



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Faculdade de Engenharia  
Campus de Bauru



**PROPOSTA DE UMA MÁQUINA PARA PROCESSO DE  
ABRASÃO BASEADO NA COMBINAÇÃO DE ALGUMAS  
CARACTERÍSTICAS DA LAPIDAÇÃO E RETIFICAÇÃO**

**JOÃO HENRIQUE DORIGATTI CRUZ**

**Dissertação apresentada à  
Faculdade de Engenharia da UNESP –  
Campus de Bauru, para a obtenção do  
título de Mestre em Engenharia  
Mecânica.**

**BAURU – SP**

**AGOSTO – 2009**

Cruz, João Henrique Dorigatti.

Proposta de uma máquina para processo de abrasão baseado na combinação de algumas características de lapidação e retificação / João Henrique Dorigatti Cruz, 2009.

103 f. : il.

Orientador: Luiz Eduardo de Angelo Sanchez


Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2009

1.Lapidação. 2. Retificação. 3. Grau de recobrimento. 4. Acabamento superficial. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE JOÃO HENRIQUE DORIGATTI CRUZ, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.**

Aos 13 dias do mês de julho do ano de 2009, às 09:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA PÓS-GRADUAÇÃO, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de JOÃO HENRIQUE DORIGATTI CRUZ, intitulado "PROPOSTA DE UMA MÁQUINA PARA PROCESSO DE ABRASÃO BASEADO NA COMBINAÇÃO DE ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DA LAPIDAÇÃO E RETIFICAÇÃO". Após a exposição, o discente foi argüido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

  
Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ

  
Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI

  
Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR

Dedico esse trabalho à minha família

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde, força e ajuda em todos os momentos em que necessitei.

Aos meus pais, Raimundo Leite Cruz e Maria Aparecida Dorigatti Cruz, pelo amor e esforço para me proporcionar uma boa formação e por estarem presentes em todos os momentos importantes da minha vida.

Á minha amada esposa Lílian de Cássia Efrísio, pelo apoio e motivação.

Ao meu irmão, Carlos Eduardo Dorigatti Cruz, por participar de minha formação e a minha irmã, Ana Carolina Dorigatti Cruz, pelo seu afeto.

Ao Professor Doutor Luiz Eduardo de Angelo Sanchez pela sua excelente orientação, pela confiança, pela amizade sincera, pelo apoio constante e principalmente compreensão.

Aos amigos Arthur Alves Fiocchi, Nilton Zhu Xu Jun e Hamilton José de Mello

Aos professores do curso de Pós-Graduação pelos conhecimentos adquiridos.

Aos demais professores, técnicos, funcionários e alunos da Faculdade de Engenharia da UNESP – *Campus* de Bauru que direta ou indiretamente colaboraram para concretização deste trabalho.

## Sumário

LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES .....	xiii
RESUMO .....	xiv
ABSTRACT .....	xv

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivo do trabalho .....	3
1.2	Relevância do tema .....	3
1.3	Estrutura do trabalho.....	4
2	Revisão bibliográfica.....	5
2.1	Processos de usinagem.....	5
2.2	A retificação, princípios, fundamento e limitações.....	8
2.2.1	Princípios do processo de retificação .....	8
2.2.2	Características dos Rebolos .....	10
2.2.3	Mecanismo de desgaste do rebolo .....	12
2.2.4	A operação de dressagem e tipos de dressadores .....	13
2.2.5	Macro e microefeitos de dressagem .....	16
2.2.6	Restrições do processo de retificação.....	18
2.3	A lapidação, seus fundamentos e suas variáveis de controle.....	20
2.3.1	Historia do surgimento dos processos abrasivos .....	20
2.3.2	Definição do processo de lapidação .....	21
2.3.3	Mecanismo de remoção de material da lapidação.....	22
2.3.4	Variáveis do processo de lapidação.....	29
2.3.5	Influencias das variáveis.....	31
2.4	O processo de brunimento plano.....	35
2.4.1	Definições do processo de brunimento plano e exemplos de aplicações ...	35
2.4.2	Cinemática do processo de brunimento plano.....	38
2.4.3	Ferramenta abrasiva utilizada no brunimento plano.....	40
2.4.4	Dressamento dos rebolos de diamante e CBN.....	41
2.5	Técnicas de usinagem na escala nanométrica .....	43
3	Materiais e métodos.....	50
3.1	O Processo de Lápidoretificação .....	50

3.2	A Lápidoretificadora .....	54
3.2.1	Conjunto Estrutural .....	57
3.2.2	Conjunto de Movimentação Longitudinal .....	58
3.2.3	Conjunto de Movimentação Transversal .....	60
3.2.4	Conjunto de rotação do rebolo abrasivo .....	62
3.2.5	Conjunto aplicador de fluido de corte .....	64
3.2.6	Conjunto de fixação da peça.....	65
3.2.7	Conjunto de monitoramento .....	69
3.2.8	Conjunto de Comando e Acionamento.....	73
4	Considerações finais.....	81
5	Sugestões para trabalhos futuros .....	83

## Índice de figuras

Figura 1 - Precisão dimensional dos diferentes processos de usinagem do ano 1940 até 2000 .....	6
Figura 2 – Qualidade superficial dos diferentes processos de usinagem .....	6
Figura 3 - Classificação dos novos processos de polimento comparando com os processos tradicionais .....	7
Figura 4 - Esquema da superfície de retificação superficial em uma retificação plana ...	8
Figura 5 - Regiões de formação elástica e plástica na formação de cavado.....	9
Figura 6 - Ilustração dos mecanismos de desgaste do rebolo: A – desgaste por atrito, B – fratura do grão abrasivo, e C – fratura do ligante.....	12
Figura 7 - Forma de aplicação das variações dos dressadores tipo <i>fliese</i> .....	14
Figura 8 - Parâmetros da operação de dressagem.....	15
Figura 9 - Região de contato entre dressador e rebolo .....	17
Figura 10 - Ação do grau de recobrimento na topografia do rebolo .....	18
Figura 11 - Modelo de lapidação utilizado na Idade da Pedra .....	21
Figura 12 - Esquema do princípio básico do processo de lapidação de peças planas ....	21
Figura 13 - Exemplo de anel dressador .....	22
Figura 14 - Velocidades tangenciais do disco de lapidação (vetor branco) e do anel dressador (vetor preto).....	23
Figura 15 - Trajetória de um único ponto do anel sobre o disco, em função de $N_L$ .....	24
Figura 16 - Representação de desgaste do disco de lapidação .....	25
Figura 17 - Exemplo do padrão descrito por um ponto da peça sobre o disco de lapidação.....	25
Figura 18 - Esquema da deformação plástica (a) e do corte (b) nas diferentes direções das partículas .....	26
Figura 19 - Mecanismos de remoção de material com abrasivos livres.....	27
Figura 20 - Foto da superfície de aço ferramenta desgastada no mecanismo de abrasão de dois corpos obtida por microscópio eletrônico de varredura – MEV .....	28
Figura 21 - Foto da superfície de aço ferramenta desgastada no mecanismo de abrasão de três corpos obtida por microscópio eletrônico de varredura – MEV .....	28
Figura 22 - Parâmetros que influenciam a operação de lapidação .....	30
Figura 23 - Influência da pressão de lapidação na remoção de material e na rugosidade .....	32

Figura 24 - Influencia da velocidade de lapidação sobre a taxa de remoção .....	33
Figura 25 - Remoção de material e rugosidade em relação ao tamanho do grão abrasivo .....	34
Figura 26 - Remoção de material em relação à concentração .....	35
Figura 27 - Esquema dos componentes de uma máquina de brunimento plano com rebolo duplo.....	36
Figura 28 - Exemplo de uma máquina de brunimento plano .....	37
Figura 29 - Pastilhas de corte cerâmicas usinadas pelo processo de brunimento plano.	38
Figura 30 - Cinemática do brunimento plano gerada pelas engrenagens planetárias.....	39
Figura 31 - Superfícies características dos processos de lapidação (a) e brunimento plano (b) com ampliação de 200x.....	39
Figura 32 - Mecanismo de dressagem para os rebolos superior e inferior .....	40
Figura 33 - Rebolo abrasivo totalmente recoberto (a) rebolo segmentado com espaçamentos largos (b).....	41
Figura 34 - Rebolo abrasivo segmentado com espaçamentos curtos .....	41
Figura 35 - Efeitos do desgaste do rebolo abrasivo e formas de compensar o desgaste desuniforme. (a) desgaste da forma do rebolo (b) desgaste gerando formação de ranhuras e pela variação na concentração dos abrasivos para compensar o desgaste (c) posicionamento dos inserts com dureza diferente para compensar o desgaste desuniforme .....	42
Figura 36 - Exemplo de discos dressadores de vDD e sua utilização no brunimento plano .....	42
Figura 37 - Aplicação de um disco dressador de vDD no brunimento plano.....	43
Figura 38 - Drive de disco rígido e detalhes do cabeçote.....	44
Figura 39 - Esquema do processo de nano-retificação .....	45
Figura 40 – Localização da camadas condutoras de onda em dispositivos de laser de alta potencia tipos III-V.....	47
Figura 41 – Processo de planificação da camada de $\text{Si}_3\text{N}_4$ .....	47
Figura 42 - Orientação da montagem da ferramenta e da peça nos diferentes processos abrasivos.....	50
Figura 43 - Esquema da dressagem na lápidoretificação .....	52
Figura 44 - Cinemática da Lapidação e da Lápidoretificação .....	53
Figura 45 - Representação da Lápidoretificadora destacando alguns conjuntos.....	55

Figura 46 - Representação da Lápido retificadora destacando-se os outros conjuntos e os eixos de referência .....	56
Figura 47 - Representação do conjunto estrutural .....	57
Figura 48 - Representação do conjunto de movimentação longitudinal .....	59
Figura 49 - Representação do conjunto de movimentação transversal .....	61
Figura 50 - Representação do conjunto de rotação do rebolo abrasivo.....	63
Figura 51 - Representação do conjunto aplicador de fluido de corte .....	64
Figura 52 - Representação dos circuitos do ar comprimido e do fluido de corte .....	65
Figura 53 - Representação do conjunto de fixação da peça .....	67
Figura 54 - Representação do mecanismo para monitoramento do torque no eixo motriz da peça de trabalho .....	71
Figura 55 - Esquema mostrando a transmissão de informação no conjunto de comando .....	75
Figura 56 - Exemplos de perfis no rebolo formados durante a operação de dressagem	75
Figura 57 - Preparação para a dressagem do rebolo abrasivo, os pontos coordenados “zero máquina” e “zero peça” são obtidos por uma seqüência de movimentos de set-up .....	77
Figura 58 - O programa de comando referencia o rebolo abrasivo através dos pontos: “zero máquina” e “zero peça” e o perfil gerado no rebolo é carregado .....	78
Figura 59 - Exemplo de interface do programa do conjunto de comando .....	78
Figura 60 - Ciclo de dressagem D01 .....	79

## Índice de tabelas

Tabela 1 - Lista de peças do conjunto estrutural .....	57
Tabela 2 - Lista de peças do conjunto de movimentação longitudinal.....	58
Tabela 3 - Lista de peças do conjunto de movimentação transversal.....	61
Tabela 4 - Lista de peças do conjunto de rotação do disco abrasivo.....	63
Tabela 5 - Lista de peças do conjunto aplicador de fluido de corte .....	65
Tabela 6 - Lista de peças do conjunto de fixação da peça.....	68
Tabela 7 - Lista de peças do mecanismo para monitoramento do torque no eixo motriz da peça de trabalho .....	71

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Å – Angstroms

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Óxido de Alumínio

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC - Carbetto de alumínio-titânio

ASME – American Society of Mechanical Engineer

CaTiO<sub>3</sub> - Titanato de cálcio

CBN - Nitreto Cúbico de Boro

CNC - Comando numérico computadorizado

Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Óxido de Cromo

D01 - Comando para o ciclo para a dressagem em uma região plana

DIN - Instituto de Normalização Alemão

EA - Emissão Acústica

EDM – Eletroerosão

EP - Extrema Pressão

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Óxido de ferro

G - Tipo de movimento no código numérico

G00 - Comando para movimentação lenta

G01 - Comando para movimentação rápida

G02 - Comando para interpolação em arcos de circunferência no sentido horário

G03 - Comando para interpolação em arcos de circunferência no sentido anti-horário

HRc - Dureza Rockwell na escala C

ISO - Organização Internacional de Padronização

LIGA - Litografia, eletroformação e moldagem

MEV - Microscópio eletrônico de varredura

MQF - Mínima Quantidade de Fluido

MRF - Magnto-rheological finishung (Acabamento reostático-magnético)

N - Seqüência das instruções no código numérico

PCD - Diamante policristalino

PVA - Resinas melamina e fenol

Ra - Desvio médio aritmético

RMS - Root Mean Square

rpm - Rotações por minuto

Rz - Média aritmética das alturas máximas nos cinco comprimentos de corte avaliados

S - Velocidade de deslocamento no código numérico

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> - nitreto de silício

SiC - Carboneto de Silício

TiO<sub>2</sub> - Óxido de Titânio

UFF/FP – Ultra-fine finishing/Float Polishing (Acabamento ultra-fino/Polimento flutuante)

vDD - vitrified Diamond Dresser, Diamante Dressador vitrificado

X - Eixo longitudinal à superfície do rebolo

Z - Eixo transversal à superfície do rebolo

ZnO - Óxido de zinco

## LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

- $a$  - Profundidade de corte [mm]
- $A_1, A_2$  – Área acima da linha média [ $\mu\text{m}^2$ ]
- $A_3$  – Área abaixo da linha média [ $\mu\text{m}^2$ ]
- $ad$  - Profundidade de dressagem [ $\mu\text{m}$ ]
- $Asd$  - Área frontal de dressagem [ $\mu\text{m}^2$ ]
- $B$  - Largura de contato do rebolo [mm]
- $bd$  - Largura de atuação do dressador [ $\mu\text{m}$ ]
- $bdr$  - Largura real da atuação do dressador [ $\mu\text{m}$ ]
- $F_n$  - Força normal à superfície de contato rebolo-peça [N]
- $F_t$  - Força tangencial à superfície de contato rebolo-peça [N]
- $hcu$  – Espessura de usinagem [ $\mu\text{m}$ ]
- $hcu\text{ eff}$  - Espessura efetiva de usinagem [ $\mu\text{m}$ ]
- $L_m$  - Comprimento de avaliação [mm]
- $L_t$  - comprimento de amostragem [mm]
- $n_{\text{anel dressador}}$  - rotação do anel dressador [rpm]
- $n_{\text{disco de lapidação}}$  - rotação do disco de lapidação [rpm]
- $N_L$  - Relação usada para caracterizar o tipo de ciclóide gerado [adimensional]
- $p$  - Pressão de usinagem [kPa]
- $rp$  - Raio da ponta do dressador [ $\mu\text{m}$ ]
- $Sd$  - Passo de dressagem [mm]
- $Ud$  - Grau de recobrimento de dressagem [adimensional]
- $V_s$  - Velocidade de corte [mm/s]
- $V_w$  - Velocidade da peça na retificação [m/s]
- $W$  - Velocidade angular do rebolo [rpm]
- $Wt$  - Ondulação teórica (macroefeito) [adimensional]
- $x$  - Posição a partir da origem [mm]
- $X1, Z1$  – Posição inicial no ciclo de dressagem [mm]
- $Z$  - Taxa de remoção de material volumétrica [ $\text{mm}^3/\text{s}$ ]
- $Z'$  - Taxa de remoção de material volumétrica por unidade de área [mm/s]

## Resumo

Os clientes dos fabricantes de equipamentos exigem cada vez mais eficiência com melhor desempenho e maior economia de energia. Prova disso são produtos que vem diminuindo no tamanho e no peso. Um componente mais eficiente necessita de melhor qualidade de acabamento superficial e tolerâncias mais apertadas.

Na fabricação de componentes precisos destaca-se a usinagem, os processos convencionais mais precisos são a retificação, a lapidação e o brunimento. Entretanto desenvolvimentos recentes nas áreas de eletrônicos e computadores geraram a necessidade de tolerâncias nanométricas, métodos ultra-precisos, que usam abrasivos livres, trabalham com tolerâncias de milésimos de micrometros.

A retificação é o processo abrasivo mais utilizado para promover acabamento e formas finais em componentes de precisão. Utiliza como ferramenta um rebolo abrasivo, e conta com a operação de dressagem para controle da capacidade de corte. As elevadas temperaturas geradas podem provocar danos térmicos e deformações dimensionais e de forma na peça de trabalho. Na lapidação são utilizados grãos abrasivos livres e o perfil é transferido a peça através de movimentos aleatórios. O grande número de variáveis envolvidas na lapidação a tornam complexa e dispendiosa. Nos anos 90, difundiu-se um processo abrasivo de grãos fixos, no qual as peças e o rebolo abrasivo composto de pastilhas de CBN ou diamante, produzem movimento análogo ao da lapidação. Esse processo, muitas vezes denominado por brunimento plano, traz vantagens em relação à lapidação, como: peça limpa, reduzido desperdício de abrasivo e maior taxa de remoção.

Neste trabalho é descrito um equipamento denominado de lápidoretificadora que usina peças pelo processo de lápidoretificação. Diferente de qualquer outro processo a lápidoretificação une uma cinemática que gera riscos aleatórios com uma ferramenta abrasiva preparada pela operação de dressagem e combina a qualidade superficial encontrada nos processos de lapidação e brunimento plano com a versatilidade operacional do processo de retificação. A lápidoretificadora possui funções específicas como a cinemática do conjunto de fixação de peças e o acionamento automático da dressagem. Suas principais características são rigidez e eficácia de controle, que fornecem precisão e capacidade de corte estável.

*Palavras-chave: Lapidação, retificação, grau de recobrimento, acabamento superficial*

## ABSTRACT

Customer's equipment manufacturers demand more efficiency with better performance and greater energy saving. In parallel is development of products with less size and weight. The most efficient components need quality of surface finish and increased manufacturing accuracy.

Precise component manufacturer is normally produced by cutting process. Grinding, lapping and honing are the most commons manufacturing precision processes in practice today. Recent developments in electronics and computers created the need for nanometer tolerances, ultra precision cutting machines, which use free abrasive process, working with tolerances in thousandths of microns.

Grinding is the most common abrasive process used to promote final form in precision components. Using an abrasive wheel as a tool, it is possible to control the cutting conditions with the dressing operation. The high temperatures generated can cause thermal damage and dimensional deformation. Lapping use free abrasive grains with random movements. The immense numbers of variables involved in the lapping make the process to complex and expensive. In the'90s, it spread a fixed abrasive grains process using CBN or diamond wheels, with movements similar to lapping. This process, often called flat honing, product clean surfaces, reduced abrasive waste and increased removal rate.

This paper described a device named lappingriding machine. Different of any other process, the lappingriding kinematics generates random risks with an abrasive tool prepared by dressing operation. The surface fining quality is similar to lapping or flat honing and the operational versatility is similar to grinding processes. The lappingriding machine has specific functions such as the kinematics of workpiece fixing device and automatic dressing device. Its main features are rigidity and effectiveness of control, providing precision and cutting capacity stabile.

*Keywords: lapping; grinding; dressing overlap; surface finishing*

# 1 INTRODUÇÃO

As indústrias metal-mecânica têm sido obrigadas a investir em novos processos e tecnologia, dentre as quais incluem-se as máquinas-ferramenta capazes de alcançar níveis de acabamento superficial e dimensional melhores que as máquinas até então disponíveis (Stähli, 1998; Saljé & Paulmann, 1988).

A retificação é o processo de fabricação mais utilizado para correção da forma de componentes usinados por processos anteriores, porém, muitos componentes necessitam de acabamento em nível mais fino do que a retificação é capaz de proporcionar. Somado a essa limitação existem problemas como o calor gerado que pode afetar as propriedades mecânicas introduzindo transformações microestruturais e a fixação de peças finas que apresentam deformações. (Stähli, 1998; Tomlinson & Newton, 1990; Spur & Sabotka, 1991).

Uma importante característica do processo de retificação reside na operação de dressagem, ou seja, na reafiação do rebolo quando se verifica uma queda do desempenho do processo. A superfície desgastada do rebolo é removida dando lugar a uma nova camada de grãos abrasivos restabelecendo-se, portanto, a capacidade de corte.

A lapidação, apesar de ser um processo abrasivo de baixa taxa de remoção de material, quando comparada a outros processos tradicionais, elimina muito dos problemas da retificação. No entanto, os problemas da lapidação não residem apenas no longo tempo de usinagem de uma peça, mas também na dificuldade em selecionar o conjunto de parâmetros adequados para satisfazer as especificações da peça, pois o número de variáveis é bastante numeroso. Dentre as variáveis pode-se citar: granulometria do abrasivo; tipo do abrasivo; friabilidade (“fragilidade”) do grão; concentração do abrasivo no veículo; material do disco de lapidação; velocidade do disco; e carga de lapidação, entre outros. Além disso o desperdício de abrasivo em estado ainda útil, expulso do disco de lapidação pela força centrífuga, constitui-se num aspecto negativo, sobretudo quando se utiliza os caros grãos de diamante (Touge & Matsuo, 1996; Chandrasekar et al., 1987a e 1987b).

Na última década, nos anos 90, difundiu-se nos EUA e Europa um processo abrasivo de grãos fixos, no qual as peças e o disco abrasivo produzem movimento relativo análogo ao da lapidação. O disco empregado é composto de pastilhas ou grandes segmentos feitos de CBN ou, então, de diamante. Este processo industrial, que

permite a usinagem de grande número de peças, assume diferentes denominações e sua denominação mais comum é brunimento plano ou retificação fina.

O brunimento plano traz algumas importantes vantagens em relação à lapidação, com quem originalmente compete, como: peça limpa, uma vez que é livre do veículo de lapidação; reduzido desperdício de abrasivo, já que os grãos são presos ao ligante; e usinagem mais rápida, pois a taxa de remoção é maior.

Pelo fato de se utilizar um disco com material superabrasivo, a reafiação do rebolo é naturalmente feita com o desgaste progressivo do ligante que provoca o surgimento de novos grãos. Quando necessário, o restabelecimento de forma do disco é feito por um anel dressador, análogo ao da lapidação, mas feito de material cerâmico em sua superfície inferior onde se dá o contato com o disco abrasivo (Beyer & Ravenzwaaij, 2005). Talvez, por se tratar de um processo derivado da lapidação, criado por tradicionais fabricantes de lapidadoras, não se tem registro da transferência do conceito do grau de recobrimento (Ud), oriundo da retificação, aplicado a este novo processo com a utilização de disco abrasivo convencional de ligante resinóide. A esta hipótese, somava-se o incipiente estudo do grau de recobrimento (Ud) por König & Messer (1980) na mesma época do surgimento do brunimento plano.

No trabalho de Jun (2005) foi construída uma máquina a partir de adaptações feitas em uma lapidadora previamente existente no Laboratório de Tecnologia da Usinagem da Unesp-Bauru. Nessa máquina, a peça era comprimida contra o disco por meio de um dispositivo composto por uma mola helicoidal e rotacionada em torno do próprio eixo por meio de um sistema de engrenagens. A dressagem era feita por um dispositivo apropriado em substituição ao dispositivo de fixação da peça. Para a execução da dressagem foi feito um acionamento composto por um fuso movido por um motor de passo. A escolha do grau de recobrimento (Ud) era feita em computador que, por sua vez, transmitia a informação para o motor de passo.

Neste trabalho, o qual iniciou o estudo sistemático do processo, então denominado lápidoretificação, sob variados graus de recobrimento (Ud), obteve-se resultados bastante satisfatórios em relação aos níveis de acabamento superficial dos corpos-de-prova usinados. Foram alcançados baixos valores de desvio de planicidade, comparáveis aos dos verificados pelo processo de lapidação, e especialmente de rugosidade. Dentre as conclusões a respeito do trabalho desenvolvido, pode-se destacar: O processo proposto é capaz de diminuir significativamente a rugosidade e o desvio de planicidade de corpos-de-prova retificados e produz pequena taxa de remoção; Os sinais

de emissão acústica podem ser utilizados no monitoramento do processo proposto sendo possível estabelecer uma relação com a rugosidade e a taxa de remoção; Pelas características do processo e qualidade dos corpos-de-prova usinados, a lápidoretificação pode ser incluída na categoria de processos especiais para acabamento fino, superior ainda à lapidação. No entanto, notou-se que a amplitude de valores de pressão sobre a peça permitida pela máquina é pequena e que a partir de 100kPa a máquina apresenta vibrações interferindo no acabamento superficial. Diante da constatação desse importante fator limitante, que inibe a exploração desse processo promissor faz-se necessário o desenvolvimento de uma máquina dedicada ao processo, diferentemente da adaptação de uma lapidadora.

## **1.1 Objetivo do trabalho**

Neste trabalho é descrito um equipamento denominado de lápidoretificadora que usina peças pelo processo de lápidoretificação. Esse processo alia características dos processos de retificação e lapidação. Os processos de usinagem de precisão atuais foram intensivamente analisados e não foi encontrado registro de nenhum processo que utilizasse como ferramenta um rebolo abrasivo preparado pela operação de dressagem segundo o método do grau de recobrimento e tivesse uma cinemática de corte semelhante a da lapidação. A máquina projetada possui funções específicas e acionamentos automáticos que são esclarecidos neste trabalho. As principais características evidenciadas são a rigidez e eficácia de controle, que fornecem precisão e capacidade de corte estável.

## **1.2 Relevância do tema**

A necessidade da indústria por processos mais eficientes para proporcionar redução de custos tem motivado a realização de estudos que buscam esclarecer as características dos processos de acabamento final. No processo de retificação são explorados parâmetros de dressagem para controle do acabamento superficial e danos térmicos. Quando a retificação não pode proporcionar o acabamento superficial desejado, processos como a lapidação e o brunimento são utilizados. A lapidação possui problemas como a necessidade de operadores experientes, a preparação da máquina é complexa demandando tempo até que a condição de corte desejada seja estabelecida

gerando um alto custo de set-up e ainda há desperdício de abrasivos em estado útil durante a usinagem. Estudos recentes procuram adicionar maior controle ao processo porém a lapidação é complexa por ter um grande número de variáveis. Processos menos convencionais como o brunimento plano estão sendo recentemente estudados e muitas aplicações bem sucedidas tem sido relatadas. Em paralelo novos processos como a nano-retificação tem surgido para atender exigências da indústria de eletrônicos e computadores. A usinagem de ultra-precisão atualmente refere-se aquela que atinge tolerâncias de até 10 nm e rugosidade superficial de até 1 nm.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

Esse trabalho está dividido nos seguintes conteúdos:

- O Capítulo 2 é uma Revisão Bibliográfica que procura mostrar ao leitor as características dos processos de usinagem precisa.
- O Capítulo 3, Materiais e Métodos, desenvolve as particularidades do equipamento e do processo de lápidoretificação.
- O Capítulo 4, Considerações finais, apresenta um apanhado das principais características e recursos que a lápidoretificadora idealizada deve contar para satisfazer as necessidades do processo proposto.
- No Capítulo 5 são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.
- No Capítulo 6 são listadas as bibliografias utilizadas no trabalho.

## 2 Revisão bibliográfica

Nesse capítulo serão vistos, de uma maneira geral, os processos abrasivos mais convencionais de retificação e lapidação e menos convencionais como os processos de usinagem nanométrica e o brunimento plano. São abordadas as características de cada processo que estão relacionadas com o objetivo desse trabalho e evidenciados seus diferenciais e limitações.

### 2.1 Processos de usinagem

Os clientes dos fabricantes de equipamentos exigem cada vez mais eficiência com melhor desempenho e maior economia de energia. Isso leva ao projeto de componentes com melhor qualidade de acabamento superficial e com tolerâncias mais apertadas. Soma-se ainda a crescente concorrência no mercado de equipamentos, que obriga as indústrias a se preocupar com a redução de custos. Prova disso são produtos que vem diminuindo no tamanho e no peso e aumentando em eficiência.

Na fabricação de componentes precisos destaca-se a usinagem, que é uma técnica que envolve um grande número de processos de corte. Atualmente a tecnologia do corte é multidisciplinar e a economia desempenha um papel muito importante. Estudos recentes como BYRNE *et al*, 2003, concluem que deve haver uma forte integração entre o planejamento dos processos produtivos e a simulação dos processos industriais. Essa integração se dá pela análise virtual dos processos, pela análise funcional do produto, por algoritmos de controle do processo e inspeção e até pela consideração do fator humano.

BYRNE *et al* (2003) mostram o estudo de McKeown que traça a capacidade dos processos de usinagem em termos de precisão dimensional e rugosidade superficial, desde os anos 40 até o ano 2000 (Figura 1 e Figura 2).

BYRNE *et al* (2003) notam que os processos convencionais de usinagem como o torneamento e o fresamento tiveram um avanço em sua precisão com a integração do comando numérico, tolerâncias abaixo dos centésimos de milímetro podem ser obtidas. Nesses processos valores de rugosidade, Ra, na faixa de 1-0,5  $\mu\text{m}$  são comuns. Os processos convencionais mais precisos são a retificação, a lapidação e o brunimento, tolerâncias de milésimos de milímetro (1  $\mu\text{m}$ ) e rugosidades, Ra, inferiores a 0,1  $\mu\text{m}$  podem ser conseguidas. Tolerâncias inferiores a 1  $\mu\text{m}$  podem ser alcançadas com

processos especiais que existem há várias décadas como o torneamento com diamante e a retificação de precisão. Entretanto desenvolvimentos recentes nas áreas de eletrônicos e computadores geraram a necessidade de tolerâncias na escala nanométrica. Usinagem precisas se desenvolveram e tolerâncias de centésimos de micrometros foram alcançadas com rugosidades inferiores a 10 nm.

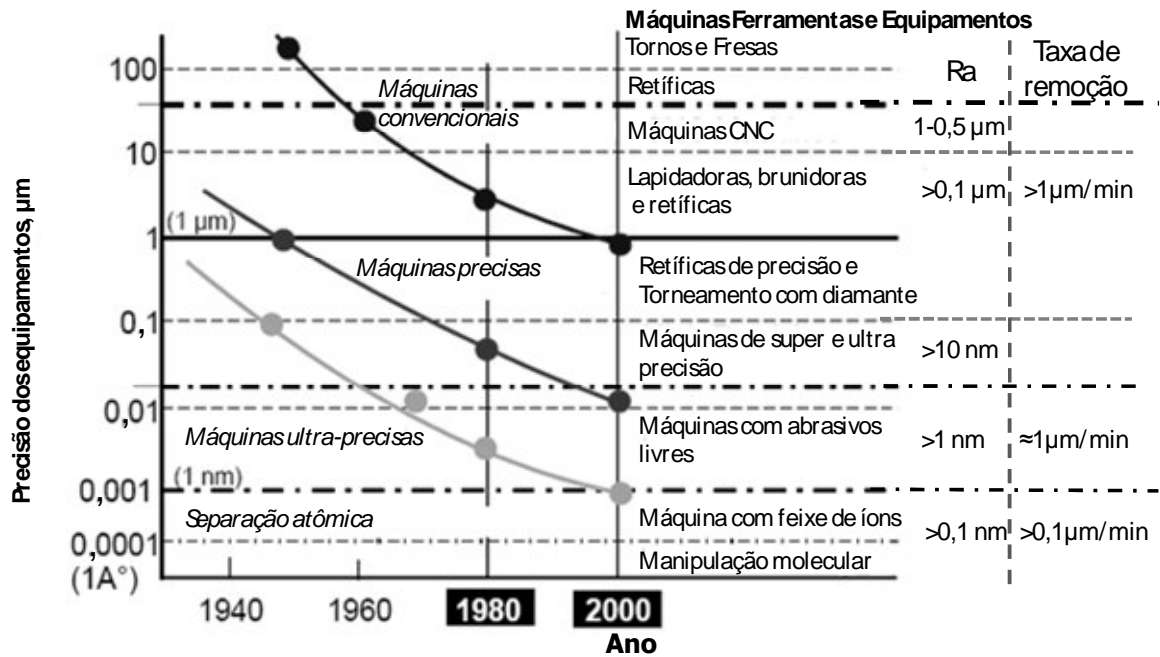


Figura 1 - Precisão dimensional dos diferentes processos de usinagem do ano 1940 até 2000, (Adaptado de Byrne *et al*, 2003)

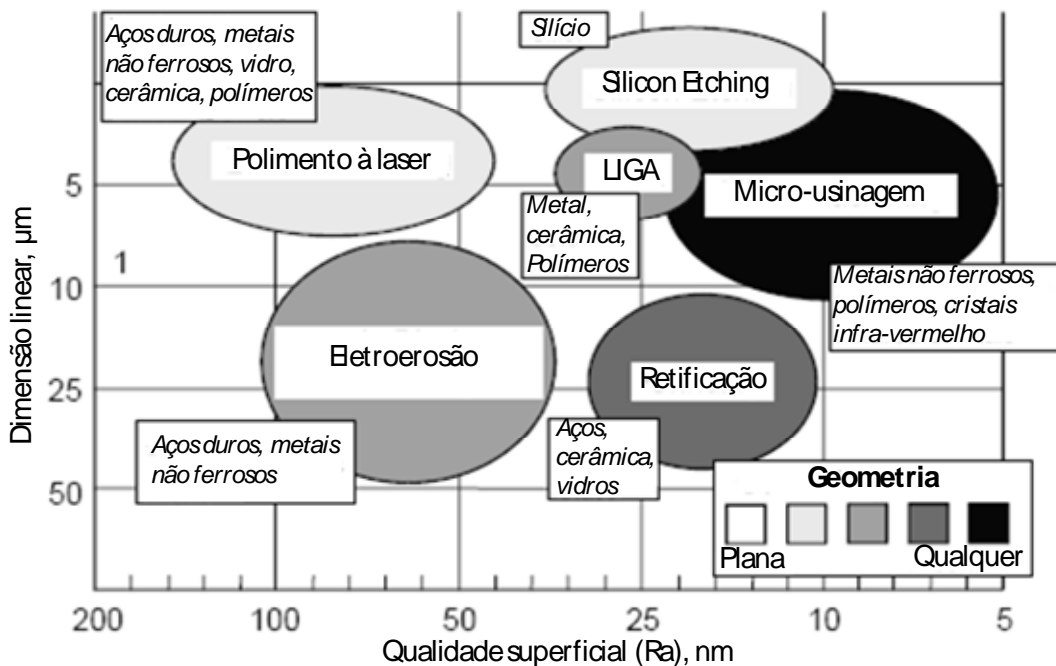


Figura 2 – Qualidade superficial dos diferentes processos de usinagem, (Byrne *et al*, 2003)

Atualmente métodos ultra-precisos que usam abrasivos livres trabalham com tolerâncias de milésimos de micrometros e rugosidades inferiores a 1 nm. BRINKSMEIER *et al.*, 2006, representaram a capacidade desses processos comparando com processos abrasivos convencionais como a lapidação e o polimento convencional para estruturas, Figura 3. Pode-se notar que os processos de polimento e lapidação convencionais têm limites de rugosidade na faixa dos 10 nm, enquanto o limite dos processos de polimento ultra-precisos é na faixa de 1 nm. Os processos que usam feixes de íons ou feixes de elétrons ou ainda a manipulação atômica podem superar os processos abrasivos alcançando rugosidades inferiores a 0,1 nm. As tolerâncias nesses casos podem ser de angstroms (Å). BYNER *et al* (2003) mostram a capacidade dos processos de polimento à laser, a eletroerosão (EDM) e os processos de micromecânica, de Litografia, Eletroformação e Moldagem (LIGA) e de corrosão de substrato em superfícies de silício (Silicon Etching), Figura 3.

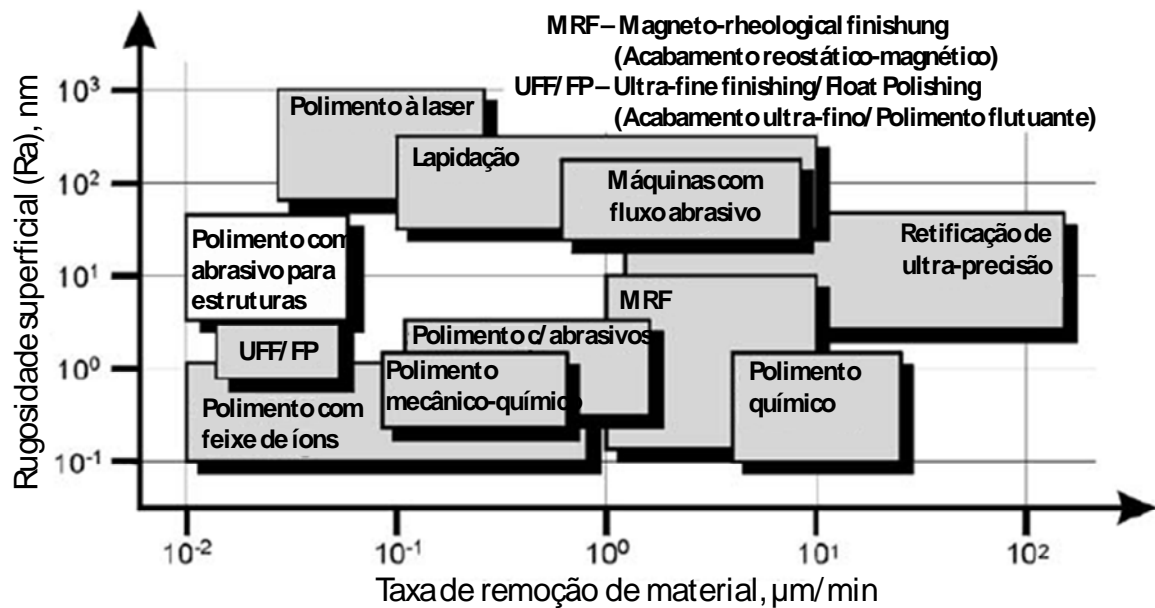


Figura 3 - Classificação dos novos processos de polimento comparando com os processos tradicionais, (BRINKSMEIER *et al.*, 2006)

## 2.2 A retificação, princípios, fundamento e limitações

A retificação é um dos processos abrasivos mais importantes na fabricação de precisão (HELLETSBERGER, H *apud* ODEBRECHT, O; 2003), ela corresponde com cerca de 20 a 25% do total de despesas com operações de usinagem em países industrializados (Malkin, 1989). Segundo DINIZ; MARCONDES & COPPINI (2001), o processo de retificação é empregado em operações de desbaste e semi-acabamento para posterior acabamento em processos como a lapidação e o polimento.

### 2.2.1 Princípios do processo de retificação

A operação de retificação utiliza como ferramenta um rebolo abrasivo, chamado de rebolo, que é constituído por múltiplos grãos abrasivos, distribuídos aleatoriamente e unidos por um ligante. A usinagem ocorre quando uma camada de material é removida pelo rebolo. No esquema da Figura 4, atuam duas forças no corte, uma força normal à superfície de contato rebolo-peça,  $F_n$  e uma força tangencial à superfície de contato,  $F_t$ .

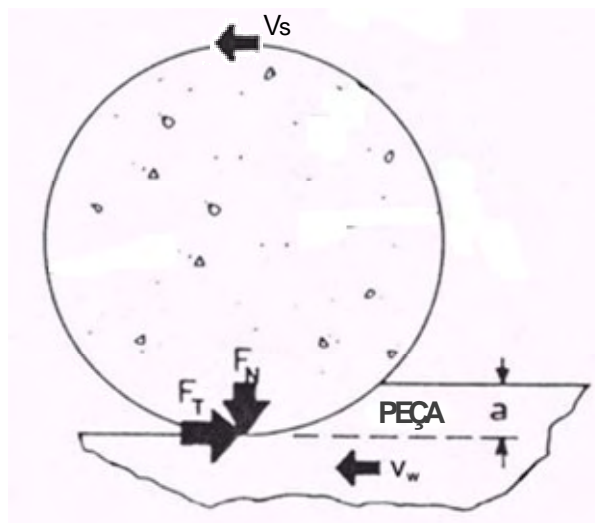


Figura 4 - Esquema da superfície de retificação superficial em uma retificação plana, (KING & HAHN, 1986)

Multiplicando  $F_t$  pela velocidade da peça tem-se a potência usada na retificação. Outras variáveis são a profundidade de corte  $a$  e a largura de contato  $B$ . Pode-se definir uma taxa de remoção volumétrica de material por:

$$Z = a \cdot v_w \cdot B \quad (I)$$

Porém como não existe um padrão para a largura do rebolo, a taxa de remoção é normalmente expressas por unidade de largura:

$$Z' = a.V_w \quad (II)$$

O símbolo para a taxa de remoção não é padronizado e pode ser encontrado escrito como:  $F'_n$ ,  $F'_t$ ,  $Z'_w$ ,  $Z'_s$ ,  $Q'_w$  ou  $Q'_s$

Segundo ODEBRECHT 2003 o mecanismo de remoção de material no processo de retificação foi descrito por König (1996) e Lang (1989). Inicialmente a aresta 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 da aresta na direção da superfície de incidência. A formação do cavaco tem início no momento em que o gume penetra na peça numa profundidade  $T_u$ , mostrada na Figura 5. Enquanto o cavaco se forma uma parte do material da peça continua sendo forçada para as laterais. A eficiência da remoção de material é determinada através da espessura efetiva de corte ( $h_{cu\text{ eff}}$ ), já que nem todo material deformado, representado pela espessura ( $h_{cu}$ ), é transformado em cavaco.

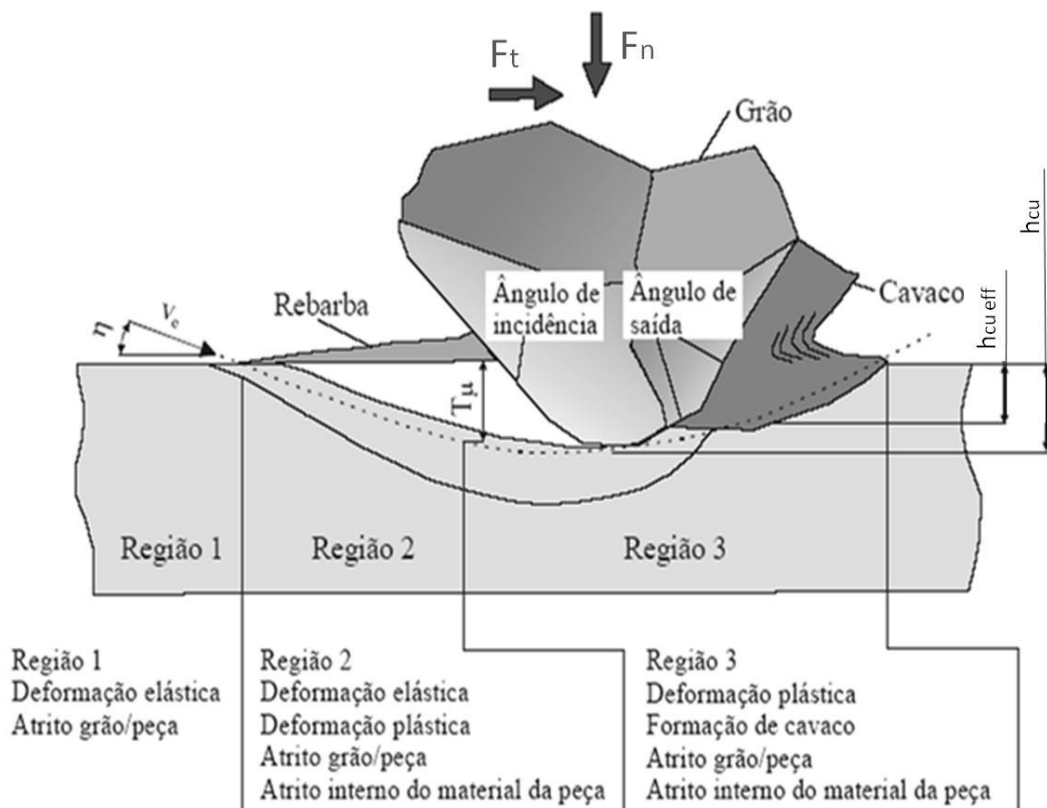


Figura 5 - Regiões de formação elástica e plástica na formação de cavaco (ODEBRECHT 2003)

## **2.2.2 Características dos Rebolos**

Os rebolos podem ser feitos de diferentes tipos de grãos abrasivos de elevada dureza e em variados tamanhos, unidos por material ligante, que pode ser resinóide, vitrificado ou metálico (MALKIN, 1989). Os rebolos podem ser convencionais, tais como óxido de alumínio ou carboneto de silício; ou superabrasivos, diamante e Nitreto Cúbico de Boro (CBN). As especificações que definem um rebolo são a forma do rebolo, o tipo de material abrasivo (tamanho e dureza) e o tipo de ligante.

Os rebolos superabrasivos são muito dispendiosos do que os convencionais, porém materiais duros como diamante e CBN sofrem menor desgaste, assim a utilização desses rebolos somente se justifica quando é realizada uma análise precisa da vida da ferramenta (INASAKI, 1998).

### **2.2.2.1 Material abrasivo**

A dureza, que é capacidade de resistir à penetração, é a principal propriedade de um abrasivo. Outras propriedades importantes são o atrito e a friabilidade. O atrito refere-se à ação de desgaste dos grãos, resultando em perda da capacidade de corte das arestas e cegamento do grão. A friabilidade é a capacidade de fratura dos grãos, sendo oposta à tenacidade (GARMO; BLACK & KOHSER, 1997). Segundo König & Messer (1980), o material abrasivo deve apresentar além de dureza extrema, estabilidade térmica e estabilidade química. No entanto, não há material abrasivo que satisfaça simultaneamente todos os requisitos, então a escolha do material abrasivo deve ser baseada nas condições de operação.

Os materiais abrasivos podem ser naturais ou sintéticos. Os naturais são o quartzo, o esmeril, o corindum, o diamante e a granada. Os abrasivos sintéticos podem ser convencionais, como o carbeta de silício, ou superabrasivos como o nitreto cúbico de boro (CBN) e o diamante policristalino (PCD) (MALKIN, 1989; SILVA JUNIOR & COELHO, 1998; DINIZ; MARCONDES & COPPINI, 2001).

O corindum é composto principalmente por óxido de alumínio cristalino ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), e difere-se de acordo com o seu grau de pureza, conforme a porcentagem de outros tipos de óxido presentes, como óxidos de titânio ( $\text{TiO}_3$ ) e os óxidos de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ).

O óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) é indicado para a retificação de materiais de alta resistência à tração tais como aço rápido, ferro fundido maleável, ferro fundido nodular, dentre outros. (KÖNIG, 1980; DINIZ; MARCONDES & COPPINI, 2001)

Um abrasivo freqüentemente empregado na indústria é o carboneto de silício (SiC). Caracteriza-se como um produto sintético obtido em forno de resistência a partir da fundição de areia de quartzo. As propriedades e composição do carboneto de silício dependem do grau de pureza existente e da posição relativa no forno de processamento. De acordo com a sua cor, classifica-se em carboneto de silício verde ou preto (KÖNIG, 1980). A seguir, tem-se a recomendação quanto ao seu emprego (DINIZ; MARCONDES & COPPINI, 2001):

- **Carboneto de silício preto:** aplicado para retificação de materiais de alta dureza (como o ferro fundido cinzento), materiais não-ferrosos (como o metal duro) e ligas não-metálicas;

- **Carboneto de silício verde:** é uma forma cristalina mais pura que o preto, apresenta maior facilidade de ruptura dos seus cristais. Indicado principalmente para a usinagem do metal duro.

Segundo GARMO; BLACK & KOHSER, 1997; DINIZ; MARCONDES & COPPINI, 2001, quando outros abrasivos não conseguem produzir o resultado esperado pode-se empregar o diamante, que apesar de ter custo muito elevado, possui a maior dureza (Knoop de  $8.000 \text{ kg/mm}^2$ ). Em operações de corte de pedras e cerâmicas, são empregados rebolos de diamante com ligantes metálicos, sempre com aplicação do fluido de corte (DINIZ; MARCONDES & COPPINI, 2001). Quando revestidos com uma quantidade de 50 a 60% em peso de níquel ou cobre, os rebolos de diamante apresentam melhorias na adesão grão-liga e a na transmissão de calor para o ligante. Para usinagem de metais duros ou para operações de precisão com ou sem fluido, são utilizados rebolos de diamante com ligantes resinóides.

O nitreto de boro cúbico (CBN) é utilizado principalmente para materiais ferrosos, como ferros fundidos e aços de alta dureza. Trata-se de um material de altíssima dureza, atingindo  $4700 \text{ kg/mm}^2$  na escala Knoop, equivalente 9,75 na escala Mohs de dureza. Apesar de ser menos duro que o diamante, o CBN é mais estável termicamente (temperatura de fusão de  $1.300^\circ\text{C}$  contra  $800^\circ\text{C}$  do diamante). Há dois tipos de CBN, o primeiro é recoberto por 60% em peso de níquel, sendo indicado para ferramentas com ligante resinóide, enquanto o outro que não apresenta recobrimento, é utilizado com ligantes vitrificados e metálicos.

### 2.2.3 Mecanismo de desgaste do rebolo

Segundo Malkin (1989), os três mecanismos principais de desgaste do rebolo são: desgaste por atrito, a fratura do grão abrasivo e a fratura do ligante, conforme mostrado na Figura 6.

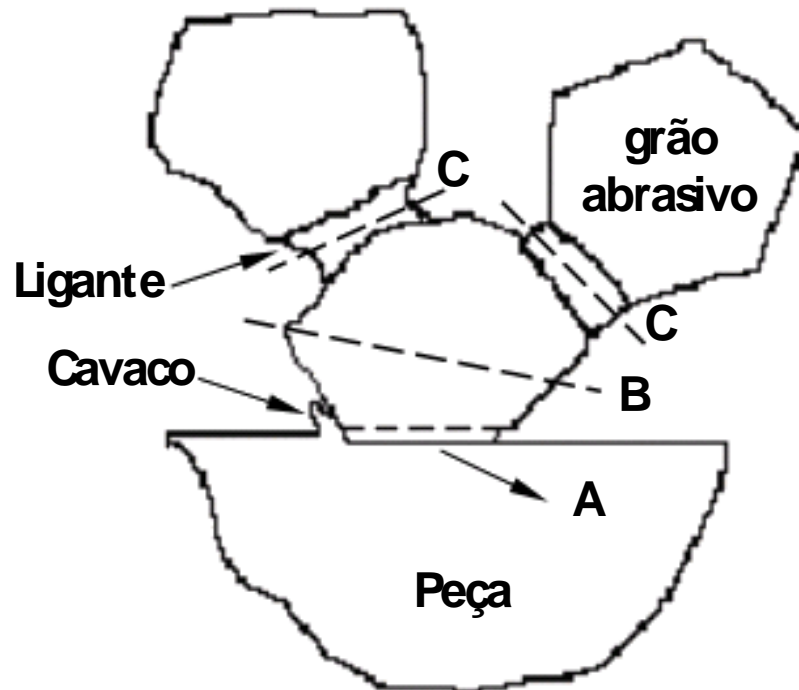


Figura 6 - Ilustração dos mecanismos de desgaste do rebolo: A – desgaste por atrito, B – fratura do grão abrasivo, e C – fratura do ligante, (MALKIN, 1989)

O desgaste por atrito envolve a perda da afiação dos grãos abrasivos e crescimento das áreas planas no rebolo devido ao atrito com a peça. A fratura do grão abrasivo provoca a remoção de fragmentos, enquanto a fratura do ligante ocorre por desalojamento do grão abrasivo inteiro devido aos esforços de corte. O outro tipo de desgaste é a erosão do ligante, que reduz a ancoragem dos grãos abrasivos e facilita a remoção destes (MALKIN, 1989).

Segundo Oliveira (1989), o rebolo ao longo de sua utilização sofre desgaste, perdendo sua agressividade, diminuindo a taxa de remoção de material e proporcionando acabamentos grosseiros. Outro efeito da perda da capacidade de corte são os danos térmicos. Segundo Malkin (1989), praticamente toda energia do corte é transformada em calor. Danos térmicos podem ser produzidos pelas elevadas temperaturas, queima superficial e transformações microestruturais. Esses danos realizam uma têmpera superficial, ou retêmpera quando o material já for temperado,

com a formação de martensita não-revenida, gerando tensões residuais de tração indesejáveis, reduzindo o limite de resistência à fadiga do componente usinado. Além disso, a expansão térmica da peça durante a retificação contribui para erros dimensionais e de forma no componente final. A capacidade de corte também pode ser prejudicada por partículas da peça presas na face do rebolo, essas partículas aderem de tal forma que o fluido de corte não consegue remover.

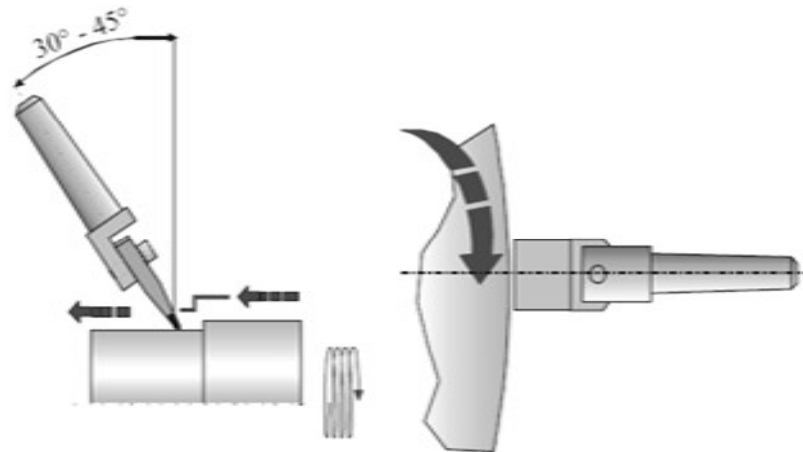
A capacidade de corte pode ser recuperada pelo condicionamento do rebolo através da operação de dressagem. Essa operação tem a finalidade de afiar o rebolo e evitar os danos térmicos. Para isso a superfície desgastada do rebolo é removida pela passagem de uma ferramenta sobre a superfície do rebolo em rotação. A camada desgastada cede lugar à uma nova camada de grãos abrasivos, restabelecendo assim a capacidade de corte, além de promover a concentricidade da face de trabalho em relação ao eixo de rotação e perfilar a face de trabalho conferindo-lhe a forma desejada. (OLIVEIRA, 1989; SILVA JUNIOR & COELHO, 1998). A operação de dressagem também remove as partículas da peça presas no rebolo pela restauração da camada de corte.

#### **2.2.4 A operação de dressagem e tipos de dressadores**

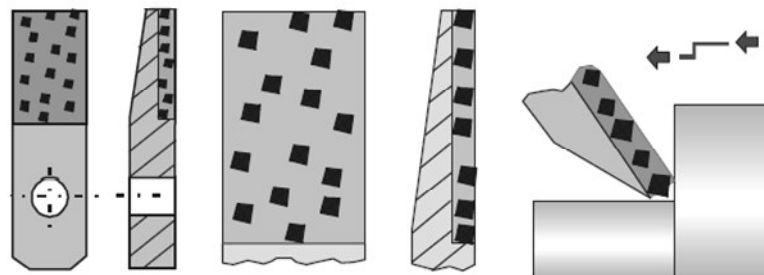
Na operação de dressagem são utilizadas ferramentas chamadas de dressadores. Existem dois tipos de dressadores: estáticos, que somente se movimentam tangenciando o rebolo; e dinâmicos, que além de transladar, rotacionam.

As ferramentas estáticas podem ter uma ou mais pontas de diamante, enquanto as dinâmicas (disco dressadores) são constituídas de liga metálica impregnada com diamantes, sendo o processo estático com ponta única o mais difundido na indústria e o mais estudado devido à facilidade de controle de variáveis (Malkin, 1989 e Sanchez, 1992). Esse dressador de ponta única é constituído de um suporte rígido no qual é fixado um diamante. Apesar de ser o mais utilizado, esses dressadores desgastam-se rapidamente quando utilizados em rebolos duros ou de grande largura de face. Outros dressadores fixos como os de diamantes conglomerados e os tipo *fliese* apresentam maior resistência ao desgaste. Os dressadores aglomerados são constituídos por pequenos diamantes de forma irregular posicionados numa matriz metálica, como o contato com o rebolo depende de vários diamantes não se consegue controlar o

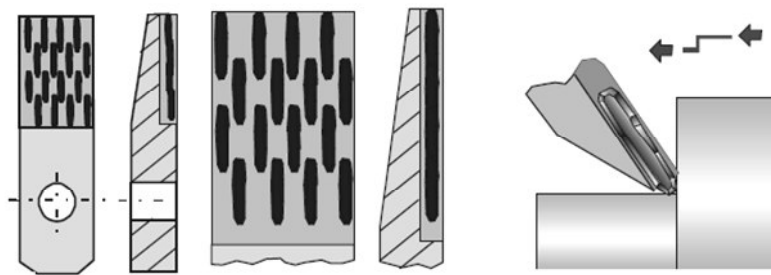
resultado da dressagem e conseqüentemente o acabamento gerado pelo processo. Já os dressadores tipo *fliese* possuem um largura efetiva menor que os aglomerados, o que permite resultados semelhantes aos obtidos com os de ponta única. Existem três variações do dressador *fliese*: com diamantes naturais, com diamantes em forma de grão de arroz e com diamantes sintéticos.



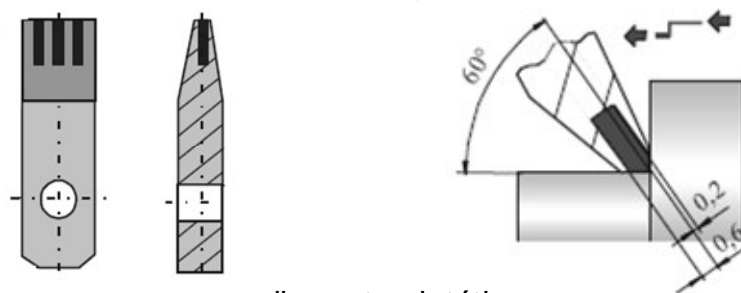
Forma de aplicação dos dressadores tipo *fliese*



com diamantes naturais



com diamantes tipo "grãos de arroz"



com diamantes sintéticos

Figura 7 - Forma de aplicação das variações dos dressadores tipo *fliese*, (adaptado de ODEBRECHT, 2003)

Os dressadores atuam no rebolo de maneira análoga ao torneamento, sendo o rebolo a peça e o dressador a ferramenta. A técnica consiste em fixar a ferramenta na mesa de trabalho e movimentá-la, com velocidade constante, sobre o rebolo (MALKIN, 1989; SANCHEZ, 1992).

A geometria do dressador é fator de grande influencia na operação, e baseado nisto foram definidos a profundidade de dressagem ( $ad$ ), o passo de dressagem ( $Sd$ ) e a largura de atuação do dressador ( $bd$ ). König (1980) é quem inicialmente caracterizou as relações entre o resultado da retificação e a dressagem através da definição do grau de recobrimento ( $Ud$ ):

$$Ud = bd/Sd \quad \text{(III)}$$

A Figura 8 mostra a região de contato entre o rebolo e o dressador com as principais grandezas envolvidas na operação de dressagem.

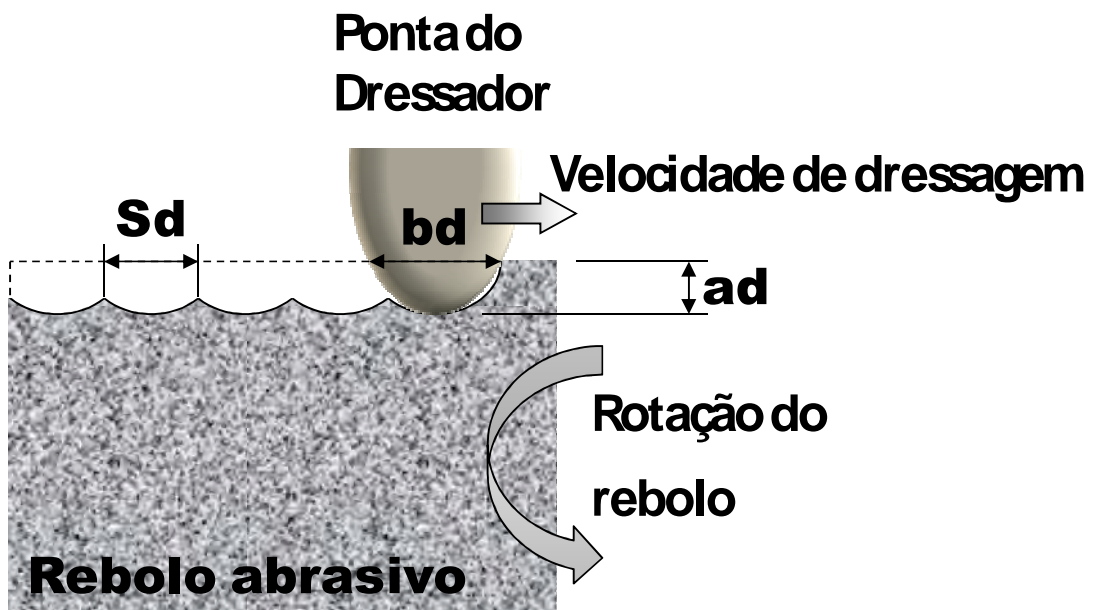


Figura 8 - Parâmetros da operação de dressagem

König (1980) notou que a agressividade máxima do rebolo era obtida com o grau de recobrimento igual a um ( $Ud = 1$ ) e a mínima foi observada com 3 ( $Ud = 3$ ). Oliveira (1989) experimentou valores de  $Ud$  a partir de 0,7 e concluiu que para operações de maior remoção de material, onde o acabamento não é importante,

aconselha-se trabalhar com Ud próximo a unidade, enquanto que para operações onde o acabamento é importante, aconselha-se trabalhar com Ud entre 4,0 e 5,0.

### 2.2.5 Macro e microefeitos de dressagem

Durante a operação de dressagem, os grãos do rebolo são cortados e fraturados pela atuação do dressador, além disso é gerada uma rosca na superfície do rebolo. Desta forma, surgem dois efeitos que são classificados como: macroefeito e microefeito de dressagem (OLIVEIRA, 1989; SILVA JUNIOR & COELHO, 1998).

O microefeito é a formação de novas arestas de corte pelo arrancamento dos grãos desgastados (com baixa ancoragem na liga) e pela fratura dos grãos que não se desgastaram por completo. A agressividade das arestas depende das condições de dressagem e da friabilidade (capacidade de formar novas arestas de corte quando fraturado) do grão abrasivo. O fenômeno do microefeito está relacionado, portanto, com o tipo de aresta que é formada nos grãos abrasivos durante a operação de dressagem, podendo ou não tornar o rebolo mais agressivo (OLIVEIRA, 1989; SILVA JUNIOR & COELHO, 1998). Verkerk & Pekelharing apud Oliveira (1989) afirmam que a agressividade das arestas depende da friabilidade do grão e também das condições da operação. Na dressagem fina são utilizados  $a_d$  e  $S_d$  pequenos. Desta forma, partículas muito pequenas são removidas ou fraturadas, o que causa a criação de planos nas superfícies de corte dos grãos, tornando-os menos agressivos. Na dressagem grosseira, com  $a_d$  e  $S_d$  elevados, grandes partes do grão são quebradas e arestas afiadas maiores se formam.

Já o macroefeito é a rosca formada sobre a superfície do rebolo. A altura dos filetes dessa rosca tornam a superfície mais agressiva. Oliveira (1989) completou os estudos de König expressando o macroefeito através da ondulação teórica da superfície ( $W_t$ ), mostrada a seguir:

$$bd = \sqrt{8rp \times ad} \quad (\text{IV}),$$

$$bdr = \sqrt{2rp \times ad} + Sd/2 \quad (\text{V}),$$

$$W_t = Sd^2/8rp, \text{ somente para } Sd < bd \quad (\text{VI}).$$

Onde:  $rp$  é o raio da ponta da ferramenta de diamante,

$b_{dr}$  é a largura real de atuação do dressador e

$W_t$  é a ondulação teórica da superfície.

Substituindo a equação (I) na (IV) obtém-se:

$$W_t = ad/Ud^2, \text{ com } Ud \geq 1 \quad (\text{VII})$$

A

Figura 9 mostra essas variáveis na operação.

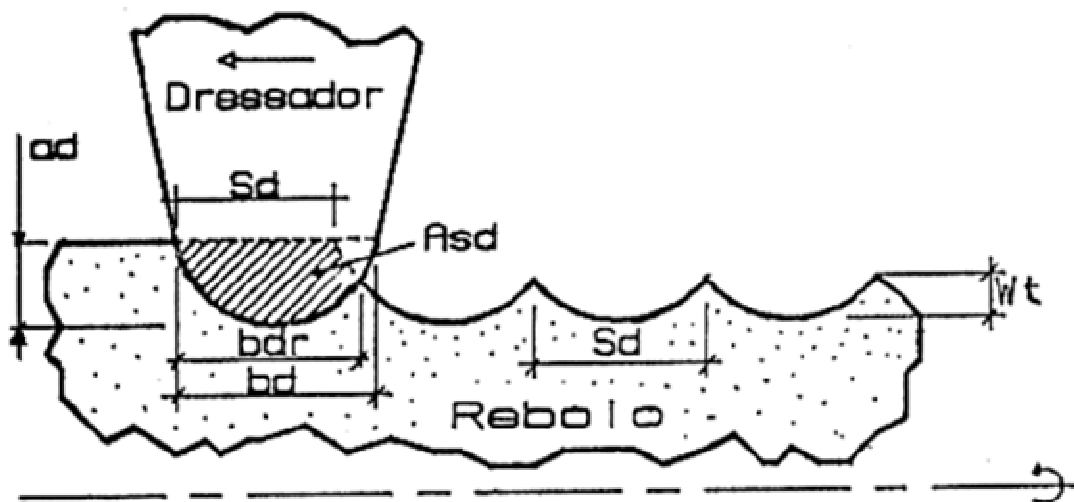


Figura 9 - Região de contato entre dressador e reboleto, Oliveira (1989)

Assim fixada a profundidade de penetração do dressador, as ondulações do reboleto são inversamente proporcionais ao quadrado do grau de recobrimento. Oliveira notou que a equação (V) somente é válida para valores de  $Ud$  maiores ou iguais a unidade, pois caso contrário as ondulações do reboleto são iguais a profundidade de penetração  $ad$ . Na Figura 10 são representadas topografias de rebolos dressados com diferentes faixas de  $Ud$ .

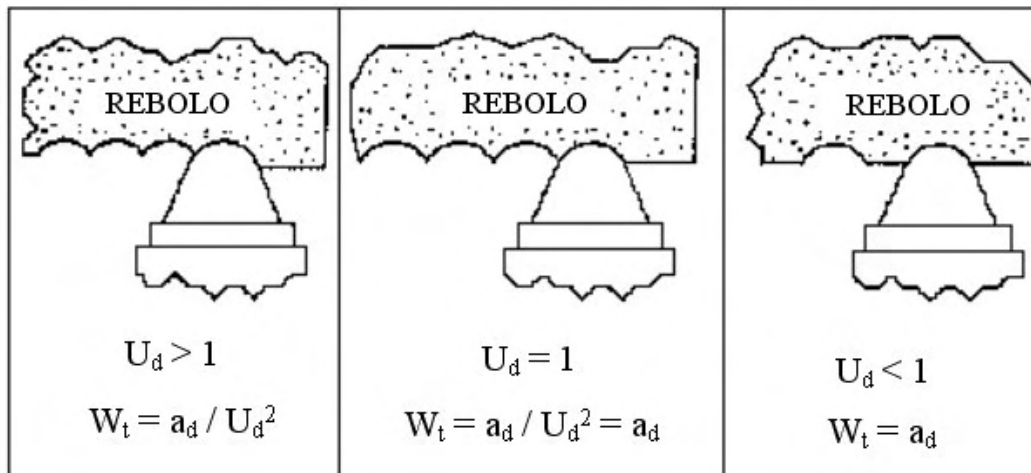


Figura 10 - Ação do grau de recobrimento na topografia do reboLO, Oliveira (1989)

### 2.2.6 Restrições do processo de retificação

Apesar da retificação ser o processo mais utilizado para promover acabamento e forma finais em componentes de precisão existem algumas restrições ao bom funcionamento do processo.

A temperatura na região de contato entre a ferramenta e a peça é bastante alta, segundo Malkin, 1989, a energia envolvida na remoção de material é transformada em calor concentrado dentro da região de corte. Esse aquecimento torna indispensável a utilização de grandes quantidades de fluido de corte. Estes fluidos de corte são utilizados para otimizar a usinagem através do aumento da ação lubrificante e refrigerante na região de corte. Mas atualmente se visa diminuir ou até mesmo anular o uso dos fluidos de corte. As justificativas para isso incluem os custos operacionais, questões ecológicas, exigências legais de conservação do meio ambiente e a preservação da saúde, já que os fluidos de corte podem transmitir doenças e contaminar o meio ambiente.

Entretanto, mesmo com a ação dos fluidos de corte as elevadas temperaturas na região de contato com a ferramenta podem produzir vários tipos de danos térmicos à peça. Os danos térmicos na retificação são entendidos como as modificações das características físicas e/ou químicas da superfície retificada como também das regiões que se encontram abaixo desta superfície (região subsuperficial). Distintos termos foram utilizados para poder denominar este fenômeno, Malkin (1989) o identifica como queima da peça e König (1980) como camada limite. Para atenuar a restrição do dano

térmico é geralmente necessário reduzir a potência de retificação, o que pode ser obtido com a redução da taxa de remoção ou com uma dressagem mais grosseira, porém ambas tem suas desvantagens.

Segundo Malkin, 1989, além dos danos térmicos as elevadas temperaturas da zona de retificação geram expansão térmica da peça o que contribui para o aumento dos erros dimensionais e de forma no componente final. Isso é crítico para peças delgadas, que podem sofrer empenamento.

Outros fatores que afetam tolerâncias dimensionais incluem deflexões da máquina, expansão e distorção térmica da máquina, desgaste do rebolo e vibrações. Muitos dos fatores que afetam as tolerâncias dimensionais também afetam tolerâncias de forma. Contudo os erros de forma mais significativos são associados com desgaste excessivo do rebolo, especialmente quando se retifica formas em seções transversais com canais ou quinas.

Processos de retificação são freqüentemente selecionados devido à necessidade de satisfazer requerimentos de rugosidade superficial e tolerância. Quando existem exigências no acabamento superficial além dos parâmetros do processo de retificação, os parâmetros da operação de dressagem se tornam muito influentes. Segundo Malkin (1989) uma dressagem mais fina pode causar maiores forças, mas a rugosidade superficial é melhorada, o que pode ser praticável se as restrições de potência de retificação e danos térmicos não forem violadas. Superfícies mais lisas podem também ser obtidas usando rebolos de grãos mais finos, contudo este pode também conduzir a maiores forças ou maiores taxas de desgaste do rebolo.

As restrições da retificação estão ligadas portanto à capacidade do processo promover acabamento superficial e tolerâncias finas sem comprometer a resistência superficial da peça trabalhada. Quando a retificação não atinge tais exigências a lapidação e o brunimento podem ser adotados, porém isso freqüentemente está ligado a alterações significativas de custo.

## **2.3 A lapidação, seus fundamentos e suas variáveis de controle**

Segundo DINIZ; MARCONDES & COPPINI (2001) a lapidação e o polimento são processos de acabamento final empregados após operações de desbaste e semi-acabamento do processo de retificação.

A lapidação possui um mecanismo de remoção de material distinto da retificação e uma quantidade de variáveis que dificulta o controle do processo.

### **2.3.1 História do surgimento dos processos abrasivos**

O primeiro mecanismo de remoção de material utilizado pela humanidade foi a abrasão. Desde os primórdios esse processo já era empregado para a fabricação de utensílios, ferramentas e armas. Segundo Stähli (1985), a lapidação talvez seja o mais antigo dos processos de usinagem, remontando inclusive à Idade da Pedra, como mostrado no artefato da Figura 11. Utilizando-se este aparato rudimentar eram produzidos furos em rodas de pedras com o auxílio de areia, funcionando como um abrasivo, e uma vara pressionada e rotacionada contra a superfície. Esse processo fundamentava-se numa combinação de fricção, velocidade e força.

Com a descoberta dos metais forjados, a lapidação ficou em desuso até se demandar alta qualidade de acabamentos superficiais como na fabricação dos blocos padrões utilizados na calibração de instrumentos e medição de peças. Porém o conhecimento do processo manteve-se em segredo com os fabricantes por um longo tempo. A lapidação somente tornou-se popular com a introdução de novas tecnologias usadas em outras aplicações, como na área da óptica. Mesmo com esse avanço a lapidação era cara e inexata. A técnica da lapidação manual não satisfazia os anseios da indústria. Na Segunda Guerra Mundial enormes demandas de qualidade, intercambiabilidade e de produção em massa, e mais tarde seguida pela indústria automobilística trouxeram a lapidação para o conjunto dos processos de usinagem industrial (Stähli, 1985).

Farago em 1980 confirma que a lapidação restringiu-se a produção de instrumentos como blocos padrões, calibres passa-não-passa e paquímetros até a década 80, porém a partir desta data, o processo desperta interesse de pesquisadores e fabricantes de componentes de precisão.

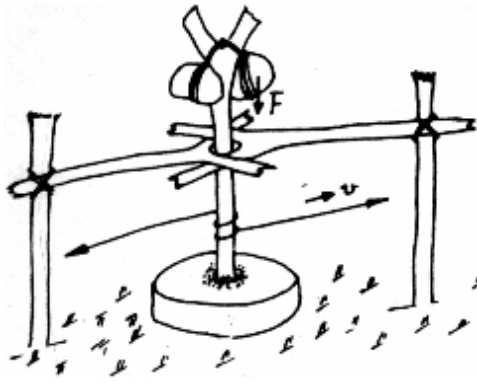


Figura 11 - Modelo de lapidação utilizado na Idade da Pedra, (Stähli, 1985)

### 2.3.2 Definição do processo de lapidação

A lapidação é um processo de usinagem envolvendo grãos abrasivos dispersos em um meio de lapidação, capaz de transferir para a peça a forma da ferramenta de lapidação através da remoção promovida pelos grãos que descrevem movimentos aleatórios sobre a superfície da peça (KÖNIG, 1980).

Os principais componentes de uma lapidadora plana são: disco de lapidação, anel de condicionamento de peças (anel dressador) e carga de lapidação. Estes componentes podem ser observados na Figura 12.

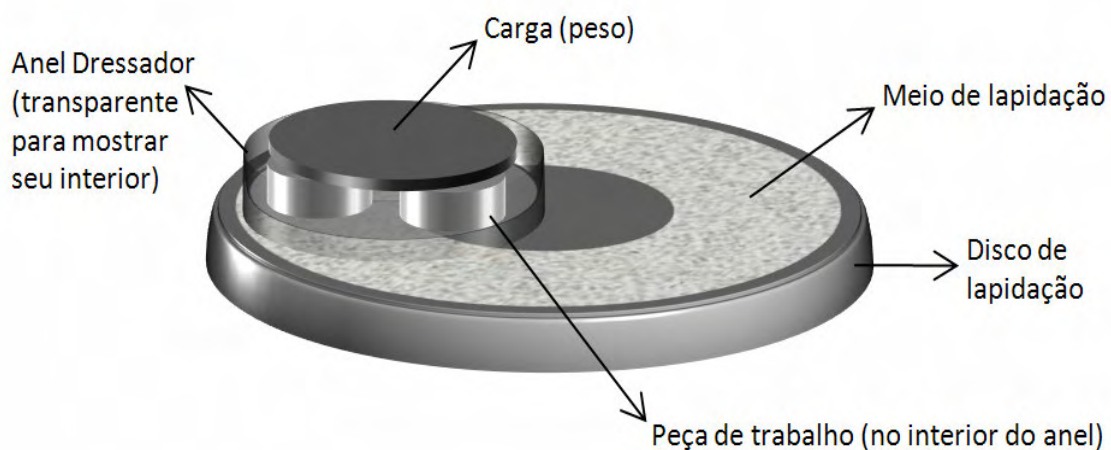


Figura 12 - Esquema do princípio básico do processo de lapidação de peças planas

O disco de lapidação e o anel dressador possuem as funções de: conter as peças de trabalho, rotacionar as peças durante a usinagem, manter a planicidade e transferi-la à peça, conformar o meio de lapidação em um fino filme com distribuição uniforme das

partículas abrasivas para assegurar a perfeita acomodação do disco com a superfície plana da peça, eliminar o material removido na usinagem e guiar a carga que pressiona o disco.

Apesar desses elementos mecânicos participarem do processo, o agente primordial do processo é o tipo de abrasivo e a forma como ocorre a remoção de material (Stähli, 1985).

### 2.3.3 Mecanismo de remoção de material da lapidação

A forma a ser produzida é transmitida à peça pelo disco de lapidação, devido ao movimento relativo entre este e a superfície da peça e a pasta (formada pela mistura de grãos abrasivos e fluido) colocada entre as duas superfícies. A planicidade desses discos pode ser continuamente corrigida por anéis armazenadores de peças mais duras que eles, que em contato permanente desgastam o disco, permitindo considerável repetibilidade dimensional e paralelismo. Em alusão a essa propriedade o anel também é conhecido como anel dressador (Figura 13).

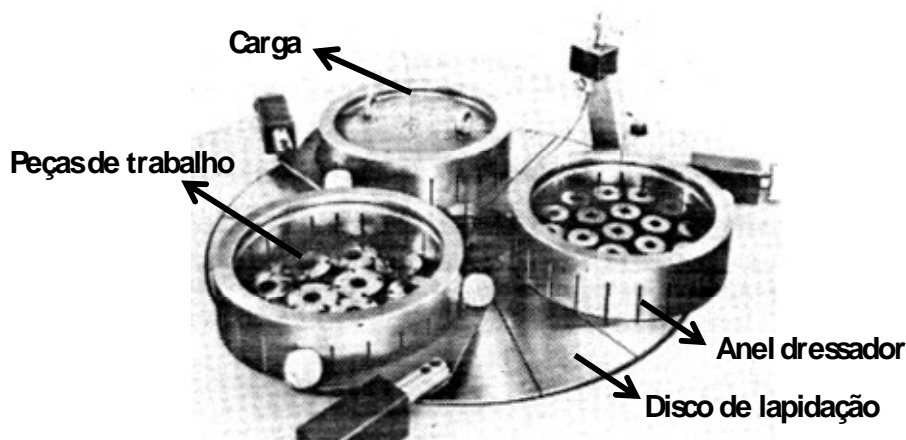


Figura 13 - Exemplo de anel dressador, (Stähli, 1985)

O anel dressador é impulsionado pelas forças de atrito atuantes entre ele e o disco de lapidação, sendo que a intensidade destas forças é influenciada pela velocidade do disco de lapidação e pela carga aplicada. As forças de atrito produzem rotações na mesma direção que o disco de lapidação, e com aproximadamente a mesma velocidade. É importante notar que a velocidade do anel dressador influencia consideravelmente a taxa de remoção e o acabamento superficial da peça usinada.

### 2.3.3.1 Trajetórias desenvolvidas sobre o disco de lapidação

Uma característica marcante na lapidação é o aparecimento de trajetórias cicloidais de movimento dos pontos individuais da peça em relação ao disco de lapidação, que lhe transmite a forma (SPUR & SABOTKA, 1991).

Stähli (1985) analisa essa composição de movimentos representando com vetores horizontais brancos, na Figura 14, as velocidades tangenciais do disco de lapidação em dois pontos extremos (A e B). Essas velocidades tangenciais crescem com o distanciamento do centro do disco, ou seja, com o aumento do raio. As setas curvas das representam as velocidades angulares do disco de lapidação e do anel dressador.

Os vetores horizontais pretos representam as velocidades tangenciais do anel dressador. Essas velocidades tangenciais aumentam com o distanciamento do centro do disco, porém nas posições inferiores ao centro do disco possuem mesmo sentido da velocidade angular desse disco, e nas posições superiores possuem sentido oposto. A Figura 14(a) representa somente as velocidades nos pontos extremos.

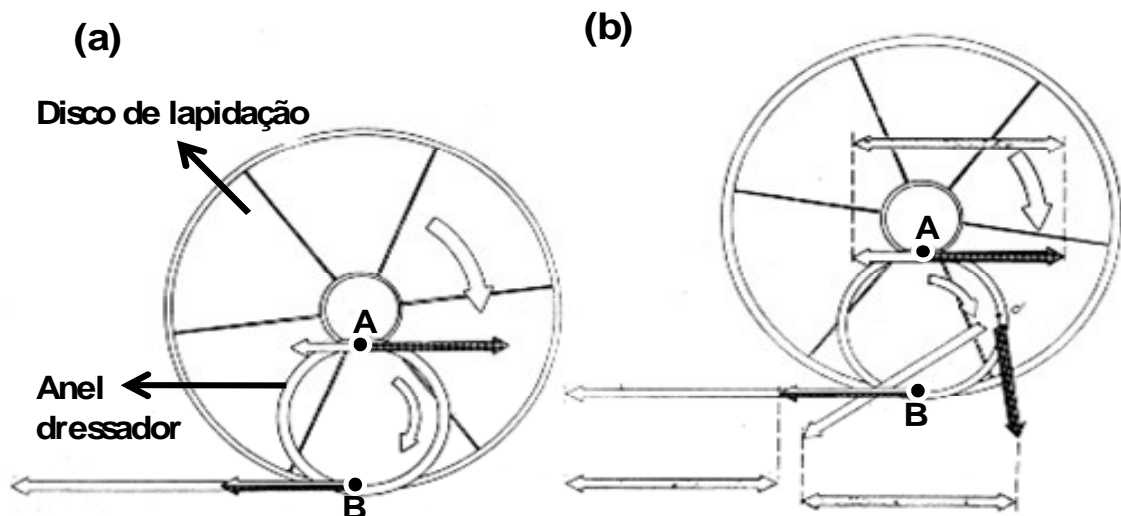


Figura 14 - Velocidades tangenciais do disco de lapidação (vetor branco) e do anel dressador (vetor preto), (Stähli, 1985)

Se as velocidades angulares do disco de lapidação e do anel dressador forem iguais, a taxa de remoção de material nos diferentes pontos do disco será idêntica.

Essa hipótese é confirmada na prática, e para entender como o anel e o disco atuam é necessário somar os vetores das velocidades tangenciais. Na região inferior ao centro do anel que abrange o diâmetro externo do disco, os vetores de velocidade são encobertos na mesma direção, e a quantidade de “trabalho” é assim proporcional à

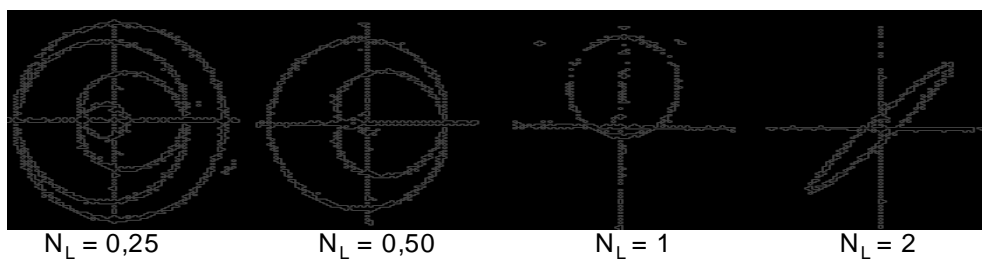
diferença entre eles, Figura 14(b). Na região superior ao centro do anel que abrange o diâmetro interno do disco, os dois vetores de velocidade estão em sentidos opostos, então a quantidade de “trabalho” é proporcional à soma dos dois, Figura 14(b).

Entretanto a diferença do primeiro caso é exatamente igual à soma do segundo caso, e assim a quantidade de “trabalho”, i.e., o material removido, são iguais. Isso ocorre em toda extensão do disco proporcionando as mesmas taxas de remoção.

A trajetória cicloidial dos pontos na peça de trabalho também é conhecida como movimento planetário, por ser compostos da rotação tanto do disco abrasivo como da peça de trabalho presa em um dispositivo excêntrico que gira em torno de seu próprio eixo. As ciclóides geradas possuem diferentes padrões que dependem das velocidades e dos sentidos de rotação. A relação  $N_L$ , que também é conhecida por lambda, é usada para caracterizar o tipo de ciclóide gerado.

$$N_L = \frac{n_{anel\ dressador}}{n_{disco\ de\ lapidação}} \quad (VIII)$$

Se a rotação do anel dressador ( $n_{anel\ dressador}$ ) possuir a mesma velocidade e sentido da rotação do disco de lapidação ( $n_{disco\ de\ lapidação}$ ) a relação  $N_L$  é igual à unidade e a trajetória de um único ponto do anel sobre o disco é uma circunferência. A Figura 15 mostra outras trajetórias em outros padrões de ciclóides.



**Figura 15 - Trajetória de um único ponto do anel sobre o disco, em função de  $N_L$ , (Stähli, 1985)**

Como mostrado no estudo vetorial feito por Stähli, 1985, para a relação  $N_L$  igual a unidade as velocidades dos grãos abrasivos são iguais em todos os pontos de contato e conseqüentemente a taxa de remoção é igual em qualquer trajetória. Variando o valor de  $N_L$  passam a existir regiões que sofrem maior desgaste como mostrado na Figura 16.

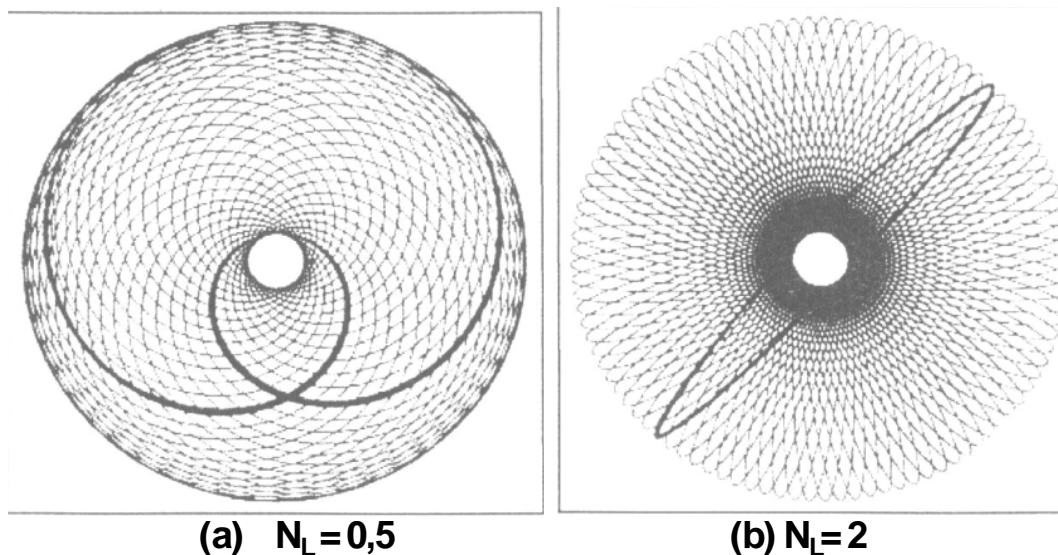


Figura 16 - Representação de desgaste do disco de lapidação, (Stähli, 1985)

Analisando a Figura 16, observa-se que determinadas regiões sofrem maior desgaste que outras para valores de  $N_L$  diferentes da unidade.

Sanchez, L.E.A., Losnak, C., Perez, F.R., (1999) também estudaram as trajetórias de um ponto da peça na lapidação. A Figura 17 mostra um exemplo de padrão da trajetória de um ponto descrito pela peça sobre o disco de lapidação.

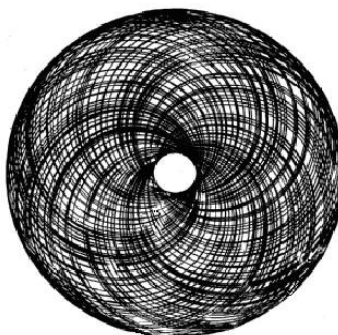


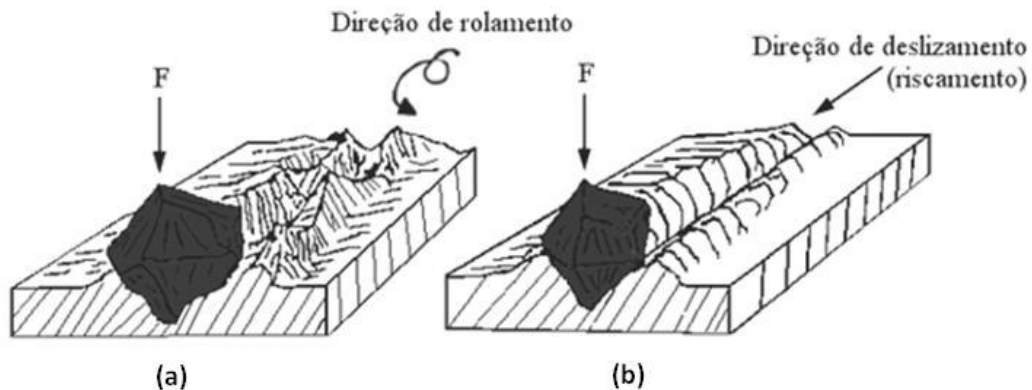
Figura 17 - Exemplo do padrão descrito por um ponto da peça sobre o disco de lapidação (Sanchez, L.E.A., Losnak, C., Perez, F.R., 1999)

### 2.3.3.2 Tipos de remoção de material

Durante o movimento planetário os grãos abrasivos atuam entre o disco de lapidação e a peça de trabalho removendo material. Há dois mecanismos diferentes de remoção de material na lapidação de metais. O mecanismo básico é a formação de cavacos como resultado do rolamento de grãos abrasivos individuais na região ativa

entre o disco de lapidação e a superfície da peça, também conhecida como “abrasão de três corpos”. Nesta situação os picos do grão são comprimidos na camada do material dúctil, provocando a liberação de finas camadas do material da peça como resultado de uma deformação de cisalhamento microplástico repetitiva e contínua, que excede a resistência do material, como pode ser observado na Figura 18(a) (SPUR & SABOTKA, 1991; YUAN et al., 2003).

O outro mecanismo observado é a adesão temporária de grãos no disco de lapidação, resultando em remoção de cavacos na região da camada da superfície metálica devido ao movimento relativo existente, é chamada por muitos autores como “abrasão de dois corpos”. Estes mecanismos também são decisivos para o desgaste do disco de lapidação metálico, como pode ser visualizado na Figura 18(b).



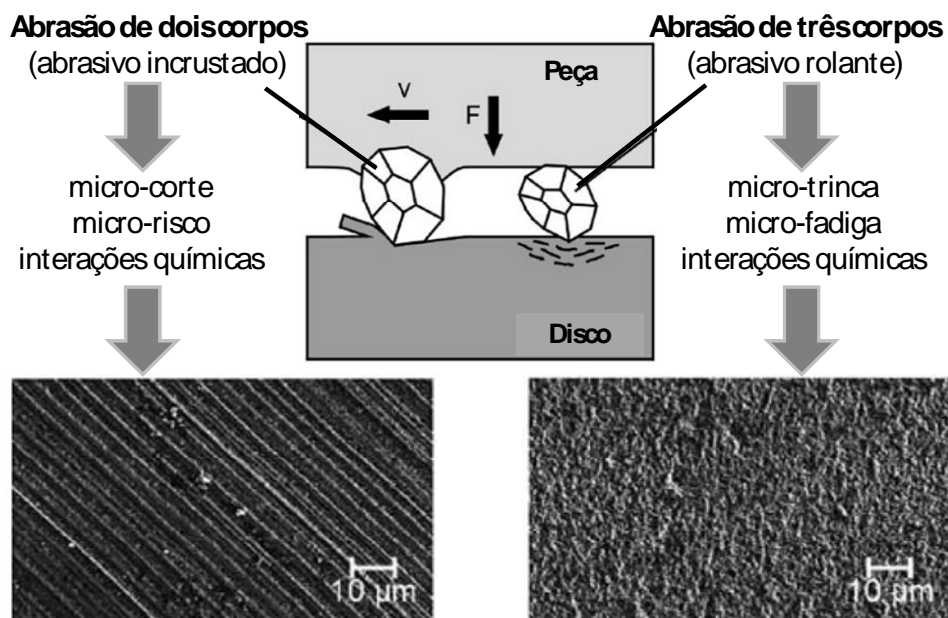
**Figura 18 - Esquema da deformação plástica (a) e do corte (b) nas diferentes direções das partículas, (STÄHLI, 1985)**

Estudos em cristais de quartzo realizados por Yuan et al., 2003, mostram que no processo de lapidação, há uma estreita relação entre o efeito da ação dos abrasivos e a propriedade do material do disco. Materiais do disco mais dúcteis provocam o embutimento do grão abrasivo, resultando em abrasão de dois corpos, enquanto que para materiais mais duros, essa ocorrência é mais rara. As micro-trincas (“*micro-cracks*”) são as principais responsáveis pela remoção do material de quartzo pela lapidação e são produzidas na superfície do cristal de quartzo devido à ação dos abrasivos. Quanto maior a carga, maior as trincas. As ações de rolamento dos abrasivos produzem indentações com micro-trincas e as ações de micro-corte dos abrasivos produzem arranhões com trincas sob a superfície.

Brinksmeier E. *et al.*, 2006, estudaram elementos ópticos estruturais feitos de vidro ou polímeros. Nesses componentes uma alta precisão é necessária. Existem processos precisos como torneamento com diamante e retificação de precisão,

entretanto em muitos casos um polimento subsequente é necessário para atingir a rugosidade superficial esperada e remover marcas que causam desvio da luz. Uma rugosidade superficial menor que 1nm e desvios de forma nanométricos podem ser alcançados em superfícies planas e esféricas, entretanto em superfícies estruturais isso ainda não é conhecido. Esses autores mostraram também as diferentes topografias das superfícies obtidas na lapidação e no polimento (Figura 19).

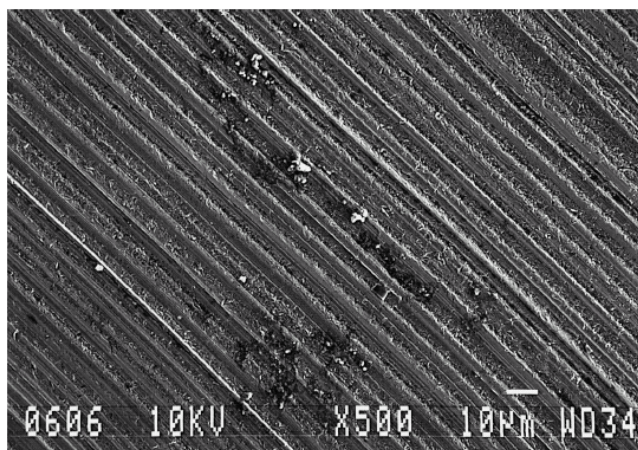
A remoção de material é feita por uma abrasão de dois-corpos quando abrasivos estão incrustados e deslizam sobre a superfície ou de três-corpos quando abrasivos livres rolam sobre a superfície. Superfícies gastas pela abrasão de dois-corpos apresentam ranhuras paralelas enquanto a abrasão de três-corpos gera micro-crateras.



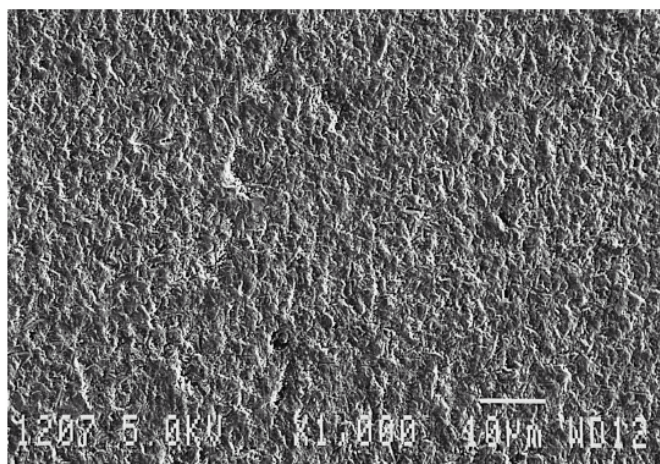
**Figura 19 - Mecanismos de remoção de material com abrasivos livres, (BRINKSMEIER E. et al., 2006)**

TREZONA et al., 1999, estudou também o mecanismo de desgaste na lapidação. Observou que o mecanismo de dois corpos é dominante na condição de alta carga e/ou baixa concentração de abrasivos. Este processo ocorre quando uma quantidade significativa de partículas abrasivas adere à superfície do disco e agem como ferramentas fixas, produzindo uma série de sulcos na superfície da peça. Os autores afirmam ainda que os espaçamentos dos sulcos correspondem ao tamanho dos grãos abrasivos, conforme se pode observar na Figura 20. Enquanto o mecanismo dominante em baixa carga e/ou alta concentração da pasta é o processo de três corpos, em que os grãos abrasivos não aderem à superfície do disco de lapidação, mas rolam entre as duas

superfícies, produzindo uma grande deformação, gerando uma superfície de desgaste em múltiplas indentações sem uma direção definida. Na Figura 21 apresenta-se uma foto de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de uma superfície em que se desenvolveu um desgaste abrasivo de três corpos.



**Figura 20 - Foto da superfície de aço ferramenta desgastada no mecanismo de abrasão de dois corpos obtida por microscópio eletrônico de varredura – MEV, (TREZONA *et al*, 1999)**



**Figura 21 - Foto da superfície de aço ferramenta desgastada no mecanismo de abrasão de três corpos obtida por microscópio eletrônico de varredura – MEV, (TREZONA *et al*, 1999)**

Descrevendo ainda os mecanismos de remoção de material, Spur e Sabotka (1991) complementam que em materiais frágeis a deformação plástica é limitada, resultando num destacamento submicroscópico. Além dos mecanismos descritos acima, os efeitos de processos tribológicos e químicos também contribuem no processo. As reações químicas são ativadas através do meio entre os componentes ativos. A investigação do comportamento tribológico mostrou que o atrito e o desgaste não são somente influenciados pelas propriedades físicas, mas também pelas químicas dos

materiais em contato, bem como pelo meio intermediário e condições ambientais. Além disso, as condições do ataque como tipo de movimento, velocidade de deslizamento e temperatura podem ter influência sobre o comportamento tribológico.

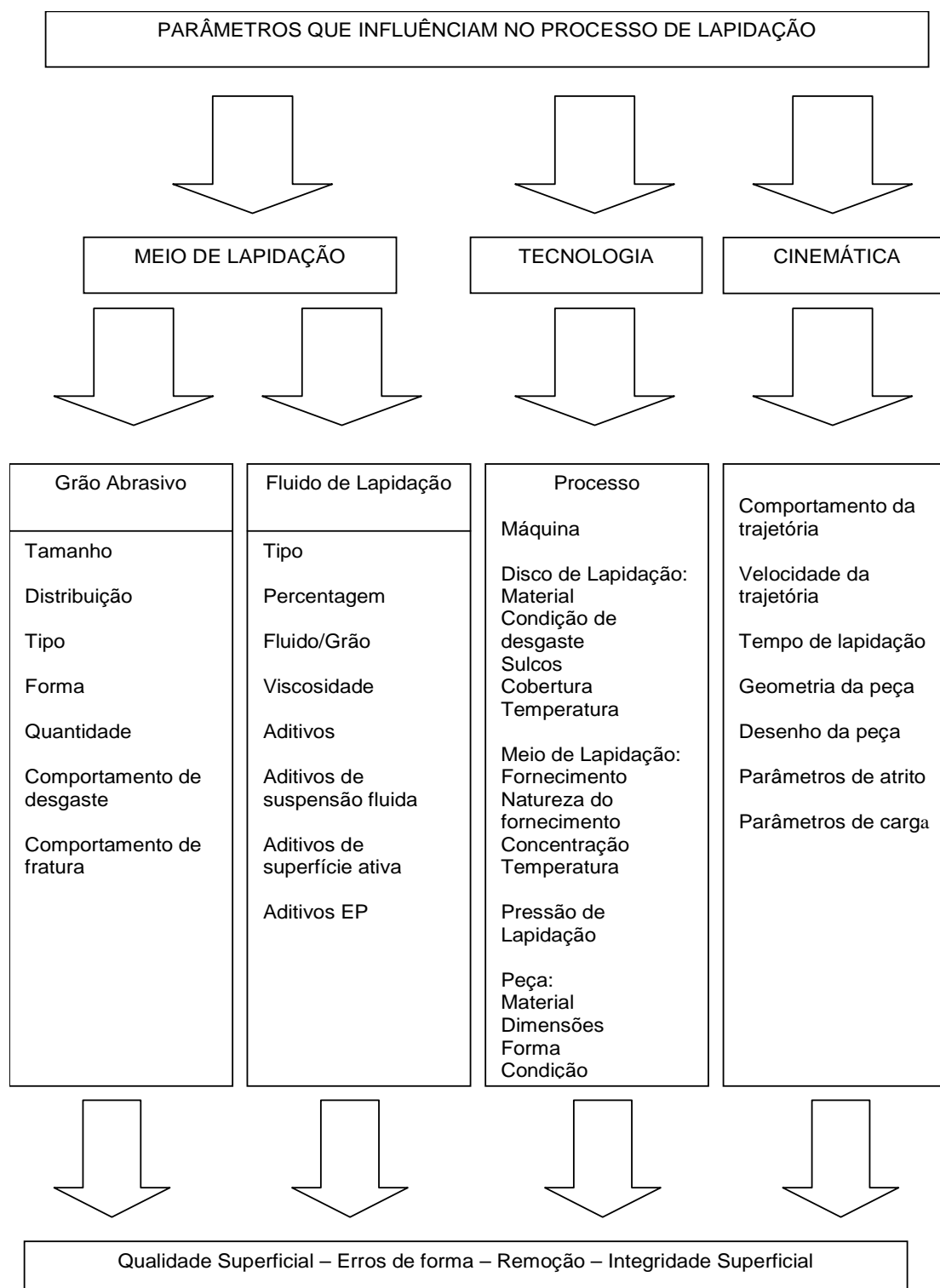
#### **2.3.4 Variáveis do processo de lapidação**

Pelo grande número de variáveis, a lapidação é considerada um processo complexo. Dentre as variáveis do processo Spur e Sabotka (1991) destacam o tipo de grão abrasivo (tamanho, distribuição, forma, quantidade e friabilidade) e o fluido de lapidação (tipo, relação fluido/grão abrasivo e viscosidade). Quanto às variáveis tecnológicas, os autores citam a pressão de lapidação, o material da peça, do disco de lapidação (dureza e porosidade) e do anel dressador. No entanto, as variáveis cinemáticas, relacionadas à trajetória do grão abrasivo na superfície da peça, desempenham papel importante como a densidade e a distribuição dos riscos produzidos na peça, o comprimento da trajetória, a velocidade do disco, e o tempo de usinagem.

Com tantas variáveis atuando, a lapidação exige que o operador da máquina tenha habilidade e uma vasta experiência com relação ao processo. A simulação da cinemática da operação de lapidação representa um primeiro passo em direção à solução desta dificuldade. Os resultados dos trabalhos recentes sobre os aspectos de simulação relacionam-se principalmente à definição de um critério de adequação cinemática de máquinas planas para determinação da velocidade de trajetória e do desgaste do disco de lapidação. Porém, atualmente, ainda despense-se muito tempo para a preparação da máquina, o chamado “set-up”, tornando o processo demasiadamente oneroso.

Verspui & With (1997) relatam que a combinação da variação de cada elemento caracteriza a usinagem. Do ponto de vista das características da máquina-ferramenta e da operação, a lapidação é um processo de fácil executabilidade. Entretanto, o domínio e a otimização dos parâmetros influentes é uma tarefa dispendiosa, devido ao grande número de variáveis envolvidas no processo.

Spur & Sabotka, 1991 e Yuan, 2003, relatam que alterações nas variáveis do processo exercem grande influência no resultado final, como no acabamento geométrico e superficial, erros de forma e na taxa de remoção, como mostrado na Figura 22.



**Figura 22 - Parâmetros que influenciam a operação de lapidação, (Spur & Sabotka, 1991).**

### 2.3.5 Influências das variáveis

A lapidação, por possuir um elevado número de variáveis, exige experiência na operação e no set-up. No preparo do processo procura-se ajustar a taxa de remoção e o acabamento superficial dentro de padrões viáveis. Pesquisadores tem procurado quantificar a influência de cada uma das variáveis do processo.

Martin & Matsunaga apud König & Messier (1980) verificaram que o aumento da taxa de remoção é aproximadamente proporcional ao aumento da granulometria, porém esse aumento é muitas vezes maior quando relacionado ao aumento da pressão de trabalho. A pressão empregada na lapidação exerce grande influência sobre a taxa de remoção e sobre o comportamento da rugosidade.

A

Figura 23(a) mostra que, na usinagem de um aço frágil, a taxa de remoção aumenta constantemente até uma pressão de 160 kPa para o mesmo tempo de usinagem, porém para pressões maiores do que 160 kPa, a taxa de remoção decresce (KÖNIG, 1980). A forma das curvas se deve ao colapso do processo ao atingir uma pressão de saturação, o que não permite a remoção dos grãos gastos e a retirada dos cavacos da região de usinagem.

Conhecendo a condição do processo, é possível otimizar a pressão de lapidação, produzindo peças com custos de usinagem mais baixo. Ainda de acordo com DAVIS apud KÖNIG, 1980, a redução da taxa de remoção poderia ser evitada se fosse possível a alimentação contínua do meio de lapidação, porém isso acarretaria prejuízo ao acabamento superficial da peça.

Yuan et al., 2003, notaram que na usinagem do quartzo a taxa de remoção é proporcional á pressão. Quando se aumenta a pressão, a força que cada grão exerce na superfície da peça aumenta relativamente, assim como o comprimento da trinca abaixo da superfície, o que resulta em aumento da taxa de remoção. De acordo com o autor, há uma pressão ideal de trabalho. Caso esta pressão seja ultrapassada, a peça de quartzo pode romper (

Figura 23, b).

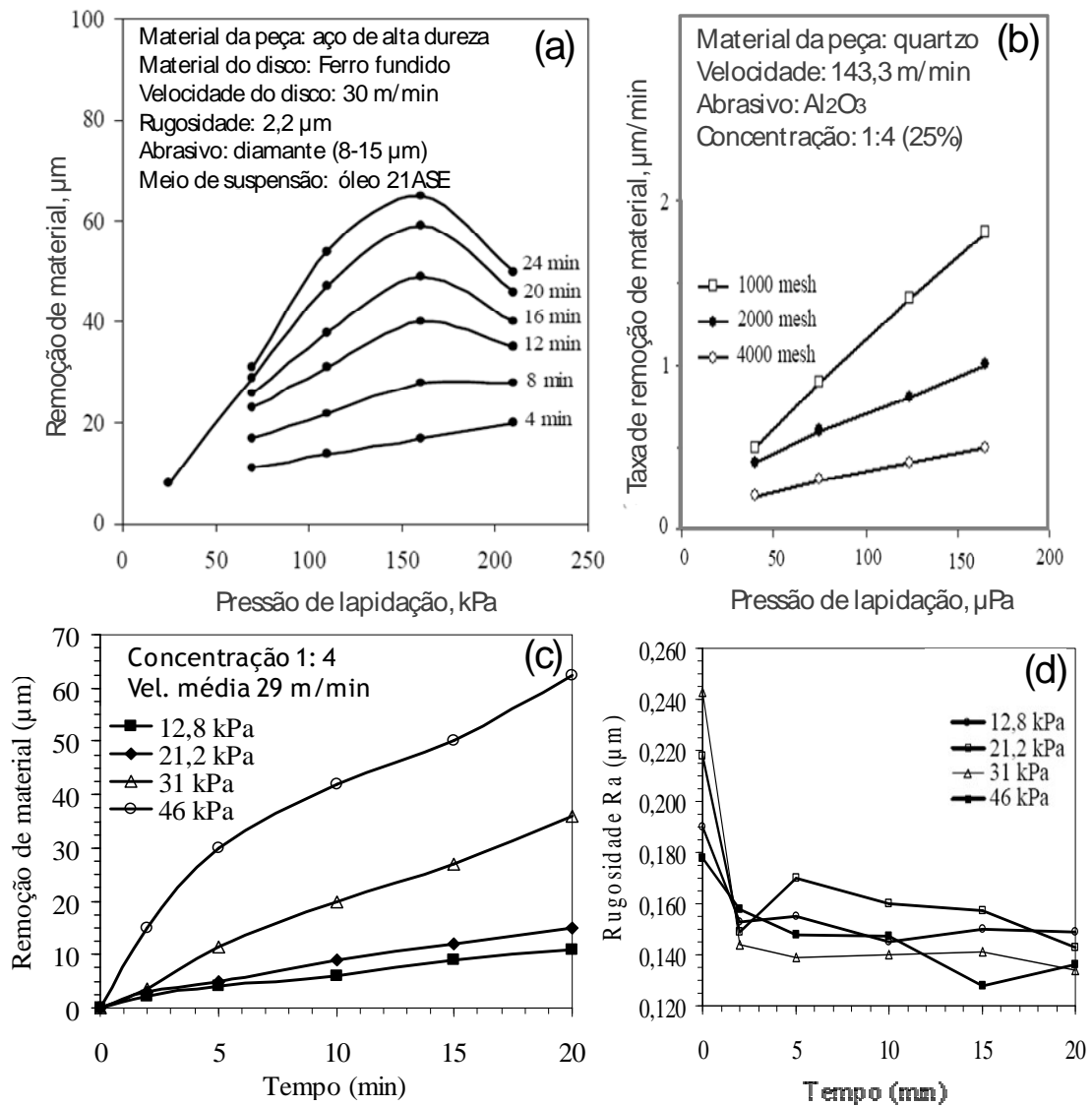
Crichigno Filho (1994); Verspui & With (1997) afirmam que a remoção aumenta com o aumento do tempo de lapidação para diferentes pressões de ensaio. Essa tendência pode ser explicada pela alimentação contínua das partículas abrasivas, o que resulta na renovação do meio de lapidação na fenda de trabalho e, conseqüentemente,

mantendo a capacidade de corte. A remoção de material é mais intensa no início do processo por causa da remoção dos picos de rugosidade inicial oriundos do processo de retificação, como se pode observar na

Figura 23(c).

Crichigno Filho (1994) afirma que com relação a rugosidade Ra, em função do tempo de usinagem, da

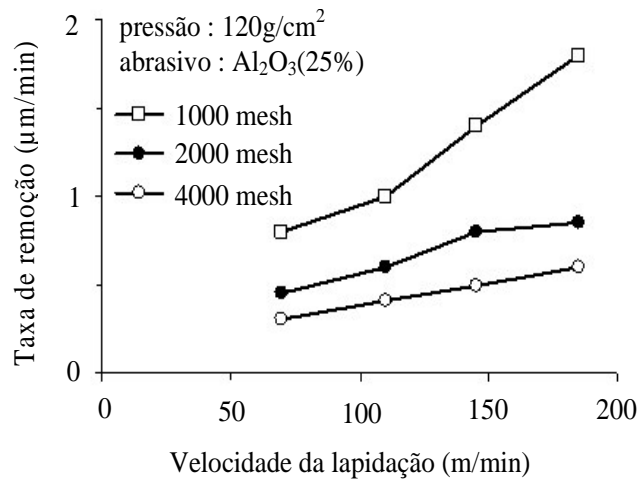
Figura 23(d), há uma tendência de queda rápida de rugosidade nos instantes iniciais de lapidação, independente da pressão e da rugosidade inicial.



**Figura 23 - Influência da pressão de lapidação na remoção de material e na rugosidade, (adaptado de (a) DAVIS apud KÖNIG, 1980; (b) YUAN et al., 2003 (c) CRICHIGNO FILHO, 1994 (d) CRICHIGNO FILHO, 1994)**

Yuan et al., 2003, mostraram a influência da velocidade de lapidação sobre a taxa de remoção nas peças de quartzo (Figura 24). Quanto maior a velocidade, mais

extensas são as micro-trincas da usinagem provocadas pela ação dos abrasivos por unidade de tempo, aumentando assim a remoção. Eles afirmam ainda que quanto maior a velocidade, menor a rugosidade.



**Figura 24 - Influência da velocidade de lapidação sobre a taxa de remoção, (YUAN, 2003)**

Segundo GARMO; BLACK & KOHSER,1997, o abrasivo utilizado na lapidação possui variações de tipo, tamanho (granulometria), forma e concentração, sendo que cada uma dessas variações influencia de modo diferente no processo. O tipo do abrasivo tem as características de dureza, atrito e friabilidade e estão relacionados com a dureza no material usinado.

A granulometria afeta diretamente o acabamento e a taxa de remoção, sendo que se utilizam grãos mais grossos para uma usinagem de desbaste e posteriormente grãos mais finos para o acabamento. Entretanto não há necessidade de substituir os grãos grossos por finos para se atingir o acabamento desejado. Devido a sua friabilidade, durante o processo de lapidação, os grãos abrasivos mais grossos fraturam-se progressivamente reduzindo o seu tamanho. Se esta técnica é empregada, deve haver uma tolerância de material suficiente para a lapidação, para então os sulcos mais profundos formados inicialmente pelos grãos mais grossos serem removidos pelos grãos fraturados. (GARMO; BLACK & KOHSER,1997).

O tamanho dos grãos mais comumente utilizados na lapidação varia de 100 a 1000 mesh. Entretanto, não é raro o emprego de grãos de tamanho variando de 50 a 3800 mesh, ou até mais finos (GARMO; BLACK & KOHSER, 1997). Quando um certo tamanho de abrasivo é usado, alguns dos grãos serão menores e outros maiores que o tamanho especificado. A faixa de variação destes grãos é um importante

parâmetro na seleção de qualquer abrasivo. O preço dos mesmos aumenta com a restrição desta faixa de variação.

Yuan et al. (2003) verificaram que quanto mais finos os grãos abrasivos, menores os riscos e os comprimentos das micro-trincas, resultando em menores valores de rugosidade. Porém, neste caso menor é a taxa de remoção de material. A Figura 25 mostra a taxa de remoção e a rugosidade em relação ao tamanho do grão abrasivo.

Crichigno Filho (1994) estudou a concentração, ou seja, a proporção entre o abrasivo e o óleo. Foi obtida uma concentração (4:1) que resultava na máxima remoção de material, como pode ser observado na Figura 26.

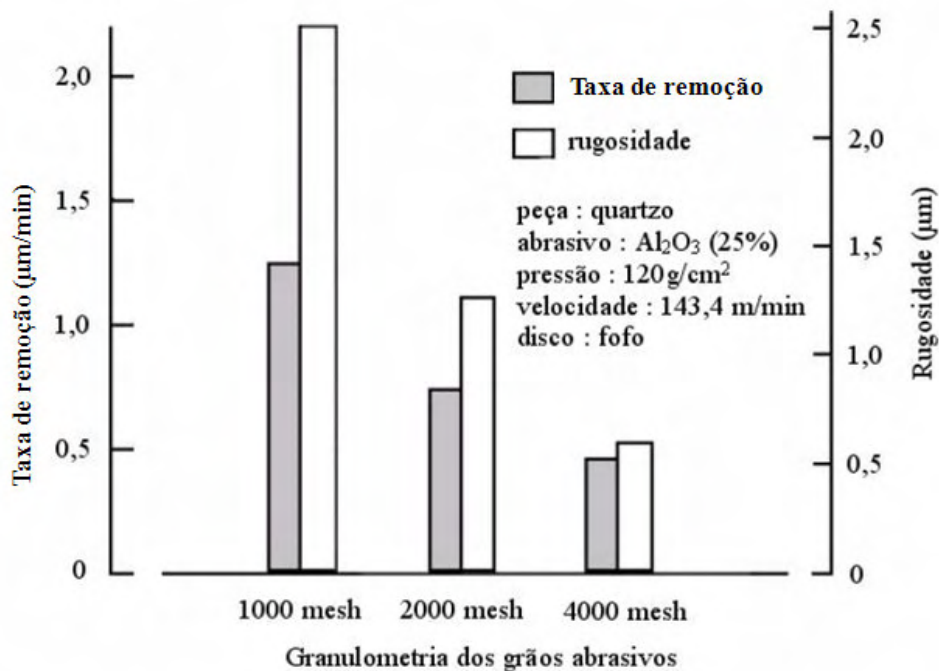


Figura 25 - Remoção de material e rugosidade em relação ao tamanho do grão abrasivo, (YUAN et al., 2003).

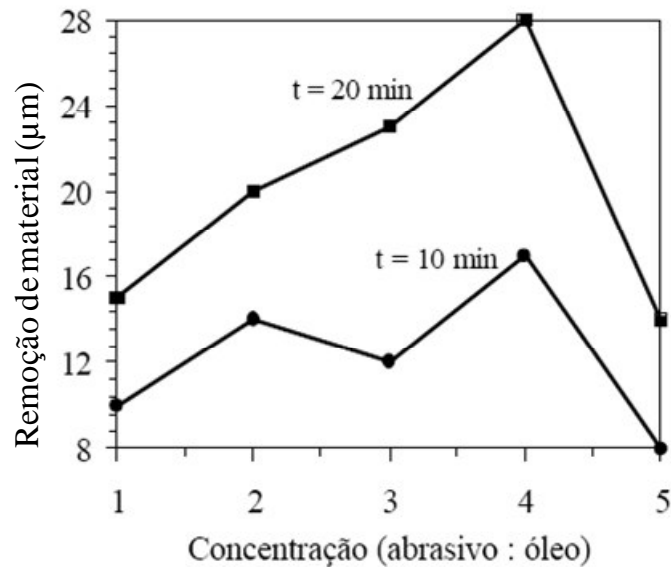


Figura 26 - Remoção de material em relação à concentração, (CRICHIGNO FILHO, 1994).

## 2.4 O processo de brunimento plano

BYRNE *et al* (2003) classificam a retificação e a lapidação como processos industriais convencionais, máquinas não convencionais são classificadas como super e ultra precisas. Entre os processos super precisos destaca-se um denominado de brunimento plano cujas características se assemelham ao processo de lápidoretificação, tema desse trabalho.

### 2.4.1 Definições do processo de brunimento plano e exemplos de aplicações

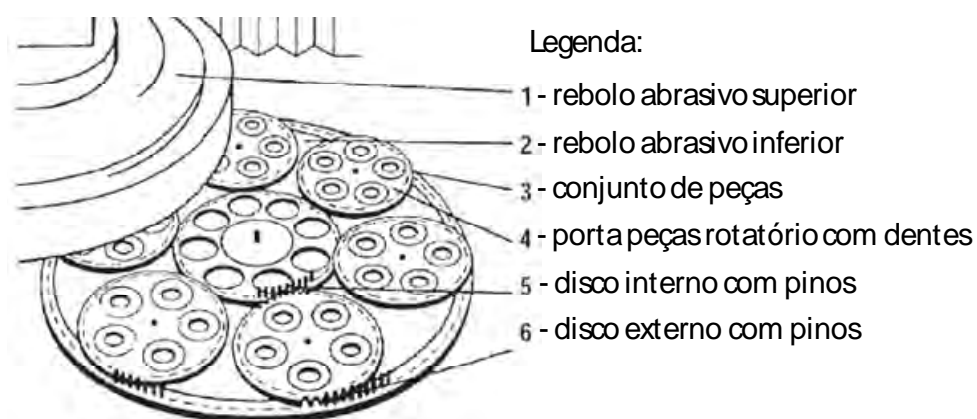
Na última década, nos anos 90, difundiu-se nos EUA e Europa um processo abrasivo de grãos fixos, no qual as peças e o disco abrasivo produzem movimento relativo análogo ao da lapidação. O rebolo empregado é composto de pastilhas ou grandes segmentos feitos de CBN (Nitreto de Boro Cúbico) ou, então, de diamante. Este processo industrial, que permite a usinagem de grande número de peças, assume diferentes denominações não estando ainda claramente padronizado. Os fabricantes de máquinas o denominam “fine grinding” (retificação fina) ou “flat honing” (brunimento plano). Na literatura, pode ser tratado por diferentes autores como “fine grinding” (Tönshoff *et al*, 1998 e Mackensen *et al*, 1997, Marinescu *et al* 2006), “flat honing” (Stähli, 2000 e Beyer & Ravenzwaaij, 2005), “face grinding on lapping machine” (Ulhman & Ardelt, 1999) e “high speed lapping” (Yang *et al*, 2007). Em francês o

processo é conhecido por “La Rectirodologie”, que livremente traduzido significa ciência da retificação e lapidação (“rectifier”= retificação, “roder”=lapidação).

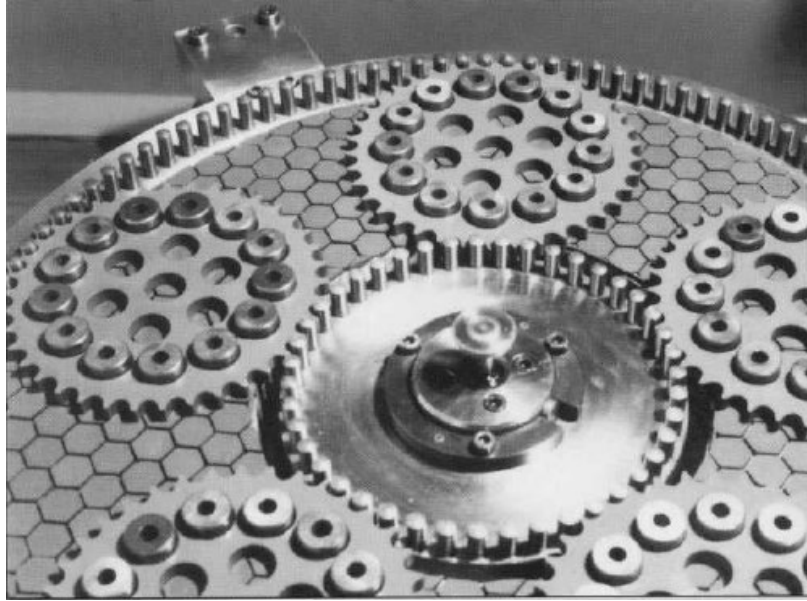
Este processo, cujo primeiro registro de sua criação reporta-se ao início dos anos 80 pela extinta empresa alemã de máquinas-ferramenta Hahn & Kolb, traz algumas importantes vantagens em relação à lapidação, com quem originalmente compete, como: peça limpa, uma vez que é livre do veículo de lapidação; reduzido desperdício de abrasivo, já que os grãos são presos ao ligante; e usinagem mais rápida, pois a taxa de remoção é maior. Na usinagem de peças de elevado nível de acabamento superficial são comuns as etapas de usinagem preliminar (na maioria das vezes a retificação), seguido da lapidação e, por último, o polimento. Esse novo processo permite a drástica redução dos tempos de lapidação e polimento ou até suas eliminações. De maneira geral, observa-se nas informações disponibilizadas por fabricantes a possibilidade desse processo usinar peças com planicidade da ordem de  $0,3\mu\text{m}$  a  $0,6\mu\text{m}$  e rugosidade  $R_a$  de até  $0,025\mu\text{m}$  (Wolters, 1998).

Pelo fato de se utilizar um rebolo com material superabrasivo, a reafiação do rebolo é naturalmente feita com o desgaste progressivo do ligante e, assim, o surgimento de novos grãos. Quando necessário, o restabelecimento de forma do rebolo é feito por um anel dressador, análogo ao da lapidação, mas feito de material cerâmico em sua superfície inferior onde se dá o contato com o rebolo abrasivo (Beyer & Ravenzwaaij, 2005).

Os componentes básicos que constituem uma máquina de brunimento plano de rebolo duplo são mostrados na Figura 27 e 28.



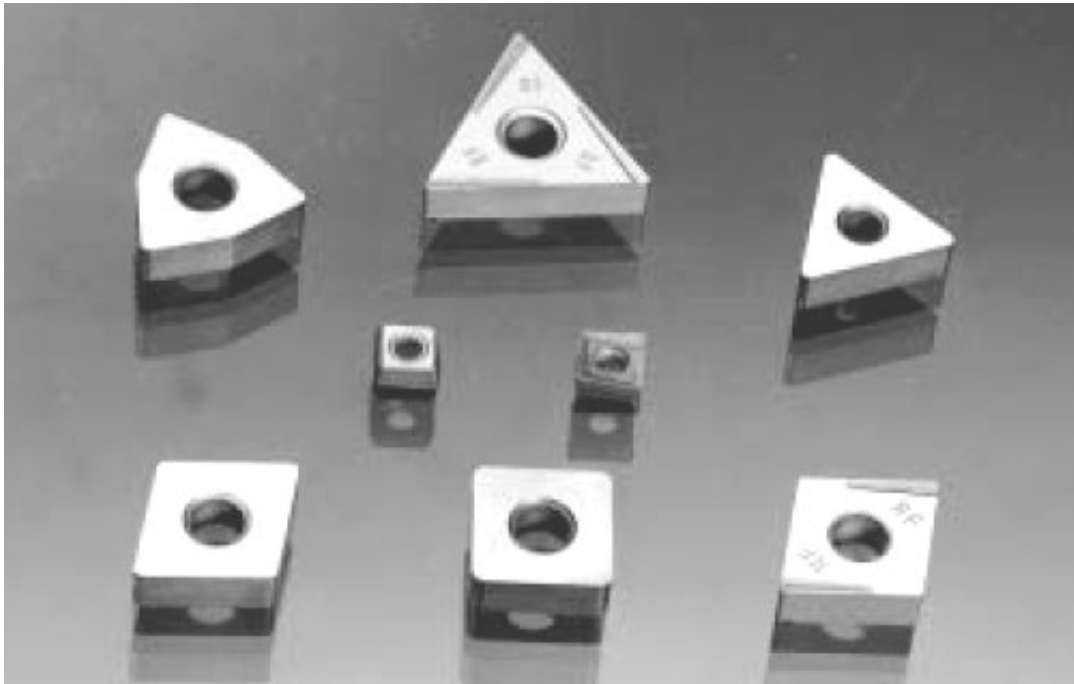
**Figura 27 - Esquema dos componentes de uma máquina de brunimento plano com rebolo duplo, (STÄHLI, 2000)**



**Figura 28 - Exemplo de uma máquina de brunimento plano, (MACKENSEN V., 1997)**

Comparando o brunimento plano com a retificação notamos que as velocidades de corte do brunimento plano são mais baixas. Enquanto a retificação trabalha com velocidades de corte de 10 a 100 m/s, o brunimento plano trabalha com 10 a 100 m/min. Quando comparado com a lapidação, o brunimento plano apresenta muitas vantagens como: menores custos de processo, maiores taxas de remoção de material e redução de custos de limpeza da peça após a usinagem. Essas vantagens foram evidenciadas por V. von Mackensen, W. Longerich, P. Dennis e D. Preising, 1997, na usinagem de pequenos componentes automotivos feitos de aço 100 Cr 6 (62 HRc). Peças com diâmetro de 25 mm e espessura de 2,7 mm foram produzidas com um batimento de 150  $\mu\text{m}$ , paralelismo e planicidade inferiores a 10  $\mu\text{m}$  e rugosidade Rz menores de 2  $\mu\text{m}$ . O brunimento plano reduziu o tempo de usinagem de um lote de 276 peças de 28 minutos, usados pela lapidação, para apenas 6,5 minutos. O custo unitário do processo abaixou 59%, o que representa um substancial ganho se tratando de 2,5 milhões de peças.

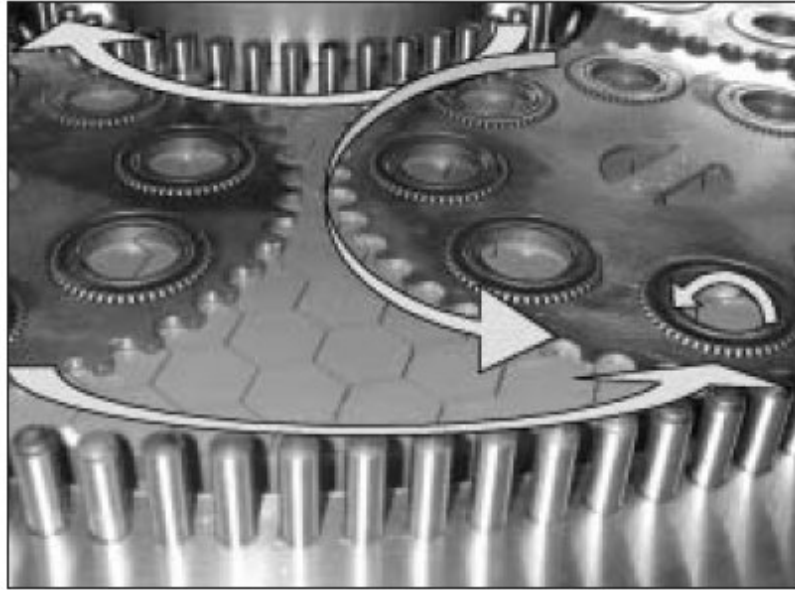
A.W. Stähli, 2000, também evidenciou exemplos de aplicações bem sucedidas do brunimento plano. Foram usinados corpos de bocais de bombas injetoras com precisão nanométrica e pastilhas de corte cerâmicas (Figura 29) foram usinadas em grande quantidade com precisão.



**Figura 29 - Pastilhas de corte cerâmicas usinadas pelo processo de brunimento plano, (STÄHLI, 2000)**

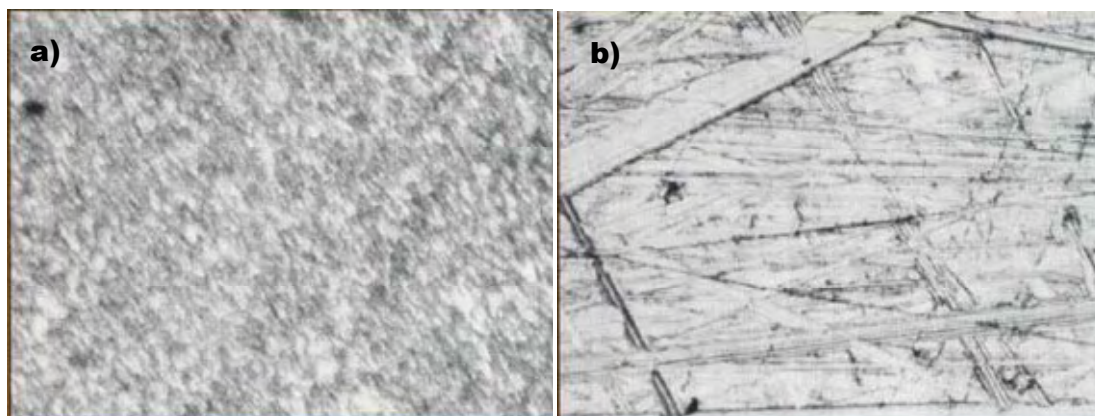
#### **2.4.2 Cinemática do processo de brunimento plano**

A cinemática do processo de brunimento plano é semelhante à da lapidação, as peças são forçadas entre os rebolos abrasivos em um movimento de rotação gerados pelas engrenagens planetárias. O porta peças rotaciona no sentido contrário ao dos rebolos abrasivos, ele faz com que as peças se movimentem em quase toda a superfície dos rebolos abrasivos promovendo um desgaste mais uniforme. O sentido e a velocidade de rotação das peças são os mesmos do reboło abrasivo, já que o atrito com o reboło força as peças a girar em torno de si mesmas. A Figura 30 mostra os sentidos desses movimentos (BEYER 2005)



**Figura 30 - Cinemática do brunimento plano gerada pelas engrenagens planetárias, (BEYER 2005)**

Apesar da cinemática dos processos de lapidação e brunimento plano se assemelharem o mecanismo de remoção de material não é o mesmo. A lapidação utiliza grãos abrasivos soltos que rolam sobre a superfície da peça. Já o brunimento plano utiliza um rebolo com grãos abrasivos fixos e a remoção de material é feita pela combinação de mecanismos de corte microscópicos nos quais os grãos riscam a peça gerando entalhes e removendo material ou ainda o material é removido pela fadiga do material. As superfícies geradas por esses dois processos apresentam diferenças visíveis. A superfície lapidada apresenta uma distribuição aleatória de micro-crateras, enquanto a superfície da peça no brunimento plano apresenta micro-riscos em direções aleatórias, Figura 31 (MACKENSEN, 1997)



**Figura 31 - Superfícies características dos processos de lapidação (a) e brunimento plano (b) com ampliação de 200x, (MACKENSEN V., 1997)**

### 2.4.3 Ferramenta abrasiva utilizada no brunimento plano

Nos anos 80, Hahn e Kolb iniciaram o uso de grãos abrasivos fixos com um rebolo de óxido de alumínio ou de carboneto de silício. Porém eles tinham que dresser o rebolo regularmente para reaver a capacidade de corte. Esse fato gerou a necessidade da utilização de uma ferramenta de dressagem, Figura 32. A ferramenta de dressagem passava radialmente ao rebolo com velocidade controlada, o que produzia também rasgos na superfície do rebolo. Esse método não apresentava uma planicidade adequada do rebolo, e ainda as constantes dressagens afetavam a uniformidade de qualidade entre os componentes.

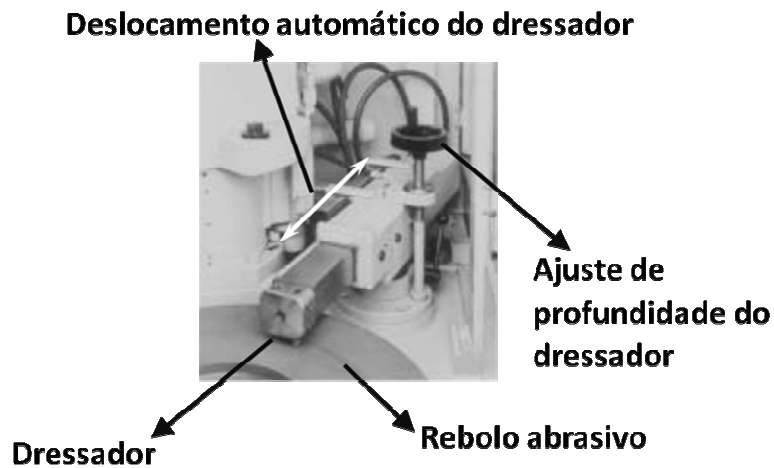
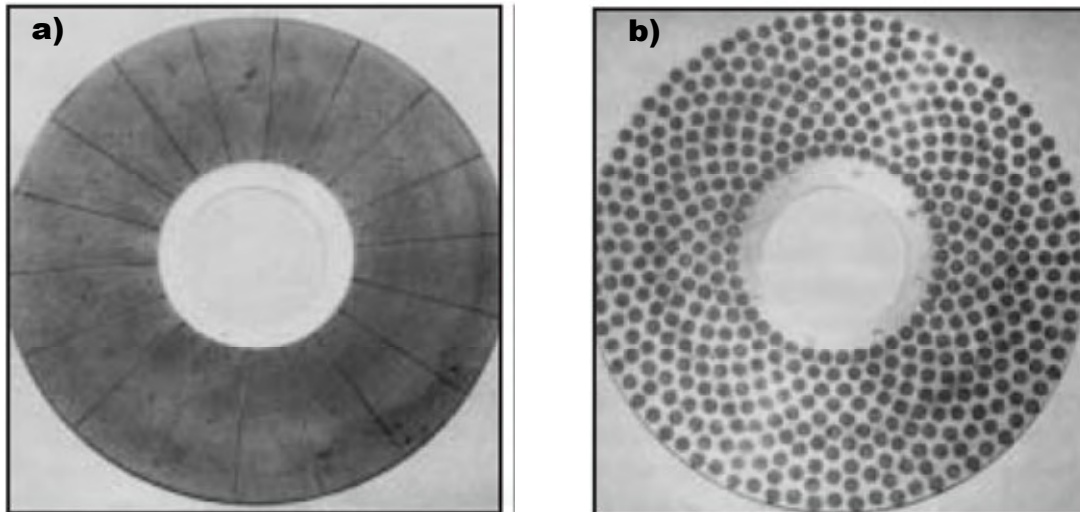


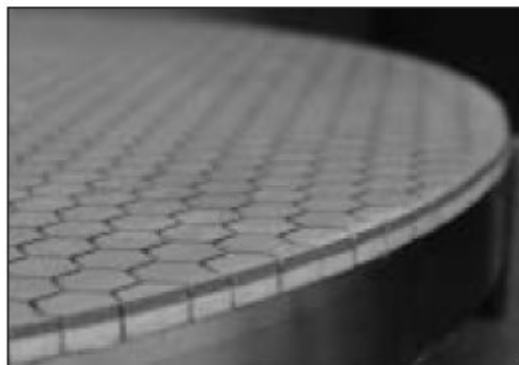
Figura 32 - Mecanismo de dressagem para os rebolos superior e inferior, (STÄHLI, 2000)

Segundo Stähli, 2000, o uso de grãos abrasivos fixos foi se estabelecer anos depois com os resultados bem sucedidos da usinagem de peças de compressores e válvulas com precisão de 1  $\mu\text{m}$  usando rebolos abrasivos com grãos de diamante e CBN. Os rebolos de diamante e CBN surgiram com o objetivo de gerar uma lapidação limpa, no início eram produzidos apenas pequenos insertos que formavam um rebolo segmentado, mas hoje são produzidas rebolos totalmente recobertos de diamantes ou CBN. Hoje os rebolos segmentados são formados por insertos hexagonais e os rebolos inteiriços são formados por uma fina camada de abrasivos. Os rebolos segmentados apresentam diferentes espaçamentos entre os insertos, os espaçamentos garantem a remoção do cavaco junto ao fluido de corte, entretanto podem causar irregularidades na superfície das peças. A camada de abrasivo normalmente é de 3 a 6 mm, Figuras 33 e 34.

Os rebolos ainda apresentam diferentes concentrações de abrasivos. Dependendo do material da peça podem ser usadas as concentrações de 25, 50, 75 e 100, sendo que a concentração de 100 corresponde a um abrasivo de 4,4 quilates por  $\text{cm}^3$  de material abrasivo.



**Figura 33 - Rebolo abrasivo totalmente recoberto (a) rebolo segmentado com espaçamentos largos (b); (STÄHLI, 2000).**

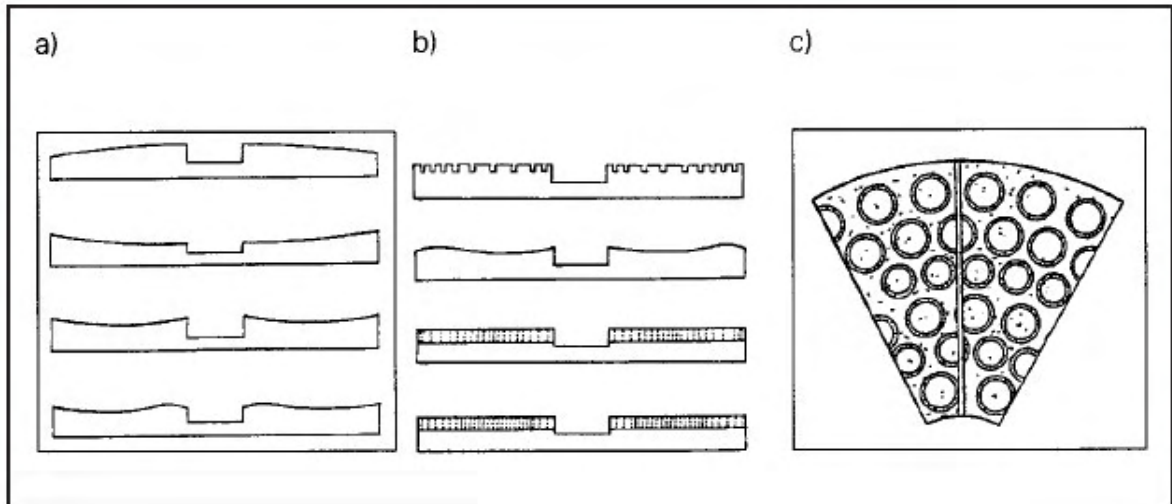


**Figura 34 - Rebolo abrasivo segmentado com espaçamentos curtos, (BEYER, 2005).**

#### **2.4.4 Dressamento dos rebolos de diamante e CBN**

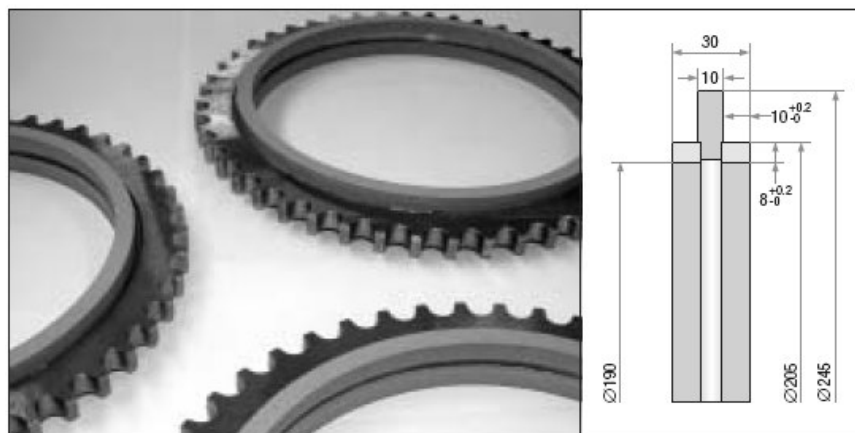
Para se manter bons resultados no processo é necessário que a ferramenta esteja constantemente plana e com alto grau de habilidade de corte. Porém, na medida em que o rebolo é utilizado aparecem desgastes na forma do rebolo o que prejudica a planicidade das peças, além disso surgem ranhuras devido a um desgaste concentrado em certas regiões do rebolo. Para compensar esse desgaste desuniforme, algumas regiões do rebolo podem ser fortalecidas e outras enfraquecidas, alterando a

concentração dos abrasivos em um rebolo totalmente recoberto ou posicionando adequadamente insertos com durezas diferentes, como mostrado na Figura 35.

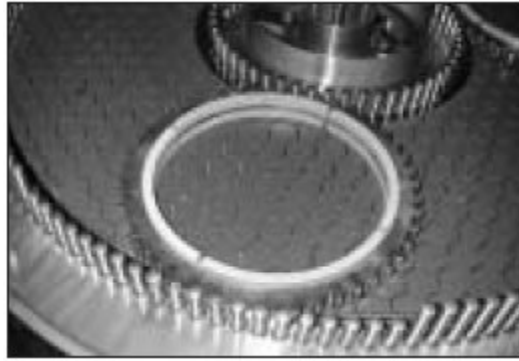


**Figura 35 - Efeitos do desgaste do rebolo abrasivo e formas de compensar o desgaste desuniforme. (a) desgaste da forma do rebolo (b) desgaste gerando formação de ranhuras e pela variação na concentração dos abrasivos para compensar o desgaste (c) posicionamento dos insertos com dureza diferente para compensar o desgaste desuniforme, (STÄHLI, 2000)**

No brunimento plano são utilizados discos dressadores de vDD (Dressador de diamante vitrificado) para renovar a capacidade de corte, diminuindo assim o tempo de usinagem. Esses dressadores possuem vantagem como: diminuição da força de dressagem, eficiente renovação da capacidade de corte e excelente nivelamento do rebolo. As Figuras 36 e 37 mostram exemplos de discos dressadores, eles possuem a mesma forma de montagem do porta peças e quando passam sobre o disco transferem a ela sua forma plana.



**Figura 36 - Exemplo de discos dressadores de vDD e sua utilização no brunimento plano, (BEYER, 2005).**



**Figura 37 - Aplicação de um disco dressador de vDD no brunimento plano, (BEYER, 2005)**

## **2.5 Técnicas de usinagem na escala nanométrica**

A nanotecnologia é a técnica usada para fabricar componentes com dimensões ou tolerâncias na faixa de 0,1 a 100 nm (FRANKS, 1987). A tendência de miniaturização de componentes é originária das indústrias de eletrônicos e computadores, porém recentemente a nanotecnologia foi introduzida em outras áreas como robótica, comunicação com fibras óptica, aeroespacial, materiais avançados, engenharia química, biologia e medicina (Mamalis, 2007).

Segundo Mamalis, 2007, atualmente a usinagem de ultra-precisão refere-se aquela que atinge tolerâncias de até 10 nm e rugosidade superficial de até 1 nm em componentes que podem ter partes menores que 1 $\mu$ m com máquinas com resolução da ordem de 10 nm.

O torneamento com diamante (“diamond turning”) é uma técnica conhecida na usinagem de precisão. Dependendo do tipo de material e das características da ferramenta pode-se atingir precisão de forma da ordem de 27 nm e rugosidade de 3 nm.

Freqüentemente a usinagem de precisão está ligada a um método abrasivo. Métodos com abrasivos soltos, como a lapidação e o polimento podem atingir rugosidades menores que 0,1 nm RMS (FRANKS, 1987), porém métodos com abrasivos fixos vem sendo desenvolvidos procurando atingir tal precisão com um menor custo.

A nano-retificação (“nanogrinding”) foi criada por Gatzen, Maetzig e Schwab, 1996, com o objetivo de fornecer acabamento aos componentes de equipamentos para gravação de dados digitais (cabeçotes de gravação, “recording head”).

Segundo Kametz, 2002, esses cabeçotes medem 1,0 mm x 1,0 mm x 0,3 mm e trabalham como mancais aerostáticos flutuando a cerca de 10 a 25 nm da superfície do disco rígido. A tolerância de planicidade requerida está na faixa de 10 nm e a rugosidade superficial pode ser menor que 1 nm. Para reduzir o desgaste com o disco rígido o cabeçote deve ser duro, cerâmicas como o carbetto de alumínio-titânio ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ ), Titanato de cálcio ( $\text{CaTiO}_3$ ) e Carbetto de silício ( $\text{SiC}$ ) são os materiais mais utilizados. A Figura 38 mostra a forma de um cabeçote de disco rígido típico.

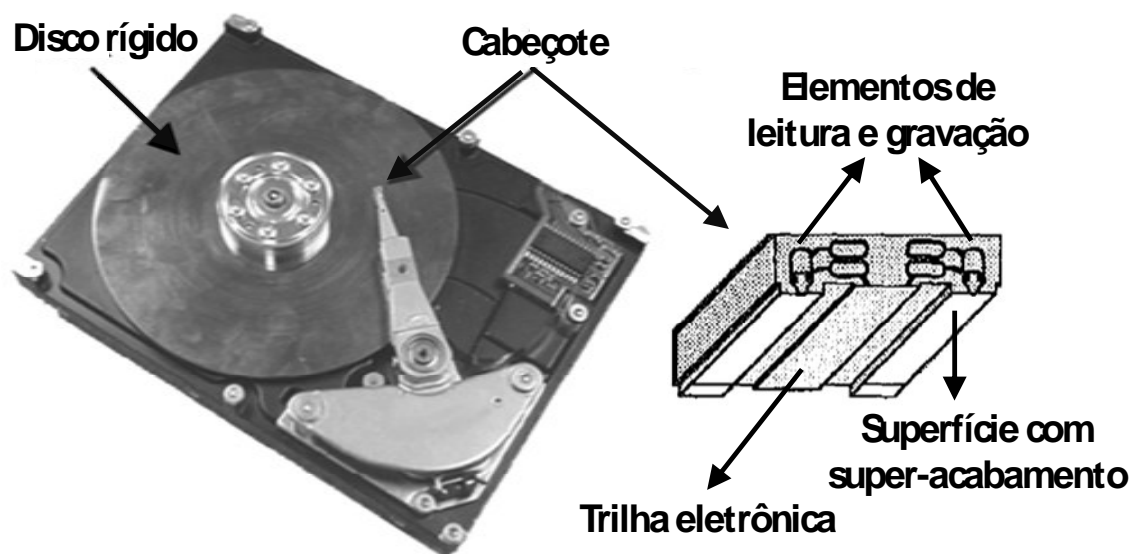


Figura 38 - Drive de disco rígido e detalhes do cabeçote, (adaptado de KAMETZ, 2002 e GATZEN, 1996)

Segundo Gatzen, 1996, a nano-retificação é um método de usinagem de ultra-precisão que utiliza grãos abrasivos fixos em um disco metálico macio, feito em alumínio. A cinemática do processo é a mesma da lapidação, porém o mecanismo de remoção de material é o de dois corpos. Em um primeiro passo o disco metálico macio é preparado pela impregnação de diamantes em sua superfície. Após espalhar os grãos de diamante sobre o disco, um anel dressador fixa os grãos no disco. Em um segundo passo o peça é usinada, Figura 39.

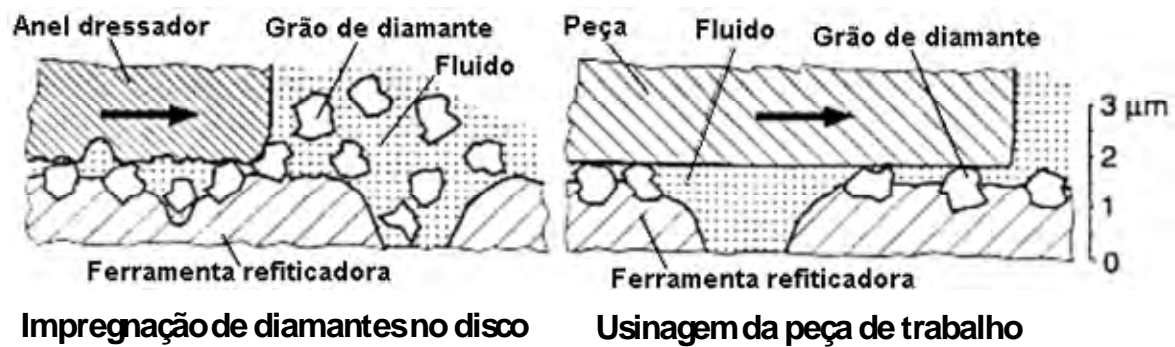


Figura 39 - Esquema do processo de nano-retificação, (GATZEN e MAETZIG, 1997)

Nesta técnica, as peças são usinadas primeiro em regime de desbaste. Para isso, utilizam-se grãos de diamante monocristalinos de 1.5 a 3  $\mu\text{m}$  e um disco confeccionado com ranhuras radiais por onde migra o excesso de abrasivo. Depois, no regime de acabamento, é empregado um disco sem ranhuras e grãos abrasivos pequenos, de 0.5 a 1  $\mu\text{m}$ , de diamantes policristalinos, cujo excesso deposita-se nos riscos pertencentes à rugosidade. Aliás, constatou-se que discos lisos não produzem bom desempenho, por isso, previamente à sua criação, deve-se lapidá-los com grãos abrasivos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$  de no máximo 50  $\mu\text{m}$ . Naturalmente, após este condicionamento, se faz necessário uma rigorosa limpeza da superfície do disco para eliminação dos grãos remanescentes que seriam contaminantes na usinagem da peça.

Tanto durante a preparação dos discos como durante a usinagem é utilizado fluido a base de água com a vazão do 1 ml/min. A pressão utilizada foi de 0,52  $\text{N}/\text{mm}^2$  e foram obtidas rugosidades aritméticas de 1,14 nm para cabeçotes de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 0.79 nm para cabeçotes de SiC, medidas com microscópico de força atômica. As taxas de remoção obtidas variam de 8 a 1  $\mu\text{m}/\text{min}$  dependendo do material processado e do estado do disco com diamantes (GATZEN, 1997)

Quanto aos desvios de planicidade, conseguiu-se o valor mínimo de 6 nm em cabeçote feito de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  (Gatzen, Maetzig e Schwab, 1996). Em peças de grande exigência de acabamento, como esta, o desprendimento de grão abrasivo do disco torna-se um aspecto crítico do processo uma vez que um risco pode comprometer o uso do componente usinado.

Gatzen et al., 1996, comparam duas variações do processo de nano-retificação com a lapidação na usinagem dos cabeçotes de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ ,  $\text{CaTiO}_3$  e SiC. Na lapidação foram utilizados grãos de diamante monocristalino de 3  $\mu\text{m}$  na concentração de  $3,3 \times 10^{-3}$  g/ml, com pressão de 0,33  $\text{N}/\text{mm}^2$  e 40 rpm, foram obtidas rugosidades aritméticas de

27 nm, 15 nm e 45 nm para os cabeçotes de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ ,  $\text{CaTiO}_3$ ,  $\text{SiC}$ , respectivamente. A nano-retificação utilizou um disco ranhurado, impregnado com diamantes monocristalinos de  $3\ \mu\text{m}$  com a mesma pressão e velocidade utilizadas na lapidação. Os resultados de rugosidade aritmética foram: 3 nm, 2 nm e 4 nm para os cabeçotes de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ ,  $\text{CaTiO}_3$ ,  $\text{SiC}$ , respectivamente. Outra variação da nano-retificação foi avaliada, agora o processo possui dois passos, o primeiro é a usinagem com o disco ranhurado descrito anteriormente, o segundo passo completa a usinagem com um disco não ranhurado impregnado com diamantes policristalinos de  $0,75\ \mu\text{m}$ , as rugosidades aritméticas passa a ser 1 nm, 2 nm e 2 nm para os cabeçotes de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ ,  $\text{CaTiO}_3$ ,  $\text{SiC}$ .

Também utilizando conceitos estabelecidos na lapidação para promover o acabamento de componentes de equipamentos para gravação de dados digitais, Eda & Tomita (1996) elaboraram discos abrasivos de  $\text{SiC}$  com ligante composto de resinas PVA, melamina e fenol, que em porcentagens adequadas, 20%, 15%, 5% em peso, produzem um disco com características necessárias para a lapidação de substrato de disco magnético. Este tipo de componente, feito de uma liga de alumínio de alta pureza, apresenta problemas de impregnação de finas partículas de abrasivos e rugosidade inadequada ( $R_a \approx 0.9\ \mu\text{m}$ ) quando lapidado com partículas de  $\text{SiC}$  de  $20\ \mu\text{m}$  de tamanho em disco de ferro fundido. Já o disco abrasivo com o mesmo tamanho de grão é capaz de produzir rugosidade significativamente menor ( $R_a \approx 0.13\ \mu\text{m}$ ) e sem a deletéria impregnação de abrasivos. Com o uso do disco sintético, nota-se que a rugosidade e a taxa de remoção é diretamente proporcional ao tamanho médio do grão abrasivo. O menor abrasivo usado nos testes foi de  $3\ \mu\text{m}$  (4000 mesh) correspondendo a uma rugosidade  $R_a$  de  $0.02\ \mu\text{m}$  e planicidade de  $1.3\ \mu\text{m}$  em peças medindo cerca de 130 mm de diâmetro.

Um dos processos abrasivos atuais mais precisos é o polimento mecânico-químico, com ele podem ser atingidas rugosidades superficiais aritméticas na escala nanométrica. Wei, 2006, aplicou esse método na planificação de nitrito de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) depositado em camadas condutoras de onda em dispositivos de laser de alta potência tipos III-V. Quando elétrons percorrem as finas camadas mostradas na Figura 40, fótons são liberados e um feixe luminoso é formado.

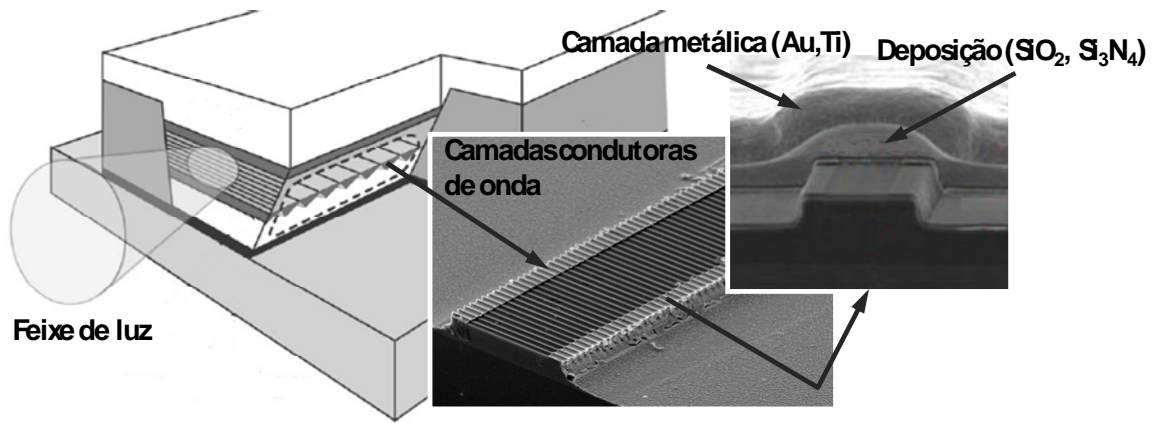


Figura 40 – Localização da camadas condutoras de onda em dispositivos de laser de alta potencia tipos III-V (adaptado de AELLEN, 2003)

O processo de planificação está esquematizado na Figura 41. O objetivo do processo é manter a variação da espessura da camada de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , do vale mínimo ao pico máximo, menor que 20 nm ao longo de todo comprimento. Foram utilizados os parâmetros: pressão de 0,4 MPa, rotação de 40 rpm e taxa de aplicação do meio de polimento de 50 ml/min. Foi observado que com o aumento da pressão ( $p$ ) ocorre o aumento da taxa de remoção entretanto a variação da espessura da camada é também aumentada. Com o aumento da rotação do disco a taxa de remoção e a variação da espessura são prejudicadas. Com o aumento da aplicação do meio de polimento não há variação da taxa de remoção entretanto a variação da espessura é prejudicada. Portanto o trabalho de Wei, 2006, mostra que o processo deve possuir taxa de remoção pequena e que o foco não deve ser o tempo do processo mais sim a qualidade. Wei, 2006, conclui que a qualidade da superfície polida é insegura e depende muito da experiência do operador.

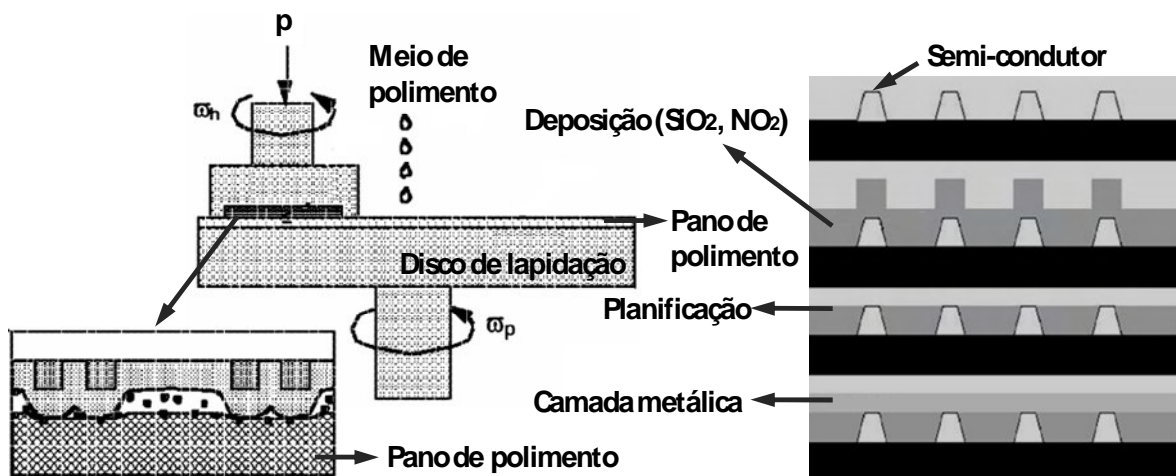


Figura 41 – Processo de planificação da camada de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , (adaptado de Wei, 2006)

Leitores de CDs (“compact disks”) utilizam lentes miniaturas que são fabricadas com grande exigência de precisão. Milhões dessas lentes são fabricadas por ano e para que o nível de difração necessário seja alcançado a precisão dimensional deve ser melhor que  $0,2 \mu\text{m}$  e a rugosidade superficial RMS deve ser inferior a  $20 \text{ nm}$ . Equipamentos ópticos mais precisos como laser de alta energia necessitam de lentes com uma rugosidade ainda menor, cerca de  $1 \text{ nm}$ , tal precisão é conseguida pelos processos de lapidação e polimento (FRANKS, 1987).

Buscando entender melhor os mecanismos de remoção na lapidação e explorar mais a sua capacidade, Touge e Matsuo (1996) identificaram que, além da influência dos numerosos parâmetros já conhecidos, a operação de faceamento do disco de lapidação exerce significativo efeito sobre o processo. No experimento realizado, em cabeçote magnético de gravação em ferrita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Mn e ZnO), uma lapidadora dotada de um dispositivo de faceamento, com ferramenta de ponta de diamante arredondada, corrige a forma e o desgaste do disco metálico macio, feito em Sn. No entanto, observa-se que diferentes avanços produzem marcas de ondulações (sulcos) na superfície em forma de semi-arcos de diferentes tamanhos de passos, mantendo-se a mesma profundidade de corte. Com o progressivo aumento dos passos, podem-se criar três situações distintas: (a) altura das cristas das marcas de ondulação abaixo da profundidade de corte; (b) altura das cristas igual à profundidade de corte; e (c) sulcos com altura igual à profundidade de corte, mas totalmente separados por áreas planas da superfície do disco. Nestes casos, o número de abrasivos contidos no fluido de lapidação aumenta da primeira situação (a) para a segunda (b), quando a quantidade de grãos soltos é máxima. No terceiro caso (c), os grãos abrasivos também cobrem a região plana entre os sulcos encravando ali. Portanto, tem-se uma situação de lapidação com grãos fixos. Como primeiro resultado, os autores verificaram que a maior taxa de remoção de material ocorre na situação (b) quando a quantidade de grãos abrasivos, de  $0,5$  a  $1 \mu\text{m}$ , é máxima.

No trabalho de Touge e Matsuo (1996), fez-se um ensaio, dividido em três partes, no qual preparou-se o disco de acordo com o terceiro caso (c). Na primeira parte do ensaio usinou-se apenas com grãos fixados sobre a região plana entre os sulcos. Depois, na segunda parte, adicionaram-se grãos abrasivos soltos, coexistindo com os grãos fixos. E na terceira parte, interrompeu-se a adição de grãos abrasivos.

Os resultados apontaram que, somente com grãos fixos, a taxa de remoção de material foi relativamente baixa e decrescente até o final da primeira etapa. A

rugosidade manteve-se em nível praticamente constante, entre 1.4 a 1.5 nm, indicando que houve modesta quantidade de desprendimento de grãos e a maioria dos remanescentes mantiveram sua protusão.

Na etapa intermediária, onde há grãos fixos e soltos juntos, a taxa de remoção mostrou-se 2,7 vezes maior do que na condição de grãos somente fixos indicando, mais uma vez, o forte efeito dos grãos soltos na remoção de material. Na última parte, com a interrupção da alimentação dos grãos abrasivos, nota-se a contínua diminuição da taxa de remoção, quando a rugosidade tende aos valores mais baixos ao final do ensaio. Nesta etapa, os autores creditam este comportamento à gradativa redução do número de grãos de protusão mais alta.

### 3 Materiais e métodos

Neste capítulo é desenvolvida a descrição do equipamento denominado de lápidoretificadora que usina peças pelo processo de lápidoretificação. Inicialmente são evidenciadas as características do processo de lápidoretificação comparando-o com outros processos abrasivos, posteriormente as características da lápidoretificadora são demonstradas separadamente em conjuntos funcionais.

#### 3.1 O Processo de Lápidoretificação

Neste trabalho será descrito um equipamento desenvolvido para a usinagem de peças por meio de um processo abrasivo de acabamento de precisão que foi nomeado de lápidoretificação e o equipamento de lápidoretificadora. Assim como no processo de retificação o processo de lápidoretificação utiliza um rebolo abrasivo. Mas na retificação o rebolo abrasivo tem seu eixo de rotação paralelo à superfície usinada, ou seja, a parte do rebolo utilizado é a superfície de sua largura. Apenas na retificação de face a peça é usinada com a superfície lateral do rebolo. Na lápidoretificação o eixo do rebolo é disposto perpendicularmente à superfície usinada da peça. A Figura 42 mostra essas diferentes orientações da ferramenta e da peça de trabalho.

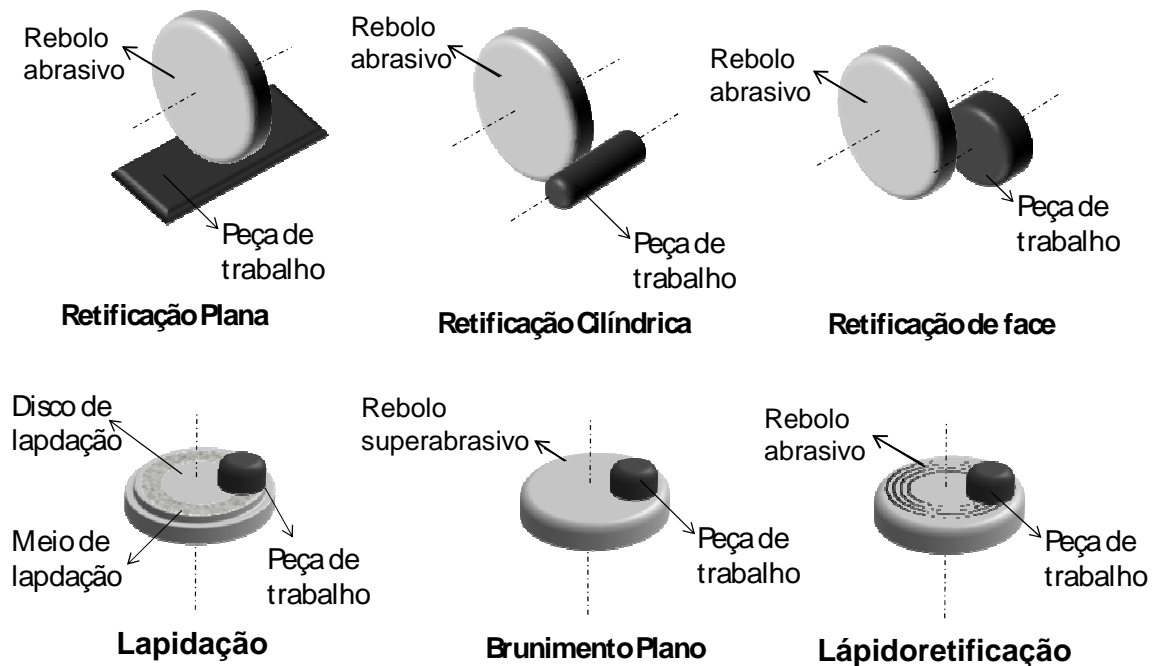


Figura 42 - Orientação da montagem da ferramenta e da peça nos diferentes processos abrasivos.

Apesar da lápidoretificação utilizar a mesma ferramenta e a mesma disposição de peça que o brunimento plano, na lápidoretificação há o condicionamento do rebolo abrasivo pela operação de dressagem. Talvez, por se tratar de um processo derivado da lapidação, criado por tradicionais fabricantes de lapidadoras, não se tem registro da transferência do conceito do grau de recobrimento (Ud), oriundo da retificação, aplicado ao brunimento plano com a utilização de rebolo abrasivo convencional de ligante resinóide. A esta hipótese, somava-se o incipiente estudo do grau de recobrimento (Ud) por König & Messer em 1980, na mesma época do surgimento do processo de brunimento plano.

A lápidoretificação possui vantagem quando comparada com a lapidação, e muitas delas se assemelham às encontradas no processo de brunimento plano. Por não utilizar o veículo de lapidação as peças são limpas e se reduz o desperdício de abrasivo. Ainda que na lápidoretificação se utilizem normalmente abrasivos convencionais, como o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), carbetto de silício (SiC), nitreto de silício ( $N_4Si_3$ ), ao contrário da lapidação e do brunimento plano em que são usados grãos de CBN ou diamante de custo muito mais elevado. Os grãos estão presos ao ligante presente no rebolo o que permite uma usinagem mais agressiva com maior taxa de remoção e conseqüentemente menor tempo de usinagem. Entretanto, diferente do brunimento plano, essa agressividade é controlada pela operação de dressagem do rebolo. A lápidoretificação também pode eliminar processos posteriores, ou ao menos reduzir os tempos de usinagem nesses processos.

Assim como na retificação, a operação de dressagem tem grande influência no processo de lápidoretificação. Essa operação prepara o rebolo abrasivo para a operação de usinagem renovando sua capacidade de corte e corrigindo a sua forma. A dressagem consiste em gerar uma espiral sobre a superfície do rebolo abrasivo através do corte com uma ferramenta dressadora. Como exemplo de ferramenta dressadora pode-se citar um cone de diamante que é preso a um suporte cilíndrico de aço que aqui é chamado simplesmente ponta de diamante.

Os parâmetros da dressagem foram definidos por König em 1980: Ud é o grau de recobrimento, bd é a largura de atuação da ponta de diamante, Sd é o passo de dressagem e ad é a profundidade de dressagem. Esses parâmetros são relacionados pela equação (III) no tópico 1.2.3 deste trabalho.

A Figura 43 representa um esquema de como é feita a dressagem na lápidoretificação, destacando os seus principais parâmetros.

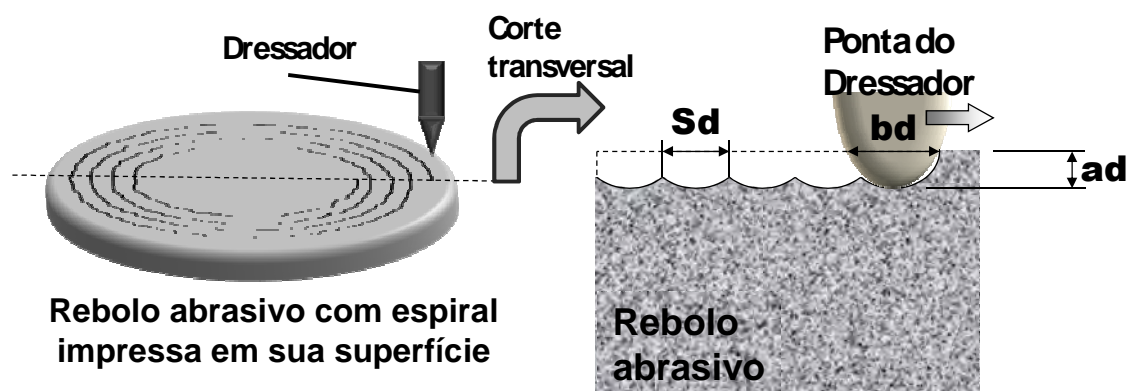


Figura 43 - Esquema da dressagem na lápidoretificação.

A geometria gerada na superfície do rebolo abrasivo pela operação de dressagem faz com que haja dois efeitos diferentes, o macroefeito e microefeito.

O primeiro é a própria superfície espiralada gerada pela dressagem, ou seja, o perfil similar ao filete de uma rosca, conforme exemplificado na Figura 43. O macroefeito altera a capacidade do corte por meio da variação do grau de recobrimento, variando de condições mais agressivas para maior remoção de material da peça de trabalho (valores de  $U_d$  próximos a 1) até condições de pequenas taxas de remoção (valores de  $U_d$  próximos a 5), para um melhor acabamento da superfície lápidoretificada.

O segundo efeito, microefeito, é caracterizado pela fratura do grão abrasivo durante a operação de dressagem. Essa característica é acentuada quanto maior for a capacidade do grão abrasivo produzir arestas cortantes durante sua fratura (friabilidade).

Apesar da lápidoretificação utilizar um rebolo abrasivo assim como a retificação, as características do corte da peça são diferentes. A retificação utiliza altas velocidades de corte no rebolo abrasivo, 50 m/s para rebolos com ligante resinóide e 200 m/s para rebolos de CBN. Dessa maneira, ocorre elevada geração de energia térmica durante o corte com obrigatoriedade de aplicação intensa de fluido de corte para refrigeração. O corte tende a gerar riscos orientados com a direção do rebolo abrasivo, o que faz com que a rugosidade na superfície da peça de trabalho seja dependente da direção em que é medida. Por sua vez, a lápidoretificação utiliza velocidade no rebolo abrasivo bem

menor, aproximadamente 2 m/s e uma cinemática de corte que se aproxima daquela usada na lapidação.

O brunimento plano utiliza a mesma cinemática da lapidação, porém o disco de lapidação é substituído por um rebolo superabrasivo, normalmente confeccionado com inúmeros segmentos de abrasivo, e a dressagem não é aplicada com o conceito de grau de recobrimento, apenas com o intuito de corrigir a forma do disco em decorrência de um desgaste não uniforme. Essa cinemática promove a geração de riscos aleatórios o que faz com que a rugosidade na superfície da peça de trabalho seja independente da orientação que é medida. Esse tipo de superfície é desejável e caracteriza uma peça com melhor acabamento.

Na lápidoretificação também são gerados riscos aleatórios, porém com um movimento distinto. O porta-peças pode permanecer fixo ou possuir um movimento linear ao longo do raio do rebolo abrasivo. Diferente da lapidação e do brunimento plano as peças de trabalho permanecem fixas ao porta-peças. A Figura 44 mostra a cinemática do corte na lapidação e na lápidoretificação.

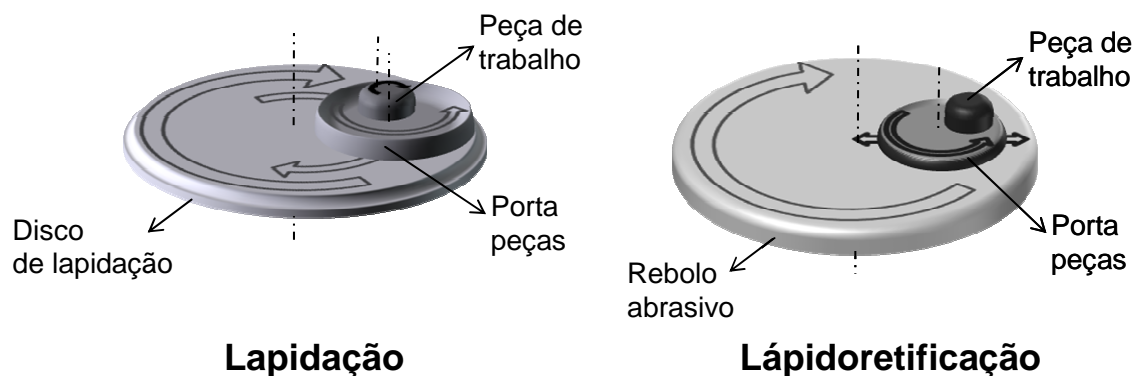


Figura 44 - Cinemática da Lapidação e da Lápidoretificação.

Apesar da aparente semelhança entre os processos de retificação, lapidação, brunimento plano e lápidoretificação, nenhum outro trabalho especifica um processo que utiliza um rebolo abrasivo preparado pela operação de dressagem de modo que os parâmetros dessa operação determinem as condições da operação de corte e que possua uma cinemática composta da rotação do rebolo abrasivo e da peça de trabalho, sendo que a disposição do rebolo é a mesma da retificação de face e ainda com a possibilidade do movimento linear da peça ao longo da superfície do rebolo. Dessa forma a lápidoretificação se caracteriza como uma inovação, sendo um processo diferente de qualquer outro já desenvolvido.

A operação de dressagem poderia ser executada em uma máquina dedicada e ao término do processo o rebolo poderia ser fixado na lápidoretificadora. Uma variação para a operação de dressagem seria a utilização de um molde para injeção da mistura ligante e grãos abrasivos. O grau de recobrimento seria transferido da superfície do molde, previamente usinado, para a superfície do rebolo. Uma variação desse processo poderia ser a estampagem a quente ou a frio da superfície espiralada no rebolo.

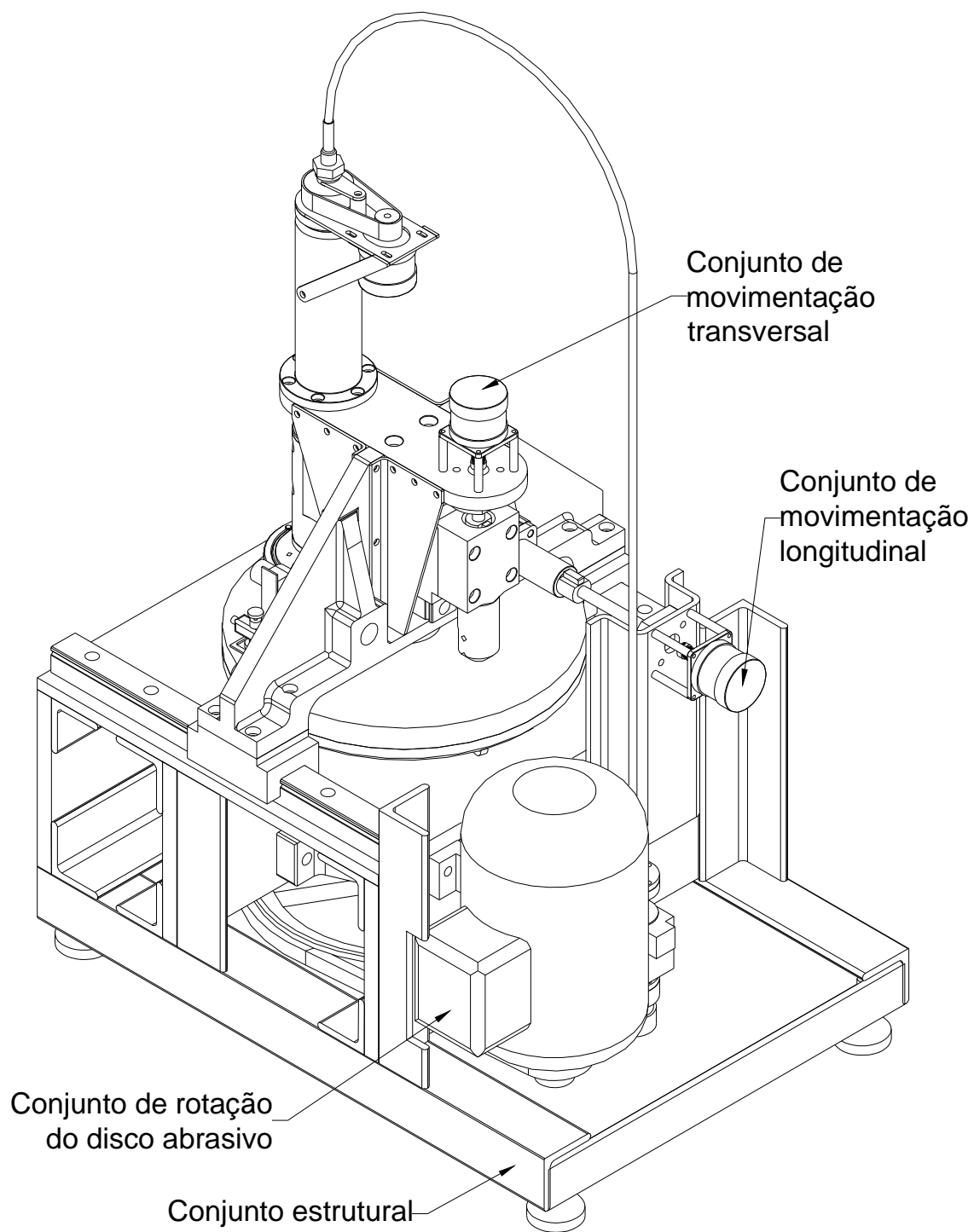
### **3.2 A Lápidoretificadora**

O equipamento que se destina a realizar o processo de lápidoretificação foi chamado de lápidoretificadora. Assim como o processo esse equipamento também se caracteriza como uma inovação, já que muitas de suas funções são específicas para a realização do processo de lápidoretificação. A lápidoretificadora pode ser dividida nos seguintes itens:

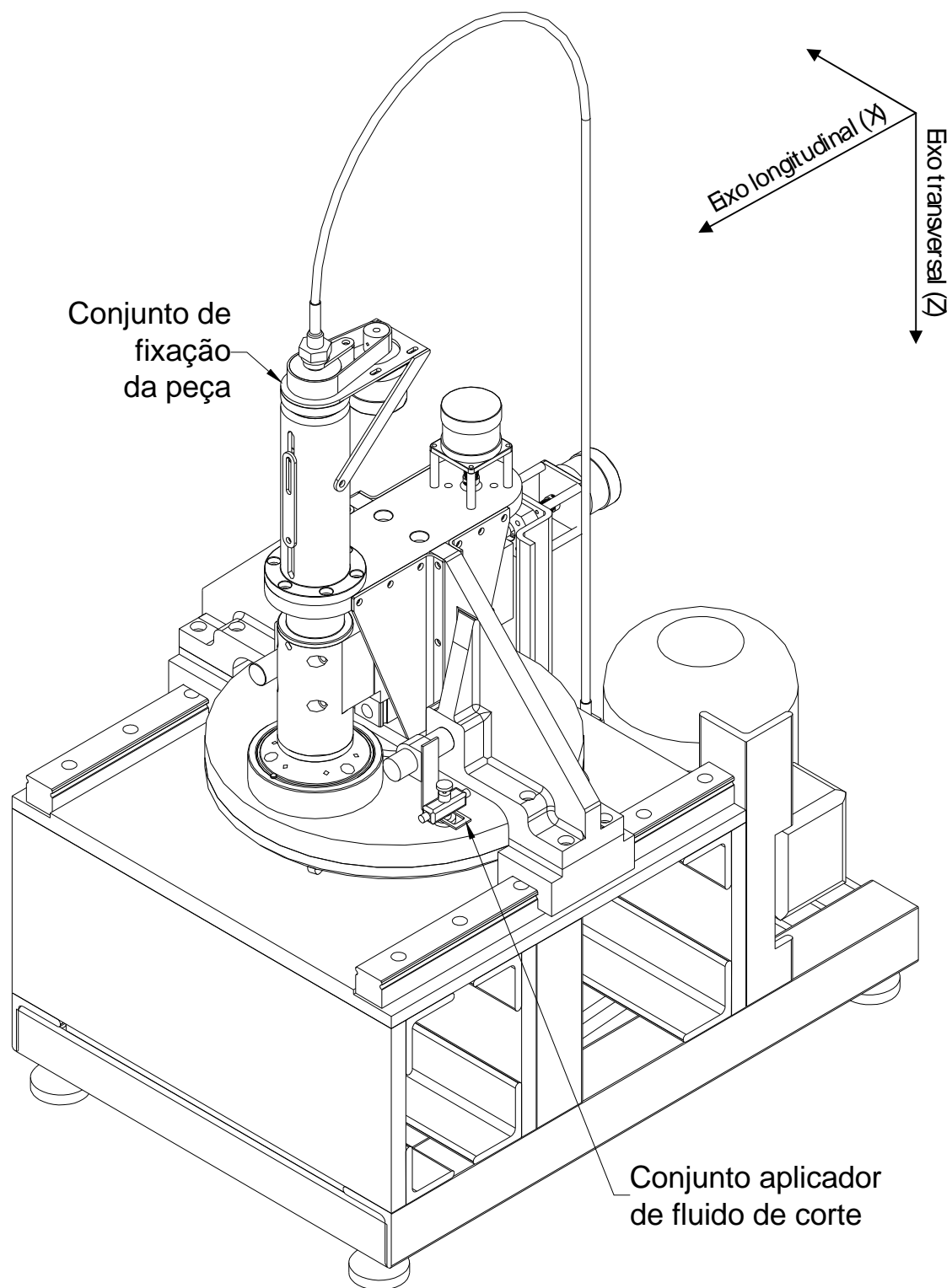
- Conjunto estrutural;
- Conjunto de movimentação longitudinal;
- Conjunto de movimentação transversal;
- Conjunto de fixação da peça;
- Conjunto de rotação do rebolo abrasivo;
- Conjunto de aplicação de fluido de corte;
- Conjunto de Monitoramento das condições de usinagem e
- Conjunto de comando e acionamento da peça e dressador.

As Figuras 45 e 46 mostram um exemplo construtivo desse equipamento. Os conjuntos que o compõem são identificados, e são definidos dois eixos de referência: o eixo longitudinal à superfície do rebolo, o qual é identificado pela letra “X” e eixo transversal, identificado pela letra “Z”.

A seguir cada conjunto é explicado separadamente, e suas funções e características são apresentadas.



**Figura 45 - Representação da Lápido-retificadora destacando alguns conjuntos**



**Figura 46 - Representação da Lápidoretificadora destacando-se os outros conjuntos e os eixos de referência**

### 3.2.1 Conjunto Estrutural

O conjunto estrutural, mostrado na Figura 47, serve de base para as demais partes da máquina. Sua estrutura deve ser robusta (alta rigidez mecânica) e com elevada massa para absorver as deformações provenientes dos esforços da usinagem. Pode ser idealmente feita de um monobloco de ferro fundido cinzento (dentre outros) que, por possuir veios de grafita livre em sua microestrutura, absorve vibrações, possui boa estabilidade dimensional e usinabilidade. Estruturas fundidas podem ser substituídas por: granito natural ou sintético (vantagens: maior precisão dimensional e menor distorção térmica; desvantagens: maior fragilidade), perfis soldados e materiais compósitos. Deve-se ainda favorecer a dissipação de calor para minimizar as distorções térmicas.

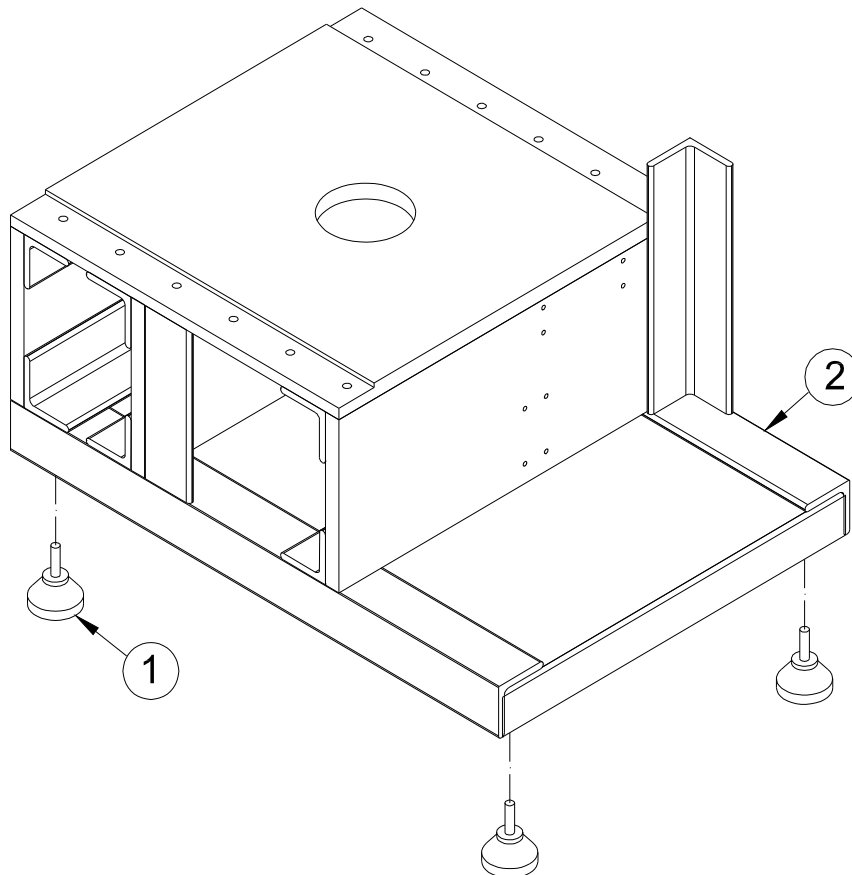


Figura 47 - Representação do conjunto estrutural

Tabela 1 - Lista de peças do conjunto estrutural

Item	Descrição	Quantidade
01	Apoio para amortecimento de vibrações	04
02	Estrutura	01

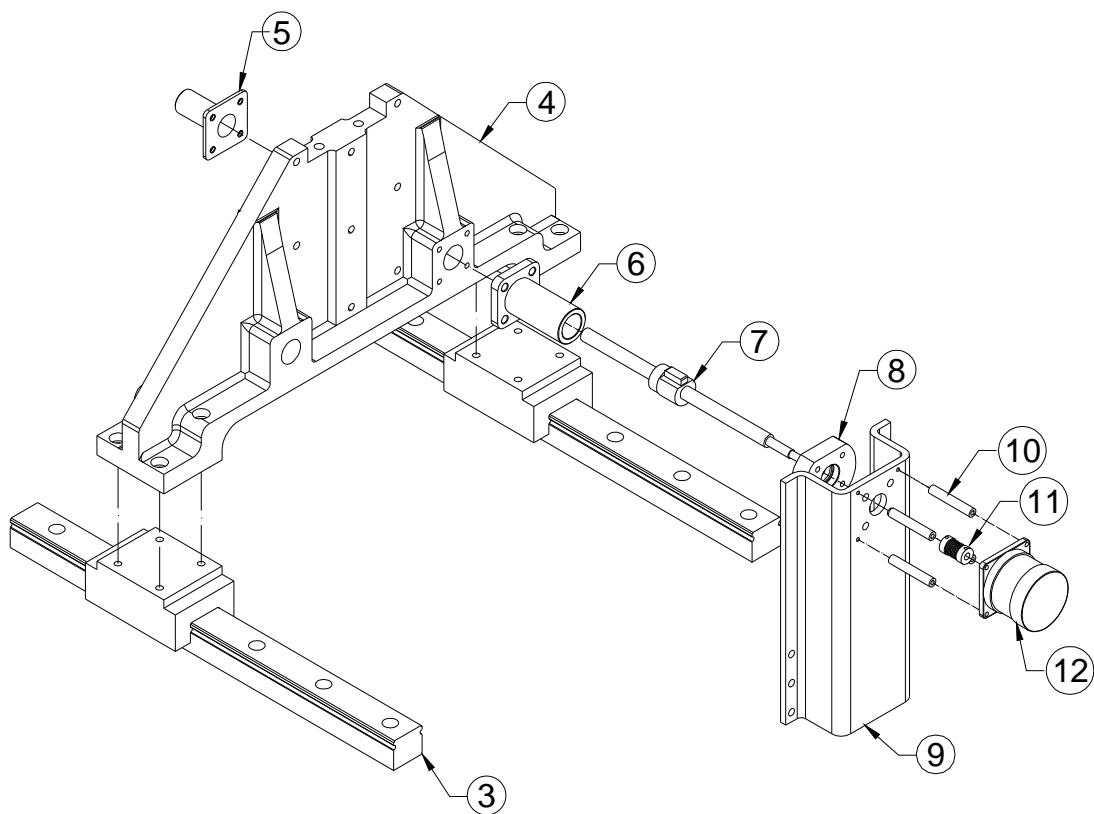
Procurando melhor absorver as vibrações originadas principalmente pelo motor de acionamento do rebolo e pelos esforços de usinagem, toda a estrutura é apoiada em uma base flexível, composta parte ou integralmente por um polímero natural ou sintético. Essa base flexível é um coxim que trabalha como um amortecedor de vibração.

### 3.2.2 Conjunto de Movimentação Longitudinal

O conjunto de movimentação longitudinal tem a função de mover a ponta de diamante para se efetuar a operação de dressagem. O conjunto proporciona o movimento no sentido longitudinal, adotado como eixo X, sendo responsável pela geração do passo da espiral resultante da passagem do dressador sobre a superfície do rebolo, conhecida como passo de dressagem (Sd). Nesse movimento não se deve apenas garantir a posição precisa, mas principalmente a velocidade de deslocamento. Outra função do conjunto de movimentação longitudinal é posicionar a peça para a usinagem. Pode-se desejar apenas alternar certas regiões do rebolo abrasivo para a usinagem da peça. Mas também se pode desejar um movimento contínuo da peça, de vai-e-vem, durante a usinagem. A peça se movimentaria na direção longitudinal alternando o seu sentido e se movimentando sobre a superfície do rebolo abrasivo com uma velocidade controlada. Mais detalhes desse movimento são discutidos na descrição do conjunto de controle.

**Tabela 2 - Lista de peças do conjunto de movimentação longitudinal**

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>	<b>Quantidade</b>
03	Guias lineares com patins	02
04	Travessa estrutural	01
05	Protetor do fuso	01
06	Flange com rosca interna	01
07	Fuso de esferas recirculantes com porca de esferas	01
08	Mancal com rolamento de esferas	01
09	Suporte para o motor	01
10	Prolongador para o motor	04
11	Acoplamento elástico	01
12	Motor de passo	01



**Figura 48 - Representação do conjunto de movimentação longitudinal**

O conjunto de movimentação longitudinal, Figura 48, pode ser construído usando qualquer dispositivo de movimentação linear desde que seja observada a precisão necessária. Os processos convencionais, como a retificação, com movimento coordenado por comando numérico (CNC) possuem precisão de 100 a 10  $\mu\text{m}$  (Byrne *et al* , 2003). Para o conjunto de movimentação longitudinal pode-se adotar a mesma faixa de precisão encontrada nas máquinas convencionas CNC, isso porque os erros de posicionamento longitudinal da ponta de diamante ou da peça não afetam diretamente na qualidade da usinagem.

Além da precisão no movimento deve se atentar para a rigidez do conjunto, o conjunto deve absorver os esforços da usinagem sem apresentar deformação significativa.

Em virtude da dressagem a velocidade de deslocamento longitudinal da ponta de diamante deve ser controlada. A rotação do rebolo abrasivo pode variar entre 0 a 10000 rpm, entretanto para diminuir os esforços de perfilamento do rebolo abrasivo e aumentar assim a estabilidade do processo normalmente utilizam-se rotações na faixa de 0 a 300

rpm. Variado-se o grau de recobrimento (Ud) de 1 a 5 e a profundidade de dressagem (ad) de 20 a 300  $\mu\text{m}$ , as velocidades de deslocamento longitudinal variam de 100 a 600  $\mu\text{m/s}$ , ou seja, são velocidades mais baixas que as utilizadas nas máquinas CNC convencionais. Mas se for desejado variações finas na profundidade de dressagem ou na rotação do rebolo abrasivo o movimento longitudinal deve sofrer variações sutis, da ordem de 10  $\mu\text{m/s}$ , o que gera a necessidade de um comando automático e de um conjunto de acionamento que possa reproduzir essa variação de velocidade.

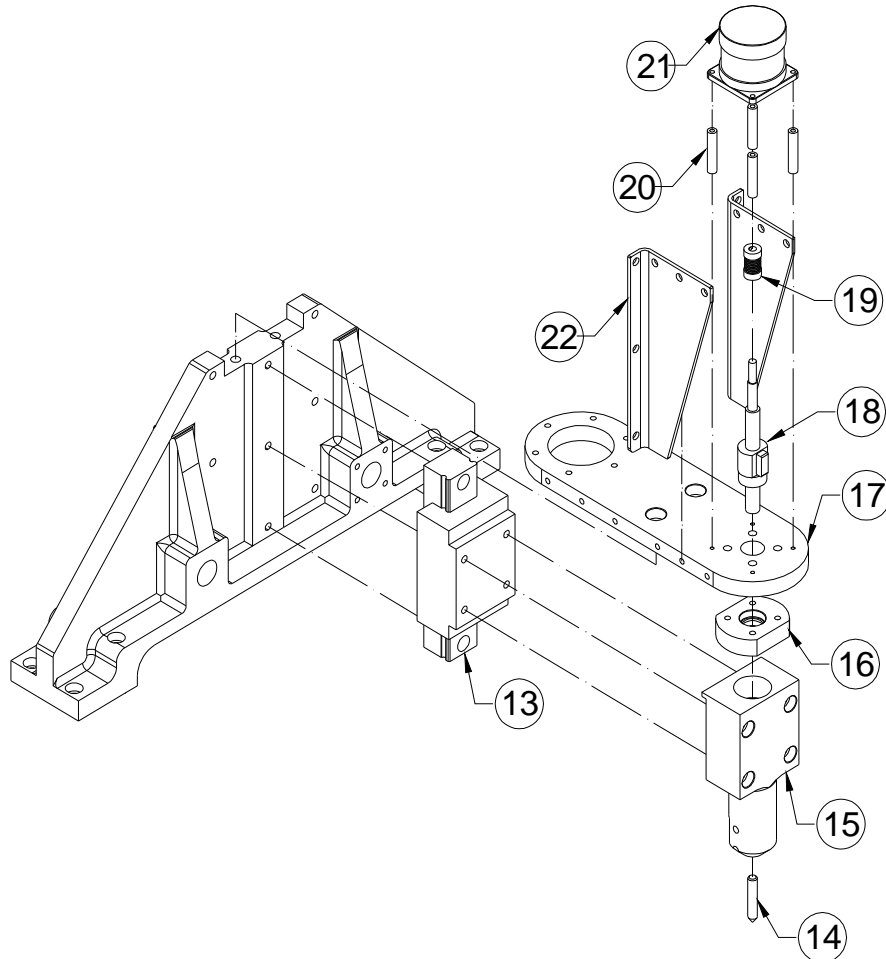
Uma solução possível para suprir as exigências do processo é a utilização de guias lineares e fusos de esferas recirculantes movimentados por um motor de passo comandado por um conjunto de acionamento eletrônico. Deve-se notar que as peças que unem este conjunto devem ser robustas e o uso de elementos flexíveis como o acoplamento elástico contribuem para compensar os erros de fabricação e montagem. Como o movimento está todo apoiado em esferas existe pouca resistência e que leva a uma menor necessidade de potência do motor e em menores tempos de aceleração. Para se ter maior precisão no deslocamento pode ser necessário o uso de sensores de posicionamento (medição direta ou indireta). Os motores elétricos como os motores de passo ou servomotores são facilmente acoplados aos sensores de posição. Sensores de posição angular como os encoders possibilitam a leitura do número de passos e da velocidade de rotação. O conjunto de controle é alimentado com essa informação e corrige o movimento do motor.

Existem outras soluções para esse conjunto, algumas delas não apenas mecânicas, como o uso de atuadores hidráulicos ou pneumáticos controlados por válvulas elétricas comandadas por conjuntos computadorizados. Nesse caso o uso de transdutores lineares de posição, como a régua óptica, se faz necessário para alimentar o conjunto de comando que controla os atuadores.

### **3.2.3 Conjunto de Movimentação Transversal**

A função do conjunto de movimentação transversal, mostrado na Figura 49, é de posicionar o dressador, em relação à superfície do rebolo, para a operação de dressagem. A ponta deve estar recuada, distante do rebolo abrasivo, para que o movimento longitudinal ocorra livremente. Entretanto durante a operação de dressagem o conjunto transversal deve proporcionar o avanço sobre o rebolo abrasivo chamado de profundidade de dressagem (ad). Nesse caso a posição do dressador é o principal fator a

ser controlado. A velocidade de movimento não é importante, porém pode-se desejar usar um avanço lento para proporcionar o aprofundamento do diamante sobre o rebolo abrasivo e um avanço rápido para o recuo da ponta. Esses detalhes são discutidos na descrição do conjunto de comando.



**Figura 49 - Representação do conjunto de movimentação transversal**

**Tabela 3 - Lista de peças do conjunto de movimentação transversal**

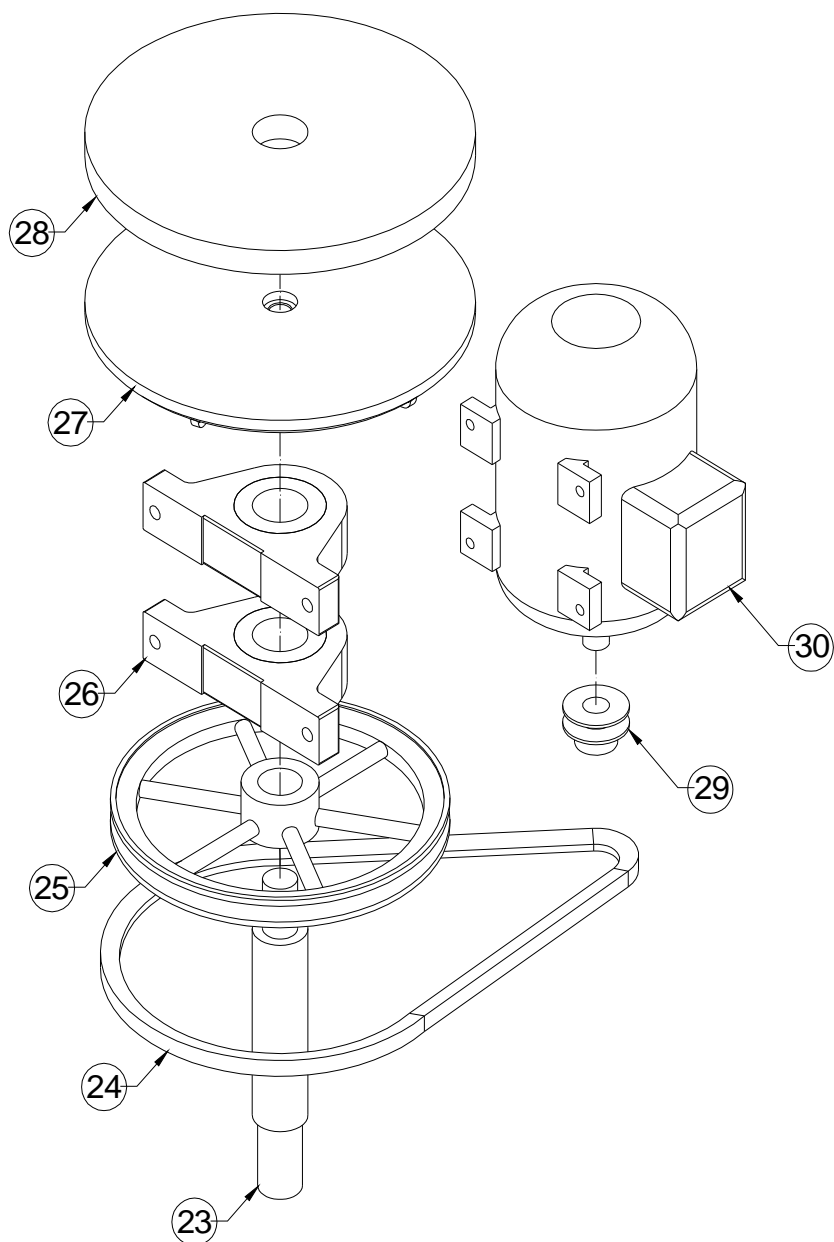
Item	Descrição	Quantidade
13	Guia linear com patins	01
14	Ponta de diamante embutida em suporte cilíndrico	01
15	Suporte de ligação entre o fuso a guia	01
16	Mancal com rolamento de esferas	01
17	Suporte para o fuso	01
18	Fuso de esferas recirculantes com porca de esferas	01
19	Acoplamento elástico	01
20	Prolongador do motor	04
21	Motor de passo	01
22	Reforço	02

As considerações construtivas do conjunto de movimentação transversal são as mesmas feitas para o conjunto de movimentação longitudinal.

### **3.2.4 Conjunto de rotação do rebolo abrasivo**

O conjunto de rotação do rebolo abrasivo é constituído basicamente de um motor, uma transmissão e um eixo com um suporte para o rebolo abrasivo, como mostrado na Figura 50.

A energia da operação de usinagem é basicamente fornecida por esse motor e por isso ele é o que necessita de maior potência. A rotação do rebolo abrasivo pode variar de 0 a 10000 rpm, mas normalmente são baixas, em torno de 100 rpm o que leva a necessidade de uma transmissão. Essa transmissão reduz a velocidade do motor e amplifica seu torque. Como as velocidades são baixas e os esforços não são tão grandes potências como 0,5 a 1,5 cavalos são suficientes quando se trabalha com um número de peças reduzido, entretanto a potência depende do número de peças que estão sendo usinadas simultaneamente. A transmissão deve ser de construção simples e nisso o conjunto correia trapezoidal e polias atendem as necessidades. Entretanto outros tipos de transmissão também poderiam ser usados. Incluindo o uso de engrenagens ou até de conjuntos com motores hidráulicos ou pneumáticos. O eixo deve ser robusto para fornecer resistência às deformações provocadas pelos esforços de usinagem e dressagem. Os mancais devem ser montados no eixo e podem ser utilizados todos os tipos disponíveis no mercado, por exemplo, mancais de rolamento, aerostáticos, hidrostáticos, eletromagnéticos, dentre outros.



**Figura 50 - Representação do conjunto de rotação do rebolo abrasivo**

**Tabela 4 - Lista de peças do conjunto de rotação do rebolo abrasivo**

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>	<b>Quantidade</b>
23	Eixo motor do rebolo abrasivo	01
24	Correia trapezoidal	01
25	Polia	01
26	Mancal com rolamento de esferas	02
27	Disco de lapidação	01
28	Rebolo abrasivo	01
29	Polia	01
30	Motor trifásico	01

### 3.2.5 Conjunto aplicador de fluido de corte

A utilização de fluido de corte é fundamental para a operação de lápidoretificação. A ausência de lubrificação e refrigeração pode gerar queima da superfície da peça, semelhantes às encontradas na retificação e distorções de forma. Como a rotação do rebolo abrasivo é substancialmente menor que a utilizada na retificação, assim como a taxa de remoção, a energia na operação de corte é menor que a encontrada na retificação. Assim o calor gerado é menor e a necessidade de refrigeração também é menor. Dessa forma a utilização de uma quantidade mínima de fluido de corte é mais adequada. Adota-se, portanto a mínima quantidade de fluido (MQF) e pulveriza-se o fluido através de um bico de aplicação. A vazão na faixa de 0 a 150 ml/h é suficiente para evitar danos térmicos à peça.

O fluido de corte é um óleo tipo semi-sintético diluído em água, comum nas indústrias em geral, e o bico de aplicação é um bico atomizador do tipo Venturi, mostrado na Figura 51. No qual são montadas duas tubulações, uma tubulação de ar comprimido em que uma vazão com pressão controlada gera uma pressão “negativa” na tubulação do fluido de corte que é então succionado. A mistura de fluido de corte e ar é pulverizada logo acima da superfície do rebolo abrasivo próximo da peça.

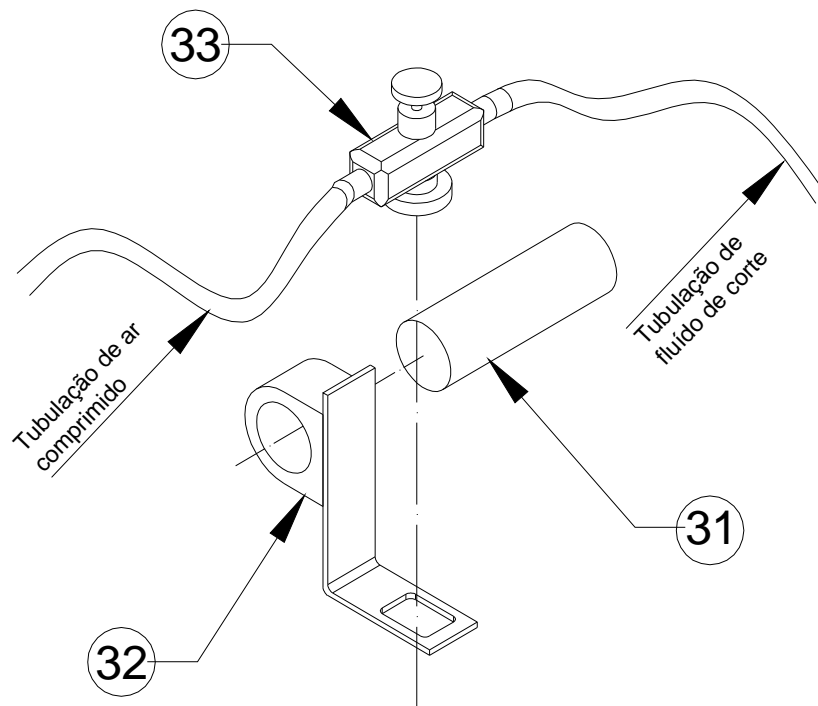


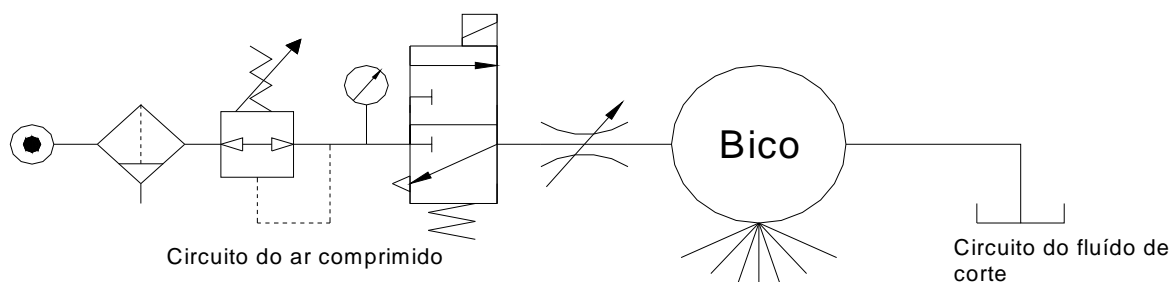
Figura 51 - Representação do conjunto aplicador de fluido de corte

**Tabela 5 - Lista de peças do conjunto aplicador de fluido de corte**

Item	Descrição	Quantidade
31	Suporte cilíndrico	01
32	Suporte para o bico	01
33	Bico aplicador	01

O ar comprimido deve ser limpo, ou seja, deve haver um filtro para controle de partículas e não conter óleo lubrificante. Válvulas de controle de pressão e de controle de vazão devem ser utilizadas para se controlar a quantidade do fluido de corte aplicado. Uma válvula direcional bloqueia a passagem do ar desligando a aplicação, quando é acionada a passagem do ar a aplicação é ligada. O sinal de acionamento dessa válvula é enviado pelo conjunto de comando.

O circuito do fluido de corte contém principalmente um reservatório e a tubulação de ligação com o bico. A Figura 52 mostra um esquema com a representação dos elementos que compõem os circuitos de ar comprimido e do fluido de corte.



**Figura 52 - Representação dos circuitos do ar comprimido e do fluido de corte**

### 3.2.6 Conjunto de fixação da peça

Depois de realizada a preparação do rebolo abrasivo pela operação de dressagem, executa-se a operação de usinagem das peças de trabalho. As peças são fixadas em um dispositivo porta-peças que é parte do conjunto de fixação da peça, mostrado na Figura 53. Esse conjunto possui duas funções: movimentar as peças de trabalho e forçar as peças contra o rebolo abrasivo com uma carga controlada.

O movimento da(s) peça(s) de trabalho é composto da rotação em torno do eixo do porta-peças e da translação longitudinal ao longo do rebolo abrasivo. A translação

longitudinal é realizada pelo conjunto de movimentação longitudinal e a rotação do porta-peças (item 66) é transmitida por um eixo que é movimentado pelo cabo flexível (item 34) acionado pelo conjunto de monitoramento do torque no eixo motriz da peça de trabalho. O eixo (item 47) que transmite a rotação ao porta-peças possui um rasgo de chaveta alongado para compensar a movimentação transversal da função de geração de carga sobre as peças de trabalho. O mesmo rasgo de chaveta é encontrado no apoio do porta-peças (item 65). Esse apoio do porta-peças possui alojamentos para os mancais de rolamento (itens 58, 60, 61 e 62). Esses rolamentos são alojados no Corpo de fixação sobre a guia com patins (item 59) que se movimenta na direção transversal fixo à guia item 67. O apoio do porta-peças também pode se posicionar um pouco inclinado em relação ao plano longitudinal do rebolo abrasivo. Essa pequena inclinação é necessária para compensar desalinhamentos

A carga sobre a peça de trabalho é gerada pela mola item 52. Essa mola é alojada no Apoio para a mola (item 53) em uma de suas extremidades, a outra extremidade é apoiada na porca do fuso (item 49). Quando o fuso item 48 é forçado a girar a porca avança comprimindo a mola, que reage comprimindo o conjunto que está abaixo dela no qual está presa a peça de trabalho. A carga sobre a peça de trabalho é então ajustada pelo deslocamento da porca do fuso, aumentado com o avanço da porca. O fuso também é forçado pela mola, porém esse se encontra rigidamente fixado no mancal de rolamentos itens 41, 43 e 44. Esse mancal está preso na peça 45 que por sua vez está presa na travessa do conjunto de movimento longitudinal. A peça 45 possui um oblongo para prover a ligação mecânica entre as peças 49, 50, 51 e 53. Dessa forma, a leitura da deformação da mola (carga) pode ser feita diretamente pela observação da variação do indicador (item 50) ao longo da escala graduada (item 51). A rotação do fuso (item 48) é gerada pelo motor 3 (item 42) e é transmitida pelas polias 37 e 38, ligadas pela correia item 36. O motor 3 é acionado pelo conjunto de comando que recebe o valor da carga informado pelo usuário do programa de comando.

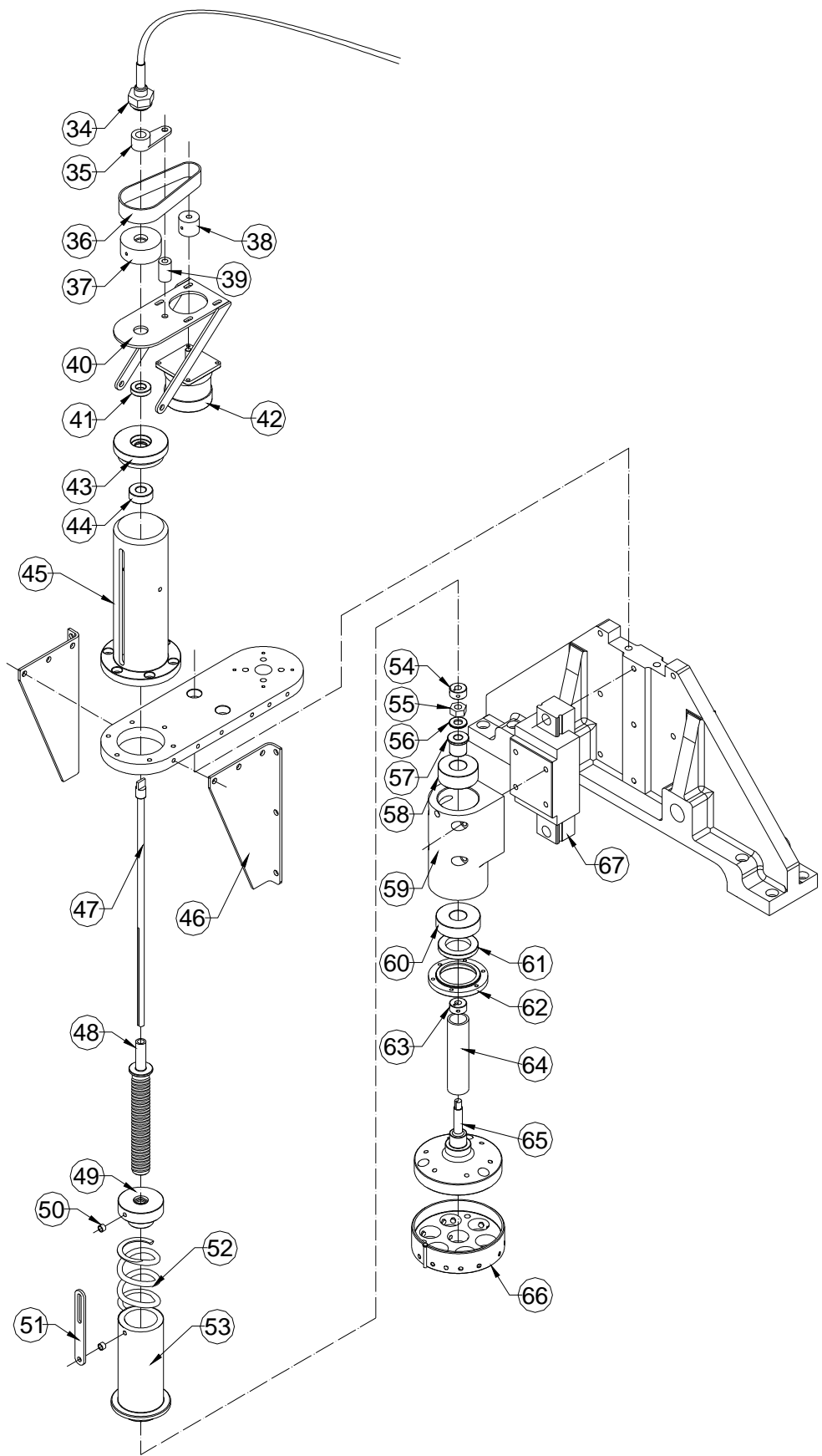


Figura 53 - Representação do conjunto de fixação da peça

**Tabela 6 - Lista de peças do conjunto de fixação da peça**

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>	<b>Quantidade</b>
34	Cabo flexível com eixo para transmissão de torque	1
35	Suporte roscado para prender a capa do cabo	1
36	Correia sincronizadora para o motor 3	1
37	Polia sincronizadora maior	1
38	Polia sincronizadora menor	1
39	Prolongador	1
40	Suporte para o motor de passo 3	1
41	Rolamento	1
42	Motor de passo 3	1
43	Mancal	1
44	Rolamento	1
45	Capa com rasgo para leitura da escala	1
46	Suporte	2
47	Eixo para transmitir o torque do cabo com rasgo de chaveta	1
48	Fuso convencional para transmitir o torque do motor 3	1
49	Porca do fuso	1
50	Bucha para leitura da carga	2
51	Escala linear para leitura da carga	1
52	Mola para geração da carga	1
53	Apoio da mola	1
54	Bucha com rasgo de chaveta superior	1
55	Porca para fixar apoio do porta peça	1
56	Arruela	1
57	Bucha flexível para compensar desalinhamento	1
58	Rolamento	1
59	Corpo de fixação sobre a guia com patins	1
60	Rolamento	1
61	Rolamento	1
62	Mancal	1
63	Bucha com rasgo de chaveta inferior	1
64	Eixo flexível para compensar desalinhamentos	1
65	Apoio do porta peça para transmissão de torque	1
66	Porta-peças	1
67	Guia linear com patins	1

### **3.2.7 Conjunto de monitoramento**

Fazem parte do conjunto de monitoramento todos os sensores que alimentam o conjunto de comando com informações do estado operacional da máquina. Entre as informações monitoradas pelos sensores estão a posição longitudinal e transversal, o torque do eixo motriz da peça de trabalho, a emissão acústica dos processos de usinagem e dressagem, a carga sobre a peça de trabalho e a potência do motor responsável pela rotação do rebolo abrasivo.

#### **3.2.7.1 Monitoramento da Posição Longitudinal e Transversal**

O comando da movimentação dos eixos longitudinal e transversal é realizado por um programa computacional que faz parte do conjunto de comando da lapídoretificadora. Esse programa coordena então o posicionamento do dressador e do suporte da peça de trabalho.

Se esses movimentos fossem realizados sem o auxílio de um monitoramento de posição deve-se presumir que a posição indicada no programa de comando é exatamente igual à medida real nos eixos que ele coordenou. Entretanto isso nem sempre estará correto, se houver algum esforço capaz de bloquear o movimento do motor, o programa de comando não percebe esse bloqueio e haverá um erro entre a posição real no eixo e a mostrada no programa de comando. Esse esforço contrário ao movimento do motor do eixo pode ser momentâneo gerando uma defasagem entre a posição real e a posição adotada pelo programa de comando, sendo que essa última está mais adiantada que a real.

Para minimizar esse problema é realizado o monitoramento da posição dos eixos longitudinal e transversal. É possível aplicar o sensor de posicionamento indireto, o qual informa, por exemplo, a posição angular atual do motor que aciona o eixo. Dessa maneira, se pode monitorar a rotação medida no eixo do motor e compará-la com aquela mostrada no programa de acionamento, se houver diferença a última é corrigida.

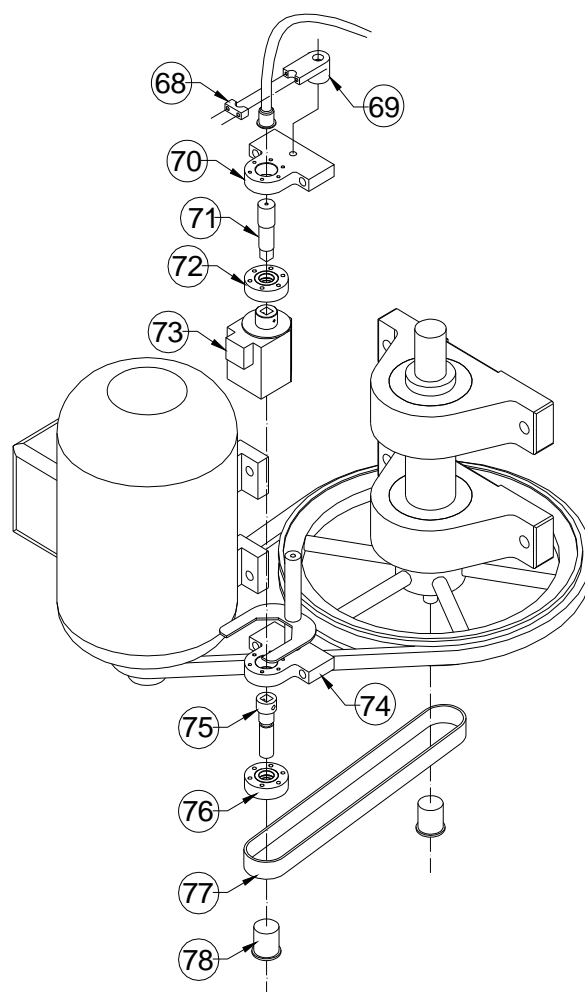
Entretanto, dependendo da precisão exigida, o monitoramento indireto pode indicar uma posição incorreta devido ao fato da medida de posição acontecer nas partes

intermediárias do conjunto. O motor que aciona um fuso de esfera recirculante tem seu movimento angular transformado em movimento linear, as folgas, a dilatação térmica e a deformação elástica do equipamento são exemplos de erros inerentes da medição indireta.

Por outro lado, podemos empregar o método direto de medição, que nesse caso ocorre diretamente sobre a parte que se deseja conhecer a posição, evitando assim os problemas citados anteriormente. Um exemplo de medição direta é a utilização de um transdutor linear, também conhecido como régua linear, montado paralelo à guia linear.

### **3.2.7.2 Monitoramento do Torque no Eixo Motriz da Peça de Trabalho**

Além do movimento de translação longitudinal, a peça de trabalho é submetida a uma rotação em torno do eixo do dispositivo porta-peças. O movimento de rotação do dispositivo porta-peças, por sua vez, provém do acionamento de uma das extremidades do cabo flexível (transmissão de torque). A outra extremidade é presa ao conjunto de monitoramento de torque. Esse conjunto de monitoramento possui um torquímetro (item 73), que é um sensor que mede o torque em seu eixo. Esse torquímetro é acoplado em dois eixos concêntricos (itens 71 e 75) que são fixados nos mancais item 72 e 76. Esses mancais são fixos em seus subjacentes 70 e 74 que sustentam o conjunto impedindo a rotação do torquímetro. O componente que aciona o conjunto de monitoramento de torque e por sua vez aciona a rotação da peça de trabalho é o motor (item 30). Uma transmissão composta de polias e correia é responsável por ligar o Eixo motor do reboło abrasivo (item 23) ao eixo do torquímetro. A relação dessa transmissão é 1:1, ou seja, a velocidade de rotação do eixo do torquímetro é a mesma do eixo do reboło abrasivo, ou ainda, a velocidade de rotação da peça de trabalho é a mesma do reboło abrasivo. Essa característica é desejada e se baseia nos estudos da cinemática da lapidação feitos por Stähli (1998). Stähli notou que caso as velocidades angulares do disco de lapidação e do anel dressador (dispositivo porta-peças) sejam as mesmas, a taxa de remoção de material nos diferentes pontos do disco será idêntica. Em analogia, na lápidoretificação as velocidades angulares do reboło abrasivo e do dispositivo porta-peças são as mesmas, e com isso deseja-se que a taxa de remoção de material seja próxima em toda a superfície do reboło abrasivo.



**Figura 54 - Representação do mecanismo para monitoramento do torque no eixo motriz da peça de trabalho**

**Tabela 7 - Lista de peças do mecanismo para monitoramento do torque no eixo motriz da peça de trabalho**

Item	Descrição	Quantidade
68	Contra peça para fixação do cabo flexível	1
69	Fixador do cabo flexível para transmissão do torque	1
70	Mancal	1
71	Eixo com rasgo para acoplar o torquímetro	1
72	Mancal com rolamentos	1
73	Torquímetro	1
74	Mancal com suporte para o torquímetro	1
75	Eixo com rasgo para acoplar o torquímetro	1
76	Mancal com rolamentos	1
77	Correia trapezoidal	1
78	Polia	2

### 3.2.7.3 Monitoramento de Emissão Acústica

O monitoramento da emissão acústica é realizado por um sensor de emissão acústica que é instalado no conjunto de fixação da peça de trabalho, próximo do dispositivo porta-peças. Esse sensor capta os sinais acústicos gerados no processo de lápidoretificação e dressagem e transmite um sinal elétrico proporcional ao ruído.

Durante a operação de dressagem o monitoramento da emissão acústica é realizado com a intenção de determinar o momento que a ponta de diamante toca no rebolo abrasivo. Nesse momento a posição da ponta de diamante é definida como zero da peça e essa informação é processada pelo programa de comando possibilitando um posicionamento preciso da ponta de diamante. Nessa função o sensor de emissão acústica funciona como um “sensor de toque”, isso é possível porque há um aumento do sinal no momento em que a ponta de diamante toca a superfície do rebolo que se encontra em movimento de rotação. Duas posições são determinadas usando esse recurso: a posição em que a ponta de diamante toca a superfície superior do rebolo e a posição em que um diâmetro calibrado, localizado no corpo da ponta de diamante, toca a superfície lateral do rebolo abrasivo. Na descrição do conjunto de comando será esclarecido que essas posições irão definir o “zero peça” nos eixos transversal e longitudinal respectivamente.

A outra função do monitoramento da emissão acústica diz respeito ao acompanhamento da operação de usinagem com o objetivo de obter o momento adequado para dressar novamente o rebolo abrasivo. Para se entender como isso é possível é necessário saber que a emissão acústica tem sido usada com sucesso no monitoramento do processo de retificação. Há uma correspondência entre o nível de ruído acústico e as condições de usinagem do rebolo abrasivo, sendo possível detectar variações nas condições de corte e se determinar o momento adequado para se efetuar uma nova operação de dressagem. A intervenção da dressagem nesse momento do processo evita variações na qualidade das peças trabalhadas e o processo de lápidoretificação passa a oferecer uma forma de restabelecer as condições adequadas do processo.

#### **3.2.7.4 Monitoramento da Carga Sobre a Peça de Trabalho**

Assim como na lapidação na lápidoretificação aplica-se uma carga sobre a peça de trabalho. A magnitude dessa carga está ligada diretamente à taxa de remoção de material, ao desgaste do rebolo abrasivo e à qualidade superficial da peça. Antes de iniciar a operação de usinagem da peça de trabalho o programa de comando envia um sinal para o motor 3 que comprime a mola localizada no conjunto de fixação da peça e uma carga é aplicada. A intensidade dessa carga é modificada durante a operação de lápidoretificação manualmente, pela observação da escala linear localizada no conjunto de fixação da peça, ou automaticamente pelo programa de acionamento. Os objetivos principais desse monitoramento são alterar a taxa de remoção de material, desgaste do rebolo abrasivo e interferir na qualidade superficial da peça de trabalho.

#### **3.2.7.5 Monitoramento da Potência do Motor do Rebolo Abrasivo**

A energia mecânica disponível na operação de usinagem da lápidoretificação provém do motor do conjunto de rotação do rebolo abrasivo. Parte dessa energia é direcionada para movimentar o rebolo abrasivo e a outra parte para a rotação do porta-peças. O monitoramento da energia desse motor é realizado por um sensor de potência elétrica que mede tanto a tensão de saída do motor como a corrente. Esse sensor é chamado de wattímetro e é baseado no efeito Hall.

O valor de potência do motor elétrico está associado à energia de corte, e portanto pode fornecer informações relacionadas à taxa de remoção de material. Existe ainda a possibilidade de relacionar a energia de corte com problemas de usinagem como queima superficial por exemplo.

#### **3.2.8 Conjunto de Comando e Acionamento**

O conjunto de comando é composto por um programa de comando, um drive e sensores, cada qual possui funções que são descritas a seguir:

O programa de comando é responsável por:

- Fornecer um meio de comunicação simples e de fácil interpretação para o usuário da máquina;

- Receber as informações referentes às operações de usinagem e dressagem, processá-las e arquivá-las;

- Enviar os dados processados para o drive.

O drive é responsável por:

- Receber os dados processados pelo programa de comando;

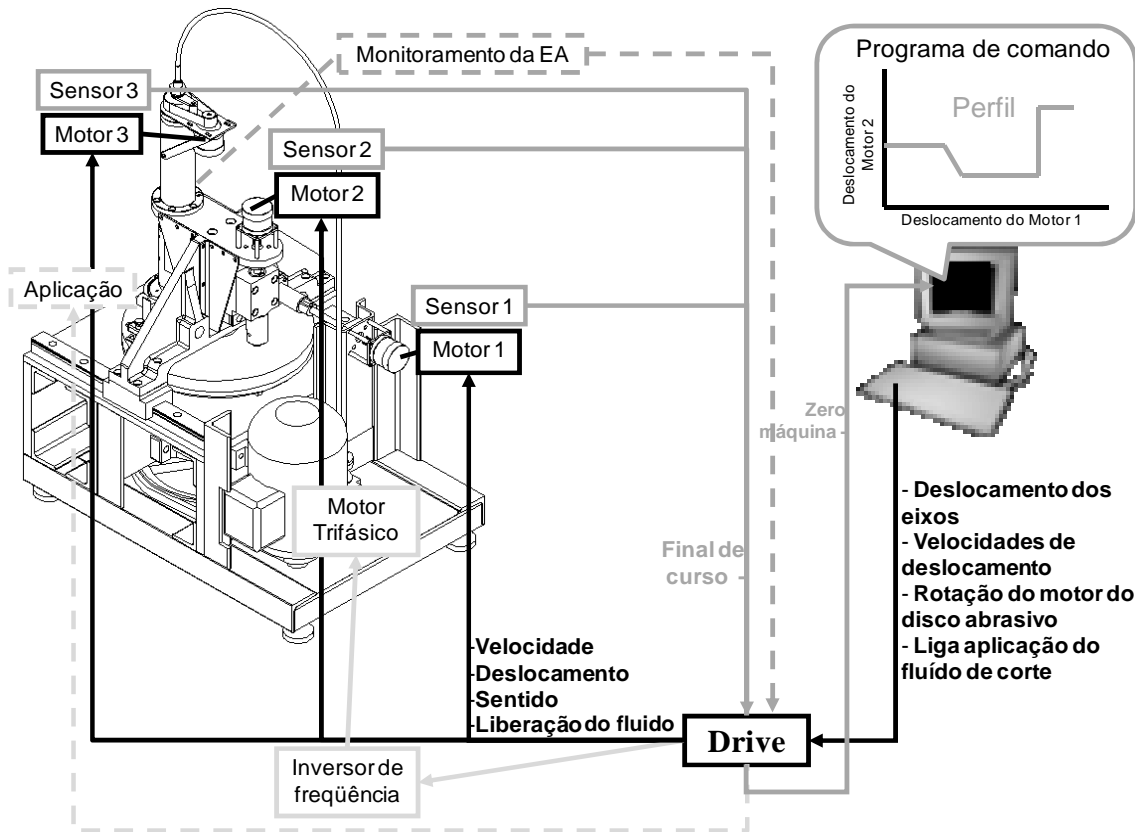
- Fazer um novo processamento dos dados e gerar sinais elétricos de potência para os motores de movimentação longitudinal e transversal (motores 1 e 2), motor de ajuste de carga (motor 3), bem como comandar o acionamento do inversor de frequência e da válvula de abertura de aplicação do fluido de corte;

- Receber os sinais dos sensores, processá-los, e transmiti-los para o software.

Os sensores são de finais de curso e têm a função de informar a posição de referência da máquina chamada de “zero máquina”.

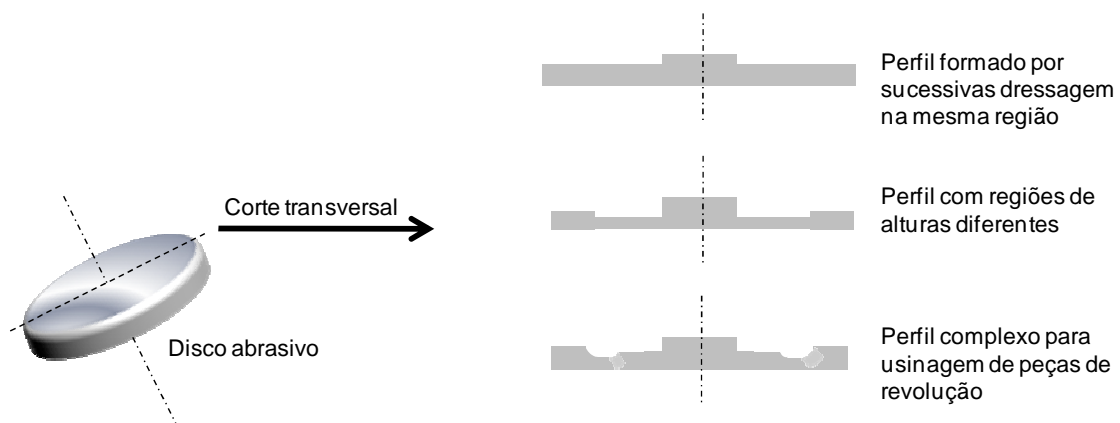
- Comandar equipamentos associados à lapidoretificadora como aspirador de partículas para remoção dos grãos removidos no processo de dressagem, luzes para iluminação do equipamento entre outros.

A Figura 55 mostra um esquema com a transmissão de informações no conjunto de comando. Os sinais dos sensores de final de curso e dos sensores do conjunto de monitoramento são recebidos pelo drive que após processá-los envia-os para o programa de comando. O programa de comando recebe essas informações e de posse dos parâmetros de dressagem e usinagem informados pelo usuário são gerados sinais contendo os deslocamentos dos eixos, as velocidades dos eixos, a rotação do motor do rebolo abrasivo e o sinal de abertura da aplicação do fluido de corte. Esses sinais são transmitidos para o drive que comandará os motores 1, 2 e 3, o inversor de frequência e a válvula de aplicação do fluido de corte. Esse fluxo de informação é contínuo e alterações nas operações de dressagem e usinagem podem ser feitas a qualquer momento por solicitação do usuário do programa de comando.



**Figura 55 - Esquema mostrando a transmissão de informação no conjunto de comando**

Para o programa de comando a operação de dressagem não se resume apenas na geração de uma espiral sobre a superfície do rebolo abrasivo. Mas também na geração de um perfil de geometria definida pelo usuário. Esse perfil pode ser formado por regiões de alturas diferentes no rebolo com graus de recobrimento diferentes, formar superfícies geométricas mais complexas para permitir a usinagem de peças perfiladas ou simplesmente representar o desgaste do rebolo abrasivo após sucessivas dressagens. A Figura 56 expressa, genericamente, algumas das possibilidades de perfis gerados no rebolo abrasivo.



**Figura 56 - Exemplos de perfis no rebolo formados durante a operação de dressagem**

O usuário do programa de comando utiliza uma linguagem de programação codificada muito parecida com a linguagem ISO, conhecida também por código G. Essa linguagem baseia-se na formação de blocos de comando que traduzem uma representação geométrica do caminho que a ferramenta deve seguir. Esses blocos de comando contém, genericamente, informações como:

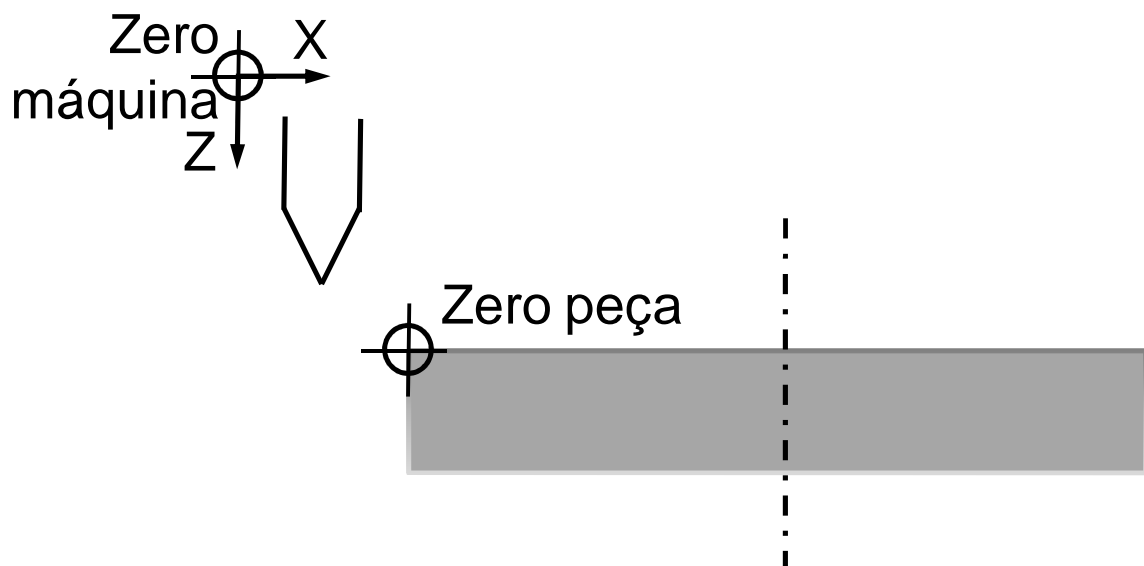
- Seqüência das instruções (identificado pela letra N)
- Tipo de movimento (identificado pela letra G)
- Coordenadas do movimento (identificadas pelas letras X e Z que representam respectivamente os eixos longitudinal e transversal)
- Velocidade de deslocamento (identificado pela letra S)

Muitas outras informações fazem parte dos blocos de comando, entretanto o perfilamento do rebolo abrasivo se resume a movimentação da ponta de diamante através de pontos coordenados que são interpolados por linhas ou arcos de circunferência e para isso poucos tipos de comando são necessários.

A Figura 59 mostra um exemplo de interface do programa de comando. A tela se assemelha a comandos numéricos industriais em que os programas são informados pelo usuário por meio de digitação das letras e números que formam os blocos de comando. O programa de comando também dispõe de recursos gráficos para a simulação da operação de dressagem. Dessa forma o usuário pode visualizar o perfil gerado no rebolo abrasivo antes ou durante a operação de dressagem. Os comandos numéricos usados em máquinas ferramenta possuem os mesmos recursos e a programação da peça de trabalho é feita tendo por base o formato da matéria-prima utilizada e a geometria final da peça usinada. No comando da dressagem a programação é feita a partir do formato gerado pela última operação de dressagem, ou seja, como o rebolo abrasivo pode ser parte integrante da máquina o programa de comando tem que armazenar o último perfil gerado e é a partir desse perfil que é feita a nova programação. Para o programa de comando cada rebolo abrasivo possui um nome de identificação e um formato bruto, normalmente cilíndrico, que é informado pelo usuário. Feita a primeira programação a dressagem é realizada e o perfil gerado sobre o rebolo é armazenado. Quando o usuário fizer uma nova programação o perfil é carregado e mostrado na tela do comando, e a partir desse formato é feita a dressagem subsequente.

Se o rebolo é trocado o programa carrega o formato do novo rebolo. Entretanto para o início da operação de dressagem em um rebolo novo é necessário uma preparação na máquina (set-up). Inicialmente deslocam-se os eixos transversal e

longitudinal até que os sensores de final de curso sejam alcançados. Essa posição é o “zero máquina”. A partir desse ponto é necessário identificar a posição do rebolo abrasivo que será trabalhado. Assim a ponta de diamante é movimentada na direção da superfície superior do rebolo até que o sensor de emissão acústica acuse o toque. Essa posição é armazenada pelo programa de comando como a coordenada Z do “zero peça”. Depois a ponta de diamante é deslocada para a lateral do rebolo abrasivo e avança até que um diâmetro calibrado, localizado no corpo da ponta de diamante, toque a superfície lateral do rebolo abrasivo, novamente é o sensor de emissão acústica que acusa o toque. Essa posição é armazenada como a coordenada X do “zero peça”. Dessa forma o rebolo abrasivo é referenciado e a operação de dressagem pode ser iniciada.



**Figura 57 - Preparação para a dressagem do rebolo abrasivo, os pontos coordenados “zero máquina” e “zero peça” são obtidos por uma seqüência de movimentos de set-up**

O formato do rebolo abrasivo armazenado pelo programa de comando é referenciado pelo “zero peça”. E as sucessivas dressagens formam um perfil que é sempre atualizado pelo programa. Se o rebolo for removido da máquina ou for novamente montado deve-se repetir a preparação descrita anteriormente. A ponta de diamante deve tocar regiões do rebolo que ainda não foram dressadas. Como a região próxima da fixação central do rebolo é a região da espessura remanescente, o programa de comando pode referenciar adequadamente o “zero peça” do rebolo abrasivo em relação ao “zero máquina” fixo os eixos na lápidoretificadora.

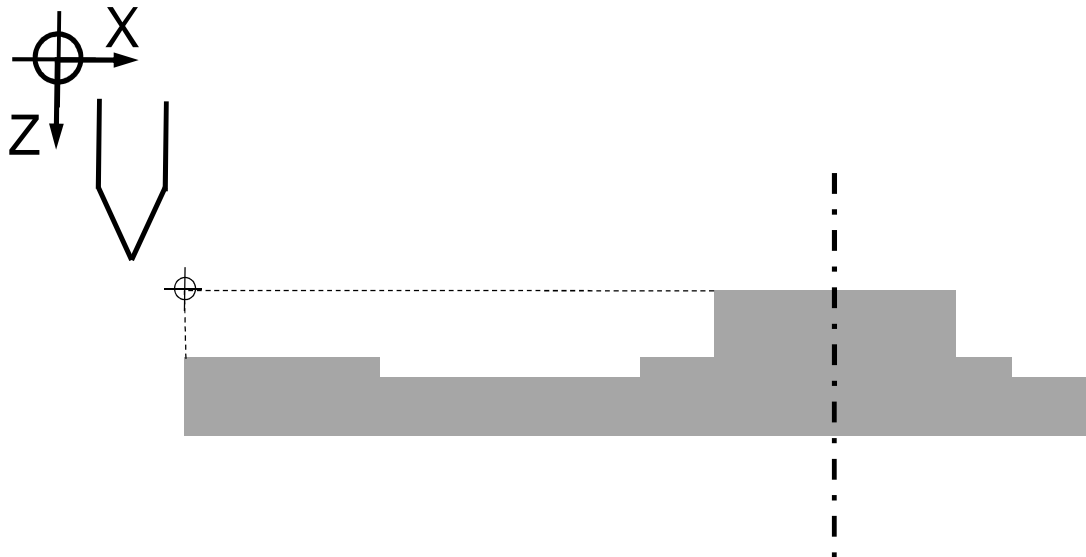


Figura 58 - O programa de comando referencia o rebolo abrasivo através dos pontos: “zero máquina” e “zero peça” e o perfil gerado no rebolo é carregado

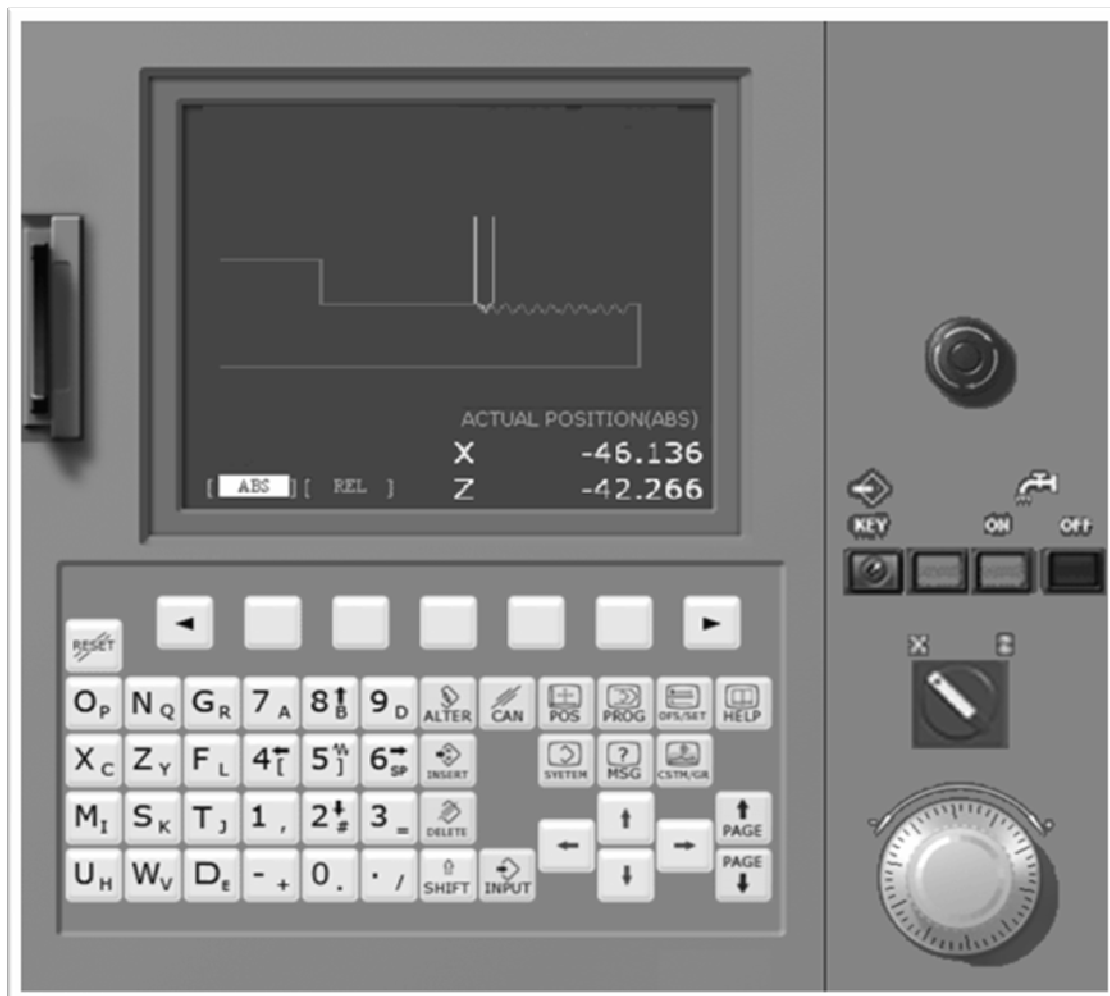


Figura 59 - Exemplo de interface do programa do conjunto de comando

Os comandos de tipo de movimentação da ponta de diamante são os mesmos encontrados na linguagem ISO, para movimentação rápida e linear se utiliza o comando G00 e para uma movimentação lenta o G01. Para os arcos de circunferência os comandos G02 quando a interpolação é no sentido horário e G03 quando é no sentido anti-horário. Entretanto como a dressagem possui parâmetros próprios, foi adicionado comandos para a geração de ciclos de dressagem.

O ciclo para a dressagem em uma região plana é representado pelo comando D01 que possui a seguinte sintaxe:

N \_\_\_ D01 X \_\_\_ Z \_\_\_ L \_\_\_ ad \_\_\_ Ud \_ bd \_\_\_

Onde X e Z são as coordenadas do ponto de início da dressagem, L e ad são as coordenadas do ponto do final da dressagem, ou seja, L é o comprimento da região a ser dressada e ad é a profundidade de dressagem. Por fim Ud é o grau de recobrimento que se deseja na dressagem e bd é a largura de atuação da ponta de diamante. A Figura 60 mostra os parâmetros do ciclo de dressagem D01.

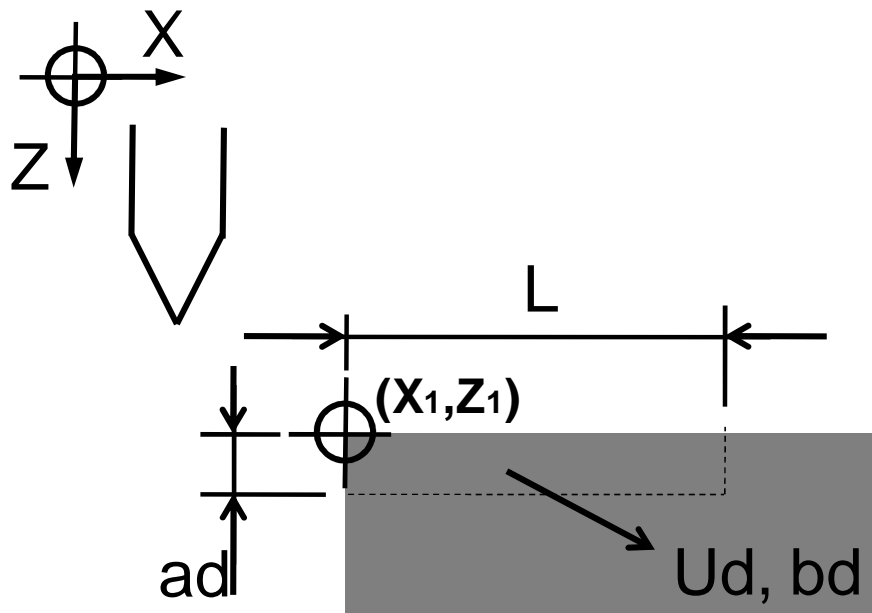


Figura 60 - Ciclo de dressagem D01

De posse dos valores desses parâmetros o programa de comando calcula a velocidade de deslocamento da ponta de diamante através do equacionamento descrito a seguir:

$Ud = \frac{bd}{Sd} \rightarrow Sd = \frac{bd}{Ud} \left[ \frac{mm}{rev} \right]$ , Conhecendo a rotação do rebolo abrasivo  $w$  ( $\frac{rev}{min}$ ). Temos que:

$$\text{Velocidade da ponta de diamante} = Sd [mm/rev] \times w [rev/min] = \frac{bd \times w}{Ud} [mm/min]$$

Uma vez obtida a velocidade da ponta de diamante a dressagem se resume na movimentação linear ao longo do eixo X, partindo-se da posição (X1) até a posição (X1 + L). A ponta de diamante faz esse trajeto com a coordenada Z fixa na posição (Z1 + ad). O ciclo de dressagem D01 termina com uma movimentação rápida até o início do ciclo, ou seja, a ponta de diamante retorna à sua posição original.

#### **4 Considerações finais**

Neste capítulo serão listadas as características mais importantes do processo de lápidoretificação e do equipamento que executa esse processo, a lápidoretificadora.

- A característica que torna o processo de lápidoretificação diferente de qualquer processo existente é o fato de unir uma cinemática que gera riscos aleatórios com uma ferramenta abrasiva preparada pela operação de dressagem. Com isso se uniu a qualidade superficial encontrada nos processos de lapidação e brunimento plano com a versatilidade operacional do processo de retificação.

- As características do processo de lápidoretificação demonstram a necessidade de haver um equipamento diferenciado, a lápidoretificadora é uma máquina cujas principais características são rigidez e eficácia de controle.

- O conjunto estrutural deve ser essencialmente rígido já que sua rigidez afeta a precisão de todos os demais conjuntos da máquina. Comparando-o com os outros conjuntos deve necessariamente deve possuir elevada massa. Pode possuir elementos flexíveis como coxins para favorecer a absorção de vibrações. O material empregado em sua fabricação deve sofrer reduzidas dilatações térmicas ou permitir a dissipação de calor, tendo então uma estabilidade dimensional.

- Os conjuntos de movimentação longitudinal e transversal são responsáveis por conferir a forma ao rebole abrasivo na operação de dressagem. Assim a qualidade da forma das ondulações do perfil de dressagem depende da posição correta da ferramenta de dressagem tanto na profundidade de dressagem, gerada pelo conjunto de movimentação transversal, como no passo de dressagem, gerado pelo sincronismo da velocidade de dressagem, conferido pelo conjunto de movimentação longitudinal, e da rotação do rebole abrasivo que é controlada pelo conjunto de acionamento. A precisão relacionada ao controle depende dos componentes mecânicos e da resolução dos componentes eletrônicos de monitoramento e acionamento. Como são desejadas variações micrométricas na profundidade de dressagem e na velocidade de dressador os componentes responsáveis pelo acionamento desses conjuntos devem permitir tal sensibilidade.

- O conjunto de rotação do disco abrasivo deve possuir eixo e mancais resistentes as deformações provocadas pelos esforços de usinagem e dressagem. A relação de transmissão adotada deve favorecer o controle da rotação do rebolo.
  
- O conjunto de aplicação do fluido de corte deve permitir vazões na faixa de 0 a 150 ml/h, pulverizando o fluido pelo método da mínima quantidade de fluido (MQF). Seu acionamento deve ser automático para diminuição do tempo de preparação da máquina para a usinagem.
  
- O conjunto de fixação da peça deve resistir às deformações causadas pelos esforços de usinagem. Deve possibilitar a aplicação da carga em pressões que permitam a usinagem de peças com diferentes áreas superficiais em diferentes condições de usinagem. A transmissão do torque deve fornecer um esforço suficiente para que seja vencido o atrito da peça de trabalho com o rebolo e a velocidade angular da peça de trabalho deve ser igual a do rebolo.
  
- O conjunto de monitoramento deve alimentar o conjunto de comando com informações do estado operacional da máquina. Os sensores de posição longitudinal e transversal devem informar a posição de final de curso que são as coordenadas do “zero máquina”. As informações do torque do eixo motriz da peça de trabalho e da carga sobre a peça de trabalho auxiliam no comando na usinagem. O sinal de emissão acústica determina o momento do toque do dressador no rebolo gerando as coordenadas do “zero peça”, esse sinal também monitora as condições da usinagem auxiliando a determinar o momento que deve ocorrer a operação de dressagem. O sinal de potência do motor do rebolo abrasivo também auxilia no monitoramento das condições de usinagem por ser proporcional a taxa de remoção.
  
- O conjunto de comando e acionamento deve de ser capaz de receber o sinal dos sensores e através de um meio de comunicação simples e de fácil interpretação possibilitar ao usuário inserir a geometria do perfil a ser gerado no rebolo durante a operação de dressagem. Durante a usinagem o conjunto de comando e acionamento deve comandar o movimento das peças de trabalho monitorando as condições de usinagem através dos sensores de emissão acústica e de potência do motor do rebolo abrasivo e informar ao usuário da máquina quando o rebolo deve ser dressado.

## **5 Sugestões para trabalhos futuros**

Para a continuação do estudo sobre o processo de lápidoretificação sugere-se:

- Realizar ensaios modificando-se a dureza do rebolo;
  
- Estudar os efeitos da aplicação de outros valores de profundidade de dressagem em relação à rugosidade, a taxa de remoção e erro de forma;
  
- Avaliar os efeitos da aplicação de outros valores de pressão de usinagem sobre o acabamento superficial e geométrico;
  
- Determinar a vida útil da ferramenta (quantidade de peças, tempo de usinagem) variando o grau de recobrimento;
  
- Determinação da influência da granulometria dos grãos abrasivos (um rebolo de 220, 400mesh, por exemplo) sobre o resultado quanto ao acabamento superficial e geometria, e a taxa de remoção;
  
- Pesquisar a influência dos outros tipos de fluido de corte (fluido mais viscoso, óleo vegetal) sobre a rugosidade, a taxa de remoção e erro de forma, utilizando o sensor de EA para monitorar o processo em todos os casos;
  
- Empregar a técnica da Mínima Quantidade de Fluido (MQF) no processo.

## Referências Bibliográficas

AELLEN T., BLASER S., BECK, M., HOFSTETTER D. *Continuous-wave distributed-feedback quantum-cascade lasers on a Peltier cooler*. Applied Physics Letters, vol. 83, n. 10, setembro, 2003.

AGOSTINHO, O. L. *Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões*. Edgard Blücher, 1977.

BEYER P., RAVENZWAAIJ M. V. *Innovative flat honing with vitrified-bond grinding and conditioning tools*. Industrial Diamond Review; n° 4, pp. 47-50., 2005.

BRINKSMEIER E., RIEMER O., GESSENHARTER A., *Finishing of structured surfaces by abrasive polishing*. Precision Engineering 30 (2006): 325–336.

BYRNE G., DORNFELD D., DENKENA B., *Advancing Cutting Technology*. eScholarship Repository, University of California, 2003.

CHANDRASEKAR, S., SHAW, M.C.; BRUSHAN, B., *Comparasion of grinding and lapping of ferrites and metals*, Journal of Engineering for Industry, v.109, pp. 76-82, 1987.

CHANDRASEKAR, S., SHAW, M.C.; BRUSHAN, B., *Morphology of ground and lapped Surfaces of ferrite and metals*, v. 109, pp. 83-86, 1987.

CRICHIGNO FILHO, J. M. *Simulação Numérica do Processo de Lapidação Plana Como Ferramenta para Otimização do Processo*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1994.

DINIZ, A. E., F. C. MARCONDES, e N. L. COPPINI. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. Artliber Editora, 2001.

EDA H., TOMITA Y. *A study of the ultra precision grinding process on a magnetic disk substrate-development of new bonding materials for fixed abrasives of grinding stone*. Wear 195, 74-80, 1996.

FARAGO, F. T. *Abrasive methods Engineering*. Industrial Press Inc., New York, v. I, 1990.

FOELLINGER H., *Optimum parameters for dressing process of convencional grinding*, in: Proc. Superabrasives'85, April 22-25, Chicago, Illinois, USA, pp 8-22 to 8-37, 1985.

FRANKS, A. *Nanotechnology*. J. Phys. E: Sci. Instrum. 20, 1442-1451, 1987.

GARMO, E.P., J.T. BLACK, e R. A. KOHSER. *Materials and processes in manufacturing*. Prentice-Hall Inc, 1997.

GATZEN H. H., MAETZIG J. C. *Nanogrinding*. Precision Engineering 21:134-139, 1997.

GATZEN H. H., MAETZIG J. C., SCHWABE M. K. *Precision Machining of Rigid Disk Head Sliders*. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL 32, No 3,, 1996.

GONZÁLEZ C., ZELENY R. *Metrología*. McGraw-HILL, 1995.

INASAKI, I. *Application of acoustic emission sensor for monitoring machining process*. Ultrasonics, v. 36, p. 273-281, 1998.

JUN, N. *Análise de um processo abrasivo combinando em algumas características da lapidação e retificação*. Tese de Mestrado, FEB-UNESP, Bauru, 2004.

KAMETZ, D. A. *Precision fabrication and development of charging and testing methods of fixed-abrasive lapping plates*. Tese de mestrado, North Carolina State University, 2002.

KÖNIG W.; MESSER J., *Dressing conventional grinding wheels with polycrystalline diamond (in German)*, Industrie-Anzeiger 102, 35-38, 1980.

KÖNIG, W., e J. MESSER. *Afiação de Rebolos de Corundo (Óxido de Alumínio) com Ferramenta de Afiação Estática*. Tradução da firma Robert Bosch, Campinas, 12 p., 1980.

KÖNIG, W., KLOCKE, F. *Fertigungsverfahren Band 2: Schleifen, Honen, Läppen*. 3. ed. Düsseldorf: VDI-Verlag, p. 3-275., 1996.

LANG G., SALJÉ E. *Moderne Schleiftechnologie und Schleifmaschinen*. 1. ed. Essen: Vulkan-Verlag, p. 15-39 e 55-58, 1989.

MACKENSEN V., LONGERICH W., DENNIS P., PREISING D. *Fine Grinding with diamond and cBN*. Industrial Diamond Review, nº 2, pp. 40-43, 1997.

MALKIN, S. *Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives*. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 275p, 1989.

MAMALIS, A. G. *Recent advances in nanotechnology*. Journal of Materials Processing Technology 181, 52–58, 2007.

MARINESCU, I.; INASAKI, I. ULHMANN, E. *Handbook of machining with grinding wheel*, CRC Press, 596 p, 2007.

ODEBRECHT, O. *Dressamento de rebolos de óxido de alumínio microcristalino com dressadores fixos*. Tese de mestrado, UFSC, Florianópolis, 2003.

OLIVEIRA, J.F.G. *Tópicos avançados sobre o processo de retificação*. São Carlos. 94p. Apostila – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1989.

RAJA J., MURALIKRISHNAN B., FU SHENGYU. *Recent advances in separation of roughness, waviness and form*. Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 26, 222-235, 2002.

SALJÉ, E.; PAULMANN, R., *Relations between abrasive process*, Annals of the CIRP, v. 37, pp. 641-648, 1988.

SANCHEZ, L. E. A. *Sistema de programação CN para retificação de peças cilíndricas escalonadas*. Dissertação de mestrado, EESC-USP, São Carlos, 122 p., 1992.

SANCHEZ, L. E. A., C. LOSNAK, e F. R. C. PEREZ. *Comportamento da Taxa de Remoção e Acabamento Superficial na Lapidação Plana sob Diferentes Parâmetros do Processo*. XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 10 p, 1999.

SILVA JUNIOR, C. E., e R. T. COELHO. *Dressagem de rebolos para aplicações de precisão*. Máquinas e Metais , n. 393, p. 100-111, 1998.

SPUR, G., SABOTKA, I. *Mecanismos de remoção de material no polimento de cerâmicas*. Máquinas & Metais (Tradução), fevereiro, p. 32-41, 1991.

STÄHLI, A.W. *The Technique of Lapping*. Editorial técnico de A, W. Stähli Ltda, Biena, Suíça, 35 p., 1985.

STÄHLI, A.W., *Flat honing with diamond or cBN discs*, Industrial Diamond Review, 1, pp. 9-13, 2000.

TOMITA, Y., EDA, H., *A study of the ultra precision grinding process on a magnetic disk substrate – development of new materials for fixed abrasives of grinding stone*, Wear, 195, 74-80, 1996.

TOMLINSON, W.J.; NEWTON, R.C., *Effect of grinding, lapping and various surface treatments on the strength of silicon nitride*, v. 45, pp. 307-310, 1990.

TONSHOFF, H.K.; EGGER, R.; LONGERICH, W.; PREISING, D.,  
*Superfinishing ceramics, Manufacturing Engineering*, pp. 52-59, 1998.

TOUGE, M., MATSUO T. *Removal Rate and Surface Roughness in High-Precision Lapping of Mn-Zn Ferrite*. Annals of the CIRP, v. 45, p. 307-310, 1996.

TREZONA, R. I., D. N. ALLSOPP, e I. M. HUTCHINGS. *Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test*. Wear, v. 225-229, p. 205-214, 1999.

ULHMANN E.; ARDELT T., *Influence of kinematics on the face grinding process on lapping machines*, Annls of the CIRP, v. 48, pp. 281-284, 1999.

VERSPUI, M. A, e G. WITH. *Three-body abrasion: influence of applied load on bed thickness and particle size distribution in abrasive processes*. Journal of european ceramic society, v.17, p. 473-477, 1997.

WEI, J. *Application of chemical-mechanical polishing for planarizing of silicon nitride passivation layers used in high power III-V laser devices*. Cryst. Res. Technol. 41, No. 2, p. 180-185, 2006.

WOLTERS, P., *Fine grinding can be the answer (fine grinding systems)*, Tooling & Production n. 6, pp 45-46, 1998.

YUAN, J. L., P. ZHAO, J. RUAN, Z. X. CÃO, e ZHAO. *Lapping and polishing process for obtaining super -smooth surfaces of quartz crystal*. Journal of materials processing technology, v. 138 p. 116-119, 2003.