UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

NÚCLEO DE MANUFATURA AVANÇADA - NUMA

PRÁTICAS EM PROCESSOS DE PRODUÇÃO

PRÁTICA 4 – PRINCÍPIOS DE RETIFICAÇÃO CNC

Prof. Tit. REGINALDO T. COELHO

Prof. Tit. JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA

Prof. Dr. ERALDO JANONNE DA SILVA

Fevereiro 2013

ÍNDICE

1. CLASSIFICAÇÃO DO PROCESSO **3**

2. A MÁQUINA **3**

3. A CINEMÁTICA DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO **6**

4. DISPOSITIVOS DE ALIMENTAÇÃO E FIXAÇÃO DA PEÇA **7**

5. AS FERRAMENTAS E APLICAÇÃO **9**

6. PRINCIPAIS PARÂMETROS DE RETIFICAÇÃO **11**

7. FORÇA, POTÊNCIA E ENERGIA ESPECÍFICA DE USINAGEM **12**

8. PROGRAMAÇÃO CNC DA OPERAÇÃO **12**

9. PRÁTICA: PROJETO DE UM CICLO DE RETIFICAÇÃO PARA UMA OPERAÇÃO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO ..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

10. PROBLEMA PROPOSTO PARA A PRÁTICA ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

11. BIBLIOGRAFIA **13**

1. Classificação do processo

De maneira geral, os processos de retificação podem ser classificados conforme a forma da superfície gerada, resultado do grau de interação entre peça e ferramenta. Na Figura 1 são destacados os processos de retificação plana cilíndrica externa e interna. A diferenciação entre mergulho ou passagem dá-se pelo deslocamento longitudinal do rebolo.

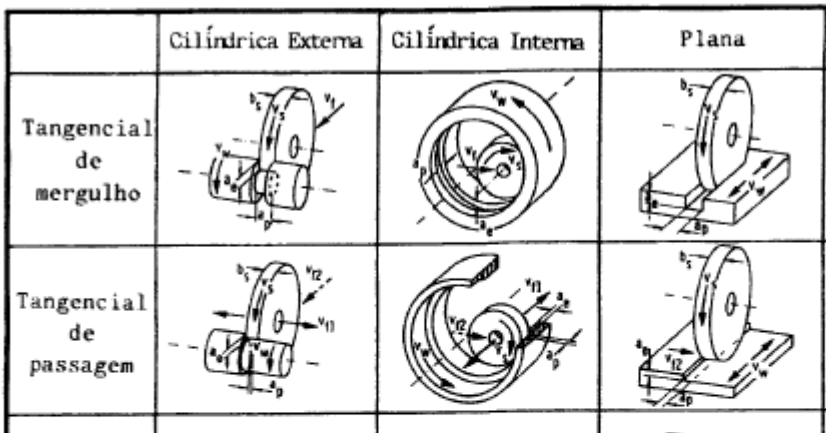

Figura 1 – Alguns processos de retificação classificados segundo a norma DIN 8589 (Adaptado de Oliveira, 1989)

As retificadoras podem apresentar diferenças construtivas em função do tipo de processo a ser executado. Todavia, a configuração cinemática básica consiste em rotacionar uma ferramenta abrasiva, o rebolo, composto de inúmeros grãos abrasivos. A remoção de material ocorre pela interação entre rebolo e peça. Essa última também é dotada de movimento de giro, no caso de uma retificação cilíndrica externa ou interna. Já componentes de superfície plana são montados sobre a mesa magnética da retificadora, permitindo o deslocamento longitudinal e transversal da peça.

2. A Máquina

Na Figura 2 são apresentadas os modelos esquemáticos de uma retificadora plana e cilíndrica, a) e b), respectivamente. Ambas apresentam uma base para apoio e amortecimento da estrutura, sobre a qual são montadas as guias. A retificadora plana possui uma mesa magnética para fixação das peças, como movimento longitudinal e transversal. Já a retificadora cilíndrica possui um carro porta-peça e conjunto de contraponto, o que permite a fixação e o giro de peças cilíndricas. A mesa ainda possui movimento longitudinal. Na retificadora plana o conjunto de acionamento do rebolo é montado sobre uma coluna com movimento vertical. Na retificadora cilíndrica universal, o rebolo é montado no cabeçote porta-rebolo de externo para operações de externo, e no cabeçote de internos para a retificação de diâmetros internos.

A ferramenta ainda pode-se movimentar radial ou longitudinalmente, dependendo da configuração de (mergulho ou passagem, respectivamente), dependendo da relação entre largura total da peça e largura do rebolo.

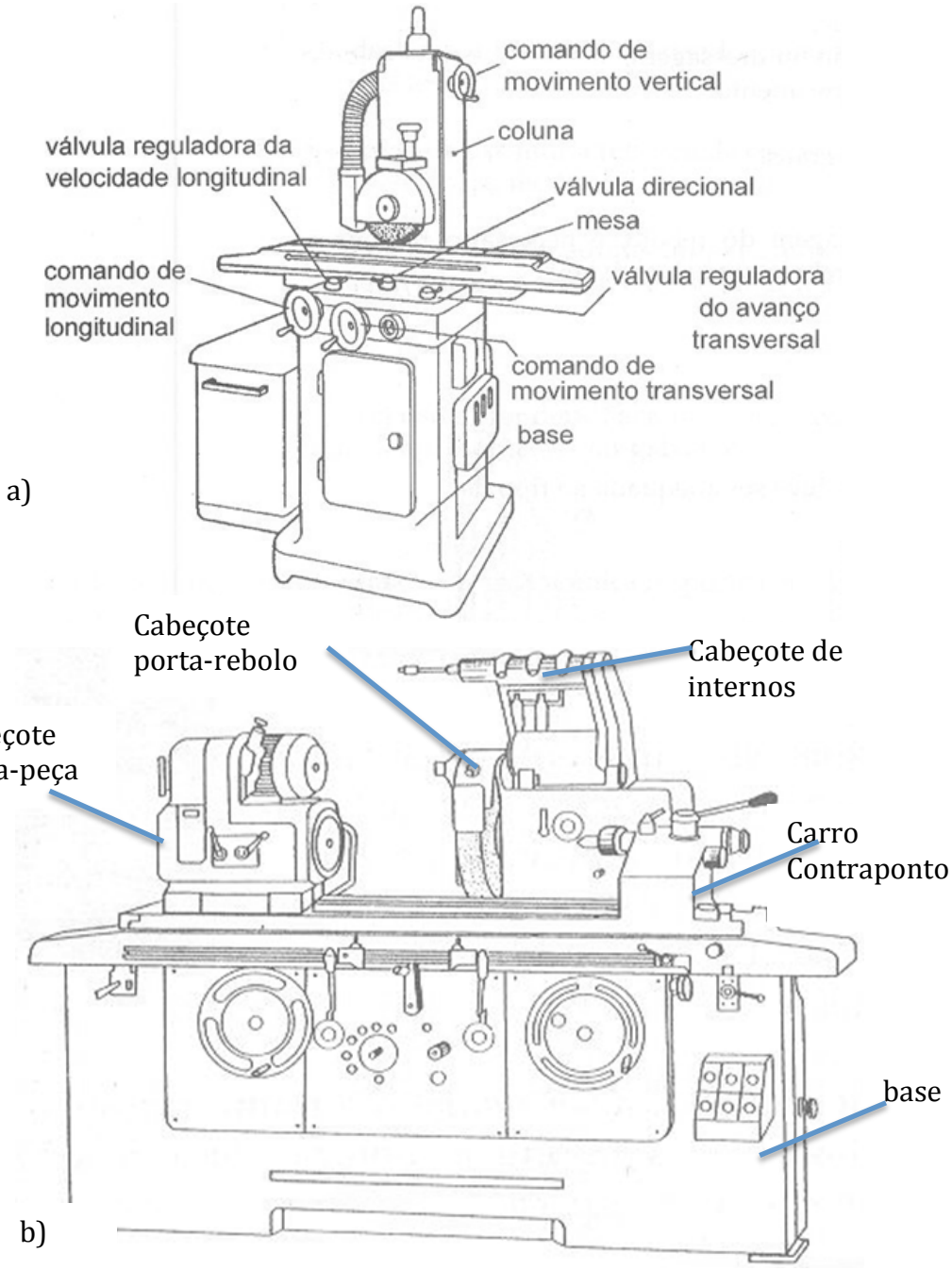

Figura 2 – Visão esquemática das retificadoras: a) plana e b) cilíndrica

As retificadoras CNCs representam uma evolução das retificadoras convencionais, resultado do advento e introdução dos comandos numéricos

computadorizados – CNCs e das demais modificações construtivas necessárias. Dentre elas destacam-se:

a) A Operação da máquina, incluindo a movimentação de eixos, giro da ferramenta e acionamento de sistemas periféricos, é realizada através de linguagem normalizada, sendo interpretada pelo CNC;
b) Movimentação controlada dos eixos longitudinal e transversal da retificadora, através de sistema composto de fusos de esferas recirculantes, acionados por servo-motores de corrente alternada amplificados O controle de posicionamento é garantido através de uma malha de controle fechada.
c) As máquinas apresentam carenagens que tem a função de confinamento do ambiente de corte, evitando que respingos e névoas de fluidos de corte, bem como cavacos, atinjam o operador. A carenagem também tem a função de evitar que pedaços da ferramenta de corte possam atingir o operador e o ambiente ao redor, no caso de uma quebra do rebolo;
d) O sistema de fixação de peças pode ser feito com acionamento automático;
e) Sistemas automáticos de monitoramento e controle podem ser adicionados à retificadora, visando manter o balanceamento dinâmico da ferramenta de corte durante a usinagem. Busca-se ainda detectar e reduzir os riscos de colisões entre o rebolo, a peça e a estrutura da máquina durante a movimentação da ferramenta; o posicionamento correto da superfície de corte da ferramenta e garantir a operação de dressagem (afiação) da ferramenta.

A Figura 3 mostra uma retificadora cilíndrica CNC fabricada no Brasil. Seus subsistemas são apresentados na Figura 4, com indicação do sistema de coordenada dos eixos.

Figura 3 – Retificadora cilíndrica CNC

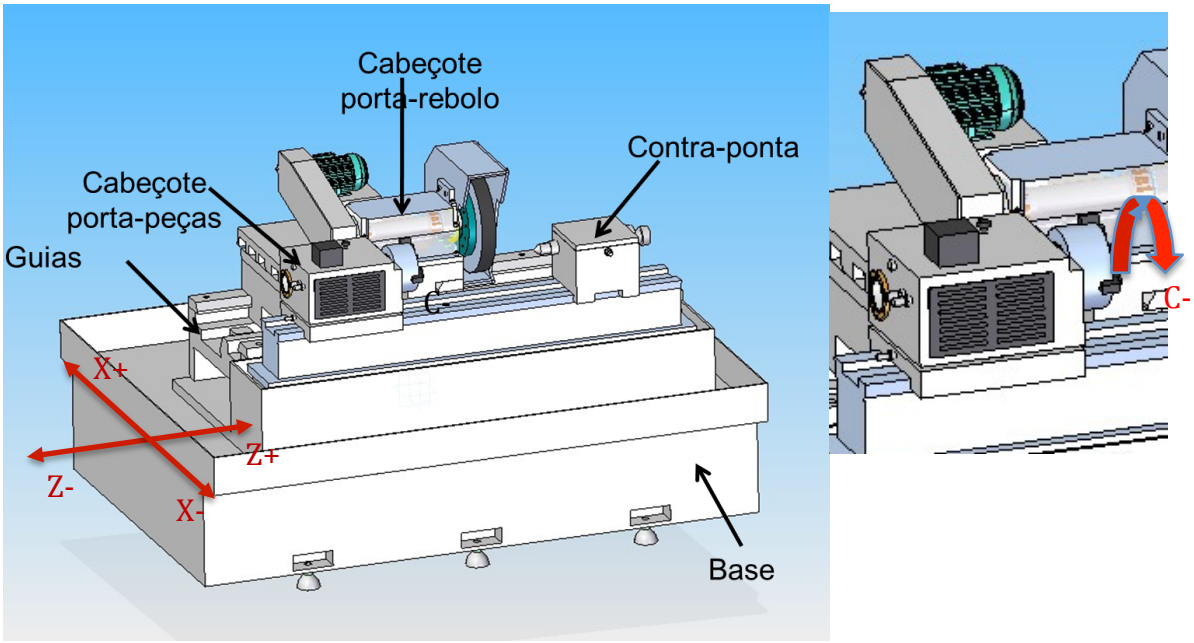

Figura 4 – Sistema de coordenadas de uma retificadora CNC

3. A cinemática do processo de retificação

O sistema de interação máquina-rebolo-peça para uma retificação cilíndrica externa pode ser entendido conforme apresentado na Figura 5. A estrutura da máquina sustenta o rebolo e a peça através de molas, com rigidez k_s e k_w, respectivamente. A rigidez da máquina na direção do avanço do rebolo com velocidade v_{fr} pode ser entendida como uma combinação em série da rigidez das duas molas. Adicionalmente, deve-se considerar ainda a flexibilidade inerente do rebolo e da peça, obtendo-se assim a rigidez total do sistema, denominada k_t. Dessa forma, durante o ciclo de retificação, ocorre uma deformação elástica do sistema, resultando em uma diferença entre o avanço teórico e o real da ferramenta sobre a peça. A deflexão resultante é o cociente entre a força normal na direção do avanço (F_n) e a rigidez total do sistema (k_t). Torna-se necessário, ao final do ciclo de retificação, um tempo de espera, sem avanço teórico do rebolo sobre a peça, denominado de *spark-out* ou centelhamento. Esse tempo de espera permitirá um relaxamento do sistema, com supressão das deformações elásticas, resultado da cessão dos esforços na direção do avanço. Busca-se assim atingir a profundidade de corte teórica do ciclo de retificação, as tolerâncias dimensional e de forma da peça, bem como a rugosidade de projeto. A não introdução desse tempo de relaxamento do sistema acarretará na retificação de peças fora da especificação. Sua duração é função das deformações impostas no ciclo de retificação, as quais são função da rigidez do sistema máquina-peça-rebolo.

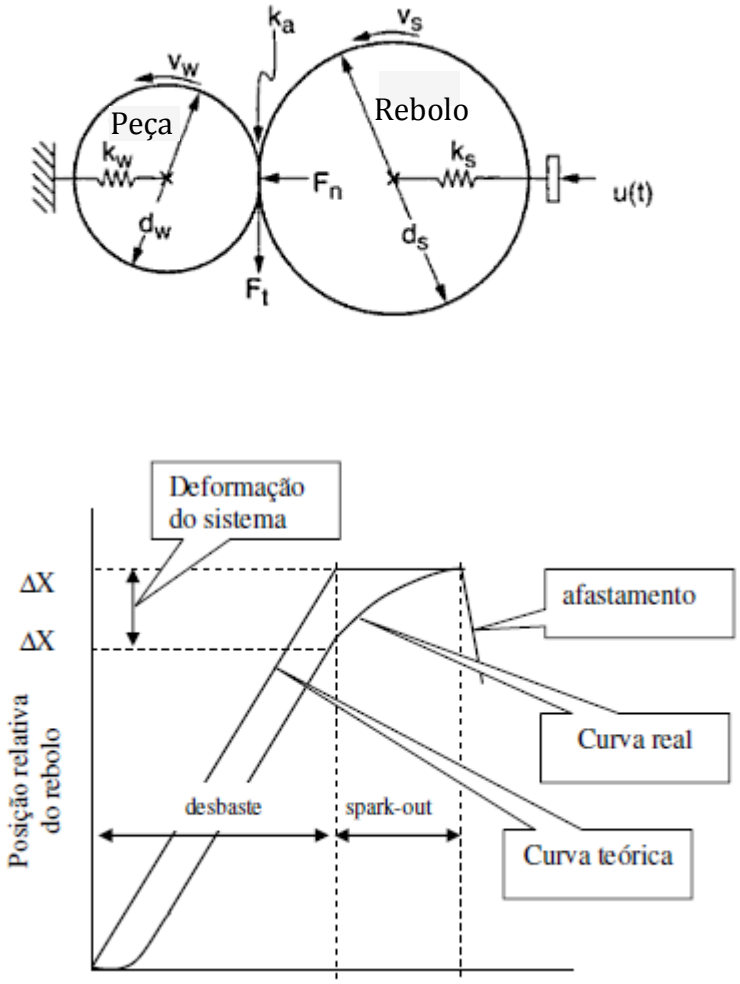

Figura 5 – Comportamento do avanço teórico e real do rebolo durante uma operação de retificação

4. Dispositivos de Alimentação e Fixação da Peça

Nas retificadoras cilíndricas CNC, a peça é fixada na extremidade do carro porta-peças por intermédio de placa, ponta ou pinça. Uma combinação de tipos de fixação, com a utilização ou não de contraponto e/ou luneta dependerão do comprimento, peso e resistência à flambagem da peça. Exemplos desses dispositivos são apresentados na Figura 6.

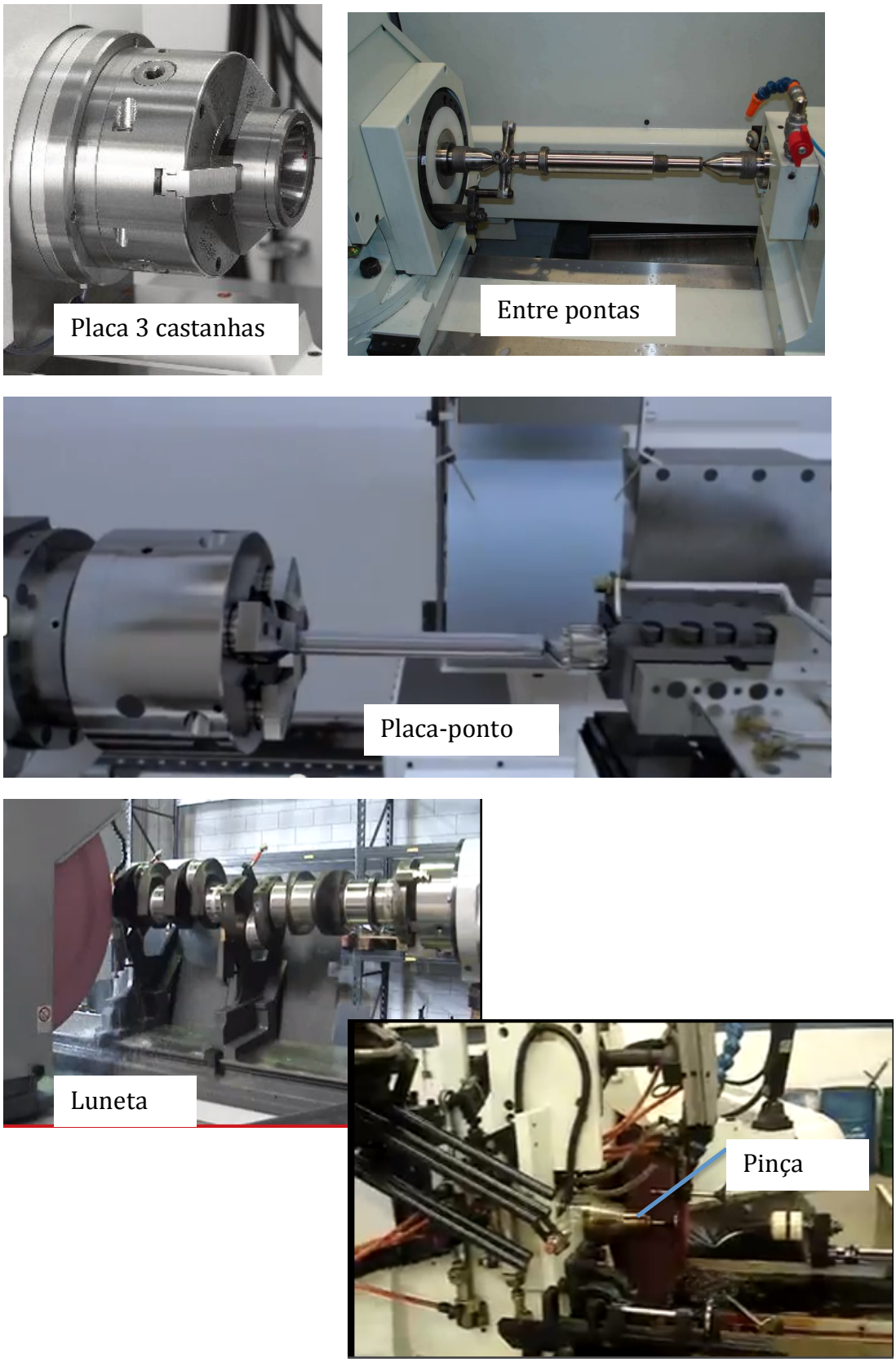

Figura 6 – Diferentes dispositivos de fixação de peças utilizados na retificação

5. As Ferramentas e aplicação

A ferramenta

O rebolo é a ferramenta de corte utilizada na retificação. Três elementos compõem o rebolo: grãos abrasivos, ligantes e porosidades. O ligante serve como meio aglutinante dos grãos abrasivos, responsáveis pela remoção de material. Já os poros permitem o alojamento de fluido de corte e de cavacos. O desempenho de corte do rebolo dependerá basicamente da combinação das seguintes características de projeto:

A) Tipo e tamanho dos grãos abrasivo;
B) Tipo do ligante
C) Dureza do ligante
D) Proporção em volume entre grãos, ligante e porosidade

Dentre os principais grãos abrasivos convencionais utilizados destacam-se os de óxido de alumínio e carbeto de silício. Já dentre os superabrasivos tem-se os de nitreto de boro cúbico (cBN) e os diamantados (sintéticos e naturais). As diferenças entre os grãos estão relacionadas com a dureza, condutividade térmica e estabilidade química, direcionando assim sua aplicação para os diferentes materiais. Aços endurecidos são retificados com cBN, sendo uma alternativa ao óxido de alumínio. O carbeto de silício é aplicado tipicamente em alumínio e não metálicos. Já o diamante é tipicamente utilizado para retificar cerâmicas e metal-duro. Exemplos de rebolos convencional e superabrasivo são apresentados na Figura 7.

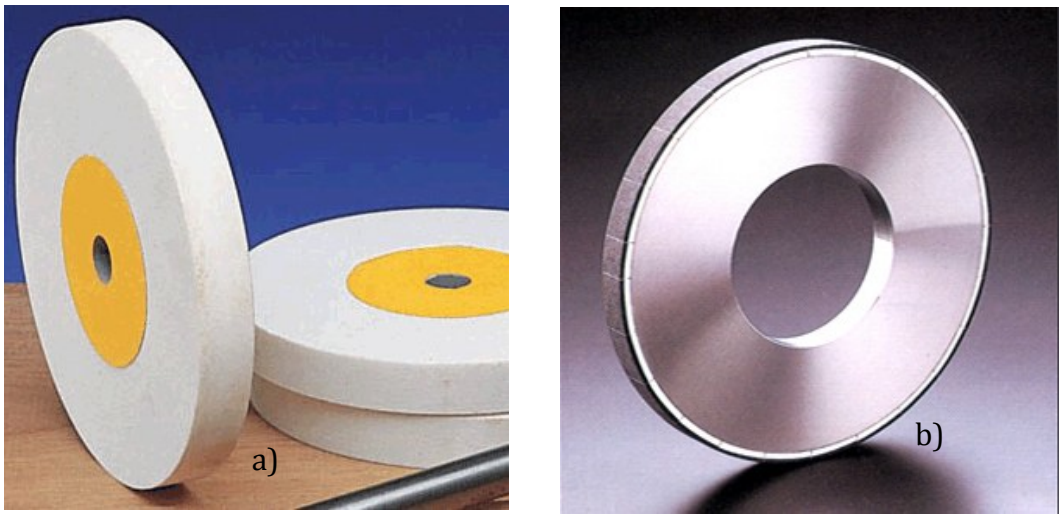

Figura 7 – Exemplos de rebolos convencional a) e superabrasivo b)

Preparando a superfície de corte da ferramenta

A preparação da superfície de corte do rebolo é de fundamental importância para o seu desempenho. Um rebolo deve ter sua superfície de corte concêntrica com o seu centro de giro. Além disso, sua superfície de corte deve ser agressiva o suficiente para permitir a remoção do material. Essa agressividade é limita pela

rugosidade desejada na peça retificada, distinguindo-se em operações de desbaste ou acabamento.

Em rebolos convencionais, as operações de perfilhamento, controle da agressividade e renovação da superfície de corte, pela remoção de grãos desgastados ou mal-ancorados, são realizadas simultaneamente. Dá-se o nome de dressagem a essa operação. Para tal são utilizadas ferramentas estáticas, tipicamente hastes com uma ou mais grãos de diamante, de dimensões controladas. Esses são chamados de dressadores (Figura 8). Durante a operação de dressagem, o dressador penetra uma profundidade de dressagem ($\mathbf{a_d}$), sendo deslocado longitudinalmente a face do rebolo, com velocidade de dressagem ($\mathbf{v_t}$). Define-se o passo de dressagem ($\mathbf{S_d}$) dividindo-se a velocidade de dressagem pela rotação nominal do rebolo. Conhecendo-se a largura de atuação do dressador ($\mathbf{b_d}$) pode-se definir um parâmetro de grande importância, o grão de recobrimento ($\mathbf{U_d}$), como sendo a razão entre $\mathbf{b_d}$ e $\mathbf{S_d}$.

Figura 8 – Dressadores estáticos

O controle da agressividade da ferramenta está relacionado com o grau de recobrimento adotados. Para $\mathbf{U_d}$=1 tem-se a máxima agressividade da superfície de corte do rebolo, produzindo-se um macro-efeito (ondulação) pronunciado. Para $\mathbf{U_d}$ entre 2 e 4 obtém-se uma agressividade intermediária, sendo que operações de acabamento são tipicamente utilizados valores de $\mathbf{U_d}$ maior que 4, com predominância de micro-faturas no grãos e macro-efeito pouco perceptível (Figura 9).

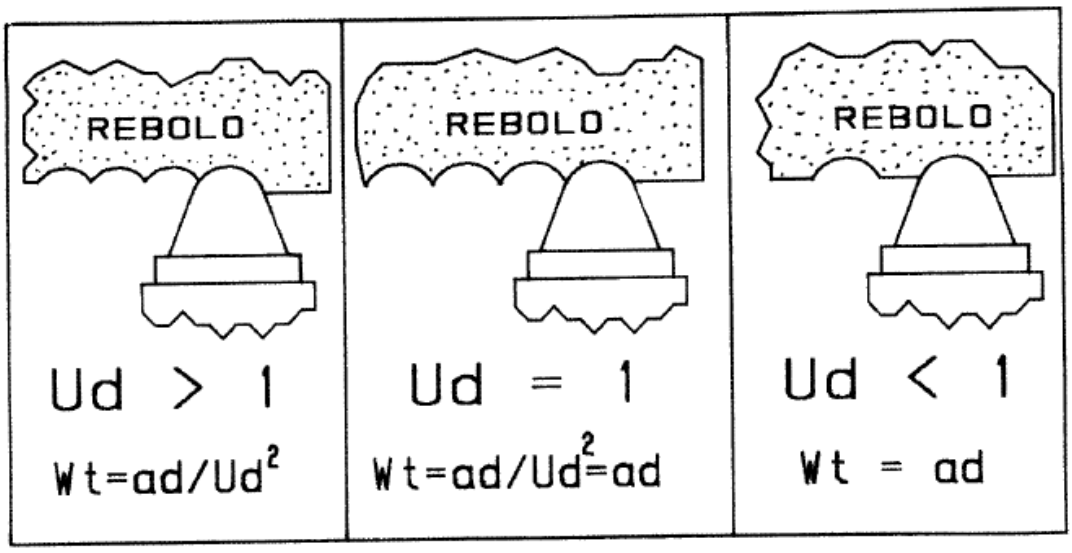

Figura 9 – Grau de recobrimento

6. Principais parâmetros de retificação

A Figura 10 traz a configuração esquemática dos principais parâmetros geométricos do processo de retificação tangencial plana (a) e cilíndrica externa. São eles:

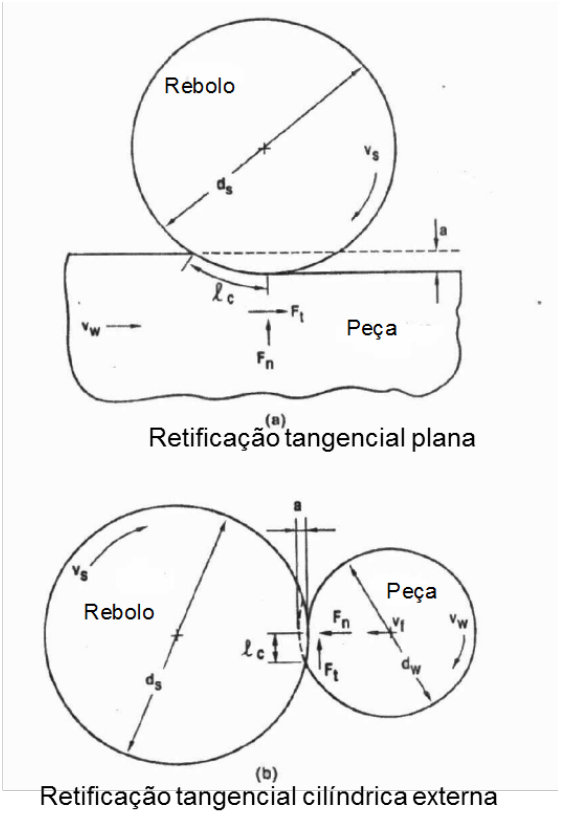

Figura 10 – Principais parâmetros da retificação

- Velocidade do rebolo ($\mathbf{v_s}$) [mm]
- Velocidade da peça ($\mathbf{v_w}$) [mm]
- Diâmetro do rebolo ($\mathbf{d_s}$) [mm]
- Diâmetro da peça ($\mathbf{d_w}$) [mm]
- Comprimento de contato ($\mathbf{l_c}$) [mm]
- Velocidade de mergulho (retificação cilíndrica) ($\mathbf{v_f}$) [mm]
- Profundidade de corte ($\mathbf{a}$) [μm]
- Profundidade de corte ($\mathbf{a_e}$) [μm/volta]
- Sobremetal de usinagem (**SM**) [mm] – diferença entre a dimensão inicial e final do componente retificado

7. Força, potência e energia específica de usinagem

A potência necessária para a remoção do cavaco na retificação (**P**) pode ser entendida como um somatório da parcela da potência para a formação do cavaco propriamente dito, da parcela correspondente ao riscamento do grão abrasivo na peça e da potência de atrito entre rebolo (grão e ligante) e peça. As duas últimas parcelas são indesejadas e devem ser minimizadas através da manutenção da afiação da ferramenta. Definindo-se ($\boldsymbol{\rho}$) como a relação entre a força tangencial e normal de retificação, e adotando-se com base na literatura um valor de ρ=0,45, pode-se determinar as seguintes relações:

- **Potencia de retificação (P)**
  $P = F_t \times v_s$ [W]
- **Força normal de retificação (Fn)**
  $$F_n = \frac{F_t}{\rho} = \frac{F_t}{0{,}45} \quad [\text{N}] \quad (2)$$
- **Energia específica de retificação (u):** energia gasta na remoção de 1 mm³ de material retificado
  $$u = \frac{P}{Q_w} \quad [\text{J/mm}^3] \quad (2)$$
- **Taxa de remoção específica de material**: volume de material removido na retificação por unidade de tempo e por largura de rebolo
  $Q'_w = v_w \times a = \pi \times d_w \times v_f$ [mm³/mm.min] (3)

8. Programação CNC da operação

O processo de programação CNC de uma retificadora é bastante similar ao do torneamento. Os comandos de movimentação do rebolo para a realização de movimentos de interpolação linear e circular são os mesmos (G0, G1, G2 e G3). Funções miscelânea M (definição de sentido de rotações, fim de programas, parâmetros e acionamento de periféricos), tipo F (velocidade de avanço), S (velocidade de rotação) também estão presentes. Como a troca automática de rebolos não é uma operação trivial em retificadoras cilíndricas universais, as funções T são comumente empregadas em retificadoras adaptadas ao conceito

lean-manufacturing, para as quais os rebolos são montados em sistemas de fixação e troca rápida de ferramentas similares aos centros de usinagem CNC. Caso contrário, a troca de rebolos é ainda uma operação realizada de forma manual. Todavia dispositivos para remoção movimentação e colocação do rebolo no cabeçote porta-rebolo são utilizados, já que os diâmetros dos rebolos variam tipicamente entre 500 -1000 mm.

9. Questões

1. Qual é a função do processo de retificação na fabricação de um componente por usinagem?
2. Quais os principais elementos de uma retificadora CNC?
3. Quais são os procedimentos iniciais necessários para a utilização de um rebolo numa retificadora? Como é feito o processo de afiação do rebolo? Quando o mesmo deve ser realizado?

10. Bibliografia

Oliveira, JFG, Tópicos avançados sobre o processo de retificação, 1989, apostila, EESC, 93p, 1

ROSSI, M. A. **Método prático para otimização do ciclo e retificação transversal de precisão.** 2009. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.