



## MANDRILAMENTO DE PRECISÃO COM CABEÇOTES DE EXCENTRICIDADE REGULÁVEL E SISTEMA DE BALANCEAMENTO

**Walter Lindolfo Weingaertner**

E-mail: wlw@lmp.ufsc.br

**Rolf Bertrand Schroeter**

E-mail: rolf@lmp.ufsc.br

**Henrique Brüggmann Mühle**

Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP

Departamento de Engenharia Mecânica

Universidade Federal de Santa Catarina

Campus Universitário –Trindade

Caixa Postal - 476 – EMC-

88.040-970 - Florianópolis – SC

E-mail: mühle@lmp.ufsc.br

***Resumo.** Os processos de mandrilamento são freqüentemente aplicados a estágios finais de fabricação, sobre peças que já agregaram um considerável número de horas de usinagem prévia, sendo portanto a produção de refugos nessa etapa altamente indesejável. Máquinas-ferramentas cada vez mais rápidas e precisas, aliadas ao aumento da resistência ao desgaste das ferramentas, vêm diminuindo cada vez mais os tempos primários de usinagem. A redução dos tempos secundários, que envolvem troca da peça e regulagem ou troca da ferramenta requerem o uso de um cabeçote dotado de um sistema de compensação de excentricidade, que mantenha a precisão dimensional independentemente do desgaste da ferramenta. De posse de um levantamento bibliográfico acerca dos processos de mandrilamento, foi elaborado um estudo prático. O trabalho experimental consiste na avaliação das influências de parâmetros de corte sobre a qualidade superficial obtida através de ensaios de usinagem com dois cabeçotes de mandrilar de distintos fabricantes dotados de sistema de balanceamento.*

***Palavras-chave:** Mandrilamento, Cabeçotes de mandrilar, Parâmetros de corte.*

### 1. INTRODUÇÃO

Máquinas-ferramentas cada vez mais rápidas e precisas, em conjunto com ferramentas de corte cada vez mais resistentes ao desgaste, contribuíram para um considerável aumento da taxa de remoção de material nos processos de usinagem com ferramentas de geometria

definida. Isto reflete a necessidade de se criar dispositivos capazes de acompanhar esta tendência.

Para o caso específico de ferramentas de mandrilamento, surge a necessidade de se trabalhar com cabeçotes, que além de permitirem operações com altas velocidades de corte permitam também uma rápida e fácil regulagem da ferramenta, a fim de que a máquina fique parada o menor tempo possível. Também faz-se necessário o uso de ferramentas mais precisas, que reduzam as possibilidades de erro dimensional da peça. Além disso o cabeçote deve apresentar características dinâmicas tais que possibilitem um acabamento superficial de alta qualidade.

Para tanto, fabricantes de ferramentas têm desenvolvido cabeçotes de mandrilar que se adequem a esta realidade. Assim sendo, cabeçotes mais recentes possuem sistemas de balanceamento que permitem uma diminuição no nível de vibração do conjunto cabeçote-fuso, tornando possível sua utilização em rotações mais elevadas. Além disto, estes sistemas permitem uma fácil e rápida regulagem de excentricidade da ferramenta de corte.

## 2. TIPOS DE MANDRILAMENTO

O mandrilamento é um processo de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução, onde a ferramenta de corte é dotada de movimento rotatório e a peça ou a ferramenta se desloca segundo trajetória determinada. Tal processo se destina à usinagem de cavidades em peças, onde o movimento relativo entre ferramenta de corte e peça é conseguido através da rotação da ferramenta, uma vez que a rotação da peça poderia levar a situações críticas, em função de grandes dimensões ou devido a formas assimétricas.

Segundo Ferraresi (1970), os tipos mais comuns de mandrilamento são os mostrados na Fig 1.

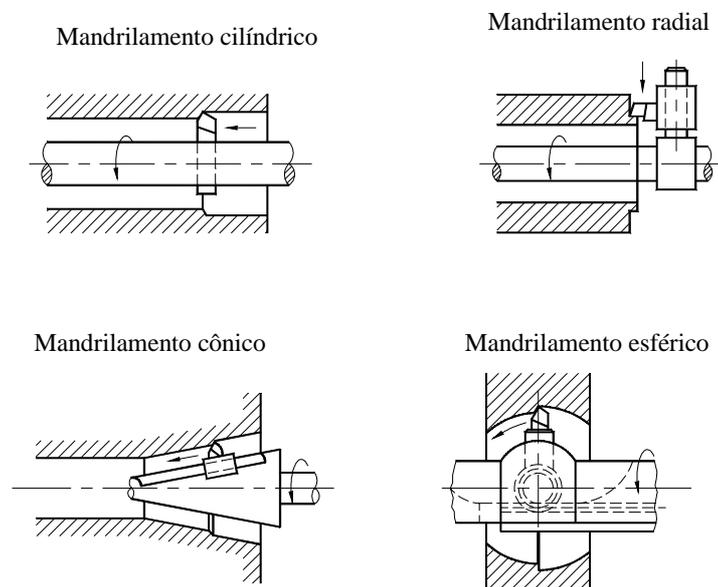


Figura 1: Tipos mais comuns de mandrilamento

## 3. FERRAMENTAS DE MANDRILAR

As ferramentas de mandrilar mais simples são as barras de mandrilar, que não apresentam qualquer tipo de regulagem. As barras de mandrilar tem dimensões (comprimento, diâmetro) fixas, assim como excentricidade da ferramenta de corte. Assim, com uma ferramenta de

mandrilar só podem ser usinados furos em uma determinada faixa de profundidade e com um diâmetro fixo, sem a possibilidade de correção de raio devido ao desgaste da ferramenta de corte.

Ao contrário das barras de mandrilar, os cabeçotes de mandrilar possuem a possibilidade de regulagem de excentricidade da ferramenta. Vários são os sistemas de regulagem, que no entanto foram agrupados por Buck (1974), segundo seu princípio de funcionamento, em dois grupos principais: regulagem somente através do movimento da cápsula da ferramenta e de seu suporte (Fig. 2.a), e a regulagem através do movimento de uma haste (ou prolongamento), onde a cápsula da ferramenta é fixa (Fig 2.b). Na Fig. 2 são mostradas as partes móveis (hachuradas) dos dois tipos de cabeçotes.

A regulagem somente da ferramenta traz a vantagem de que pequenas massas são movimentadas, de forma que o desbalanceamento permaneça pequeno. Entretanto, na usinagem de furos pequenos, onde um cabeçote de pequeno diâmetro é necessário, depara-se com o fato de que não há espaço disponível no cabeçote, para um sistema de regulagem robusto.

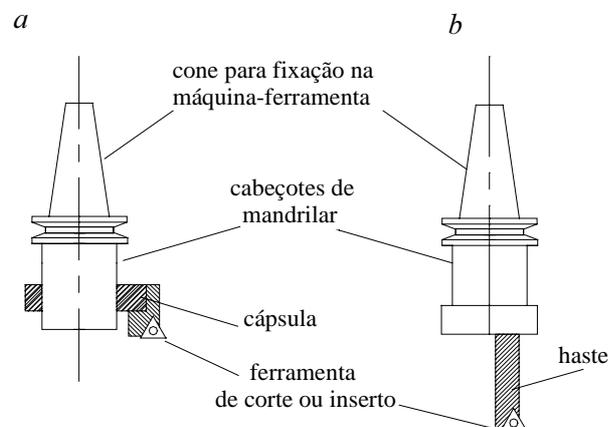


Figura 2: Princípios de funcionamento da regulagem de excentricidade de cabeçotes de mandrilar

Neste caso, segundo Buck (1974), o sistema de regulagem se encontra geralmente na parte superior da ferramenta, onde há espaço suficiente para que se possa usar um sistema com a devida robustez. Assim, a ferramenta fica localizada na ponta de uma haste, longe do sistema de regulagem. A distância entre sistema de regulagem e ferramenta faz, no entanto, com que os erros de tal sistema apareçam de forma agravada na ferramenta.

A movimentação de toda a haste também ocasiona problemas de vibrações causados por desbalanceamento, devido à massa considerável localizada fora do centro de giro da ferramenta, o que se reflete negativamente sobre a qualidade superficial da parede do furo usinado. Conseqüentemente, menores rotações devem ser usadas nestes casos, o que acarreta uma velocidade de corte menor e, por conseqüência, o baixo aproveitamento tanto desta quanto da máquina-ferramenta.

#### 4. PARÂMETROS RELACIONADOS À USINAGEM

A rugosidade resultante de uma superfície pode ser atribuída a vários fatores, entre eles: vibração da ferramenta, marcas de avanço deixadas pela ferramenta e pequenas incrustações na superfície devido à formação de gume postiço durante o processo de formação do cavaco.

Através dos parâmetros de corte e da geometria da ferramenta, pode-se intervir no processo, agindo-se sobre um dos fatores acima, a fim de melhorar o acabamento superficial.

#### 4.1 - Parâmetros de corte

##### *Avanço*

Além de sua importância na economia do processo, o avanço  $f$  exerce influência direta sobre as distâncias entre ranhuras na superfície e sobre a rugosidade  $R_t$ . O avanço tem um efeito muito mais significativo na qualidade do acabamento superficial que a profundidade de corte.

A Fig. 3 mostra o efeito do avanço da ferramenta sobre a superfície usinada. Enquanto que um bom acabamento exige um avanço pequeno, a produção econômica exige grandes avanços, pois esta é a condição mais vantajosa do ponto de vista da ferramenta e consumo de energia. Assim deve-se encontrar um meio termo que possa satisfazer estas duas exigências contraditórias (Stemmer, 1995).

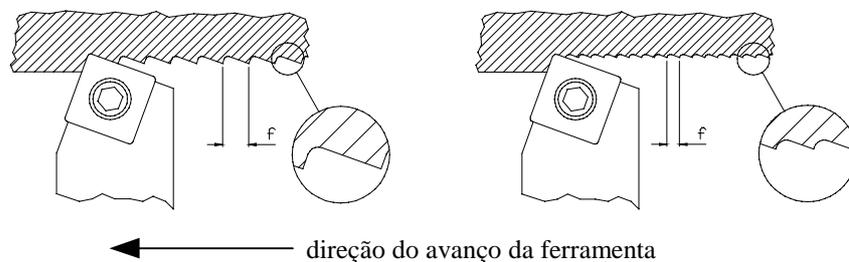


Figura 3: Influência do avanço sobre a superfície usinada

##### *Velocidade de corte*

A velocidade de corte  $v_c$  tem grande importância na economia do processo. É um parâmetro de relevância no tempo de fabricação da peça, uma vez que determina, juntamente com o avanço e profundidade de corte, a taxa de remoção de material. Além disso, tem grande influência sobre a temperatura da ferramenta, o que por sua vez influi na vida da mesma (König, 1989).

A qualidade superficial sofre normalmente uma melhora com o aumento da velocidade de corte, estabilizando em um determinado ponto. Pesquisas realizadas por Böttger (1967) mostram que no torneamento interno de aço CK 45 com metal-duro, a menor rugosidade é atingida com velocidades de corte entre 250 e 300 m/min.

##### *Profundidade de corte*

A profundidade de corte  $a_p$  depende fortemente do excesso de material a ser retirado da peça. Em operações de desbaste é aconselhável que a profundidade de corte seja a maior possível, visando-se reduzir os tempos primários e secundários. Tem-se que, no entanto, levar em consideração a potência da máquina, a máxima seção de corte permissível e a estabilidade do sistema máquina-ferramenta-peça. O efeito do desgaste da ferramenta ocasionado pela profundidade de corte é pequeno em relação ao causado pela velocidade de corte e avanço (Essel, 1972).

## 4.2 - Geometria da ferramenta

### *Ângulo de posição*

Quanto menor o ângulo de posição  $\kappa_r$ , maior a largura  $b$  do cavaco, o que diminui a força por unidade de comprimento de gume. Ângulos de posição pequenos são utilizados na usinagem de materiais de alta resistência, visando-se manter baixa a sollicitação do gume e o desgaste da ferramenta. Por outro lado, a instabilidade aumenta devido ao aumento da força passiva, o que pode dar origem a vibrações regenerativas, prejudicando o acabamento superficial (König, 1989).

### *Ângulo de saída*

O ângulo de saída  $\gamma_0$  apresenta uma forte influência sobre a força de usinagem, sobre o calor gerado e sobre o acabamento. Quanto maior o ângulo de saída, menores as forças de corte, avanço e temperatura de corte, devido ao menor trabalho de deformação sofrido pelo cavaco. Para um ângulo de saída grande, a pressão exercida pelo cavaco sobre a ferramenta se dá mais afastada do gume, diminuindo o seu desgaste. A formação do cavaco se dá de forma mais contínua devido à menor deformação, o que evita o surgimento de vibrações (König, 1989).

Um ângulo de saída negativo aumenta a resistência do gume e sua capacidade de dissipar calor, assim como a temperatura do processo, devido à maior deformação do cavaco. A força passiva também sofre um aumento podendo dar origem a vibrações. A qualidade de acabamento da superfície usinada é menor para ângulo negativo.

### *Raio de quina*

À curva de concordância entre os gumes principal e secundário é dado o nome de raio de quina ( $r_\epsilon$ ). Esta curva exerce influência tanto sobre a superfície usinada (Fig. 4), quanto sobre a formação do cavaco. Sendo o raio de quina pequeno, apenas uma porção do cavaco tem sua espessura reduzida. Para a mesma profundidade de corte, e para um raio de quina maior, a variação da espessura do cavaco se dá gradualmente (König, 1989).

O aumento do raio de quina reduz os esforços sobre a quina da ferramenta. Entretanto apresenta a desvantagem de induzir vibrações e aumentar a potência de corte de 5 a 20%.

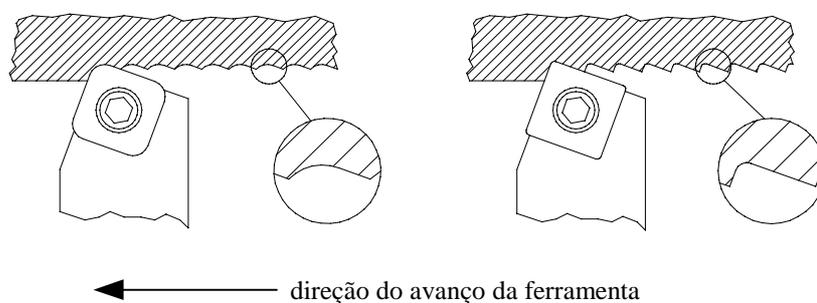


Figura 4: Influência do raio de quina sobre a superfície usinada

## 5. VIBRAÇÕES

### 5.1 Origem das vibrações

A usinagem de metal ou qualquer outro material é invariavelmente acompanhada por vibrações entre peça e ferramenta. Estas vibrações podem ter origem em uma ou mais fontes descritas a seguir. (Crede e Harris, 1991).

**Vibrações Externas à Máquina:** vibrações externas à máquina-ferramenta, geralmente geradas por outras máquinas (prensas, motores, compressores ou outras máquinas-ferramenta), são transmitidas pelas fundações.

**Vibrações Regenerativas:** vibrações regenerativas, ou auto-excitadas, não são causadas por forças externas, mas sim causadas e mantidas por forças geradas pelo próprio corte do material pela ferramenta. Tais vibrações têm forte efeito negativo sobre a vida da ferramenta e qualidade da superfície usinada.

**Vibrações devido à Falta de Homogeneidade da Peça:** o processo de corte livre de vibrações pode ser considerado um sistema dinamicamente estável. Este sistema se torna instável quando ocorre alguma variação nas condições de corte, como por exemplo o corte de uma região de material, onde este apresenta maior dureza. A presença de regiões de diferentes durezas em uma peça causa pequenos choques na ferramenta, resultando em vibração.

**Vibração Causada por Corte Interrompido:** na usinagem com corte interrompido, a ferramenta sofre impactos consideráveis que podem levar a níveis indesejáveis de vibração.

**Vibração Causada pela Máquina:** vibrações causadas pela máquina surgem tanto em acionamentos de componentes dotados de movimento rotacional (fusos, mesas rotatórias), quanto em acionamentos de componentes com movimento de translação (movimentos de avanço).

### 5.2 Balanceamento

Um rotor perfeitamente balanceado é aquele cujo eixo de rotação coincide com um dos eixos de inércia. Desconsiderando-se as forças que causam a rotação deste rotor e que o sustentam, nenhuma outra força age sobre os seus rolamentos quando o rotor se encontra em movimento giratório. Assim, nenhum tipo de vibração pode ser detectado (Crede e Harris, 1991).

Este rotor, no entanto, é meramente teórico, uma vez que por mais apertadas que sejam as tolerâncias de fabricação de um componente, sempre haverá um erro de colinearidade entre eixo de inércia e de rotação, causando um desbalanceamento. O desbalanceamento causado por esta falta de colinearidade pode ser de dois tipos: estático e dinâmico (Crede e Harris, 1991).

O desbalanceamento estático existe quando o centro de gravidade do rotor não se encontra sobre o eixo de rotação do mesmo. Da excentricidade do centro de gravidade do rotor, quando de sua rotação, surge uma força radial que age sobre este, devido à aceleração centrífuga. Esta força é dada por:

$$F = m\varepsilon\omega^2$$

Onde  $m$  é a massa do rotor,  $\varepsilon$  é a excentricidade ou a distância do centro de gravidade ao eixo de giro do rotor, e  $\omega$  é a velocidade angular em radianos por segundo. Esta força é contrabalançada pela soma das reações que surgem nos rolamentos do rotor.

A eliminação deste tipo de desbalanceamento pode ser obtida movendo-se o centro de gravidade em direção ao eixo de rotação do rotor. Isto é feito através da adição ou retirada de massa do rotor, de forma que a força radial causada por esta adição ou retirada seja igual, em módulo, e de direção oposta à força causada pela excentricidade do centro de gravidade. O processo de balanceamento, neste caso, é chamado balanceamento estático ou balanceamento em um plano, uma vez que se faz necessária a adição ou retirada de material em um só plano do rotor.

O balanceamento perfeito, no entanto, só é atingido quando, como já comentado, existe a coincidência dos eixos de rotação e de inércia. Isto é possível quando massas são retiradas ou adicionadas em um plano longitudinal do rotor, possibilitando a rotação do eixo de inércia com relação ao eixo de rotação. Este tipo de balanceamento é chamado de balanceamento dinâmico ou balanceamento em dois planos. Um rotor balanceado dinamicamente necessariamente possui balanceamento estático. A recíproca, no entanto, não é verdadeira.

### **5.3 Vibrações Causadas pelo Cabeçote de Mandrilar**

Um cabeçote de mandrilar, seja com ferramenta ou com toda haste regulável, é sempre uma fonte de vibrações devido ao desbalanceamento causado pela excentricidade de seu centro de gravidade com relação ao seu eixo de giro. Dentre as cinco fontes de vibração descritas no item 5.1, a vibração causada por um cabeçote de mandrilar pode ser considerada pertencente ao grupo de vibrações causadas pela máquina, uma vez que por estar preso ao fuso desta, produz um efeito semelhante ao desbalanceamento do próprio fuso.

## **6. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS**

### **6.1 Considerações Gerais**

Como já comentado, a intenção deste trabalho é a de identificar as tendências relacionadas ao processo de mandrilamento. Para tal, foram selecionados os parâmetros mais importantes relacionados à usinagem, sendo eles: velocidade de corte, profundidade de corte e avanço. O parâmetro relacionado aos cabeçotes de mandrilamento foi a excentricidade da ferramenta, que tem influência direta sobre o diâmetro do furo. Parâmetros relacionados à ferramenta de corte ou inserto (como os abordados no item 4.2) não foram alterados, por terem sido usados insertos recomendados pelos fabricantes da cada cabeçote.

Procurou-se abranger o maior número de condições possível dentro do tempo previsto para este trabalho, escolhendo-se três valores para cada um dos parâmetros citados acima, totalizando 81 condições de corte para cada cabeçote.

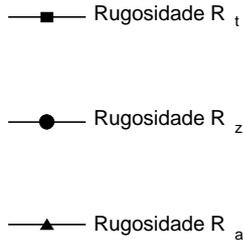
### **6.2 Cabeçotes de Mandrilar Testados**

O cabeçote A apresenta regulagem de excentricidade com resolução centesimal e hastes de metal-duro. O inserto usado é triangular do tipo TPGT 110202. O cabeçote B apresenta regulagem de excentricidade com resolução milesimal e hastes de aço com insertos losangulares do tipo CPGM 2151 KT 125.

### **6.3 Resultados**

A Fig. 5 mostra a influência dos três parâmetros de corte e do diâmetro do furo sobre os três tipos de rugosidade para os dois cabeçotes testados.

## Cabeçote A

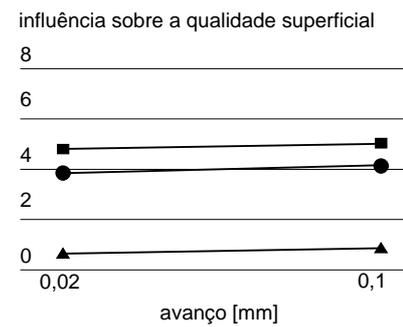
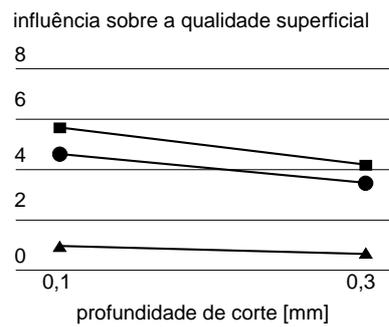
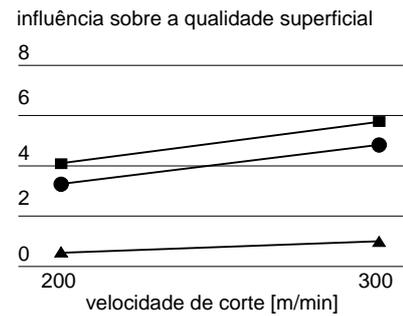
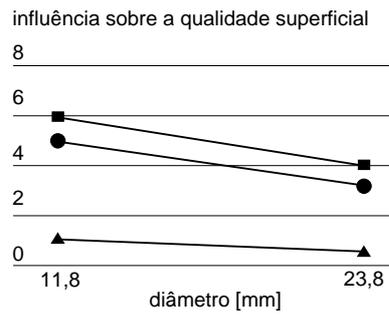


Diâmetro: 11,8 e 23,8 mm

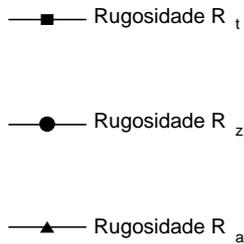
Avanço: 0,02 e 0,1 mm

Profundidade de corte: 0,1 e 0,3 mm

Velocidade de corte: 200 e 300 m/min



## Cabeçote B



Diâmetro: 11,8 e 23,8 mm

Avanço: 0,02 e 0,1 mm

Profundidade de corte: 0,1 e 0,3 mm

Velocidade de corte: 200 e 300 m/min

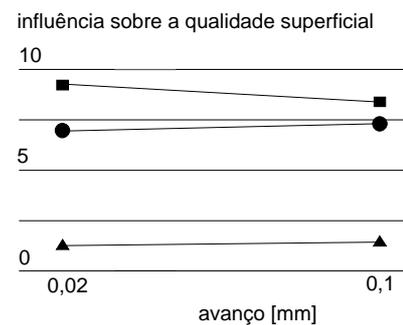
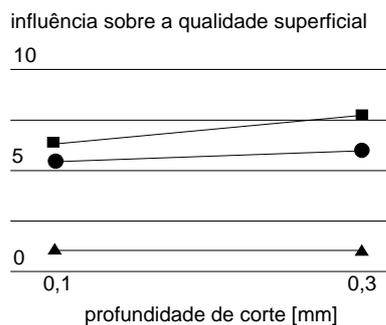
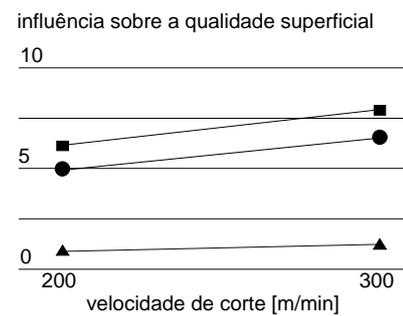
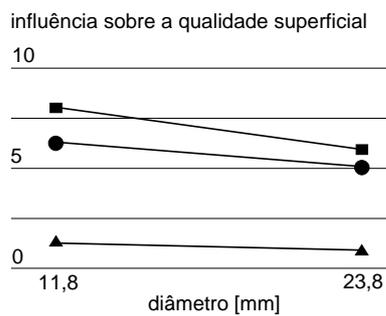


Figura 5: Influência dos parâmetros de corte e diâmetro sobre rugosidades  $R_a$ ,  $R_t$  e  $R_z$ .

O aumento dos valores de rugosidade causados pelo aumento da velocidade de corte são provavelmente causados pelo desbalanceamento residual dos dois cabeçotes. Como explicado no item 5.2, a força de desbalanceamento é dependente da velocidade angular  $\omega$ , consequentemente a rotação dos cabeçotes. Velocidades de corte maiores significam maiores

rotações e, assim, maiores forças de desbalanceamento. A vibração causada pelo desbalanceamento pode ser a possível causa do aumento dos valores de rugosidade.

O efeito do aumento da profundidade de corte  $a_p$  é diferente para cada um dos cabeçotes. Enquanto que para o cabeçote A o aumento da profundidade de corte ocasiona uma melhora na qualidade superficial, para o cabeçote B ocasiona a diminuição da mesma. Possíveis causas para tal são a diferença de geometria dos insertos usados em cada cabeçote (foram usados insertos diferentes em cada cabeçote, recomendados pelos respectivos fabricantes) e a diferença de material com que são confeccionadas as hastes. As hastes do cabeçote A são de metal duro, enquanto as do B, de aço. Estas diferenças podem fazer com que o comportamento dinâmico das hastes seja distinto, acarretando diferentes tendências relacionadas à qualidade superficial.

O efeito do aumento do avanço  $f$  sobre as rugosidades  $R_a$  e  $R_z$  é o mesmo para os dois cabeçotes, ocorrendo um leve aumento de seus valores com o aumento do avanço. No entanto, a rugosidade  $R_t$  nos experimentos com o cabeçote B apresenta uma tendência contrária, diminuindo com o aumento de  $f$ . Tal comportamento pode ser explicado pela diferença entre raios de quina  $r_e$  dos insertos de cada cabeçote, sendo o  $r_e$  do inserto do cabeçote B maior do que o de A. Uma vez que o avanço mínimo para que não haja amassamento de material na superfície usinada é dependente do raio de quina (menor o avanço mínimo, quanto menor o raio de quina), supõe-se que este tenha sido muito grande para o avanço inicial de 0,01 mm. Desta forma, à medida que se aumentou o avanço, atingiu-se um valor mais favorável à formação de cavaco sem amassamento da superfície, obtendo-se uma diminuição no valor da rugosidade  $R_t$ .

Uma outra tendência que pôde ser notada foi a da diminuição de rugosidade com o aumento no diâmetro dos furos mandrilados, como mostrado na Fig. 6. É importante salientar que os valores de rugosidade resultam da média de todos os valores obtidos nos experimentos com um cabeçote para um diâmetro  $D$ . A variação de parâmetros como velocidade e profundidade de corte, assim como avanço, não foram levadas em consideração.

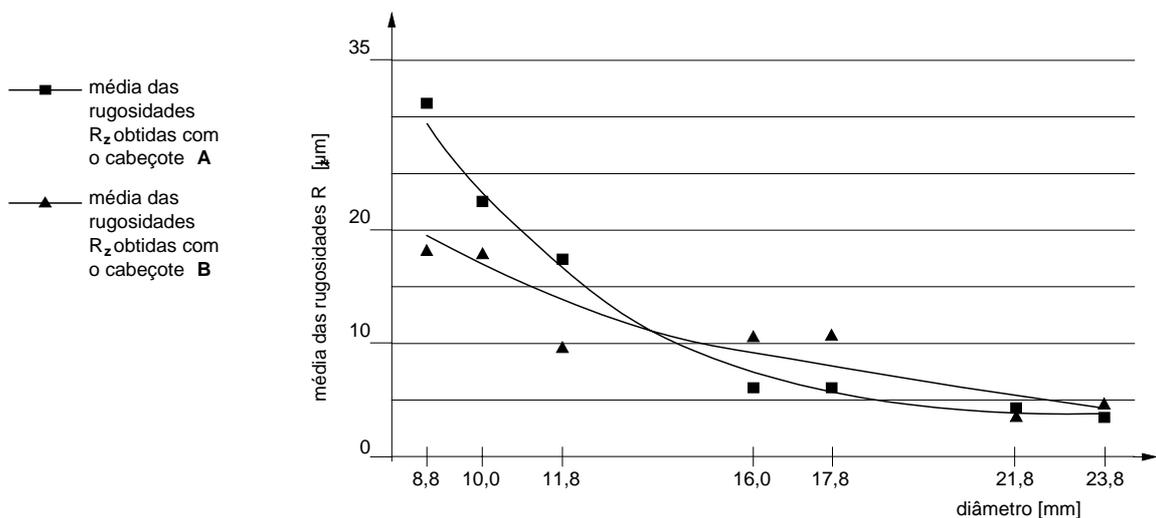


Figura 6: Influência do diâmetro sobre a rugosidade  $R_z$  para os cabeçotes A e B

## 7. CONCLUSÃO

De uma forma geral o comportamento dos dois cabeçotes se assemelha. Apesar de os cabeçotes possuírem sistemas de balanceamento, a existência de um desbalanceamento que

não pode ser compensado por tais sistemas é inevitável. Assim o aumento da velocidade de corte implica em uma piora da qualidade superficial dos furos.

Também para os dois cabeçotes, o aumento do diâmetro das hastes parece ocasionar uma diminuição da rugosidade. Possuindo cada cabeçote de mandrilar um conjunto de hastes, capacitando-os para operarem em uma maior faixa de diâmetros, à medida em que se aumenta o diâmetro do furo a ser mandrilado, maior o diâmetro da haste empregada. O uso de uma haste de maior diâmetro implica em mais rigidez do sistema, ou seja, menos vibrações, o que pode explicar a influência positiva do aumento do diâmetro sobre a rugosidade.

### ***Agradecimentos***

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq para realização de pesquisas apresentadas neste trabalho.

### **REFERÊNCIAS**

BÖTTGER, H., 1967, Untersuchung über den Einfluss der Spanungsbedingungen auf die makro- und mikrogeometrische Formgenauigkeit der erzeugten Werkstückoberfläche beim Innenfeindreihen von Stahl Ck 45 mit Hartmetall, Universidade Técnica de Karl-Marx, Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. 83p.

BUCK, G., Aug. 1974, Einstellprinzipien an Bohrwerkzeugen. Werkzeugmaschine International, Würzburg, n.4, p. 9-12.

BUCK, G., Dez. 1974, DurchmesserEinstellung durch Bohrstangenverlagerung. Werkzeugmaschine International, Würzburg, n.6, p. 41-44.

CREDE, C.E. e HARRIS, C.M. 1991, Shock and Vibration Handbook vol. 1, Mc. Graw-Hill.

ESSEL, K., 1972, Entwicklung einer Optimierregelung für das Drehen. Aachen, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Rheinisch-Westfälischen Technische Hochschule Aachen. 117 p.

FERRARESI, D., 1970, Usinagem dos Metais. 2.ed., São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 3 v., V.1: Fundamentos da Usinagem dos Metais, 751 p.

KÖNIG, W., 1989, Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen und Bohren. 3. Aufl. Düsseldorf, VDI, Vol 2, 421p.

STEMMER, C. E., 1995, Ferramentas de Corte I, 4<sup>a</sup> ed., Florianópolis Editora da UFSC, 249 p.

### **Precision Boring With Regulating Boring Heads and Integrated Counterweight Systems**

**Abstract:** *This paper concerns about boring heads with integrated counterweight systems. After the theoretical research about the boring process, some experiments have been made, in order to show the influences of the cutting parameters (cutting speed, depth of cut and feed rate) and tool diameter on the surface quality.*

**Keywords:** *Boring process, Boring heads, Cutting parameters*