

# MICROUSINAGEM: AULA 8

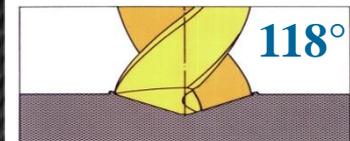
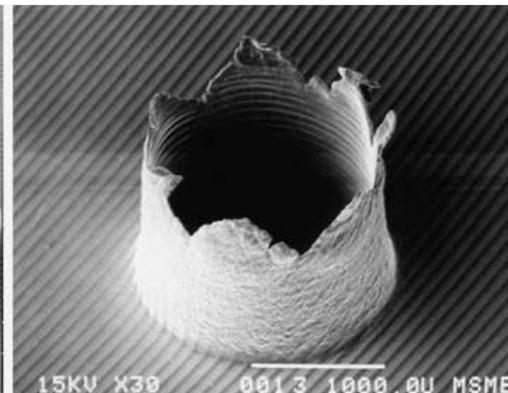
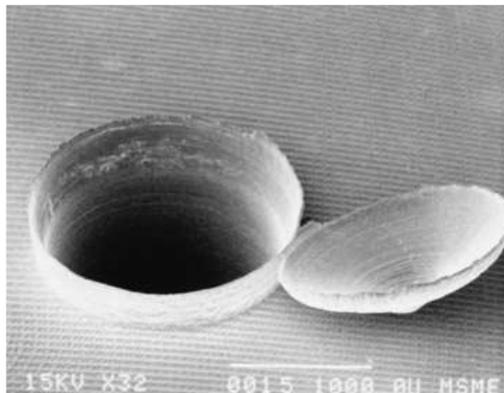
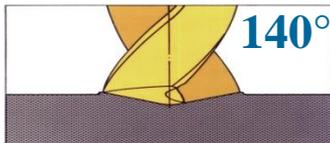
## MICROFURAÇÃO

**Prof. Assoc. Renato Goulart Jasinovicus**

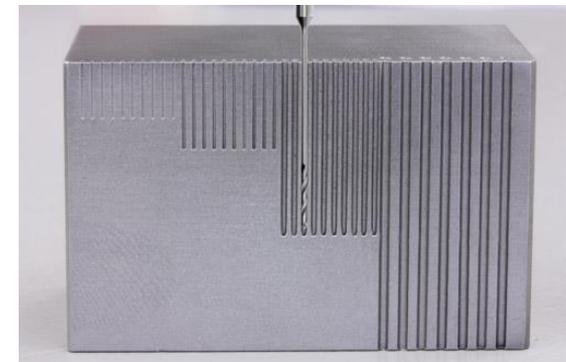
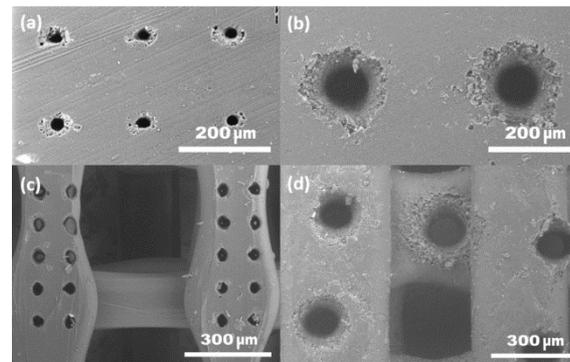
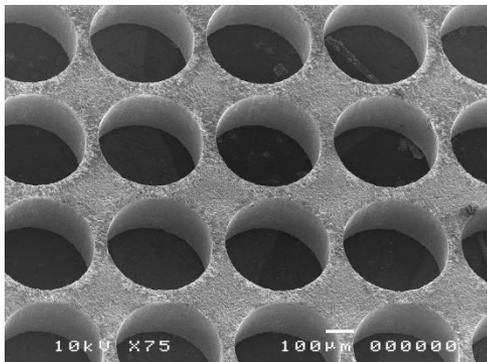
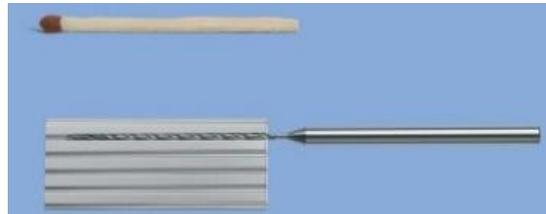
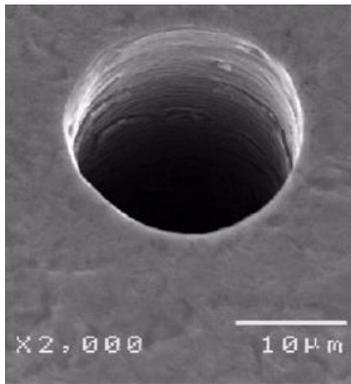
**Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues**

## INTRODUÇÃO

- Micro e mesofuração: aumento de pesquisas (maiores vcs e menores TRM)
- Como a deformação do material afeta o processo?
- Furação livre de rebarba: produtos médicos e aeroespaciais
- Materiais compósitos (polímero reforçado com fibra) e poliméricos
- Rebarbas: falha prematura (especialmente em implantes humanos)



## INTRODUÇÃO



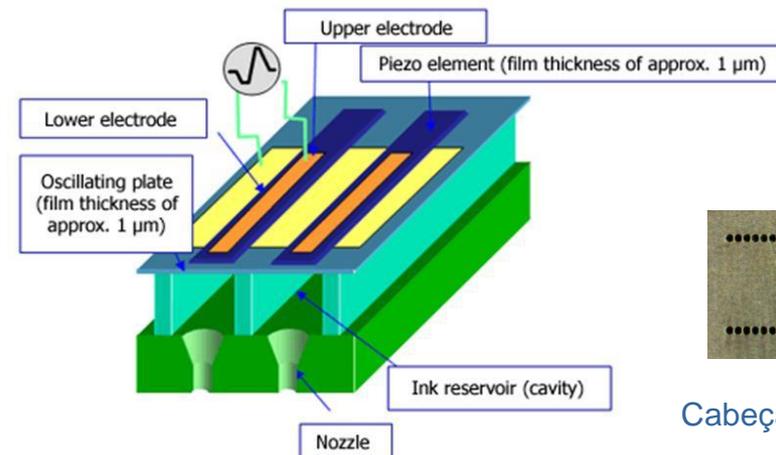
Laser

Scaffolds (laser)

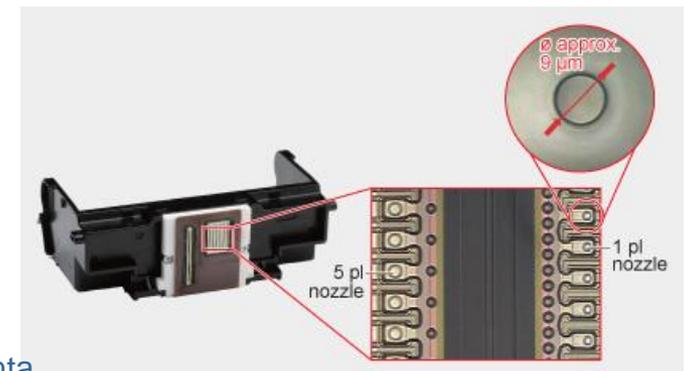
Microfuração mecânica profunda  
(30 x d)

## INTRODUÇÃO

- Microfuração: furos de dezenas de micrometros de diâmetro
- Aplicações: placas de circuito impresso e bocais de combustível
- Cabeças para impressoras de jato de tinta: 250 furos de  $\varnothing 50 \mu\text{m}$  espaçados de  $200 \mu\text{m}$  (uma única fila)
- Microbrocas menores ou iguais a 0,5 mm
- Menor diâmetro comercial: 0,005 mm



Cabeças de impressora à jato de tinta



## INTRODUÇÃO

- **Vantagens:** plásticos, metais e compósitos podem ser microfurados e tempo de usinagem controlável (processo estável)



Polímero



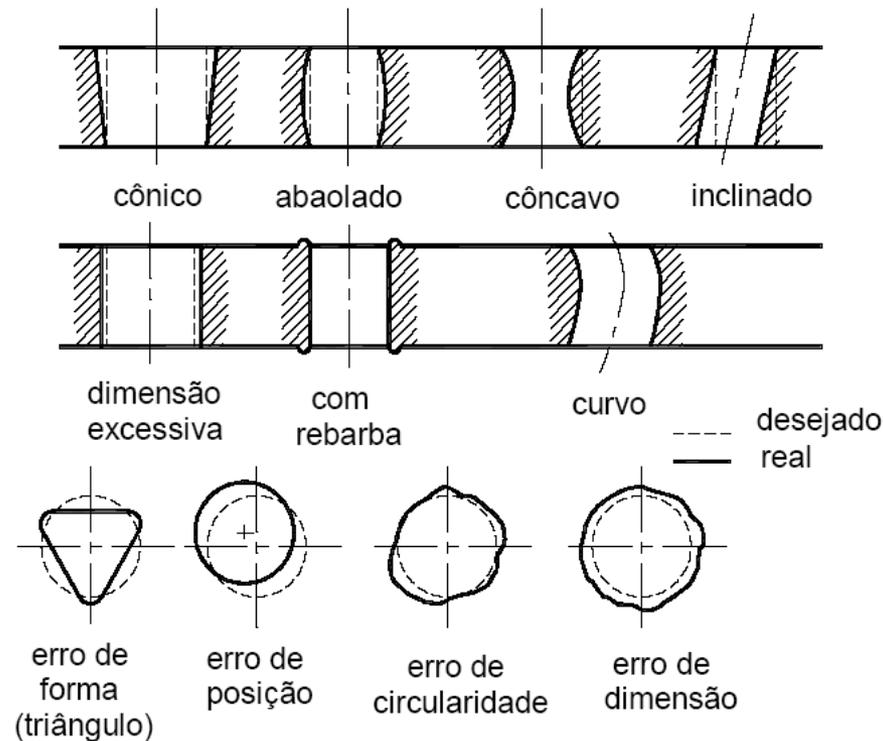
Cerâmica



Compósito

## INTRODUÇÃO

- **Desvantagens:** certos erros de forma (desvios) e lascamento da peça de materiais frágeis (alternativa usar diamante)



## MICROBROCAS

- Material: HSS (mais tenaz) e WC+Co (mais rígida)
- **Iscar:** WC <  $\varnothing$  0,5 mm
- **Mitsubishi:** WC+TiAlN (PVD)  $\varnothing$  1,0 a 2,8 mm para alumínio aeronáutico, titânio 6Al4V, aço inoxidável 304L e aço 4130
- **MA Ford:** WC microgrão <  $\varnothing$  0,1 mm

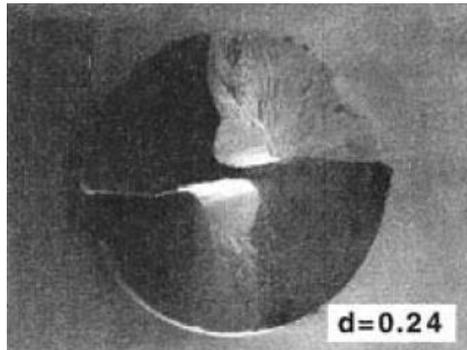


Microbrocas helicoidais de aço rápido microgrão  
Haste  $\varnothing$  1/8"

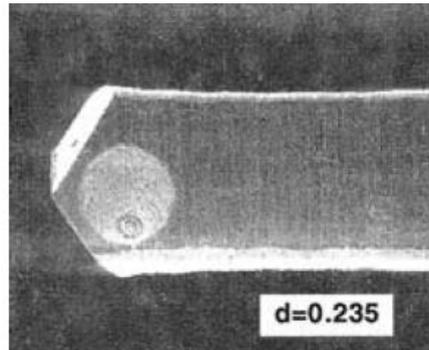


Microbroca  $\varnothing$  0,03 mm furando cabelo humano  
de  $\varnothing$  0,07 mm

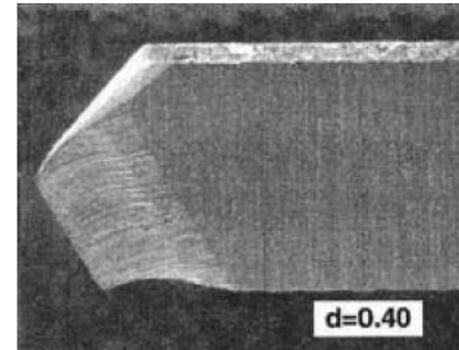
## MICROBROCAS



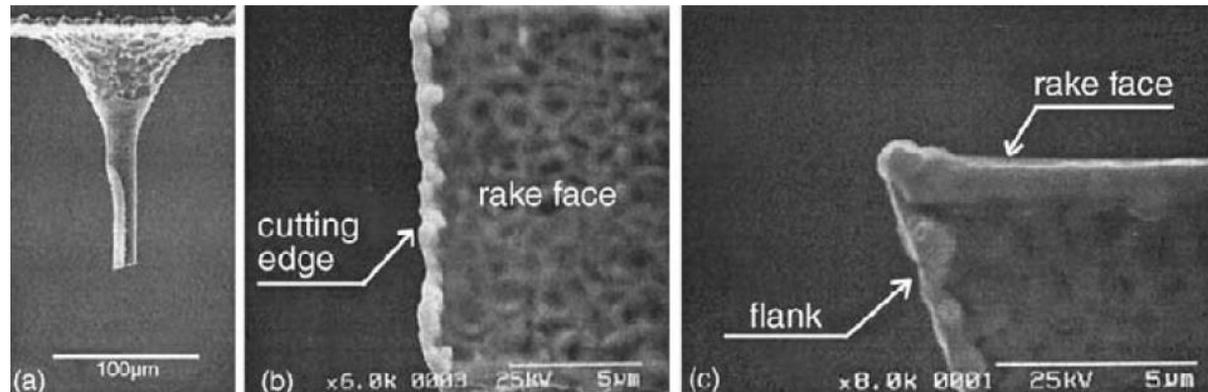
Helicoidal



Espada (até  $\varnothing$  0,025 mm)



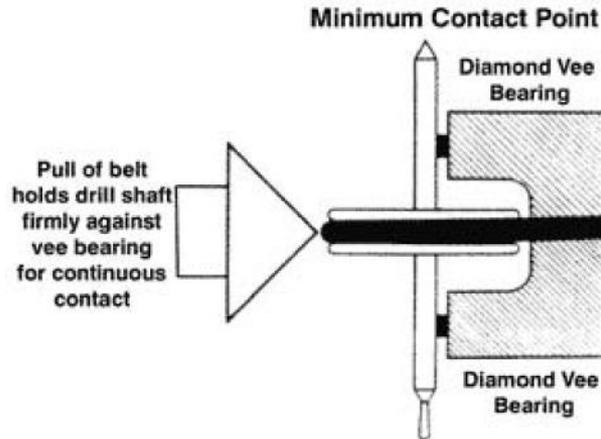
Forma D (até  $\varnothing$  0,006 mm)



Microbroca  $\varnothing$  0,017 mm (WEDG) /  $f = 0,3 \mu\text{m/r}$  e  $L = 50 \mu\text{m}$

## MÁQUINAS-FERRAMENTAS

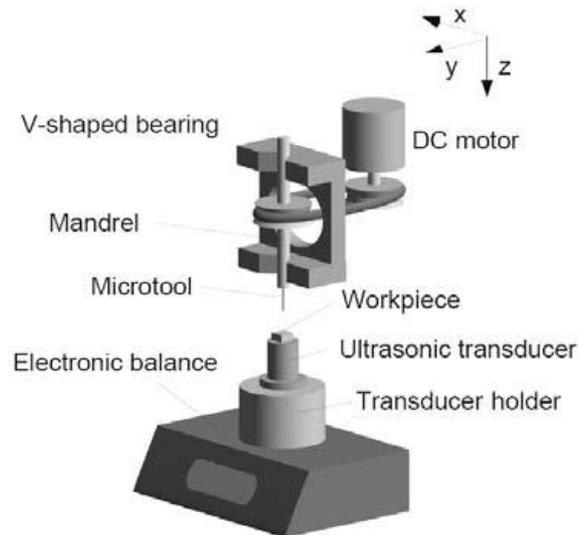
- Microfuração mecânica, laser e  $\mu$ -EDM
- Máquinas convencionais CNC, tornos suíços ou máquinas especiais
- Meta: furos  $< \varnothing 10 \mu\text{m}$  com tolerâncias de  $2 \mu\text{m}$
- Rotações: 3500 a 5000 rpm



Máquina-ferramenta para microfuração (mancais de diamante em V x mancais de rolamento ou deslizamento)

## MÁQUINAS-FERRAMENTAS

- Microfuração HSM (pesquisas): 500 mil rpm (*spindle* com mancal aerostático)
- Correntemente: 180 mil rpm (aerostático) e 160 mil rpm (rolamento)
- Furação com vibração ultrassônica: amplitude de  $0,8 \mu\text{m}$  (furação de vidro no modo dúctil sem fratura /  $a_p$  de 50 nm e queda na  $F_c$  de 60-70%)

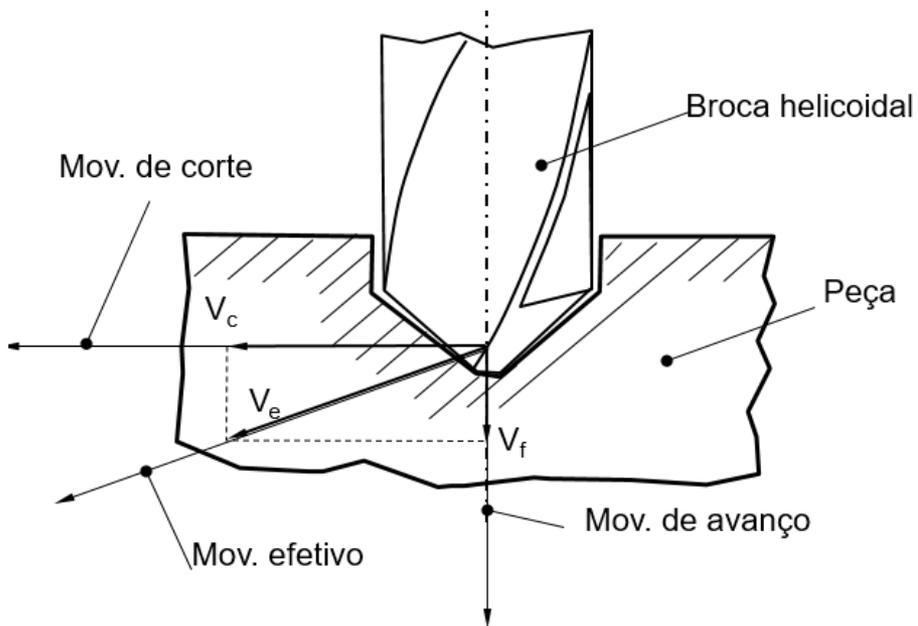


Microfuração com vibração ultrassônica

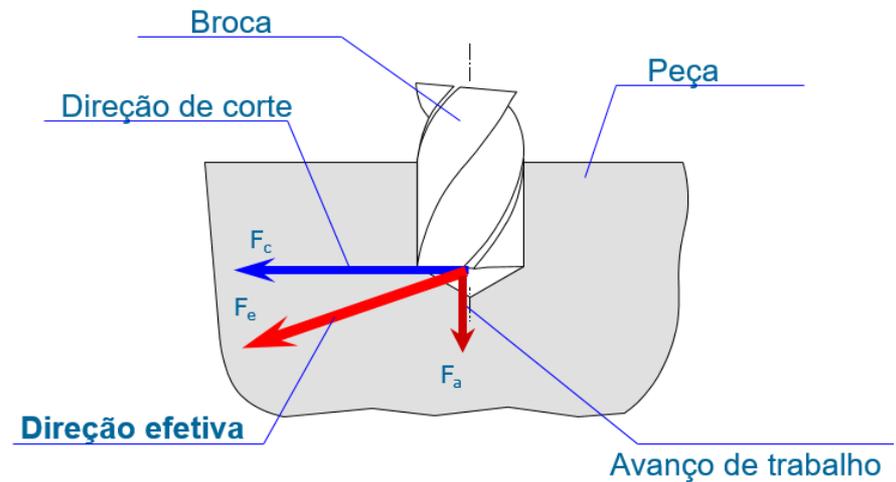


*Spindle* com mancais aerostáticos

## CINEMÁTICA DO PROCESSO

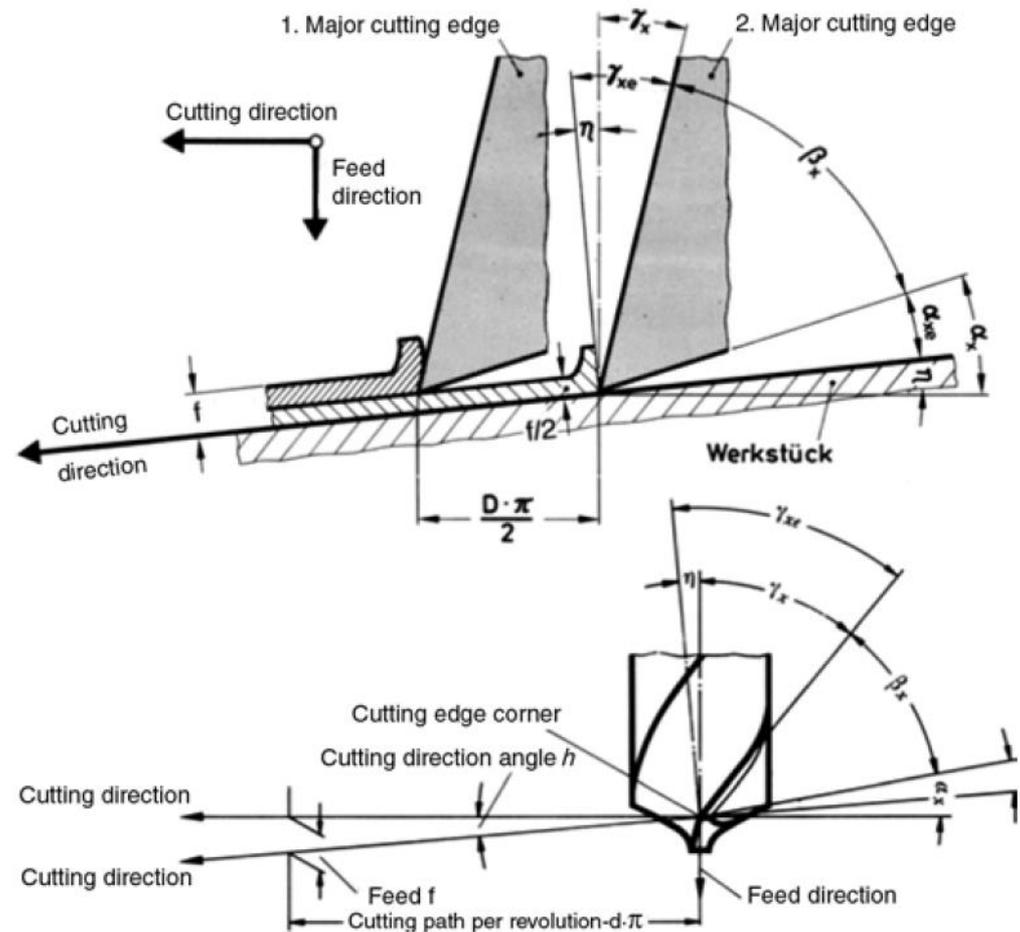
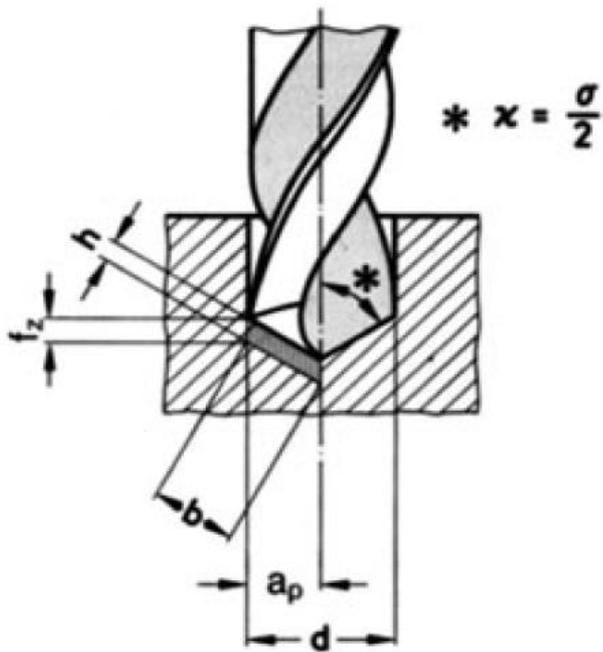


Movimentos e velocidades



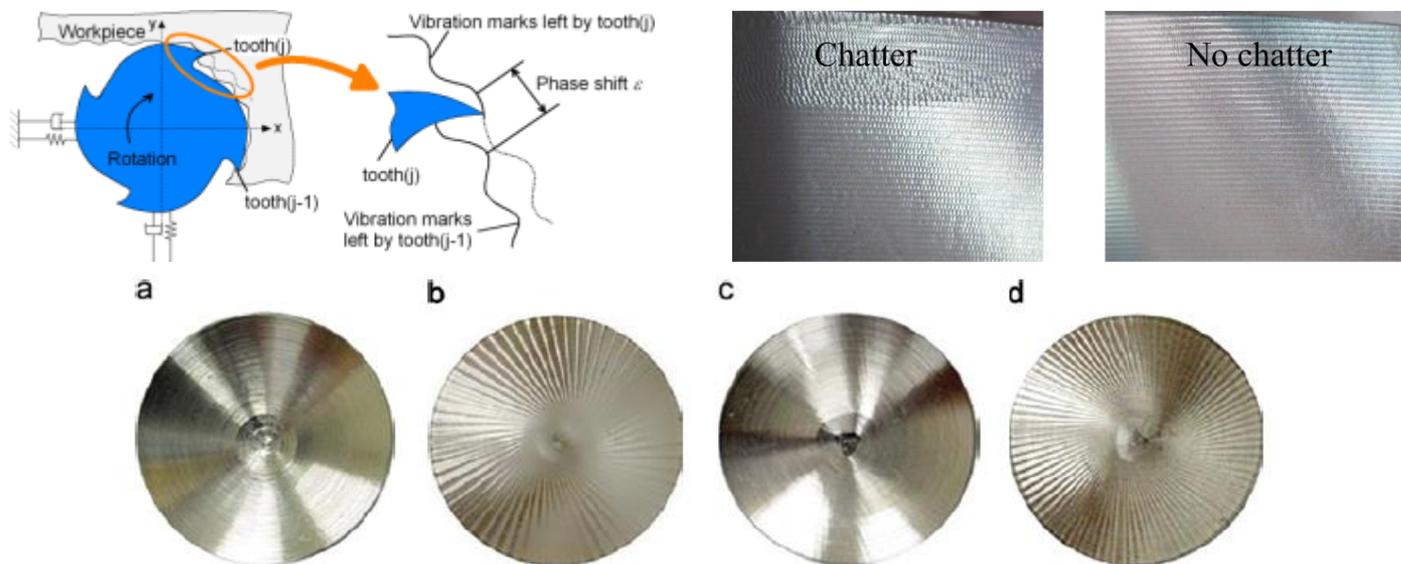
Forças no processo

## CINEMÁTICA DO PROCESSO



## CHATTER EM FURAÇÃO

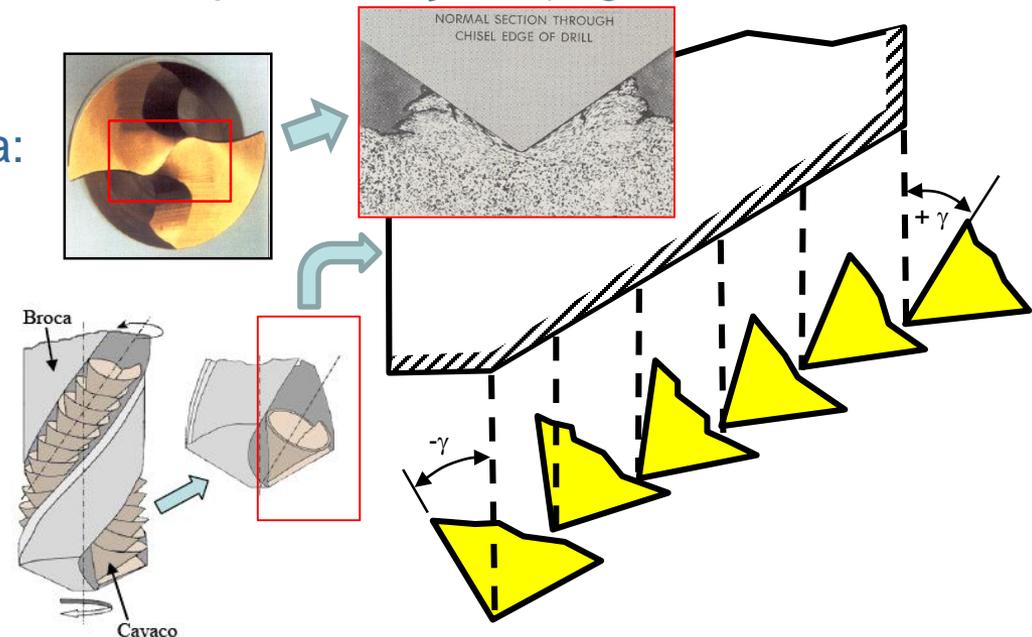
- Vibração autoexcitada entre a peça e a ferramenta
- *Chatter* regenerativo: superfície usinada + formação do cavaco



Microfuração mecânica: (a) Corte estável, (b) chatter axial-torsional, (c) chatter redemoinho e (d) chatter axial-torsional + redemoinho

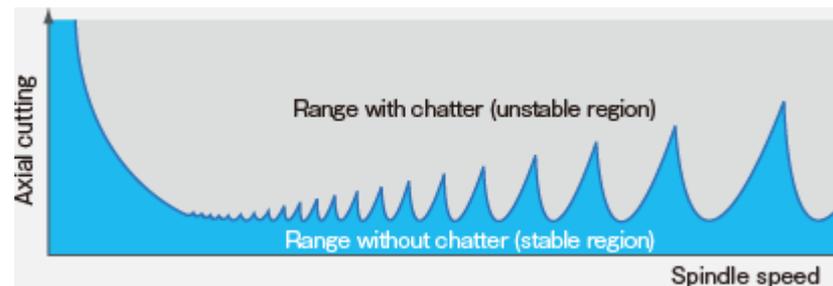
## CHATTER EM FURAÇÃO

- Problemas: diminui a vida da ferramenta, limita a produtividade, piora o acabamento da peça, prejudica as tolerâncias e gera ruído
- Torneamento e fresamento: maior campo de estudos de *chatter*
- Modelos analíticos preditivos: máximo ap x rotação (regimes ótimos de usinagem)
- Furação ainda é pouco investigada:
  - Geometria da broca complexa
  - Aresta transversal causa *plowing*
  - Ângulo de saída variável
  - Espessura do cavaco variável



## CHATTER EM FURAÇÃO

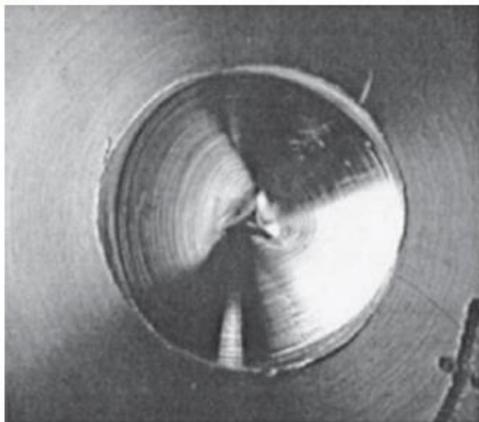
- Modelagem do chatter em furação: geometria complexa da broca
- Vibração torsional: não ocorre em torneamento e fresamento
- Literatura: modelos axial-torsional, flexão e combinados
- Variáveis: atrito, aresta transversal, engajamento, textura, desalinhamento, superfície de folga, comprimento da broca etc
- Métodos no domínio do tempo e da frequência
- Dificuldade em definir *threshold* para identificar o início do *chatter*
- Curvas de estabilidade: aumenta a eficiência no processo de furação



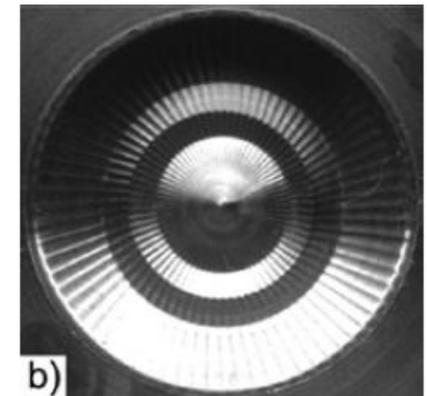
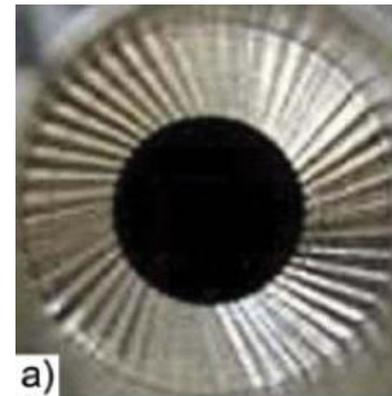
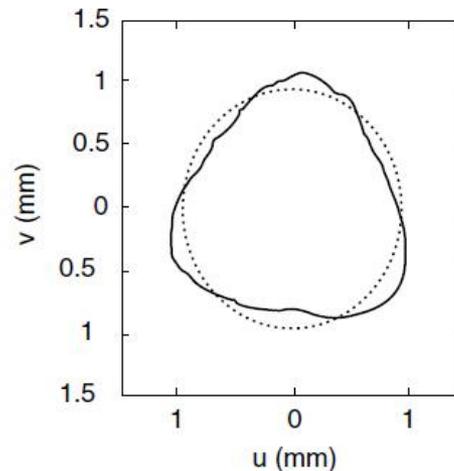
## CHATTER EM FURAÇÃO

- *Chatter* regenerativo (vibração redemoinho)
- Número ímpar de lados
- Aresta transversal: amortecimento do sistema
- Ferramenta estacionária x peça rotacional
- Efeitos do *spindle* e mancais negligenciados

(a) *Chatter* redemoinho



(b)



*Chatter* axial-torsional com e sem pré-furo

## CHATTER EM FURAÇÃO

- Modelos genéricos de *chatter*.

$$F_t = K_t a h_0$$

$$F_r = K_r a h_0$$

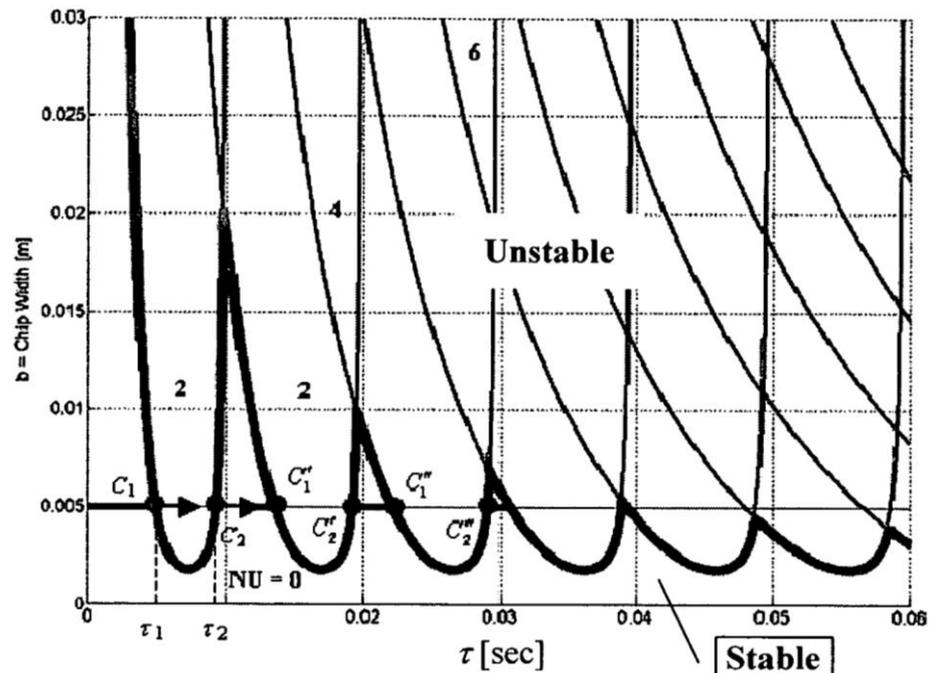
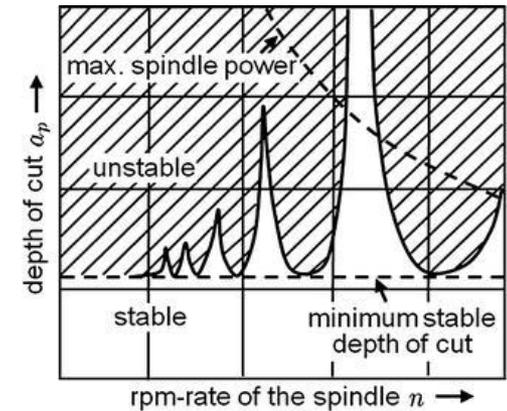
Espessura de corte estática

$$h(t) = h_0 - \delta[y(t) - y(t-T)]$$

Espessura de corte dinâmica

$$\frac{h(s)}{h_0(s)} = \frac{1}{1 + (1 - e^{-sT})K_r a \Phi(s)}$$

Equação de estabilidade



## CHATTER EM FURAÇÃO

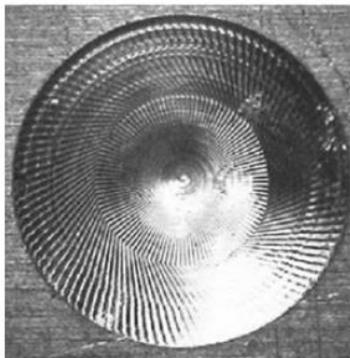
- *Chatter* axial-torcional: vibração no fundo do furo (variação de  $h$ )

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F$$

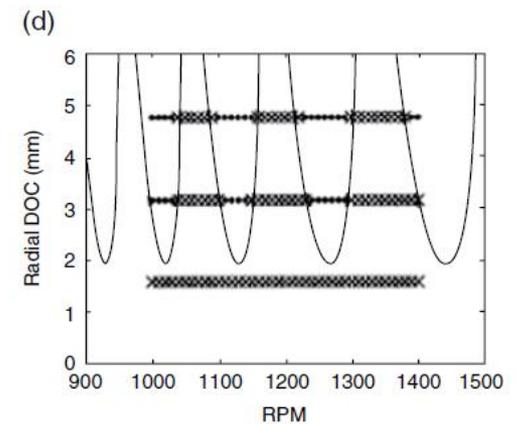
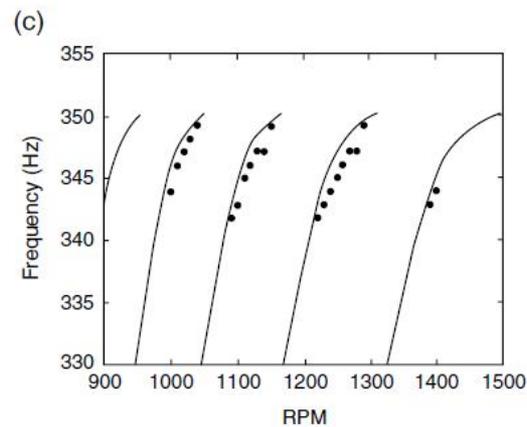
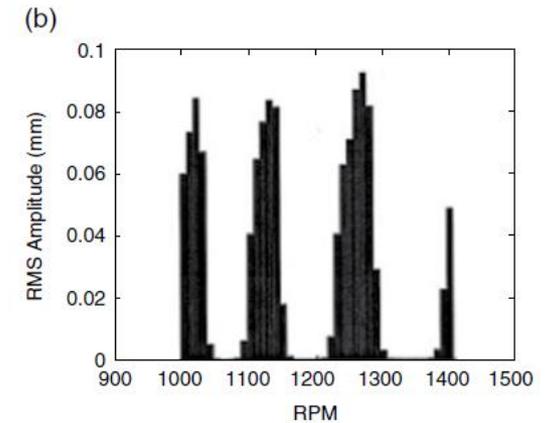
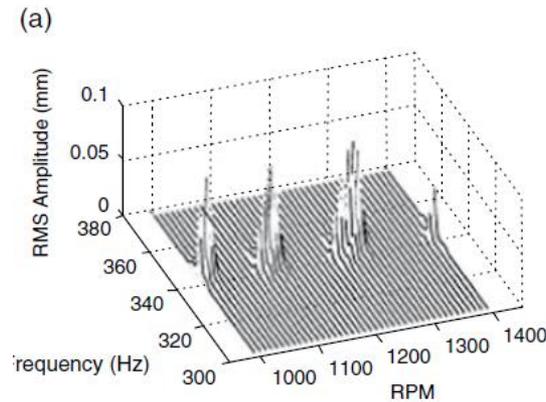
Equação do movimento

$$b = \frac{-1}{\alpha C_1 2 \operatorname{Re}[\Phi p(\omega)]}$$

Função de estabilidade

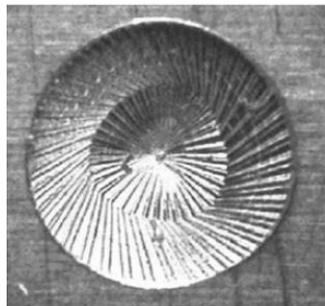
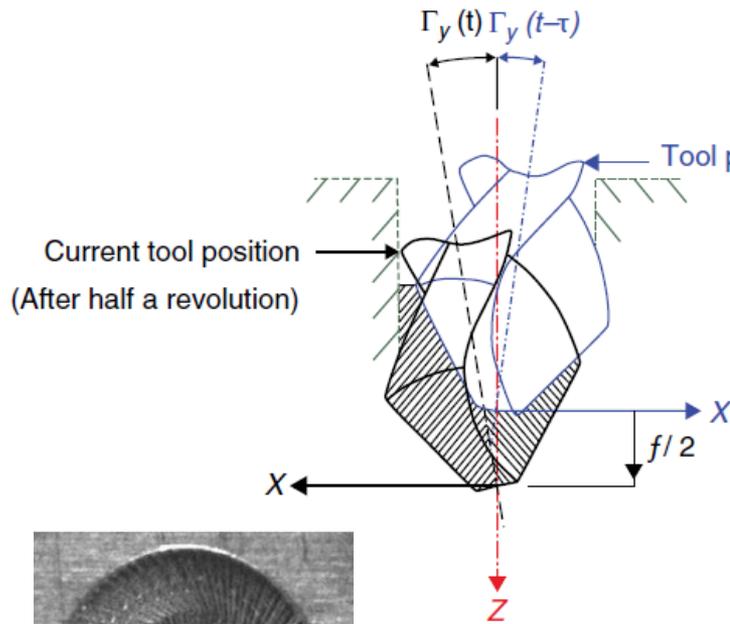


*Chatter* axial-torcional



## CHATTER EM FURAÇÃO

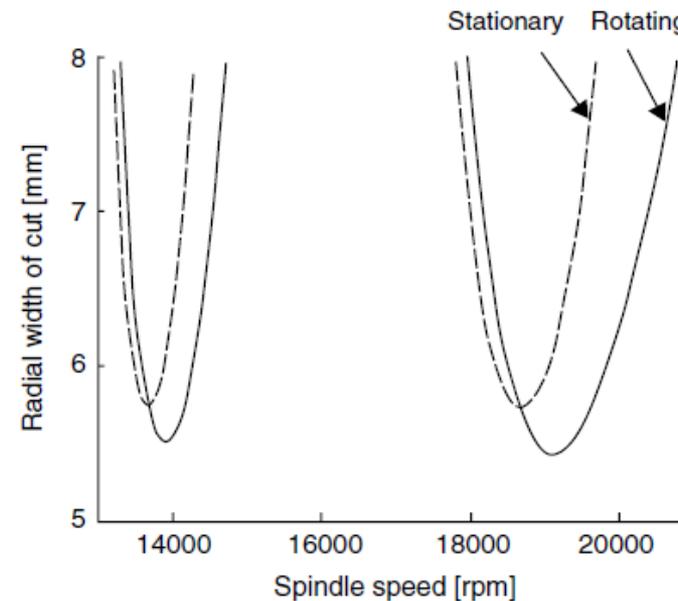
- *Chatter* por flexão: mudança de forma do furo (erros geométricos)



*Chatter por flexão*

$$f_c = r f_n \pm \frac{2\pi r^2 f_n}{4\pi N + 2\phi \mp 2\pi r}$$

Efeito giroscópico

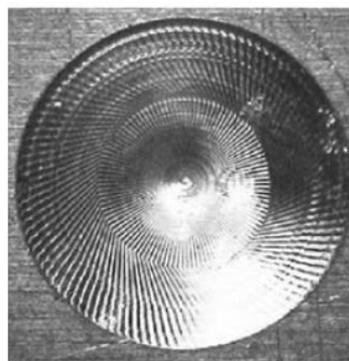
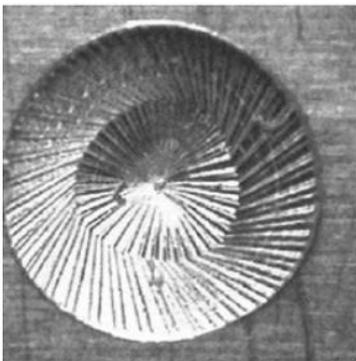
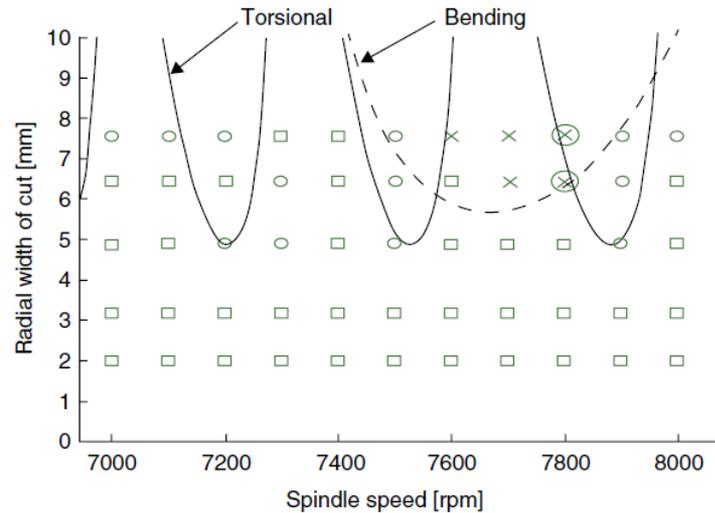


## CHATTER EM FURAÇÃO

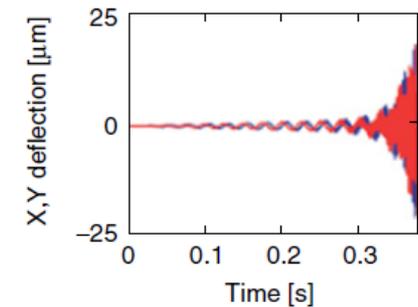
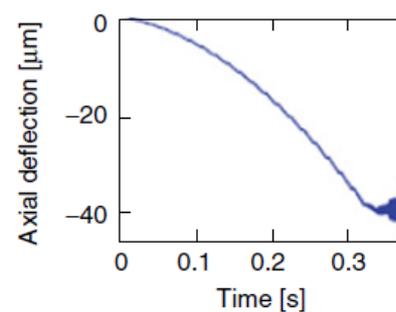
- Combinação do *chatter* flexional e axial-torcional

$$[M] \begin{Bmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{y}(t) \\ \ddot{z}(t) \\ \ddot{\theta}(t) \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{z}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \\ \theta(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_c \end{Bmatrix}$$

Equação do movimento



Chatter por flexão (esq) e axial-torcional (dir)



## SUPRESSÃO DO CHATTER EM FURAÇÃO

- Torneamento e fresamento: controle extensivamente pesquisado
- Métodos da variação da velocidade do *spindle* aplicados com sucesso

$$n_s = \frac{30 f_c}{N} \quad n_s = \frac{f_c}{(N+1)z}$$

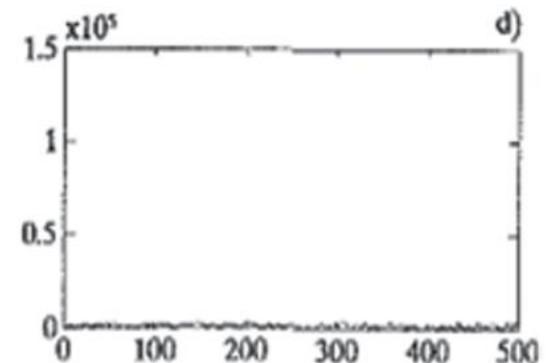
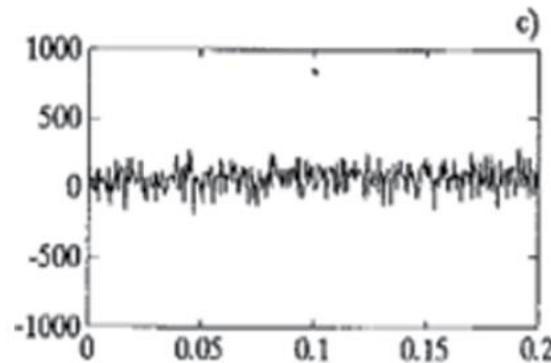
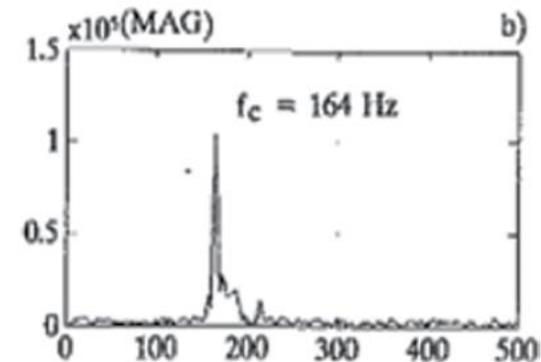
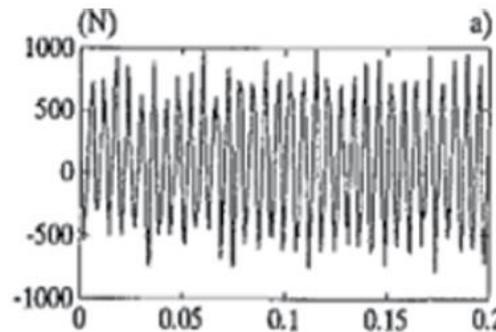
Rotação do *spindle*

$$\frac{f_c}{f_t} = N + \frac{\varepsilon}{2\pi}$$

Frequência do *chatter*

$$b_{\text{lim}} = \frac{-1}{k_s G_m (j f_c) (1 - e^{-j\varepsilon})}$$

Limite de estabilidade  
da largura de corte



## CHATTER EM MICROFURAÇÃO

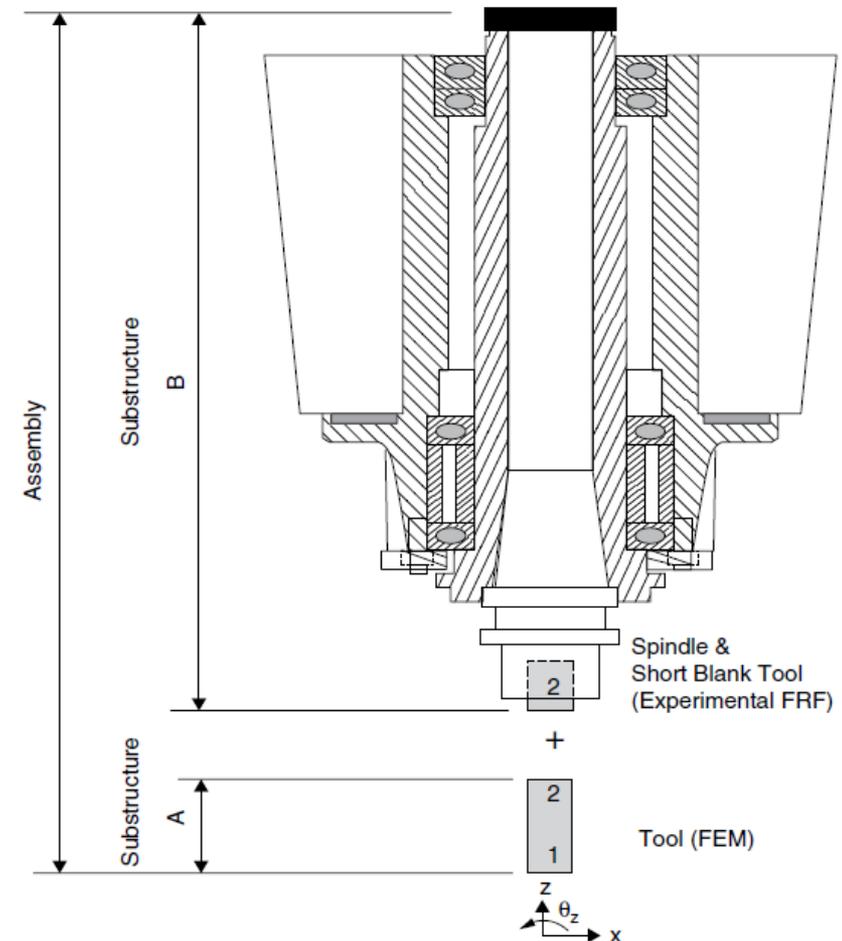
- Microfuração: impossível o uso do martelo de impacto
- Simulações numéricas imprecisas: viga engastada x dinâmica na ponta da ferramenta
- Técnica de acoplamento da receptância: FRF analítica + experimental

$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_{A,2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{A,11} & H_{A,12} \\ H_{A,21} & H_{A,22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix}$$

Subestrutura A

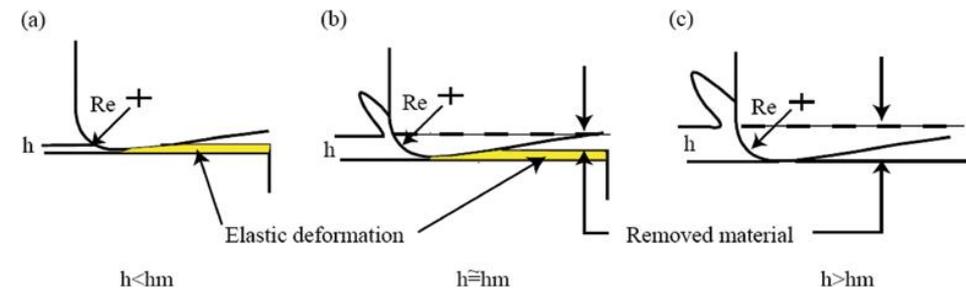
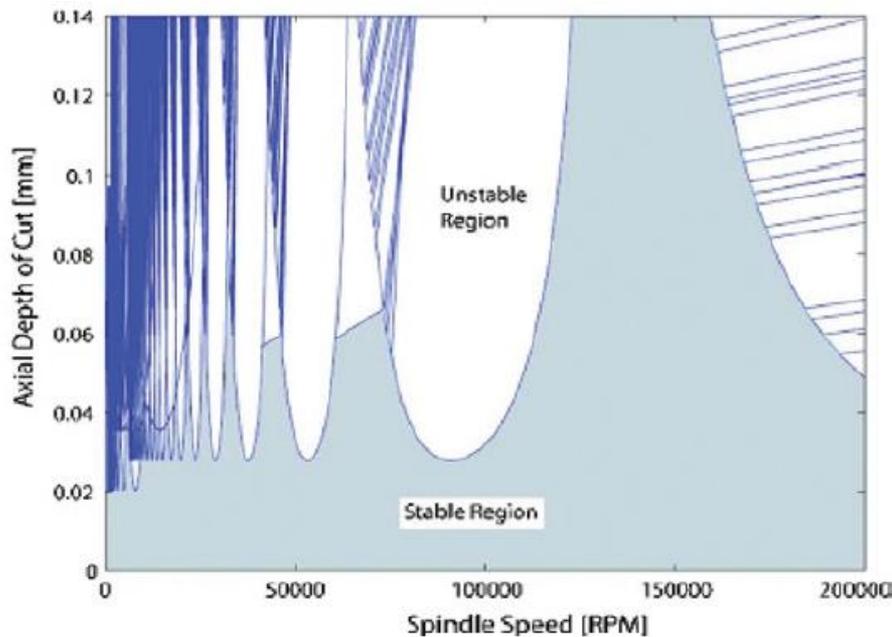
$$\{X_{B,2}\} = [H_{B,22}]\{F_{B,2}\}$$

Subestrutura B



## CHATTER EM MICROFURAÇÃO

- *Chatter* em microescala não tem sido plenamente investigado (dilatação térmica, recuperação elástica, batimento radial-axial, microestrutura da peça, espessura mínima de corte, *plowing*)



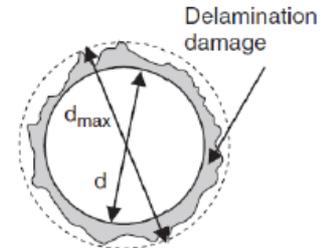
Espessura mínima de corte e *plowing*

Diagrama de lóbulos de estabilidade para microfuração

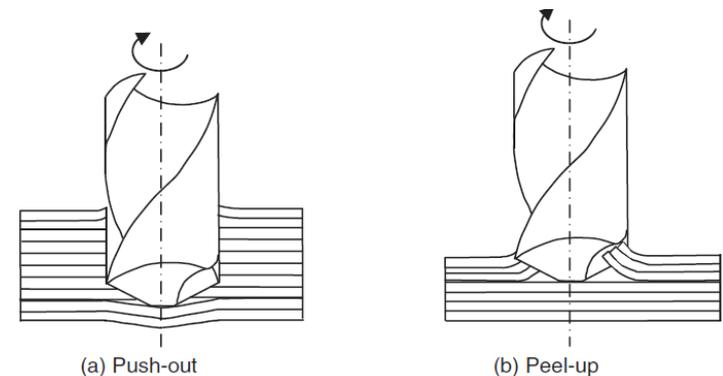
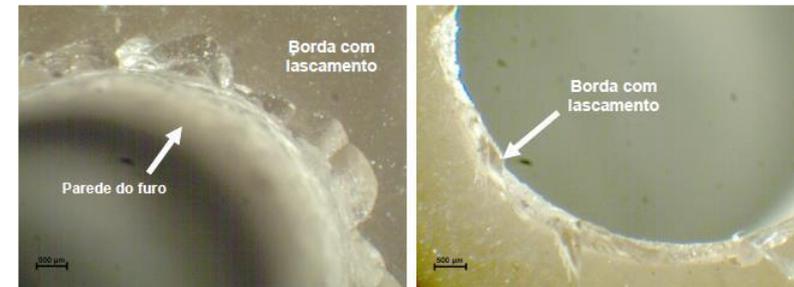
## MATERIAIS DA PEÇA PARA MICROFURAÇÃO

- **Compósitos:**

- Pobre acabamento dos furos
- Delaminação
- Microbrocas de WC e diamante (filmes de cristais de diamante depositados em HSS ou diamante policristalino sinterizados junto com Co)
- Arestas mais afiadas
- 6x mais caras que WC
- Dependente da orientação das fibras
- Abrasão, temperatura, refrigeração

$$F_d = \frac{D_{\max}}{D}$$


Delamination damage



## MATERIAIS DA PEÇA PARA MICROFURAÇÃO

- **Polímeros:**

- Maior problema é a formação de rebarbas
- Aplicações médicas: aparências, acúmulo de bactérias
- Peças com interseção de furos
- Diminuir o avanço na saída da microbroca da peça
- Microbrocas afiadas e com ângulo de ponta agudo
- Evitar uso de fluido de corte (criogênia)
- Rebarbação manual x jato d'água e criogênico

