 = Desgaste radial	1
			2	2 = Após o dress.	2
			3	3 = Degrau 1	3
				4 = Degrau 2	4
				5 = Degrau 3	5
			6 = Degrau 4	6	
				7	
• GGG 70					
• LMP					

A largura de retificação de 8 mm foi determinada de tal forma que fosse possível trabalhar com um comprimento de apalpação de 5,6 mm e um *cut-off* (λ_c) de 0,8 mm, para a rugosidade obtida na retificação. Assim, o comprimento de medição foi de 4 mm. O tipo de perfil escolhido foi o perfil “P” não filtrado, que mantém a ondulação e os erros de forma. Um exemplo de medição de rugosidade pode ser visto na figura 46.

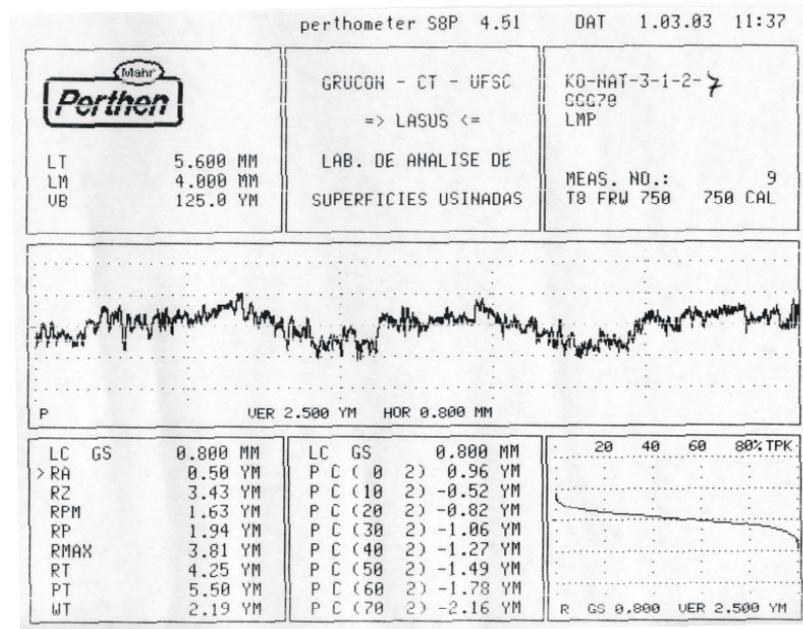


Figura 46 – Exemplo de medição de rugosidade.

O desgaste radial do rebolo também foi medido através do registro de rugosidade. A figura 47 mostra um exemplo de sua medição. Nesse exemplo a altura do degrau é de 11 μm . Para efetuar esta medição foram estabelecidas duas retas paralelas que melhor representam as partes da impressão do desgaste do rebolo. A distância entre estas linhas paralelas representa o desgaste radial do rebolo.

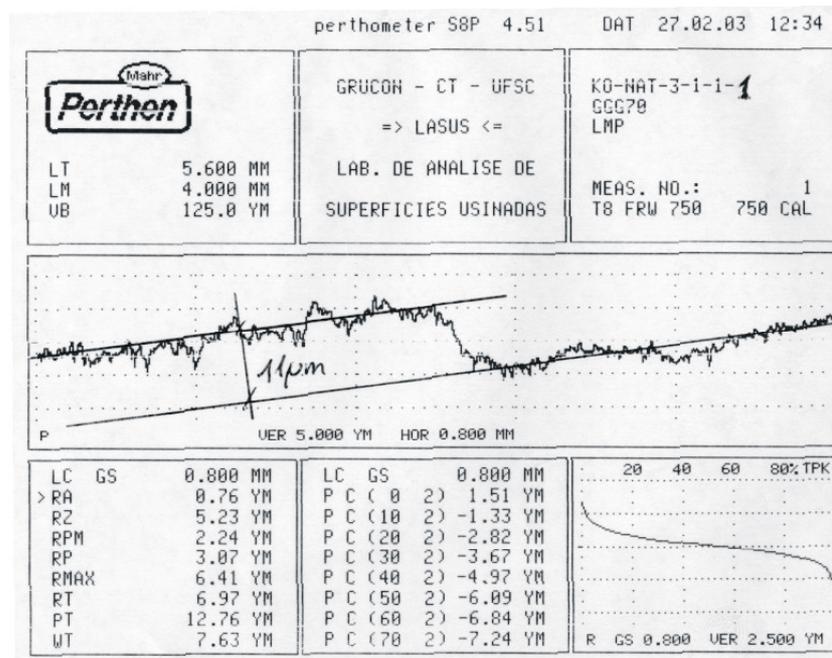


Figura 47 – Exemplo de medição do desgaste radial.

Verificou-se em testes preliminares que o degrau deveria ser maior que 10 μm , pois valores menores não deixam tão claros os pontos de início e fim do degrau. Além disso, Messer [19] determinou uma precisão de $\pm 1 \mu\text{m}$ nesse tipo de medição. Dessa maneira, o erro para um valor medido de 5 μm é de 20% e para um valor de 20 μm é de apenas 5%.

Quanto maior o degrau menor é o erro. Por outro lado, quanto menor o degrau menor é o tempo do ensaio e mais próximos se encontram os resultados dos processos usados na indústria. Objetivou-se, portanto, um valor entre 10 e 20 μm .

Conforme visto no item 3.9.1, verificou-se que um $V'_w=1.800 \text{ mm}^3/\text{mm}$ seria o suficiente para uma medição confiável do desgaste radial, ou seja, do degrau. Isso se comprovou no fato do valor da altura do degrau encontrado se situar justamente entre 10 e 20 μm .

3.9.3 Medição do desgaste dos dressadores

A medição do desgaste dos diamantes dos dressadores foi feita através de imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura. Para tanto foram adquiridas imagens (figura 48) da lateral e da vista superior dos dressadores após o dressamento e conseqüente retificação de três peças, ou seja, após uma bateria de ensaios com cada par de rebolo-dressador. Essas imagens foram então comparadas com as imagens dos diamantes virgens.

O volume gasto do diamante se assemelhava a de um prisma de seção transversal triangular (figura 48). As medidas das arestas do triângulo menor " A_1 " e da sua distância " h_1 " ao triângulo maior " A_2 " foram medidas através do software COREL DRAW 9.0 (figura 48 e 49). Esse software permite a ampliação da imagem e a obtenção da medida das arestas que compõem o triângulo através da escala da imagem.

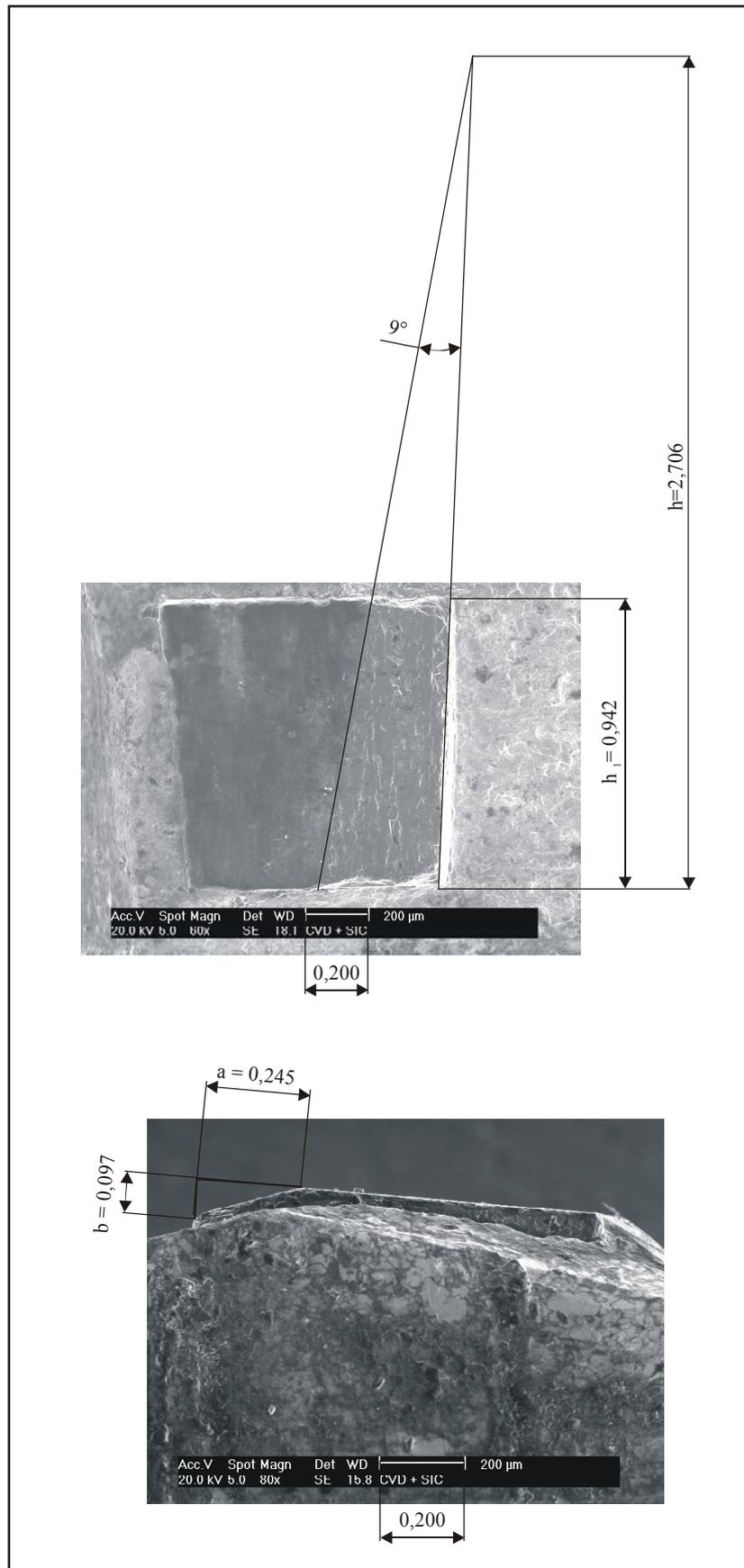


Figura 48: Medição das imagens do desgaste do diamante.

Para calcular o volume do tronco do prisma era necessária a área do triângulo menor “ A_1 ” e maior “ A_2 ”, além da distância “ h_1 ” entre eles e da altura do prisma “ h ” (figura 49).

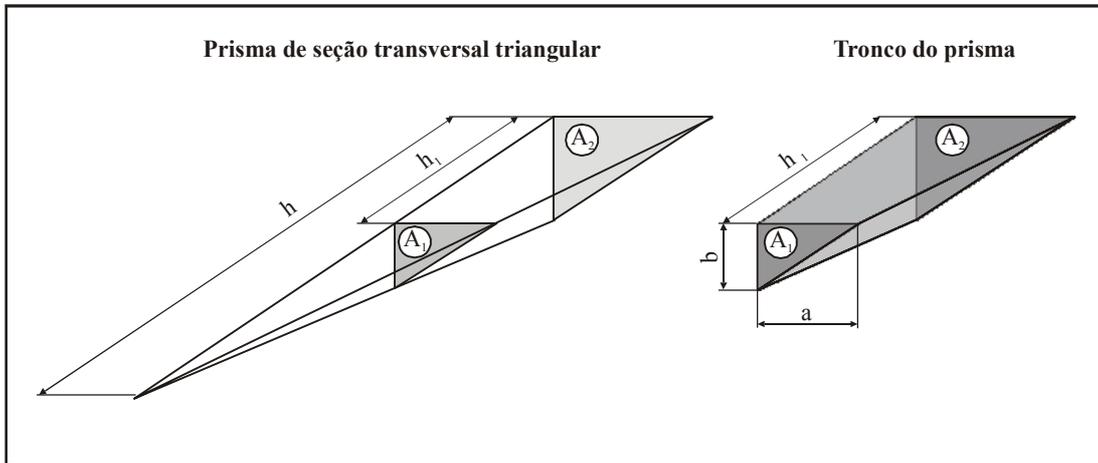


Figura 49: Volume desgastado do diamante.

A área do triângulo menor “ A_1 ” pôde ser calculada através das arestas medidas na imagem (equação 9) [31]. As distâncias “ h_1 ” e “ h ” também puderam ser medidas na imagem. O triângulo maior “ A_2 ” foi obtido através da semelhança de triângulos em um prisma (equação 10) [32].

$$A_1 = \frac{a \cdot b}{2} \quad (9)$$

$$A_2 = A_1 \cdot \left(\frac{h}{h_1} \right)^2 \quad (10)$$

O volume do tronco do prisma pôde então ser calculado a partir da equação 11 [32].

$$V_{tronco} = \left(\frac{A \cdot h}{3} \right) \cdot \left[\left(\frac{h}{h_1} \right)^2 - 1 \right] \quad (11)$$

Nas imagens da vista superior do diamante (figura 50), com ampliação de 50 vezes, é possível visualizar a região que esteve (região 1) e a que não esteve (região 2) em contato com o rebolo. Além disso, nessa mesma ampliação percebem-se os possíveis lascamentos do diamante (região 3).

Numa ampliação maior, de 800 vezes, vê-se nitidamente a rugosidade do diamante (ampliação das regiões 1, 2 e 3 da figura 50).

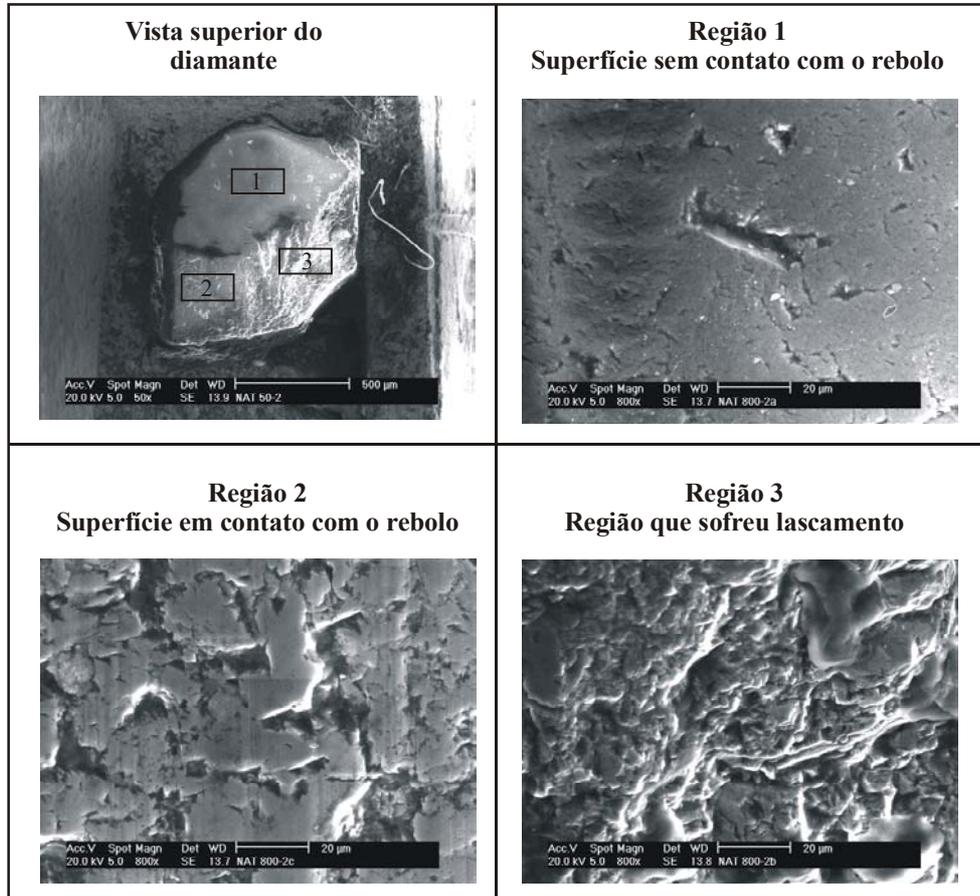


Figura 50: Rugosidade e lascamento na vista superior do diamante.

Dessa maneira pôde-se ver o quão harmônica é a relação entre o diamante e o rebolo. Como visto no item 2.7.4, grande rugosidade do diamante significa uma boa relação entre dressador e rebolo. Já a superfície lisa do diamante significa que o rebolo alisa o diamante e este não consegue abrir a estrutura do rebolo.

As imagens permitem apenas que se faça uma análise visual e comparativa.

4 RESULTADOS

4.1 Análise do desgaste do diamante do dressador

Devido às diferenças estruturais dos três tipos de diamantes testados esperaram-se variações na maneira do desgaste do diamante. Como detalhado no item 3.9.3 (ver também o anexo 6), os critérios utilizados para essa análise foram:

- O volume desgastado do diamante;
- A aparência da topografia do diamante, na região ativa.

Conforme o item 3.9.1, os parâmetros dos ensaios foram mantidos constantes e o volume dressado pelos três diamantes foi o mesmo. Com base nisso, obtiveram-se os resultados mostrados abaixo.

Nos ensaios com o rebolo de Al_2O_3 -MC, o volume de desgaste dos diamantes foi de:

- Diamante natural = $7,7 \mu m^3$;
- Diamante CVD = $4,1 \mu m^3$;
- Diamante MCD = $3,1 \mu m^3$.

O resultado da análise da topografia dos diamantes pode ser visto na tabela 12. As figuras correspondentes encontram-se no anexo 6.

Tabela 12: Rugosidade da topografia dos diamantes no ensaio com rebolo de Al_2O_3 -MC.

Diamante	Resultado da topografia
Natural	Grande rugosidade
CVD	Grande rugosidade
MCD	Grande rugosidade

Embora a topografia dos três diamantes seja parecida, percebem-se diferenças acentuadas no desgaste. O diamante natural sofreu o dobro de desgaste em relação ao diamante MCD. Já o diamante CVD desgastou cerca de 30% a mais que o diamante MCD.

Nos ensaios com o rebolo de Al_2O_3 comum o volume de desgaste dos diamantes foi de:

- Diamante natural = $5,2 \mu\text{m}^3$;
- Diamante CVD = $9,9 \mu\text{m}^3$;
- Diamante MCD = $14,0 \mu\text{m}^3$.

O resultado da análise da topografia dos diamantes pode ser visto na tabela 13. As figuras correspondentes encontram-se no anexo 6.

Tabela 13: Rugosidade da topografia dos diamantes no ensaio com rebolo de Al_2O_3 comum.

Diamante	Resultado da topografia
Natural	Baixíssima rugosidade
CVD	Média rugosidade
MCD	Grande rugosidade

Tanto a topografia como o desgaste dos diamantes diferem muito entre si. A superfície do diamante natural se mostra praticamente lisa, enquanto os diamantes CVD e MCD apresentam uma rugosidade mais elevada.

Já o volume desgastado do diamante natural é quase um terço do diamante MCD e praticamente a metade do diamante CVD.

Nos ensaios com o rebolo de SiC , o volume de desgaste dos diamantes foi de:

- Diamante natural = $- \mu\text{m}^3$;
- Diamante CVD = $10,4 \mu\text{m}^3$;
- Diamante MCD = $5,7 \mu\text{m}^3$.

O volume desgastado do diamante CVD foi praticamente o dobro do constatado no diamante MCD. Não foi possível realizar essa medição no diamante natural, pois houve um lascamento muito grande, lascamento esse que abrangeu a metade da área de contato com o rebolo. Como não é possível determinar o momento desse lascamento, também não é possível a medição precisa do desgaste.

O resultado da análise da topografia dos diamantes pode ser visto na tabela 14. As figuras correspondentes encontram-se no anexo 6.

Tabela 14: Rugosidade da topografia dos diamantes no ensaio com rebolo de SiC.

Diamante	Resultado da topografia
Natural	Grande rugosidade
CVD	Média rugosidade
MCD	Baixa rugosidade

As diferenças da topografia também são grandes, mas ao contrário dos resultados com o rebolo de Al_2O_3 comum, o diamante MCD se mostra praticamente alisado e o diamante natural apresenta rugosidade grande.

4.2 Análise da rugosidade e do fator G

A análise da rugosidade, em função do volume específico de usinagem (V'_w) e do fator G, foi feita comparando os resultados dos três tipos de diamantes por rebolo.

A fim de verificar se os pontos do gráfico da rugosidade pelo volume específico de usinagem apresentavam diferenças significativas ou não, foi realizada a análise estatística (ver anexo 4). Constatou-se que os pontos apresentavam diferenças significativas, salvo poucas exceções. Dessa maneira, garantiu-se a real existência de diferenças entre as curvas de rugosidade geradas por cada diamante, nos ensaios com cada um dos rebolos.

4.2.1 Rebolo de Al_2O_3 -MC

A figura 51 mostra a evolução da rugosidade da peça com o volume usinado. Esses resultados foram obtidos com o rebolo de Al_2O_3 -MC e os dressadores com diamante natural, diamante CVD e diamante MCD. A rugosidade inicial obtida com o rebolo de Al_2O_3 -MC é igual quando dressado com cada um dos três diamantes. Nota-se que a rugosidade gerada com o rebolo de Al_2O_3 -MC é menor quando dressado com diamante MCD, seguido pelo rebolo dressado com o diamante CVD. O rebolo de Al_2O_3 -MC, dressado com o diamante natural, apresentou os piores resultados.

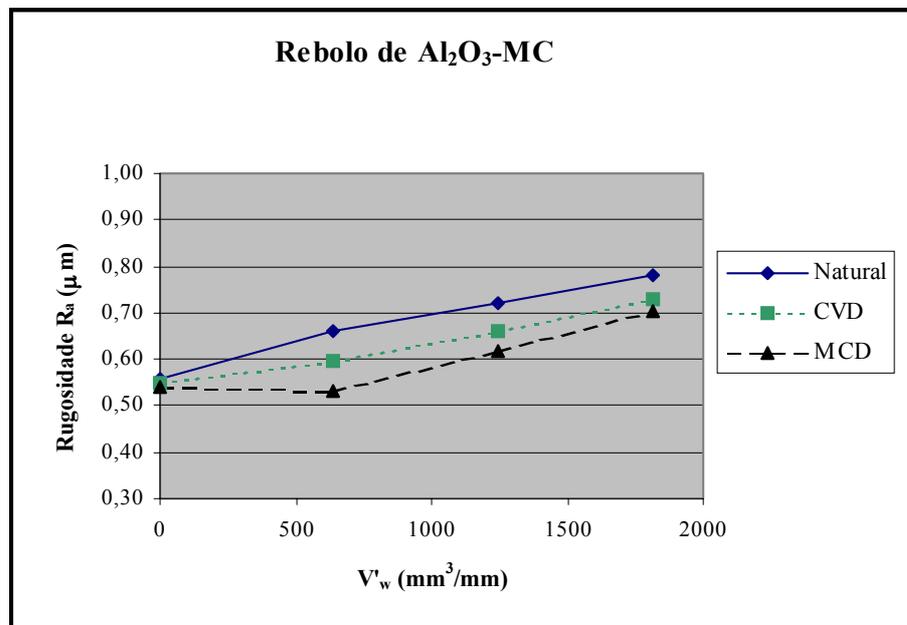


Figura 51: Evolução de $R_a \times V_w$ no ensaio com o rebolo de Al_2O_3 -MC.

Em termos de fator G , os melhores resultados foram obtidos com o rebolo de Al_2O_3 -MC dressado com o diamante MCD, conforme ilustrado na figura 52. Com um fator $G=195$, o rebolo de Al_2O_3 -MC dressado com o diamante MCD se mostrou superior ao rebolo dressado com o diamante CVD, com um fator $G=186$, e ao rebolo dressado com o diamante natural, com um fator $G=173$.

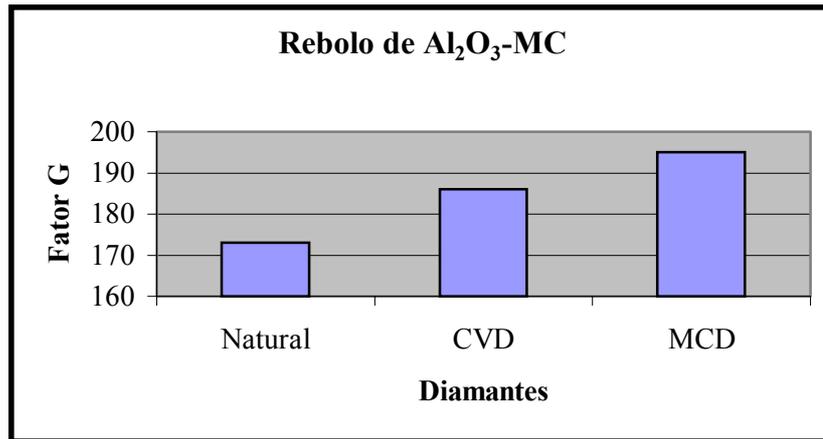


Figura 52: Fator G do rebolo de Al₂O₃-MC dressado por cada diamante.

4.2.2 Rebolo de SiC

A tendência dos resultados do comportamento da rugosidade, obtida na retificação com o rebolo de SiC, é a mesma da obtida com o rebolo de Al₂O₃-MC, ou seja, os melhores resultados foram obtidos com o rebolo de SiC dressado com o diamante MCD, seguido pelo rebolo de SiC dressado como diamante CVD e pelo rebolo de SiC dressado com o diamante natural (figura 53). Entretanto, as diferenças de resultado, obtidas com o rebolo de SiC, dressado com o diamante MCD, diante do rebolo dressado com o diamante CVD, são mínimas, mas novamente se percebe a grande diferença existente entre os resultados obtidos no dressamento com o diamante natural diante do diamante MCD.

Um detalhe que não se assemelha aos resultados com o rebolo de Al₂O₃-MC é que a rugosidade inicial, com o rebolo de SiC, é diferente para os três diamantes.

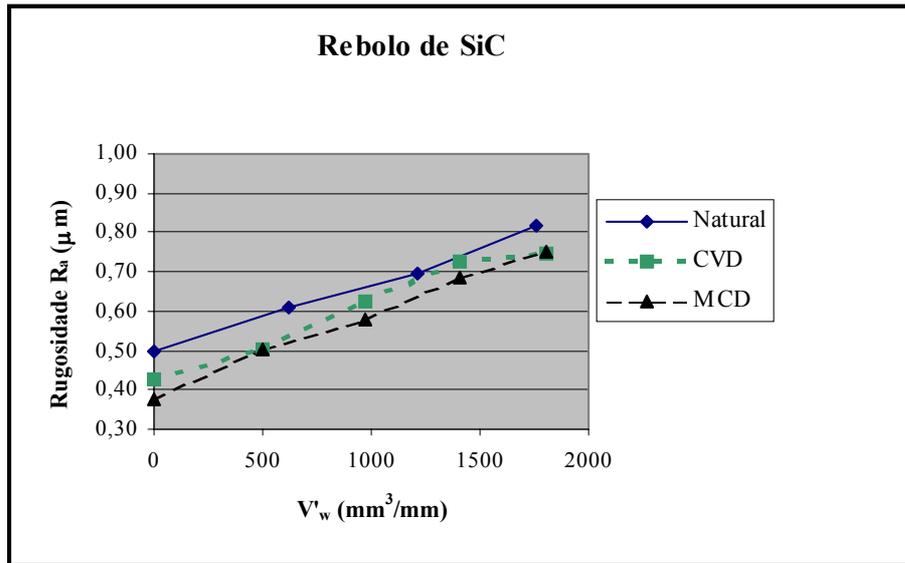


Figura 53: Evolução de R_a x V'_w no ensaio com o rebolo de SiC.

O fator G obtido com o rebolo de SiC, dressado com o diamante natural, de $G=343$ é superior aos resultados obtidos com o rebolo de SiC dressado com o diamante CVD ($G=287$) e com o rebolo de SiC dressado com o diamante MCD ($G=290$), conforme a figura 54. A diferença do fator G entre o dressamento com o diamante CVD e o diamante MCD não é significativa e considera-se, portanto, que os dois resultados são praticamente iguais.

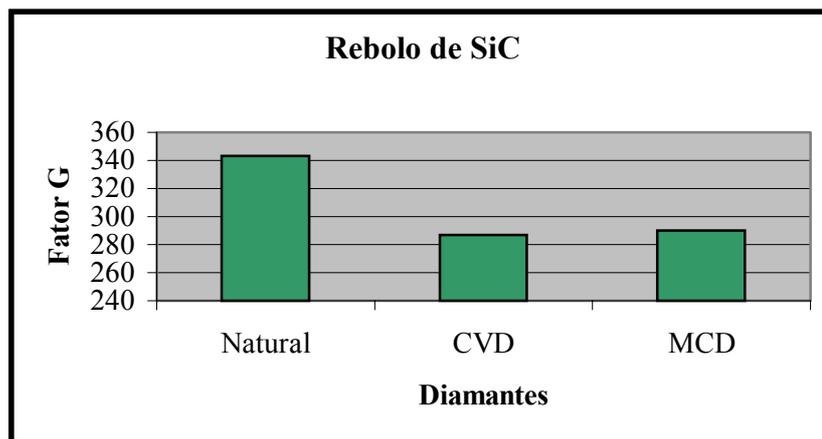


Figura 54: Fator G do rebolo de SiC dressado por cada diamante.

4.2.3 Rebolo de Al_2O_3 comum

A figura 55 mostra os resultados de rugosidade obtidos com o rebolo de Al_2O_3 comum. A rugosidade inicial obtida com o rebolo de Al_2O_3 comum dressado com o diamante natural e com o diamante MCD é igual e mais baixa em relação aos resultados obtidos com o rebolo de Al_2O_3 comum dressado com o diamante CVD. Ao contrário do que ocorreu com os rebolos de Al_2O_3 -MC e de SiC, nesse caso, o diamante natural não teve a pior performance em termos de rugosidade, mas o diamante CVD. Contudo, o diamante MCD novamente apresentou os melhores resultados.

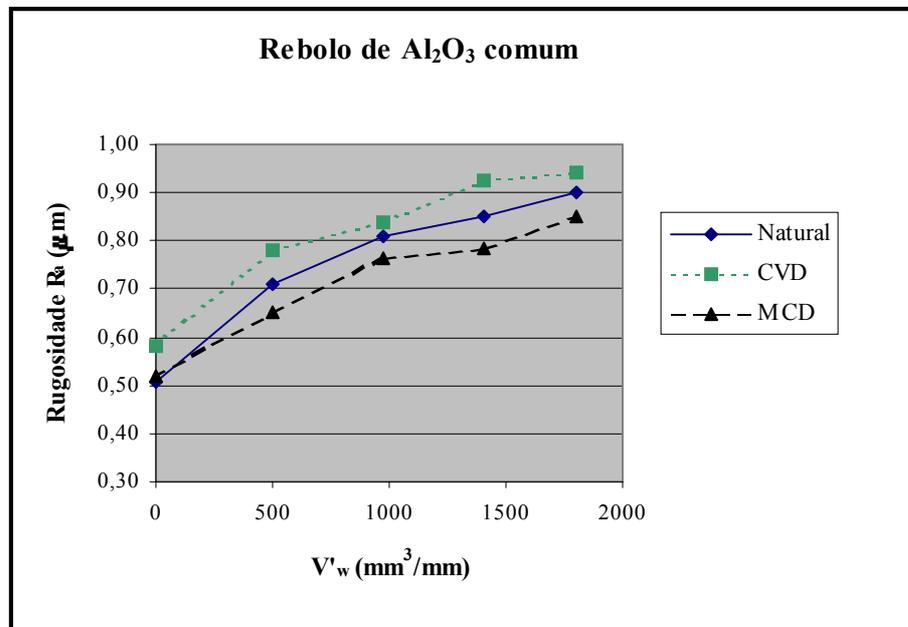


Figura 55: Evolução de R_a x V'_w no ensaio com o rebolo de Al_2O_3 comum.

O fator $G=139$, obtido com o rebolo de Al_2O_3 comum dressado com o diamante natural é superior ao do rebolo de Al_2O_3 comum dressado com o diamante MCD, de $G=115$, e do rebolo de Al_2O_3 comum dressado com o diamante CVD, de $G=75$ (figura 56). Ao contrário dos resultados obtidos com os rebolos de Al_2O_3 -MC e de SiC, há diferenças grandes de fator G entre cada um dos três diamantes usados no dressamento do rebolo de Al_2O_3 comum.

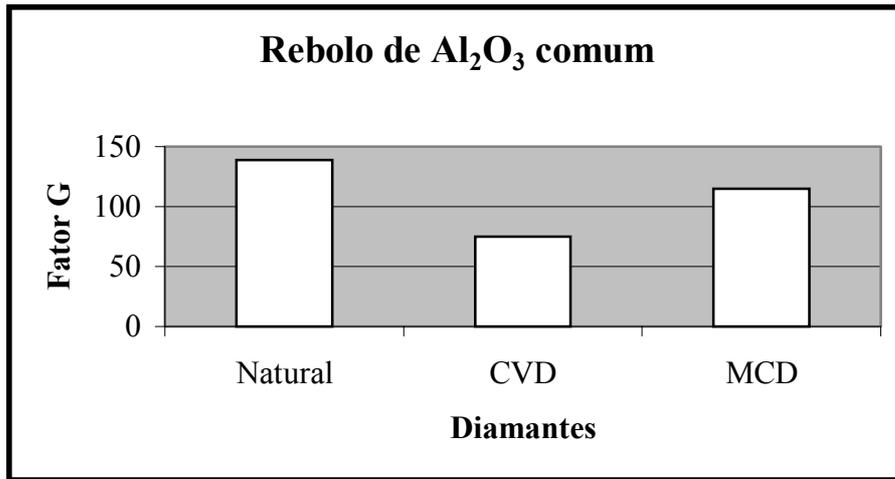


Figura 56: Fator G do rebolo de Al_2O_3 comum dressado por cada diamante.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

De acordo com a experiência do fabricante de dressadores DR. KAISER DIAMANTWERKZEUGE, os melhores resultados no dressamento de rebolos de Al_2O_3 -MC foram obtidos com o diamante MCD, o que foi comprovado neste trabalho. Tanto os resultados de rugosidade, fator G e desgaste do diamante foram sensivelmente melhores aos resultados obtidos com o diamante natural e com o diamante CVD. A menor rugosidade refletirá em peças com melhor acabamento; o maior valor do fator G determinará a manutenção do perfil por mais tempo; o menor desgaste do diamante diminui a necessidade de correção de posicionamento do dressador. Juntos, esses três resultados mostram que o acabamento e a repetibilidade do processo de retificação com rebolo de Al_2O_3 -MC e dressamento com dressador fixo é melhor se o diamante do dressador for um diamante MCD. Como segunda opção, empregar-se-ia o diamante CVD, cujo acabamento gerado, os resultados de fator G e de volume gasto dos diamantes são piores quando comparados ao diamante MCD, mas melhores quando comparados ao diamante natural.

Em se tratando de um mesmo rebolo, os resultados de baixa rugosidade e alto fator G são características de estrutura fechada. Pode-se afirmar, portanto, que o diamante MCD gera uma estrutura menos aberta que o diamante CVD e o diamante natural. Conseqüentemente as taxas de remoção são menores, já que o rebolo é menos agressivo. Essa característica pode gerar o indesejável surgimento de marcas de queima em peças endurecidas.

A prática industrial mostra que o desempenho entre os diferentes tipos de diamantes no dressamento de rebolos de Al_2O_3 fundidos e de SiC pode variar consideravelmente em relação à especificação do rebolo. Nesse sentido, os principais fatores que determinam a performance dos diamantes são o tipo e o tamanho de grão abrasivo dos rebolos. Os melhores resultados obtidos no dressamento de rebolos com esses tipos de abrasivo e diamantes sintéticos ocorrem com grãos abrasivos de tamanho igual ou inferior ao 60. A especificação correta de diamante, especialmente para o tamanho 60 de grão abrasivo, é complicada pelo fato dos resultados não seguirem um padrão. Existem casos em que uma leve variação na estrutura do rebolo, decorrente da falta de repetibilidade do processo de fabricação, poder levar a inviabilizar o diamante do dressador aprovado para o dressamento do rebolo em questão.

Os resultados obtidos no dressamento de rebolos de Al_2O_3 comum e de SiC mostraram que nenhum dos três diamante testados se sobressaiu em todos os quesitos analisados, como foi o caso do diamante MCD para o rebolo de Al_2O_3 -MC.

Nos ensaios com o rebolo de Al_2O_3 comum o melhor desempenho, em termos de rugosidade, foi obtido com o uso do diamante MCD no dressamento. Já o diamante natural gerou melhores resultados de fator G e desgaste do volume do diamante. Em função disso, nota-se que o processo é mais estável com o uso do diamante natural, no aspecto da manutenção do perfil do rebolo e da correção do posicionamento do dressador. Por um outro lado, ele não alcançará um acabamento tão bom como o gerado pelo diamante MCD. Diminuindo-se a velocidade de avanço axial de dressamento (v_{fad}), o acabamento pode ser melhorado, mas em prejuízo do poder de corte do rebolo. Comparando-se apenas os resultados do diamante CVD com o diamante MCD, o diamante MCD ganha em acabamento e fator G, mas perde para o diamante CVD no quesito volume gasto do diamante. Portanto, a única desvantagem do diamante MCD em relação ao diamante CVD seria a maior frequência de correção no reposicionamento do dressador.

A determinação do melhor diamante para o rebolo de SiC, feita a partir dos ensaios, não é tão trivial. Isso porque não há um diamante que seja superior, tanto em termos de acabamento e fator G quanto em volume gasto do diamante. Os valores de rugosidade gerados com o diamante CVD e com o diamante MCD são próximos e melhores que o diamante natural. O fator G obtido com o diamante MCD e com o diamante CVD também é praticamente igual, mas inferior em relação ao diamante natural. Se, por um lado, os diamantes MCD e CVD geram melhor acabamento, por outro lado, o rebolo mantém menos o perfil em relação ao diamante natural. Viu-se que o volume gasto do diamante CVD é praticamente o dobro do diamante MCD e não foi possível a obtenção desse valor para o diamante natural. Dessa maneira, entre diamantes MCD e CVD, optar-se-ia pelo diamante MCD, já que nos outros quesitos os seus resultados são bastante próximos.

No ensaio com o rebolo de Al_2O_3 -MC a rugosidade da superfície ativa dos três diamantes era grande. Isso mostra que o grão desse rebolo é extremamente agressivo, independente do diamante. Entretanto, como há diferenças nos resultados de acabamento, de fator G e de volume desgastado do diamante não é possível fazer uma correlação com a rugosidade da topografia do diamante.

Nos ensaios com os rebolos de Al_2O_3 e de SiC os resultados da análise da superfície ativa dos diamantes também não possibilitaram a verificação de influência sobre o acabamento e sobre o

fator G. Primeiro porque não se comprovou, conforme verificado na prática, que uma superfície ativa rugosa do diamante leva a bons resultados e, segundo, porque no ensaio do rebolo de Al_2O_3 comum e dressador natural, em que a rugosidade do diamante se mostrou baixíssima, os resultados foram excelentes.

Por um outro lado, verificou-se uma correlação nítida entre a rugosidade do diamante e o volume gasto do diamante. Quanto mais baixa a rugosidade do diamante após o ensaio, menor o desgaste do diamante e vice-versa. Essa correlação, entretanto, não foi verificada no rebolo de Al_2O_3 -MC, pois, como já visto, tamanha é a agressividade desse rebolo, que gerou alta rugosidade na topografia dos três diamantes.

Mostrou-se que o rebolo de Al_2O_3 -MC demonstra a sua agressividade na grande rugosidade apresentada nos três diamantes. Os rebolos de Al_2O_3 comum e de SiC, talvez pelo diferente mecanismo de desgaste, em relação ao rebolo de Al_2O_3 -MC, demonstram menos agressividade em certos tipos de diamante. Embora se saiba que existe uma correlação entre baixa rugosidade do diamante e marcas de queima na peça, não se verificou nenhuma influência da rugosidade do diamante sobre outros resultados de interesse na prática, como o fator G e o acabamento.

Nos resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho limitou-se à avaliação de três dressadores com três rebolos. Na prática industrial, a aplicação é muito mais ampla e há carência de informações abrangentes sobre a influência do dressamento em uma variação mais ampla de rebolos. Principalmente para os rebolos de Al_2O_3 -MC, as informações sobre o dressamento são ínfimas. Para suprir esta necessidade de informações sugere-se que seja estabelecida uma relação entre as condições de dressamento para o diamante sintético MCD, variando-se a seção transversal do diamante para rebolos de Al_2O_3 -MC com granulometria fina, média e grossa. Assim, poder-se-ia estabelecer que características geométricas otimizadas o diamante deverá ter para cada grupo de rebolos, permitindo uma minimização dos investimentos em dressadores.

REFERÊNCIAS

- [1] BARGEL, H-J.; SCHULZE, G. **Werkstoffkunde**. 6. Berlim: Springer-Verlag, 1999, p. 308-310.
- [2] BERTALAN, C. **Retificação com rebolos de nitreto de boro cúbico em máquinas convencionais**. 1997, p. 67-74. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Laboratório de Mecânica de Precisão, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [3] BRUNNER, G. **Schleifen mit mikrokristallinem Aluminiumoxid**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade de Hannover. n. 464, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998, p. 1-24 e 69-95.
- [4] BRINKSMEIER, E., HEINZEL C., WITTMANN M., SCHMID U., DREYER M., RATH H. J. **Como a aplicação do fluido refrigerante pode ser melhorada na retificação**. Revista Máquinas e Metais. São Paulo, 2001, n. 429, p. 34-41.
- [5] BRUNNER, G. **Kühlschmierstoffeinsatz beim Schleifen**. 1995, p. 1-25. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de Hannover. Hannover.
- [6] DR. KAISER DIAMANTWERKZEUGE GmbH. **Catálogo de dressadores e de ferramentas de PCD**. Celle, 2001.
- [7] FÁCIL FERRAMENTAS ABRASIVAS Ltda. **Catálogo de ferramentas abrasivas**. São Paulo, 2000.
- [8] GRAF, W. **Diamant-Abrichtwerkzeuge**. Informativo da WST, 1998, p. 2-32.
- [9] GRAF, W. **Präzisions-Schleifscheiben**. Catálogo da WST. Winterthur, 1999, p. 5-12.
- [10] HELLETSBERGER, H. **Grundlagen der Schleifwerkzeuge und des Schleifprozesses**. Publicação da Tyrolit Schleifmittelwerke Swarovski KG. Schwaz.
- [11] HOLZ, R.; SAUREN, J. **Schleifen mit Diamant und CBN**. Livro técnico da Ernst Winter & Sohn GmbH & Co., 1988, p. 74-87.
- [12] ILJIN DIAMOND. **Chemical Vapor Deposition Diamond Product**. Catálogo, p. 1-3.
- [13] JIANG, X. **Diamanttechnologie**. Informativo sobre processos de deposição de filmes de diamante CVD da Fraunhofer Institut Schicht- und Oberflächentechnik – IST.
- [14] KÖNIG, W. **Tecnologia da fabricação: Retificação, Brunimento e Lapidação**. Tradução Walter L. Weingaertner, Florianópolis, 1980, v. 2.

- [15] KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren Band 2: Schleifen, Honen, Läppen**. 3. ed. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996, p. 3-275.
- [16] LANG, G; SALJÉ, E. **Moderne Schleiftechnologie und Schleifmaschinen**. 1. ed. Essen: Vulkan-Verlag, 1989, p. 15-39 e 55-58.
- [17] LUDEWIG, T. **Auswahlkriterien für SiC- und Korundschleifkorntypen beim Schleifen von Stählen**. 1994, p. 10-12. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade de Aachen. Aachen.
- [18] MACHADO, Á. R. **Vantagens e desvantagens do uso ou não de fluidos de corte**. Revista Máquinas e Metais. São Paulo, 2000, n. 419, p. 134-151.
- [19] MESSER, J. **Abrichten konventioneller Schleifscheiben mit stehenden Werkzeugen**. 1983, p. 1-110. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade de Aachen. Aachen.
- [20] MONTGOMERY, DOUGLAS C. **Introduction to Statistical Quality Control**. New York: Wiley, 1985, 520 p.
- [21] MOTZER, W. **Entwicklung von nanostrukturierten keramischen Gradienten-Werkstoffen auf Precursorenbasis zur Herstellung hochleistungsfähiger komplexer Zerspanungswerkzeuge**. Relatório de projeto. Tübingen, 1999, p. 3-4.
- [22] NORTON DIAMOND FILM. **CVD Diamond Coatings for Tungsten Carbide Cutting Tools**. Catálogo. 1997, p. 1-2.
- [23] SCHUMANN, W. **Gemas do Mundo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A., 1982, p. 70.
- [24] SESTER, C. **Abrichten konventioneller Schleifscheiben mit stehenden Werkzeugen**. 2003. 125 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica – Laboratório de Mecânica de Precisão, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [25] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 2. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1992, p. 1-110.
- [26] SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES LTD. **Catálogo de diamantes monocristalinos sintéticos**. 1991, p. 2-4.
- [27] TABORGA, A. R. M. **Análise e monitoramento da retificação do ferro fundido nodular com rebolos convencionais**. 2002. p. 66-68. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Laboratório de Mecânica de Precisão, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [28] TÖNSHOFF, H.-K.; WESTKÄMPER, E. **Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren**. Essen: Vulkan-Verlag, 1997, v. 9, p. 324.

- [29] TYROLIT SCHLEIFMITTELWERDE SWAROVSKI KG. **Schleifen und Trennen. Zeitschrift für Schleiftechnik.** Revista 122/97, Schwaz, 1997.
- [30] UHLMANN, E., BRÜCHER, M. **Marktanalyse zu CVD-Diamantwerkzeugen.** Revista IDR 36, 2002, n. 1, p. 77 e 80.
- [31] VÁRIOS AUTORES. **Livro de matemática:** Geometria plana. Sistema Anglo de ensino. São Paulo, 1984-1985, v. 12, p. 192.
- [32] VÁRIOS AUTORES. **Livro de matemática:** Geometria espacial. Sistema Anglo de ensino. São Paulo, 1984-1985, v. 18, p. 76-84.
- [33] WICHARZ, W; KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E. **Schleiftechnik im Wettbewerb.** Colóquio sobre retificação. Aachen: VDI-Verlag, 1997, cap. 17, p. 6-8.
- [34] WINTER GmbH. **Diamantabrichtwerkzeuge-Katalog:** Catálogo de dressadores. Norderstedt, 31 p.

ANEXOS

Anexo A – Equipamentos utilizados

Anexo B – Perfis de rebolos

Anexo C – Programa CNC do ensaio

Anexo D – Análise estatística

Anexo E – Imagens do desgaste dos diamantes

Anexo F – Imagens da topografia dos diamantes

ANEXO A - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

- **MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA**

- Fabricante : Philips.
- Modelo: XL 30.
- Resolução do aparelho: 35 Å.
- Faixa de ampliação: 11 a 300.000 vezes.
- Computador acoplado: 486 DX 3.
- Ano de fabricação: 1994.

- **RUGOSÍMETRO**

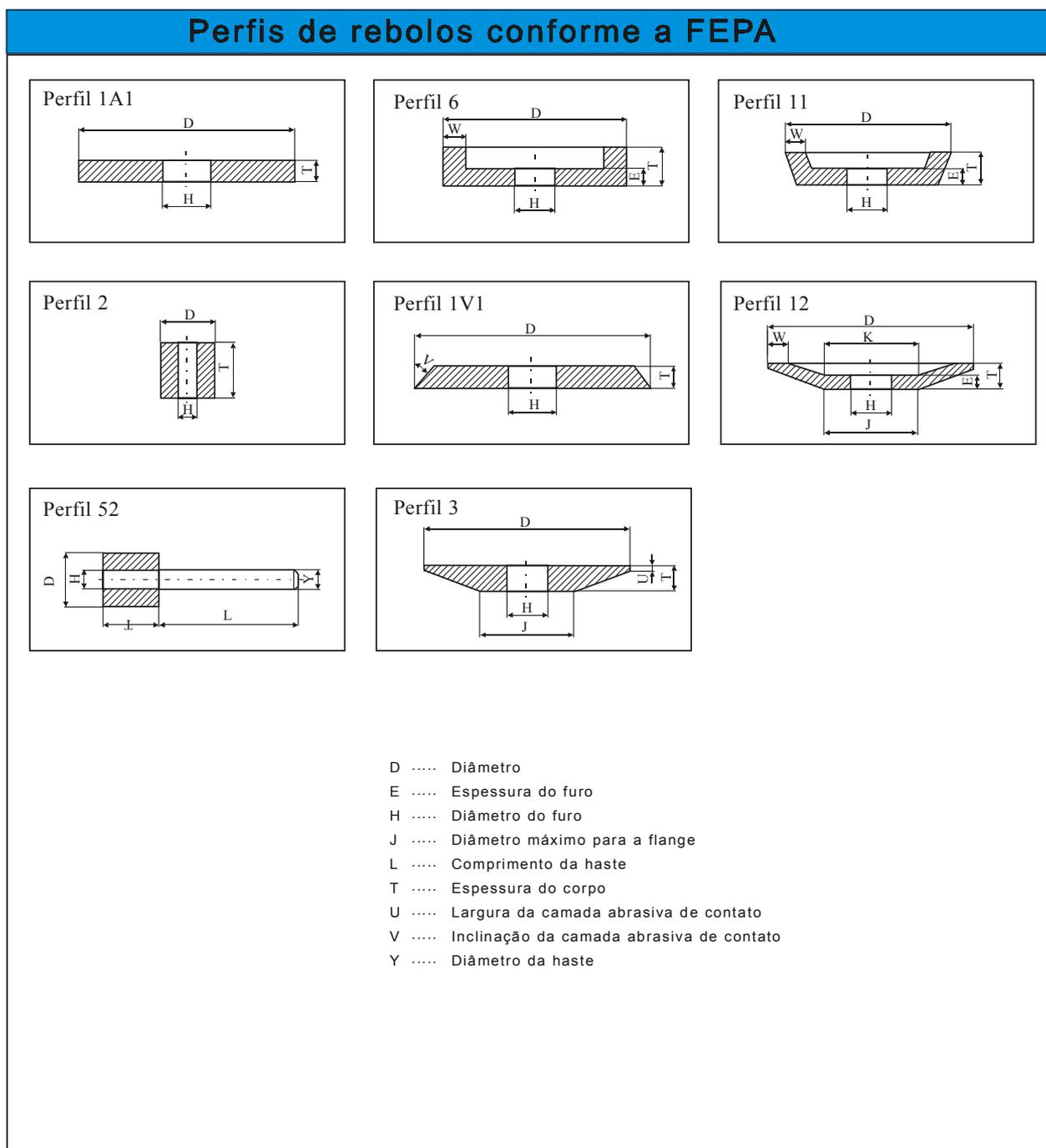
- Fabricante: Feinprüf Perthen GmbH.
- Modelo: S8P-PRK
- Apalpador com diamante de ângulo de ponta de 90° e raio de ponta de 5 µm.

- **RETIFICADORA**

- Fabricante: Zema Zselics Ltda.
- Modelo: Pratika Flexa-600-L.
- CNC: Sinumerik 840D
- Comprimento e diâmetro máximos da peça: 600 e 275 mm, respectivamente.
- Diâmetro externo máximo e largura máxima do rebolo: 406 e 50 mm, respectivamente.
- Potência: 7,5 HP.

ANEXO B - PERFIS DE REBOLOS

As figuras abaixo representam alguns perfis conforme a FEPA (organização dos fabricantes europeus de abrasivos).



ANEXO C - PROGRAMA CNC DO ENSAIO

PROGRAMA PRINCIPAL PARA A RETIFICAÇÃO DE 3 DEGRAUS

ODEBRECHT3.MPF

N10 G0 G18 G90 G94 G54 X250
 N20 M11 S2=30
 N30 M3 S30
 N40 STOPRE
 N50 GO Z-48
 N60 M8
 N70 R1=53.0; Diâmetro 1
 N80 R2=
 N90 R3=8.0
 N100 MERGULHO
 N110 STOPRE
 N120 G0 Z-64
 N130 R1=53.4; Diâmetro 2
 N140 R2=
 N150 MERGULHO
 N160 GO Z-64
 N170 R1=53.8; Diâmetro 3
 N180 R2=
 N190 MERGULHO
 N200 GO Z-126
 N210 R1=59.4; Diâmetro S
 N220 R2
 N230 R3=1.6
 N240 MERGULHO
 N250 STOPRE
 N260 M5
 N270 M9
 N280 STOPRE
 N290 GO X200
 N300 Z0
 N310 M12
 N320 M30

PROGRAMA PRINCIPAL PARA A RETIFICAÇÃO DE 4 DEGRAUS

ODEBRECHT4.MPF

N10 G0 G18 G90 G94 G54 X250
 N20 M11 S2=30
 N30 M3 S30
 N40 STOPRE
 N50 GO Z-48
 N60 M8
 N70 R1=54.4; Diâmetro 1
 N80 R2=
 N90 R3=6.6
 N100 MERGULHO
 N110 STOPRE
 N120 G0 Z-80
 N130 R1=54.8; Diâmetro 2
 N140 R2=
 N150 MERGULHO
 N160 GO Z-88
 N170 R1=55.2; Diâmetro 3
 N180 R2=
 N190 R3=5.8
 N200 MERGULHO
 N210 GO Z-96
 N220 R1=55.6; Diâmetro 4
 N230 R2
 N240 MERGULHO
 N250 G0 Z-141
 N260 R1=59.4; Diâmetro 4
 N270 R2=
 N280 R3=1.6
 N290 MERGULHO
 N300 STOPRE
 N310 M5
 N320 M9
 N330 STOPRE
 N340 GO X200
 N350 Z0
 N360 M12
 N370 M30

**SUB-PROGRAMA DE RETIFICAÇÃO -
MERGULHO DO REBOLO**

MERGULHO.SPF

N10 G54 G18 G90 M3 S=R2
 N20 G0 X=R1+R3
 N30 G1 X=R1+0.1 F0.6
 N40 X=R1+0.02 F0.4
 N50 X=R1 F0.08
 N60 G1 X=R1+R3 F500
 N70 STOPRE
 N80 M17

**PROGRAMA PRINCIPAL DE
DRESSAMENTO - CONTADOR DO
NÚMERO DE PASSES**

DRESSAMENTO.MPF

N10 DEF INT CONT
 N20 CONT=1
 N30 FOR CONT=1 TO 90
 N40 M11
 N50 M8
 M60 DRESS_RETO
 M70 ENDFOR
 M80 G0 X60
 M90 M9
 M100 M12

**SUB-PROGRAMA DE DRESSAMENTO
- OPERAÇÃO DE DRESSAMENTO**

DRESS_RETO.SPF

N10 G56
 N20 R71.0=20
 N30 G0 G90 G18 X30.0
 N40 Z5.0
 N50 STOPRE
 N60 COMPENSA_DIAMANTE
 N70 STOPRE
 N80 G1 G90 X=5.0 F5000
 N90 G1 X0.0
 N100 G1 Z0.0 F1000
 N110 Z=-R71 F=96
 N120 G1 X5.0
 N130 G0 X30.0
 N140 Z5.0
 N150 STOPRE
 N160 M17
 M110 M30

ANEXO D - ANÁLISE ESTATÍSTICA

As médias de rugosidade obtidas com os três diamantes, por degrau, e por rebolo podem ter diferenças significativas ou não. Para se fazer essa verificação foi realizada a análise estatística através da metodologia apresentada em Montgomery [20]. Quando houve diferenças entre as médias, usou-se o método de Duncan para confirmar esses resultados [20].

A análise exposta a seguir refere-se à superfície gerada pelo rebolo logo após o dressamento e ao primeiro degrau gerado pelo rebolo de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MC}$, apenas para exemplificar a forma como foi realizada essa verificação.

MÉTODO DE MONTGOMERY PARA A SUPERFÍCIE RESULTANTE APÓS O DRESSAMENTO (PRIMEIRO PONTO DA FIGURA 52).

		MCD	CVD	Natural	
Ensaio 1					
Nr.	Raa	Raa	Raa		
	em μm	em μm	em μm		
1	0,56	0,82	0,51		
2	0,60	0,81	0,46		
3	0,56	0,82	0,46		
4	0,60	0,76	0,47		
5	0,56	0,79	0,52		
6	0,56	0,83	0,44		
7	0,66	0,73	0,50		
M	0,59	0,79	0,48		
Ensaio 2					
Nr.	Raa	Raa	Raa		
	em μm	em μm	em μm		
1	0,63	0,45	0,53		
2	0,53	0,47	0,63		
3	0,61	0,47	0,65		
4	0,63	0,47	0,63		
5	0,61	0,48	0,64		
6	0,63	0,48	0,64		
7	0,63	0,50	0,56		
M	0,61	0,47	0,61		
Ensaio 3					
Nr.	Raa	Raa	Raa		
	em μm	em μm	em μm		
1	0,46	0,43	0,55		
2	0,44	0,38	0,60		
3	0,40	0,39	0,58		
4	0,48	0,41	0,62		
5	0,42	0,37	0,54		
6	0,38	0,40	0,64		
7	0,42	0,37	0,52		
M	0,43	0,39	0,58		
		MCD	CVD	Natural	Soma
soma	yi	11,37	11,63	11,69	34,69
média	ymi	0,54	0,55	0,56	
DP		0,089291	0,17929	0,069162	
IC média		0,03819	0,076682	0,02958	
Cálculo dos fatiões para a análise de variância					
SSt=	P1-	P2	=R		
SST	20,0023	19,10153	0,900775		
SStr	19,10428	19,10153	0,002756		
SSE=	SSt-SStr		Result		
SSE=	0,900775	0,002756	0,898019		
		Soma dos	Graus de	Média	
		quadrados	liberdade	quadrada	F0
SStr	0,002756	2,00	0,001378	0,092054	
SSE	0,898019	60,00	0,014967		
SST	0,900775	62,00			
		f_{0.05,2,60} =	3,150411	>	f_o = 0,092054
		Como f_o < f_{0.05,2,60}			
		==> hipótese aceita ==> Não há diferença significativa entre as médias			

MÉTODO DE MONTGOMERY PARA O DEGRAU 1 (SEGUNDO PONTO DA FIGURA 52).

		MCD	CVD	Natural	
Ensaio 1					
Nr.		Ra1	Ra1	Ra1	
		em μm	em μm	em μm	
1		0,57	0,74	0,63	
2		0,57	0,69	0,54	
3		0,50	0,78	0,53	
4		0,50	0,71	0,53	
5		0,56	0,74	0,57	
6		0,55	0,80	0,59	
7		0,55	0,69	0,60	
M		0,54	0,74	0,57	
Ensaio 2					
Nr.		Ra1	Ra1	Ra1	
		em μm	em μm	em μm	
1		0,52	0,50	0,70	
2		0,60	0,58	0,58	
3		0,55	0,58	0,76	
4		0,53	0,53	0,69	
5		0,56	0,61	0,76	
6		0,53	0,50	0,73	
7		0,61	0,56	0,67	
M		0,56	0,55	0,70	
Ensaio 3					
Nr.		Ra1	Ra1	Ra1	
		em μm	em μm	em μm	
1		0,55	0,48	0,68	
2		0,51	0,47	0,69	
3		0,49	0,52	0,74	
4		0,51	0,52	0,73	
5		0,43	0,53	0,72	
6		0,50	0,50	0,70	
7		0,51	0,51	0,76	
M		0,50	0,50	0,72	
		MCD	CVD	Natural	Soma
soma	yi	11,20	12,54	13,90	37,64
média	ymi	0,53	0,60	0,66	
DP		0,040784	0,108219	0,079788	
IC média		0,017443	0,046285	0,034125	
Cálculo dos fatiões para a análise de variância					
SSt=	P1-	P2	=R		
SST	23,0568	22,48841	0,568394		
SStr	22,66198	22,48841	0,173575		
SSE=	SSt-SStr		Result		
SSE=	0,568394	0,173575	0,394819		
Soma dos Graus de Média					
quadrados liberdade quadrada F0					
SStr	0,173575	2,00	0,086787	13,18892	
SSE	0,394819	60,00	0,00658		
SST	0,568394	62,00			
f0.05,2,60= 3,150411 < fo= 13,18892					
Como fo > f0.05,2,60					
==> hipótese não aceita ==> Há diferença significativa. entre as médias					

RESULTADOS DO MÉTODO DE DUNCAN PARA O DEGRAU 1 (SEGUNDO PONTO DA FIGURA 52).

Análise de Duncan para verificar quais experimentos são diferentes			
$S_{yi} = \sqrt{MSE/n}$ 0,017702			
Classificação das médias em ordem crescen			
0,53	0,60	0,66 <-----	
MCD	CVD	Natural	
			MCD CVD Natural
			0,53 0,60 0,66
Da tabela de Duncan para $\alpha=0,01$, e graus de liberdade do erro			60,00
tabela VII - livro Montgomery			
p=2	p=3		
2,83	2,98		
R2=	0,050096		
R3=	0,052751		
3 vs 1	0,13	>R3 - as médias não são iguais	
3 vs 2	0,06	>R2 - as médias não são iguais	
2 vs 1	0,06	>R2 - as médias não são iguais	

**MÉTODO DE DUNCAN PARA O DEGRAU 1 (SEGUNDO PONTO DA FIGURA 52).
COMPARAÇÃO ENTRE O MCD E O CVD.**

Comparando MCD vs CVD			
	MCD	CVD	
Ensaio 1			
Nr.	Ra1	Ra1	
	em μm	em μm	
1	0,57	0,74	
2	0,57	0,69	
3	0,50	0,78	
4	0,50	0,71	
5	0,56	0,74	
6	0,55	0,80	
7	0,55	0,69	
M	0,54	0,74	
Ensaio 2			
Nr.	Ra1	Ra1	
	em μm	em μm	
1	0,52	0,50	
2	0,60	0,58	
3	0,55	0,58	
4	0,53	0,53	
5	0,56	0,61	
6	0,53	0,50	
7	0,61	0,56	
M	0,56	0,55	
Ensaio 3			
Nr.	Ra1	Ra1	
	em μm	em μm	
1	0,55	0,48	
2	0,51	0,47	
3	0,49	0,52	
4	0,51	0,52	
5	0,43	0,53	
6	0,50	0,50	
7	0,51	0,51	
M	0,50	0,50	
soma	y_i	11,20	12,54
média	y_{mi}	0,53	0,60
			Soma 23,74
Cálculo dos fatires para a análise de variânci			
SSt=	P1-	P2	=R
SST	13,729	13,41875	0,310248
SStr	13,4615	13,41875	0,042752
SSE=	SSt-SStr		Result
SSE=	0,310248	0,042752	0,267495
SStr	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrada F0
SStr	0,042752	1,00	0,042752 6,392993
SSE	0,267495	40,00	0,006687
SST	0,310248	41,00	
$f_{0.05,1,42} = 4,07266$	<	$f_0 = 6,392993$	
Como $f_0 > f_{0.05,1,42}$			
==> hipótese não aceita ==> Há diferença significativa. entre as médias			

**MÉTODO DE DUNCAN PARA O DEGRAU 1 (SEGUNDO PONTO DA FIGURA 52).
COMPARAÇÃO ENTRE O MCD E O DIAMANTE NATURAL.**

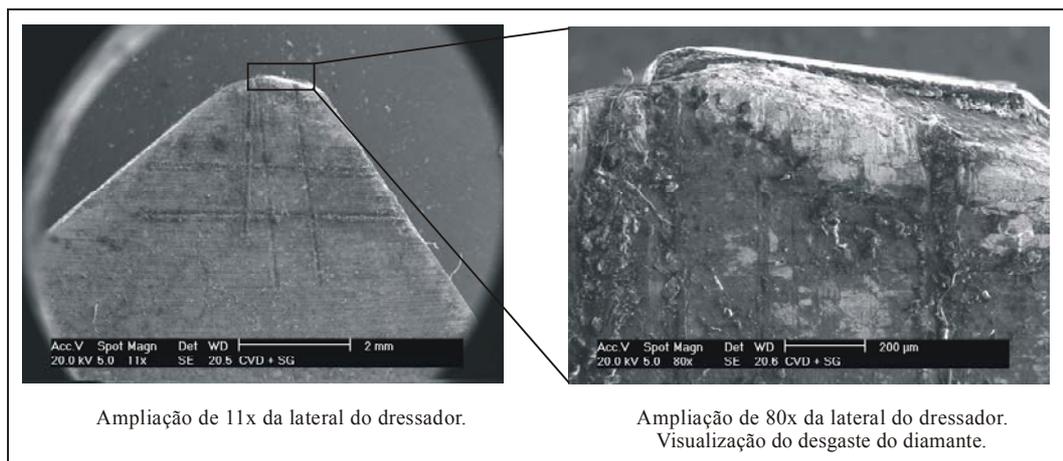
Comparação MCD vs Natural				
		MCD	Natural	
Ensaio 1				
Nr.		Ra1		Ra1
		em μm		em μm
1		0,57		0,63
2		0,57		0,54
3		0,50		0,53
4		0,50		0,53
5		0,56		0,57
6		0,55		0,59
7		0,55		0,60
M		0,54		0,57
Ensaio 2				
Nr.		Ra1		Ra1
		em μm		em μm
1		0,52		0,70
2		0,60		0,58
3		0,55		0,76
4		0,53		0,69
5		0,56		0,76
6		0,53		0,73
7		0,61		0,67
M		0,56		0,70
Ensaio 3				
Nr.		Ra1		Ra1
		em μm		em μm
1		0,55		0,68
2		0,51		0,69
3		0,49		0,74
4		0,51		0,73
5		0,43		0,72
6		0,50		0,70
7		0,51		0,76
M		0,50		0,72
		MCD	Natural	Soma
soma	yi	11,20	13,90	25,10
média	ymi	0,53	0,66	
DP		0,040784	0,079788	
IC média		0,017443	0,034125	
Cálculo dos fatires para a análise de variânci				
SSt=	P1-	P2	=R	
SST	15,3344	15,00024	0,334162	
SStr	15,17381	15,00024	0,173571	
SSE=	SSt-SStr		Result	
SSE=	0,334162	0,173571	0,16059	
	Soma dos	Graus de	Média	
	quadrados	liberdade	quadrada	F0
SStr	0,173571	1,00	0,173571	43,23331
SSE	0,16059	40,00	0,004015	
SST	0,334162	41,00		
f_{0.05,1,42} =	4,07266	<	f₀ =	43,23331
Como f₀ > f_{0.05,1,42} ==> hipótese não aceita ==> Há diferença significativa. entre as médias				

**MÉTODO DE DUNCAN PARA O DEGRAU 1 (SEGUNDO PONTO DA FIGURA 52).
COMPARAÇÃO ENTRE O CVD E O DIAMANTE NATURAL.**

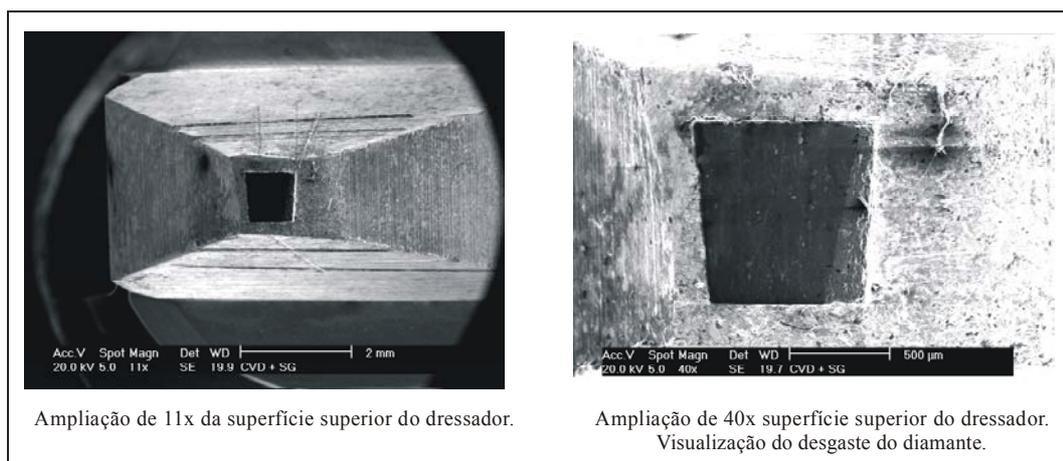
Comparação CVD vs Diamante																												
		CVD	Natural																									
Ensaio 1																												
Nr.		Ra l	Ra l																									
		em μm	em μm																									
1		0,74	0,63																									
2		0,69	0,54																									
3		0,78	0,53																									
4		0,71	0,53																									
5		0,74	0,57																									
6		0,80	0,59																									
7		0,69	0,60																									
M		0,74	0,57																									
Ensaio 2																												
Nr.		Ra l	Ra l																									
		em μm	em μm																									
1		0,50	0,70																									
2		0,58	0,58																									
3		0,58	0,76																									
4		0,53	0,69																									
5		0,61	0,76																									
6		0,50	0,73																									
7		0,56	0,67																									
M		0,55	0,70																									
Ensaio 3																												
Nr.		Ra l	Ra l																									
		em μm	em μm																									
1		0,48	0,68																									
2		0,47	0,69																									
3		0,52	0,74																									
4		0,52	0,73																									
5		0,53	0,72																									
6		0,50	0,70																									
7		0,51	0,76																									
M		0,50	0,72																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th></th> <th>CVD</th> <th>Natural</th> <th>Soma</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>soma</td> <td>yi</td> <td>12,54</td> <td>13,90</td> <td>26,44</td> </tr> <tr> <td>média</td> <td>ymi</td> <td>0,60</td> <td>0,66</td> <td></td> </tr> <tr> <td>DP</td> <td></td> <td>0,108219</td> <td>0,079788</td> <td></td> </tr> <tr> <td>IC média</td> <td></td> <td>0,046285</td> <td>0,034125</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						CVD	Natural	Soma	soma	yi	12,54	13,90	26,44	média	ymi	0,60	0,66		DP		0,108219	0,079788		IC média		0,046285	0,034125	
		CVD	Natural	Soma																								
soma	yi	12,54	13,90	26,44																								
média	ymi	0,60	0,66																									
DP		0,108219	0,079788																									
IC média		0,046285	0,034125																									
Cálculo dos fatires para a análise de variânci																												
SSt=	P1-	P2	=R																									
SST	17,0502	16,64461	0,40559																									
SStr	16,68865	16,64461	0,044038																									
SSE=	SSt-SStr	Result																										
SSE=	0,40559	0,044038	0,361552																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Soma dos quadrados</th> <th>Graus de liberdade</th> <th>Média quadrada</th> <th>F0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SStr</td> <td>0,044038</td> <td>1,00</td> <td>0,044038</td> <td>4,872112</td> </tr> <tr> <td>SSE</td> <td>0,361552</td> <td>40,00</td> <td>0,009039</td> <td></td> </tr> <tr> <td>SST</td> <td>0,40559</td> <td>41,00</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrada	F0	SStr	0,044038	1,00	0,044038	4,872112	SSE	0,361552	40,00	0,009039		SST	0,40559	41,00							
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrada	F0																								
SStr	0,044038	1,00	0,044038	4,872112																								
SSE	0,361552	40,00	0,009039																									
SST	0,40559	41,00																										
$f_{0.05,1,42} = 4,07266 < f_0 = 4,872112$ Como $f_0 > f_{0.05,1,42}$ ==> hipótese não aceita ==> Há diferença significativa. entre as médias																												

ANEXO E - IMAGENS DO DESGASTE DOS DIAMANTES

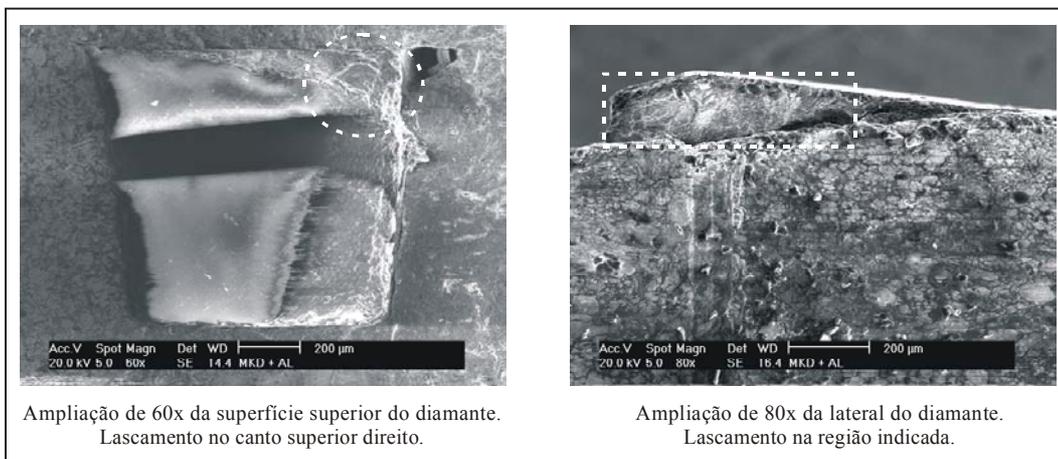
A) IMAGENS DA LATERAL DO DRESSADOR E DO DIAMANTE SEM LASCAMENTO – AMPLIAÇÃO DE 11x E DE 80x.



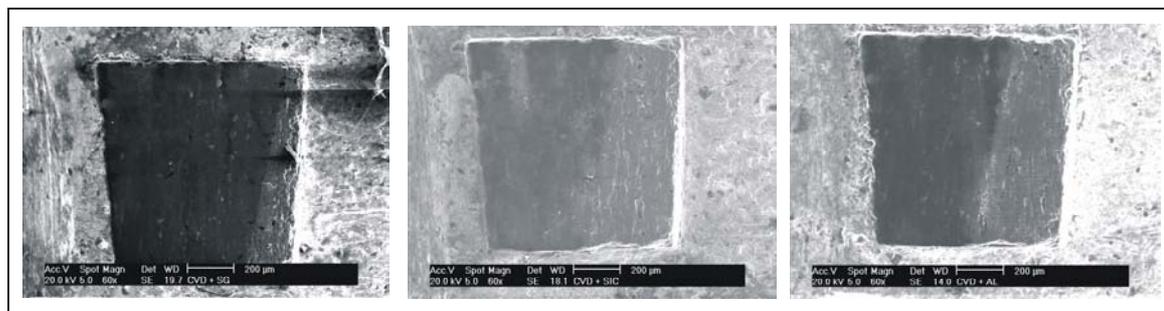
B) IMAGENS DA VISTA SUPERIOR DO DRESSADOR E DO DIAMANTE SEM LASCAMENTO – AMPLIAÇÃO DE 11x E DE 40x.



C) IMAGENS DA LATERAL E DA VISTA SUPERIOR DO DIAMANTE COM LASCAMENTO.

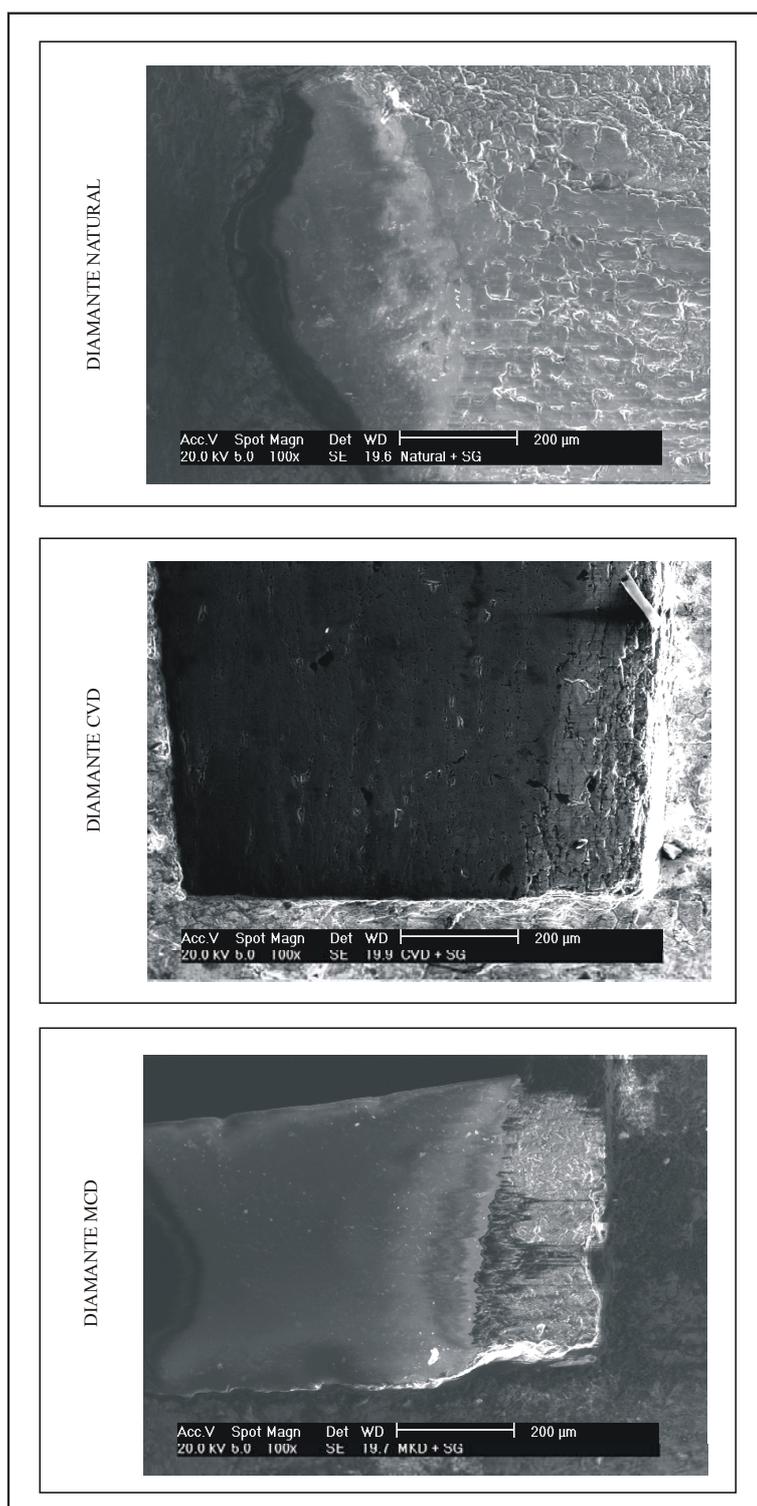


D) VISTA SUPERIOR DO AVANÇO DO DESGASTE DO DIAMANTE CVD APÓS 3 ENSAIOS COM OS REBOLOS DE Al_2O_3 -MC, SiC E Al_2O_3 COMUM, RESPECTIVAMENTE.

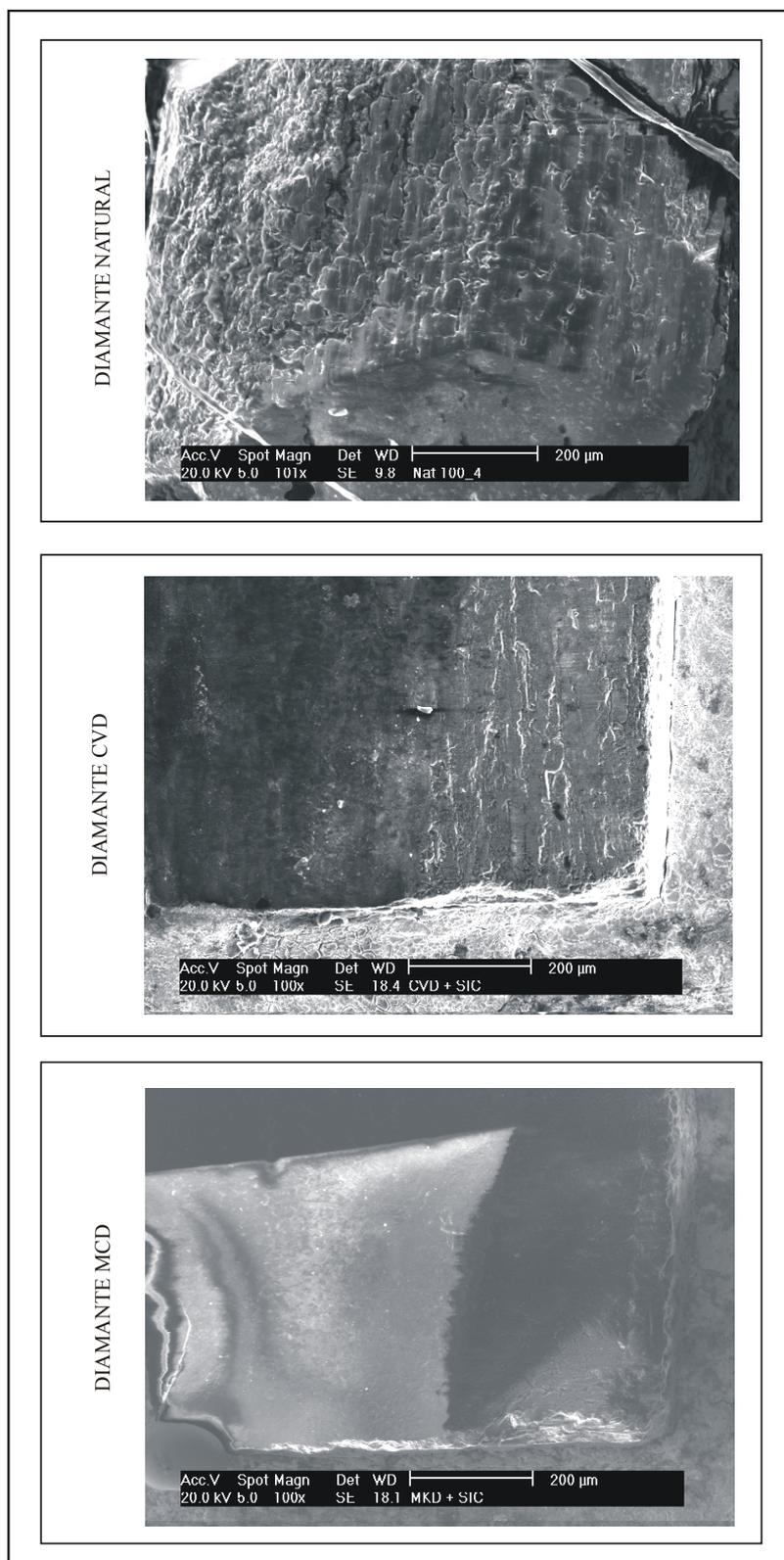


ANEXO F - IMAGENS DA TOPOGRAFIA DOS DIAMANTES

A) IMAGENS DA TOPOGRAFIA DOS DIAMANTES NATURAL, CVD E MCD COM AMPLIAÇÃO DE 100 x APÓS A RETIFICAÇÃO DO REBOLO DE Al_2O_3 -MC.



B) IMAGENS DA TOPOGRAFIA DOS DIAMANTES NATURAL, CVD E MCD COM AMPLIAÇÃO DE 100 x APÓS A RETIFICAÇÃO DO REBOLO DE SiC.



C) IMAGENS DA TOPOGRAFIA DOS DIAMANTES NATURAL, CVD E MCD COM AMPLIAÇÃO DE 100 x APÓS A RETIFICAÇÃO DO REBOLO DE Al_2O_3 COMUM.

