

# CONTROLE DE REBARBAÇÃO E DAS FORÇAS DE CORTE EM PROCESSOS DE FURAÇÃO COM BROCAS HELICOIDAIS

## **Ed Cláudio Bordinassi**

Dept. de Engenharia Mecânica - Centro Universitário – Instituto Mauá de Tecnologia Praça Mauá, 1 – São Caetano do Sul – SP - [ecb@maua.br](mailto:ecb@maua.br)

## **Carlos Oscar Corrêa de Almeida Filho**

Dept. de Engenharia Mecânica - Centro Universitário – Instituto Mauá de Tecnologia Praça Mauá, 1 – São Caetano do Sul – SP - [cocaf@maua.br](mailto:cocaf@maua.br)

## **Marco Stipkovic Filho**

Laboratório de Engenharia de Fabricação - Dept. de Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Av. Prof. Mello de Moraes, 2231, Cidade Universitária CEP 0580-900, São Paulo, SP- [kovic@osite.com.br](mailto:kovic@osite.com.br)

## **Gilmar Ferreira Batalha**

Laboratório de Engenharia de Fabricação - Dept. de Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Av. Prof. Mello de Moraes, 2231, Cidade Universitária CEP 0580-900, São Paulo, SP- [gfbatalh@usp.br](mailto:gfbatalh@usp.br) / [gilmar.batalha@poli.usp.br](mailto:gilmar.batalha@poli.usp.br)

***Resumo.** Este trabalho estudou a formação de rebarbas no processo de furação em aço e alumínio, com brocas helicoidais de aço rápido. Foram utilizadas diversas combinações de parâmetros de corte, e os esforços monitorados por um dinamômetro instrumentado com extensômetros. As rebarbas foram medidas e puderam ser comparadas com os parâmetros e esforços de corte, sendo possível encontrar correlações entre os principais fatores que afetam a formação de rebarbas.*

**Palavras-chave:** Rebarba, furação, broca helicoidal, dinamômetro.

## **1. INTRODUÇÃO**

A maioria dos processos de usinagem produz rebarbas [Kim et al, 2001]. Rebarba significa presença de arestas ou pedaços de material indesejáveis geradas nas peças. Para peças de precisão, a rebarbação e acabamento da aresta podem significar mais de 30% do custo total da peça produzida [Saunders, 2003] e caso as rebarbas formadas nas peças sejam eliminadas, estes custos tendem a diminuir. Se não forem removidas, elas podem resultar em contato imperfeito entre peças, como o assentamento indevido entre superfícies, e montagens sem precisão [Pande et al, 1985]. Além disso, as rebarbas juntamente com a produção de cavacos têm sido dois dos principais inimigos da automatização de processos [Nakayama et al, 1987]. O problema torna-se ainda mais sério quando da usinagem com altas velocidades de corte (HSM), pois neste caso, as rebarbas reduzem a precisão de fixação da peça na máquina, e podem ferir o operador durante a fixação ou retirada da peça da máquina [Enomoto et al, 2002]. O processo de furação, em si, é um dos processos mais utilizados na indústria, e corresponde a aproximadamente 33% do número de operações de usinagem [Tönshoff et al, 1994], sendo por isto bastante investigado. Entretanto, devido à possibilidade da realização de muitos ensaios em pouco tempo, a maioria dos estudos são desenvolvidos em centros de usinagem. Torna-se necessário o estudo deste em tornos, onde as condições de refrigeração, e portanto do processo, são diferentes [Bordinassi, 2002 e Bordinassi et al. 2003], principalmente para brocas de pequeno diâmetro onde não há a possibilidade de refrigeração interna.

Apesar de vários materiais e coberturas disponíveis para brocas helicoidais, o uso do aço rápido para brocas de pequeno diâmetro ainda representa uma parcela significativa das ferramentas comuns na indústria devido à pequena capacidade de altas velocidades de máquinas ainda em uso.

Diante dos motivos expostos, este trabalho visa estudar a formação de rebarbas durante o processo de furação em aço e alumínio, com brocas helicoidais de aço rápido em um torno, medindo os esforços de furação e comparando estes com as rebarbas geradas durante o processo.

## 2. ESFORÇOS NO PROCESSO DE FURAÇÃO

A fig. (1), ilustra as forças de usinagem e suas projeções nos diversos planos.

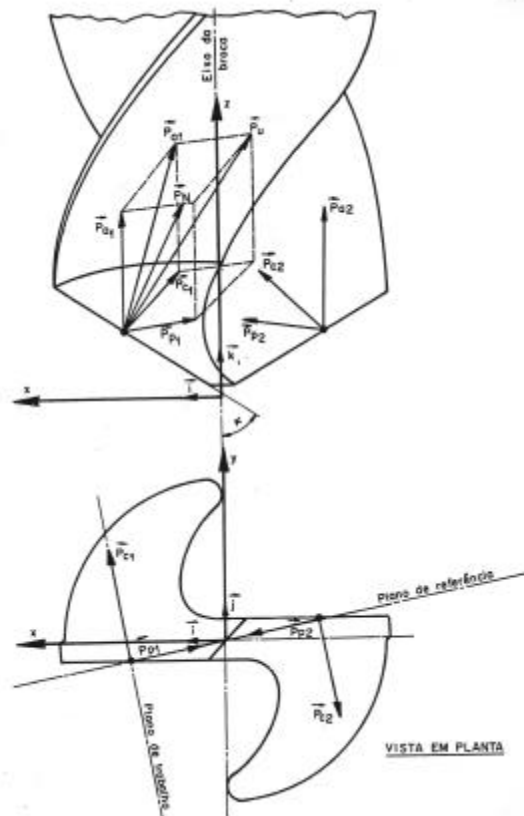


Figura 1 [Daar, 1967] – Esforços no processo de furação

A força de usinagem " $P_u$ ": é a força total que atua sobre uma cunha cortante durante o processo de furação e a outras forças, ilustradas na fig. (1), são suas projeções no plano de trabalho e no plano efetivo de referência.

No plano de trabalho, estão contidas as projeções das forças de usinagem que contribuem para a potência de usinagem, e são elas:

- força ativa " $P_{at}$ ": é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho;
- força de corte " $P_c$ ": é a projeção da força de usinagem sobre a direção de corte;
- força de avanço " $P_a$ ": é a projeção da força de usinagem sobre a direção de avanço;
- força de apoio " $P_{ap}$ ": é a projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho, e no caso, em especial das brocas helicoidais, esta coincide com a direção da força de corte, sendo igual à  $P_c$ ;
- força efetiva de corte " $P_{ce}$ ": é a projeção da força de usinagem sobre a direção efetiva de corte.

No plano de referência, estão contidas as projeções da força de usinagem que não contribuem com a potência de usinagem, e são elas:

- força passiva " $P_p$ ": é a projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular ao plano de trabalho, e também pode ser chamada de componente radial, devido à sua direção;
- força de compressão " $P_N$ ": é a projeção da força de usinagem  $P_u$  sobre uma direção perpendicular à superfície de corte;

Com o dinamômetro utilizado para medições de força neste trabalho é possível monitorar a força axial e o momento de torção durante o processo. Diversos autores apresentam modelos com constantes empíricas para a determinação destes esforços de corte, como Spur, Kronenberg, Daar, Kienzle e Oxford e Shaw [Daar, 1967]. [Altintas, 2000], apresenta um modelo para a força axial (bastante importante para a formação de rebarbas), baseado nos conceitos de medição de dureza, que consideram a dureza do material e a endentação provocada pela aresta transversal de corte.

### 3. FORMAÇÃO DE REBARBAS NO PROCESSO DE FURAÇÃO

É necessário que o processo de furação ofereça grande confiabilidade, já que de forma geral as peças são furadas já quando grande quantidade de tempo e de dinheiro já gastos com a execução destas e se possível deve ser feito com baixo custo. É também necessário que as rebarbas formadas durante este processo sejam controladas e previstas de forma a minimizar os custos de fabricação de peças, sendo que estas devem apresentar os menores valores possíveis para minimização dos custos de rebarbação ou eliminação destes. O processo de furação forma rebarbas no início do furo e no final deste [Min et al, 2001]. A rebarba na entrada é formada por escoamento plástico do material e a da saída pela conformação do material devido às altas taxas de compressão no centro do furo.

Os principais parâmetros que afetam a formação de rebarbas no processo de furação são [Min et al, 2001]:

- geometria da broca: ângulo de ponta, geometria da ponta, ângulo de hélice, alívio da aresta transversal;
- propriedades do material: dureza, rigidez, ductilidade;
- condições do processo: velocidade de corte, avanço, uso de refrigeração, furação pica-pau;
- outros: desgaste da ferramenta, material da ferramenta, aresta postiça de corte.

À medida que a profundidade de corte aumenta, a deformação acumulada no fundo do furo também cresce [Ko et al, 2001]. Quando este valor é suficiente para atingir a tensão de ruptura do material, a fratura é iniciada no ponto de maior deformação e a distância em que a broca avança antes da fratura depende da ductilidade do material. A fratura também depende da geometria da broca, pois brocas com grande aresta transversal tendem a aumentar a força axial no centro do furo. Estudos anteriores [Mahdy, 2000] mostram que a execução de um pré-furo ou de chanfros nas superfícies de saída e na de entrada, minimizam a formação de rebarbas. Com isto, os custos para execução do furo aumentam, porém este é compensado com a minimização dos custos de rebarbação. A melhor solução porém, seria que a formação de rebarbas fosse minimizada com a execução de um único furo, principalmente quando da execução de furos com pequenos diâmetros.

Podem-se dividir as rebarbas em 3 tipos, chamadas de:

- uniforme: pequenas dimensões e altura uniforme ao redor de toda a periferia do furo. Geralmente é formado um “cap” que pode desprender-se da peça durante o processo ou pode ser removido facilmente após a execução do furo. O processo de formação geralmente ocorre através de uma primeira fratura no centro do furo, onde altas de tensão de compressão atuam no material, devido à aresta transversal de corte, e um “cap” secundário se adere ao “cap” principal. Com o avanço da broca, a zona de deformação plástica se expande do centro do furo para as arestas principais da broca e uma segunda fratura ocorre na periferia do furo fazendo com que o “cap” seja criado;
- coroa: possui altura grande e irregular na periferia do furo. Com o aumento do avanço, aumenta a força axial de furação que aumenta precocemente a deformação plástica no centro do furo, principalmente com brocas de afiação cônica com grande aresta transversal. Então, a fratura ocorre no centro do furo e a rebarba se forma com a deformação do material restante nas periferias do furo;
- transição: este mecanismo de formação de rebarbas se situa entre o uniforme e a coroa. As fraturas ocorrem quase que simultaneamente no centro do furo e na periferia deste, portanto as rebarbas se formam antes do tipo “coroa” e depois do tipo “uniforme”.

Os mecanismos propostos para estes tipos de rebarbas encontram-se na fig. (2). Enquanto a fig. (3) ilustra estes 3 tipos de rebarbas obtidas durante os ensaios neste trabalho.

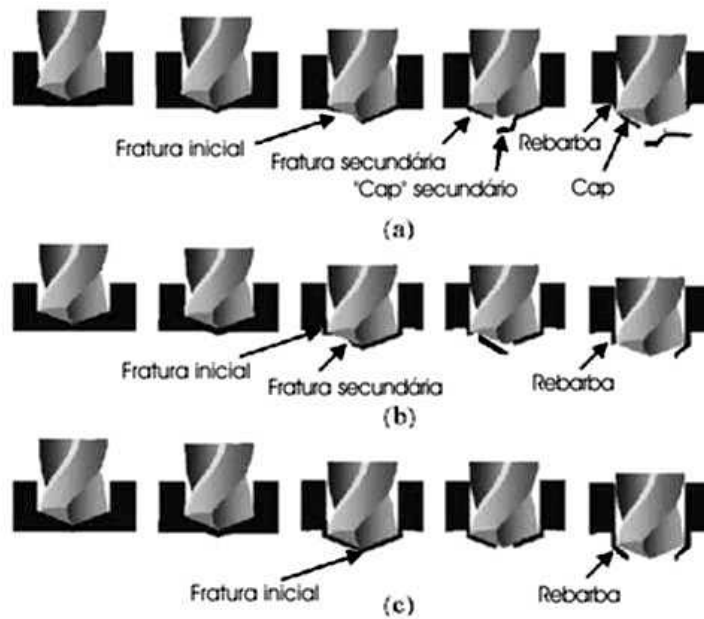


Figura 2 [Kim et al, 2001] – Mecanismos de formação de rebarbas para os 3 tipos:  
(a) uniforme, (b) transição e (c) coroa

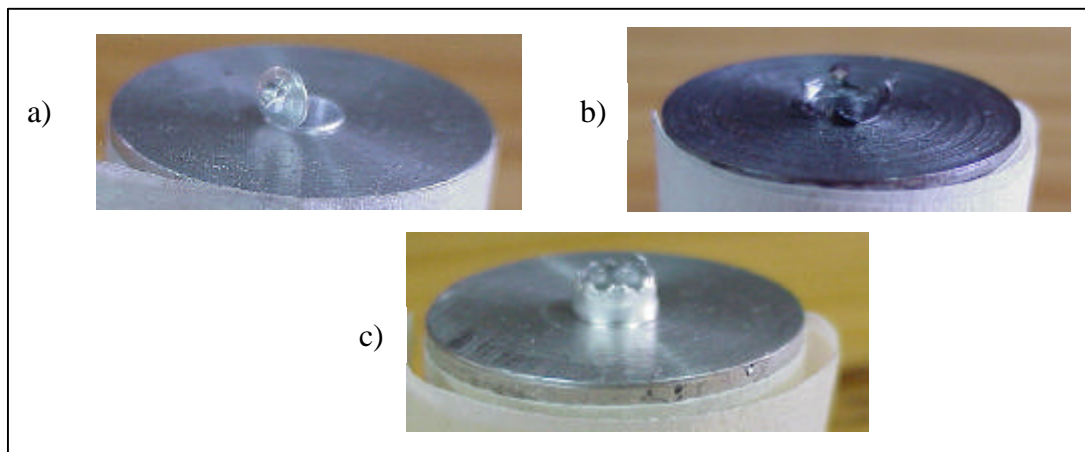


Figura 3 – Classificação de 3 tipos de rebarbas obtidas durante os ensaios: a) uniforme, b) transição, c) coroa

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram ensaiados corpos de prova cilíndricos de 3/4"x22mm, desta forma não caracterizando furação profunda, em um torno convencional. Os equipamentos utilizados foram:

- Torno Romi Tormax 20;
- Alumínio ABNT 6063;
- Aço ABNT 1040;
- Broca helicoidal de aço rápido M2 – DIN 338 – Tipo N–P5 – Afição cônica - Ø 5mm (para ambos os materiais);
- dinamômetro instrumentado com extensômetros;
- sistema de aquisição (conversor A/D);
- fluido de corte (emulsão de água + 5% óleo mineral) para furação do aço (os corpos de prova de alumínio foram furados à seco);
- parâmetros de corte:

Aço:	$V_c$ : 15.6, 25 e 39 m/min;	$f$ : 0.057, 0.073, 0.094, 0.166 e 0.229 mm/v
Alumínio:	$V_c$ : 15.6, 25 e 39 m/min;	$f$ : 0.094, 0.119, 0.166, 0.229 e 0.299 mm/v

Para cada combinação dos parâmetros de corte foram utilizados 3 corpos de prova. Os esforços de corte foram monitorados pelo dinamômetro e o valor de esforço considerado para registro no gráfico consistiu da média dos esforços durante a furação. As rebarbas formadas apresentaram valores possíveis de serem medidos com paquímetro, e os valores do gráfico resultam da média de três medições de cada corpo de prova, sendo que em cada um, foram feitas 3 medições a 120°, já que as rebarbas formadas dificilmente são uniformes. As dimensões das rebarbas foram medidas perpendicularmente à face da peça.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS ENSAIOS

A fig. (4) mostra os valores das alturas das rebarbas com relação aos esforços monitorados no processo, para os corpos de prova de aço.

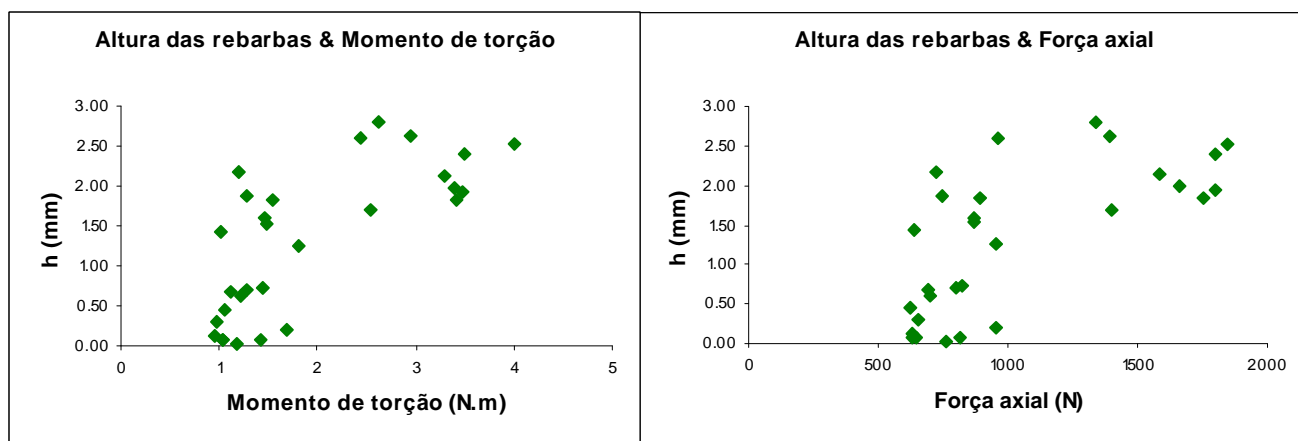


Figura 4 – Altura das rebarbas em função do momento de torção e força axial para o aço

A figura anterior mostra que as alturas de rebarbas foram proporcionais aos valores de esforços, para os maiores valores. Porém para os menores valores de esforços nota-se que várias alturas de rebarbas foram geradas. Pode-se dizer que a refrigeração pode ser o fator mais influente quando os furos foram gerados com os menores valores de esforços, mostrando que existe uma linha tênue no processo que define as alturas de rebarbas geradas.

A figs. (5) e (6), mostram as alturas das rebarbas em função dos parâmetros de corte para os corpos de prova de aço. Estas figuras mostram que com o aumento dos parâmetros de corte as alturas das rebarbas também aumentaram. Para as variações de velocidades de corte com avanços constantes, notaram-se comportamentos variados para as diferentes taxas de avanço utilizado.

Para os menores avanços, as rebarbas tiveram tendência de aumento com o crescimento da velocidade de corte. Para faixas intermediárias de avanços, as rebarbas tenderam a diminuir para algumas velocidades de corte, depois voltaram a aumentar para avanços maiores e por fim praticamente foram constantes para a última faixa de avanços utilizados mostrando que a condição crítica foi atingida para a formação das rebarbas (considerando as faixas de avanço empregadas).

Para as mudanças no avanço utilizando as mesmas velocidades de corte, os valores de rebarbas foram mais pronunciados para os maiores avanços. Este comportamento era esperado, conforme revisão efetuada anteriormente.

A fig. (7) mostra os valores das alturas das rebarbas com relação aos esforços monitorados no processo, para os corpos de prova de alumínio.

O fato do comportamento diferente pode ser justificado pela diferente refrigeração executada para os dois materiais. Para o alumínio o corte foi efetuado a seco, fazendo com a temperatura aumentasse apenas pelas variações impostas pelo processo. Já para o aço foi utilizada refrigeração constante, e esta tem uma eficiência maior para menores valores de avanço e velocidade.

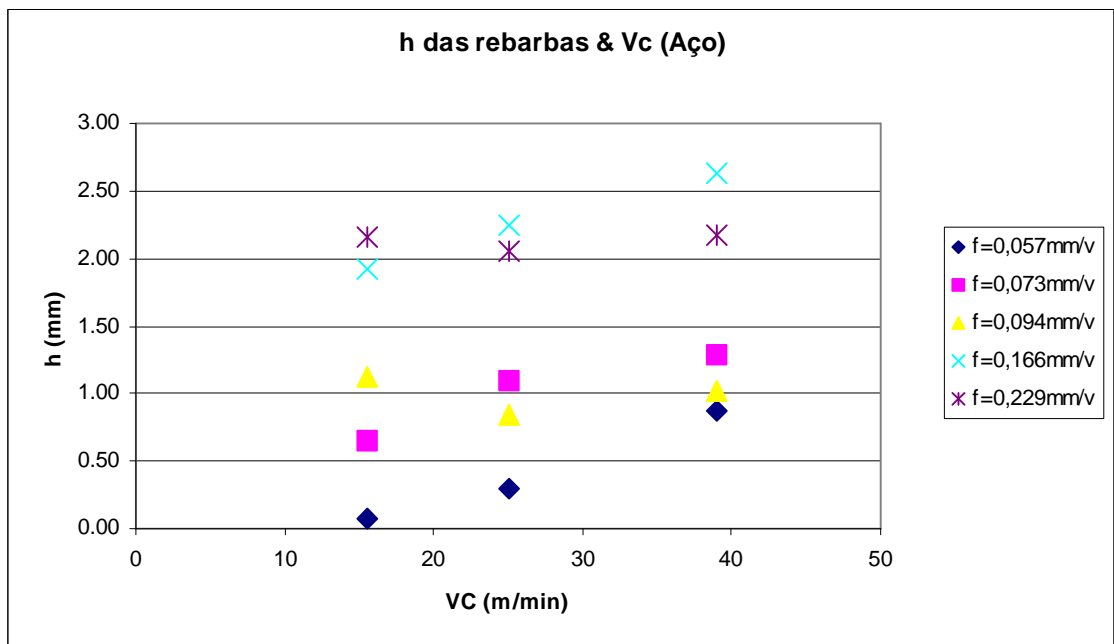


Figura 5 – Altura das rebarbas em função do avanço e da velocidade de corte para o aço

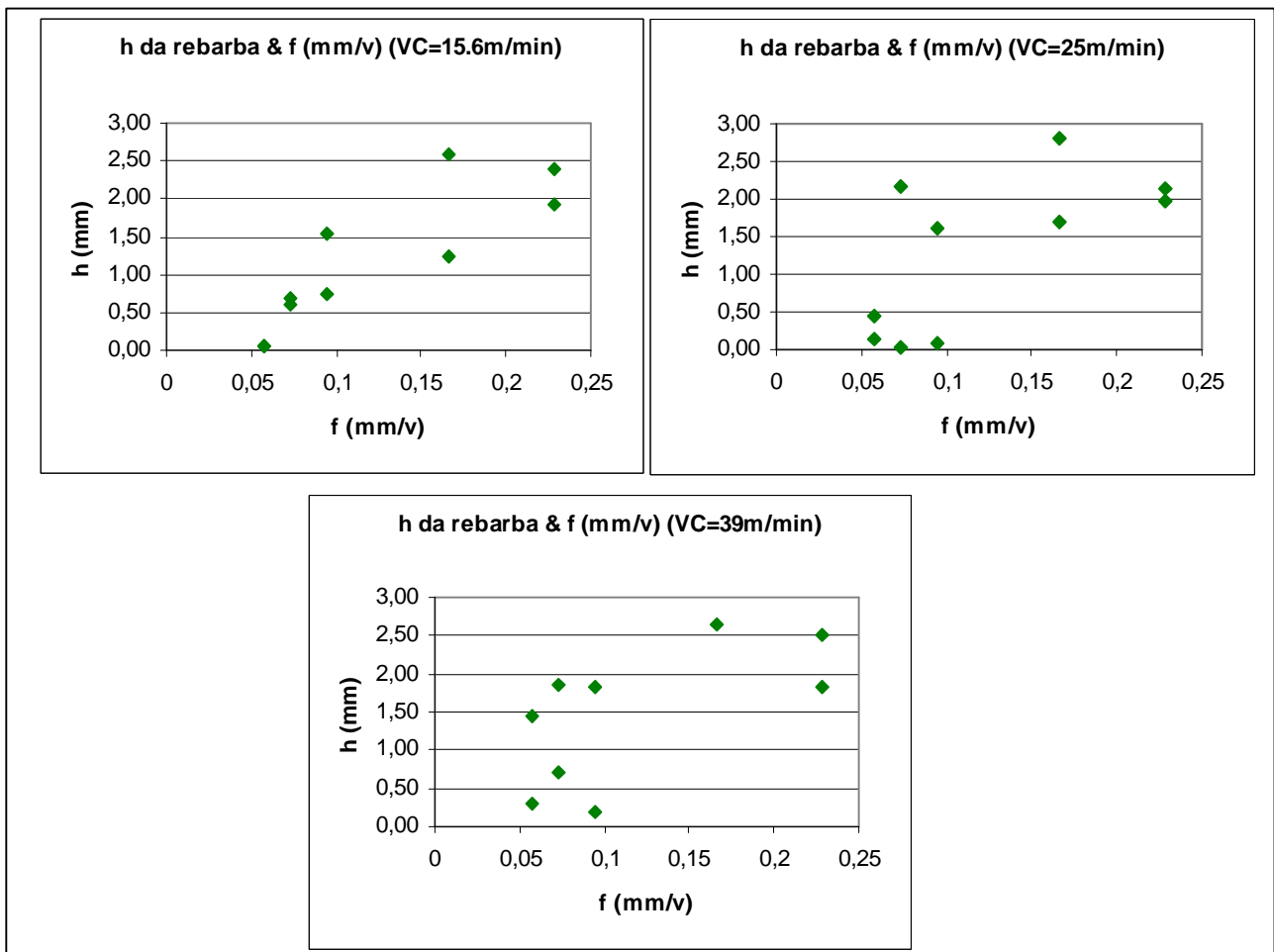


Figura 6 – Altura das rebarbas em aço, função da velocidade de corte utilizada para vários avanços.

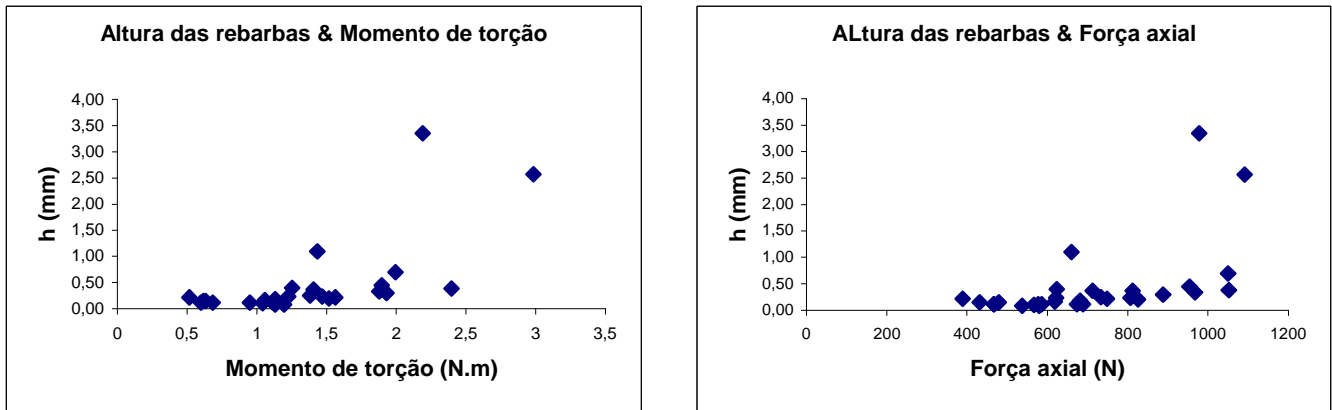


Figura 7 – Altura das rebarbas para o alumínio em função: (a) momento de torção e (b) força axial.

As figuras (8) e (9), mostram as alturas das rebarbas em função dos parâmetros de corte para os corpos de prova de alumínio.

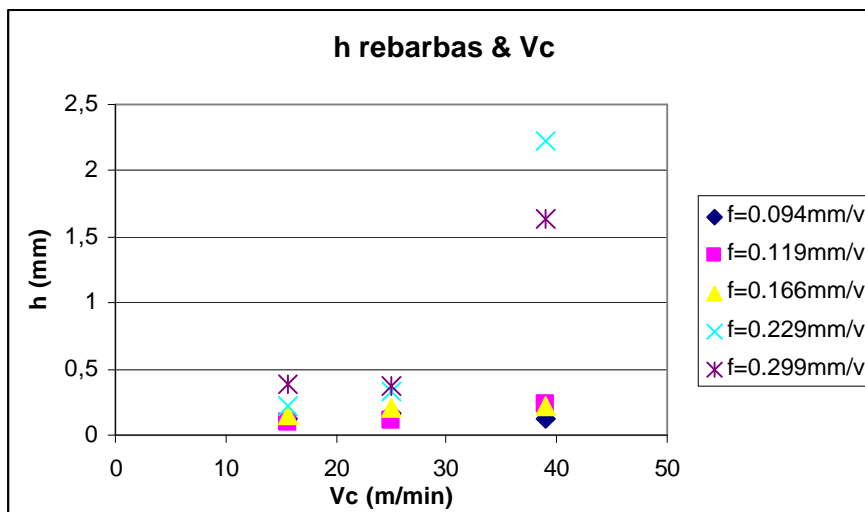


Figura 8 – Altura das rebarbas em alumínio em função da velocidade de corte e vários avanços (f).

A fig. (8), mostra que os valores das alturas de rebarbas foram praticamente constantes para os 3 primeiros valores de avanço em função das variações de velocidades de corte. Para os 2 últimos valores de avanço, as rebarbas apresentaram maiores valores, enfatizando que as condições críticas para a formação de rebarbas foram atingidas quando altos avanços e altas velocidades de corte foram empregados. Já para as variações de avanço com velocidades de corte constantes ocorreram aumentos significativos com o aumento dos valores de avanço.

A temperatura do processo é uma variável importante também para a furação do alumínio, já que o material tende a aderir na superfície de saída da ferramenta e isto pôde ser constatado durante grande parte dos ensaios realizados. Com o aumento da temperatura o material tende a aderir mais fortemente na saída da ferramenta, aumentando os esforços e fazendo com que a broca conforme o material sobressalente após a fratura deste no centro da broca ao invés de cortar. O resultado desta conformação pode ser visto na fig. (3c).

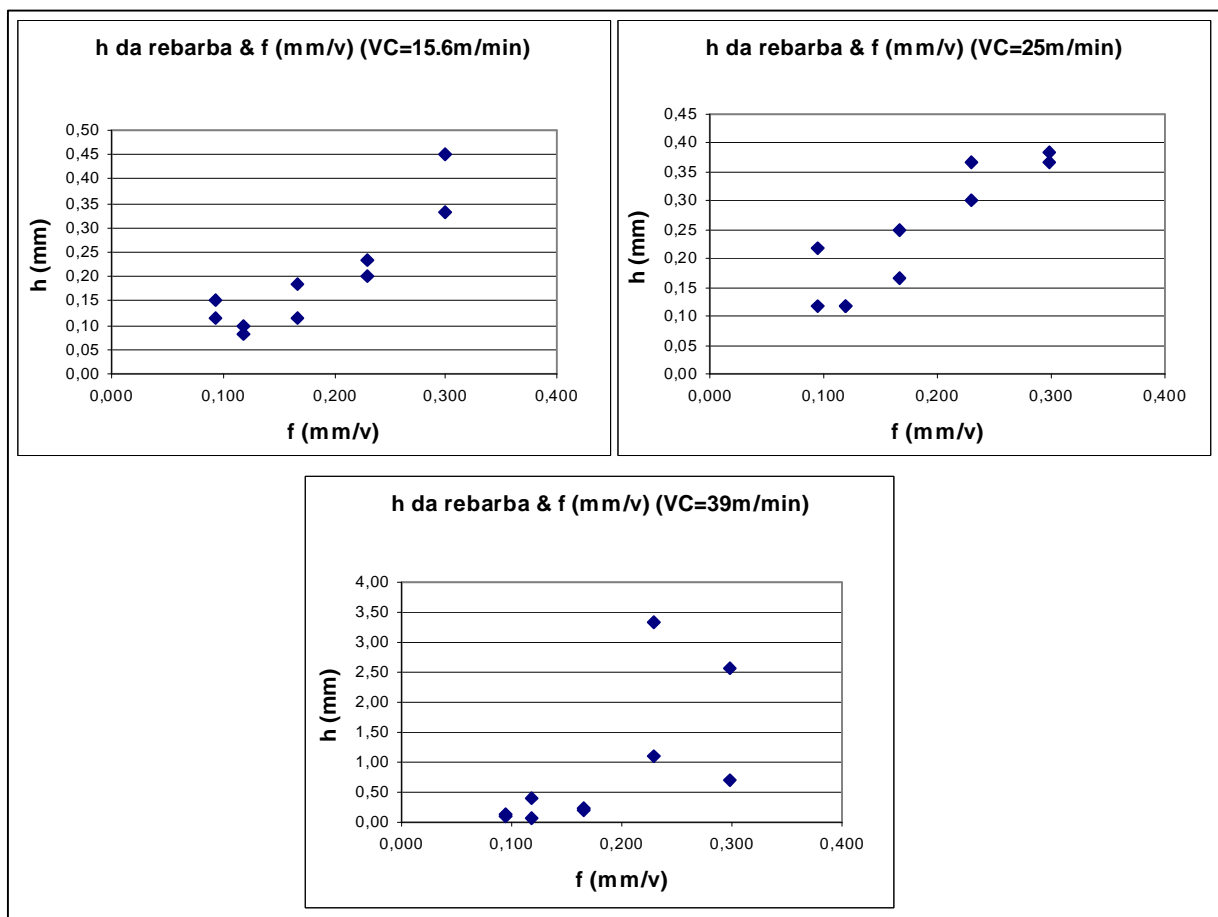


Figura 9 – Altura das rebarbas em função do avanço para várias velocidades de corte para alumínio

A combinação entre o avanço e o diâmetro da broca é um dos fatores que também deve ser observado durante os ensaios, pois com o aumento do avanço, ocorre o aumento da força axial e com isto aumenta também a deformação plástica no fundo do furo, influenciando a formação das rebarbas. Com o aumento do diâmetro da broca, podem-se utilizar maiores avanços. Uma relação entre o diâmetro da broca e avanço utilizado por ser estabelecida pela eq. (1):

$$A = \frac{f}{d} \quad \begin{array}{l} f = \text{avanço (mm/v)} \\ d = \text{diâmetro (mm)} \end{array} \quad (1)$$

Outro parâmetro bastante importante na formação de rebarbas é a velocidade de corte. Dependendo do valor desta, a geração de calor nas arestas de corte da ferramenta pode aumentar influenciando as propriedades do material. Além disso também pode aumentar o desgaste da ferramenta, especialmente nas arestas principais, que influenciam grandemente a formação das rebarbas. O parâmetro relacionado com a velocidade de corte pode ser definido pela eq. (2):

$$B = K \cdot d \cdot V_c \quad \begin{array}{l} V_c = \text{velocidade de corte (m/min)} \\ d = \text{diâmetro (mm)} \\ K = \text{constante (faz com o valor de B seja proporcional ao A)} \end{array} \quad (2)$$

Observando o aspecto das rebarbas e utilizando as eqs. (1) e (2) anteriores, podem-se construir os gráficos ilustrados nas figs. (10) e (11). A separação das rebarbas para o alumínio foi feita considerando rebarbas fáceis de se retirar e rebarbas difíceis. Foram consideradas rebarbas fáceis de se retirar, aquelas que apresentaram aspecto uniforme e altura máxima  $\leq 0.5\text{mm}$ .



A separação das rebarbas para o aço seguiu o mesmo procedimento, porém com parâmetros diferentes, pois as alturas e o aspecto das rebarbas foram diferentes para os dois materiais. As peças com alturas de rebarbas >1mm, foram consideradas difíceis de se retirar.

Conforme fig. (10), observa-se que para o alumínio, foi possível delimitar uma determinada área onde ocorre a formação de rebarbas críticas. Para tal foram utilizadas as maiores velocidades de corte e os maiores avanços utilizados nos ensaios, mostrando que tal combinação formará rebarbas críticas. Porém percebe-se que apenas a combinação dos parâmetros com os maiores valores formarão rebarbas críticas e o uso individual de um ou outro não atinge esta condição.

Já para o aço, conforme fig. (11), alguns pontos coincidiram e procurou-se traçar uma reta média entre os pontos para delimitar uma região com formação de rebarbas fáceis de se remover. Notou-se uma influência maior do parâmetro “A” relacionado com o avanço. O avanço também é o parâmetro que mais influencia nos esforços (dentro dos parâmetros utilizados), não só pela imposição de maior remoção de material, como também na temperatura, influenciando desta forma enormemente a formação de rebarbas.

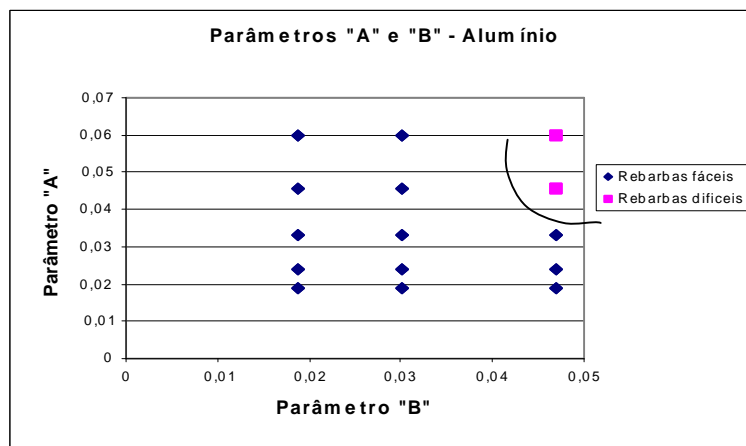


Figura 10 – Combinação dos parâmetros “A” e “B” para alumínio

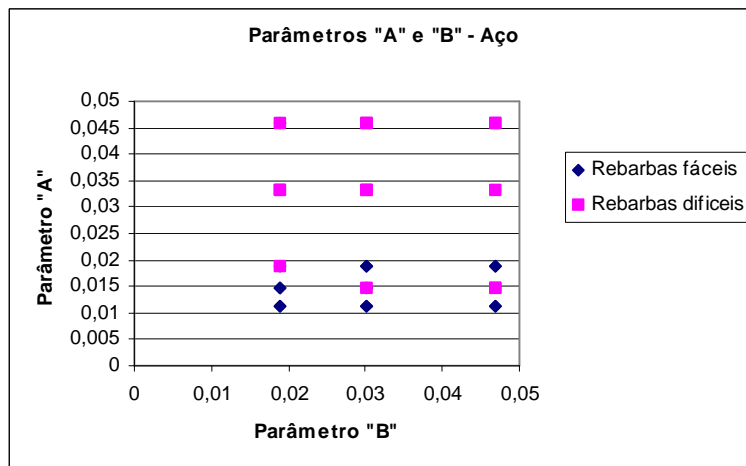


Figura 11 – Combinação dos parâmetros “A” e “B” para aço

## 6. CONCLUSÕES

Com os ensaios realizados foi possível estabelecer correlações entre os parâmetros de corte, os esforços e as rebarbas formadas no processo de furação para o aço e alumínio empregados.

Para o alumínio, foi possível delimitar uma região onde claramente as rebarbas críticas são formadas. Estas rebarbas foram formadas pela combinação das maiores velocidades de corte e os maiores avanços empregados nos ensaios. Já para o aço não foi possível delimitar uma região que identificasse claramente a correlação entre os parâmetros críticos de usinagem e as rebarbas formadas, porém percebeu-se que o avanço foi o fator mais influente na formação das rebarbas.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Sérgio Delijaicov, UNIFEI e ao Sr. Maurício a ajuda nos ensaios.

## 8. REFERÊNCIAS

- Altintas, Y., 2000, Manufacturing automation. Cambridge Univ. Press. pp. 47-53
- Bordinassi, É. C.; Stipkovic Filho, M.; Batalha, G. F. 2003, Study of the drilling process with HSS twist drills. In: International Congress of Mechanical Engineering, 17. COBEM 2003: S. Paulo : ABCM, 1-10.
- Bordinassi, E. C., 2002, Estudo do processo de furação em aço com brocas helicoidais de aço rápido. Dissertação Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 126p.
- Daar, H. A., 1967, Uma contribuição ao conhecimento do processo de furação dos aços com brocas helicoidais. São Carlos, 233p. Tese (Doutorado) – EESC – USP.
- Enomoto, S. ; Ioi, T. ; Kato, K. ; Zhou, L. Liu, X., 2002, Burr reduction with a fine-scrape cutter. Journal of materials processing technology, v. 124, p. 225-258.
- Kim, J. ; Min, S. ; Dornfeld, D. A., 2001, Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts. International journal of machine tools & manufacture: design, research and application, v. 41, p. 923-36.
- Ko, S. L.; Lee, J. K., 2001, Analysis of burr formation in drilling with a new concept drill. Journal of materials processing technology, v.113, p.392-98.
- Mahdy, M. A. M., 2000, Economic drilling conditions for a given deburring radius. Journal of materials processing technology, v. 110, p.197-205.
- Min, S. ; Kim, J. ; Dornfeld, D. A., 2001, Development of a drilling burr control chart for low alloy steel, AISI 4118. Journal of materials processing technology, v. 113, p. 4-9.
- Nakayama, K.; Arai, M., 1987, Burr formation on metal cutting. Annals of the CIRP, v. 36, p. 33-6.
- Pande, S. S.; Relekar, H. P., 1985, Investigations on reducing burr formation in drilling. International journal of machine tools & manufacture, v. 26, p. 339-48.
- Saunders, L. K. L., 2003, A finite element model of exit burrs for drilling of metals. Finite Elements in Analysis and Design, v.40, 2, pp. 139-58.
- Tönshoff, H. K.; König, W., 1994, Machining of holes, developments in drilling technology. Annals of the CIRP, v. 43, p. 551-61.

## 9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## DEBURRING CONTROL AND CUTTING FORCE ON DRILLING PROCESS WITH TWIST DRILL

### Ed Cláudio Bordinassi

Dept. of Mechanical Engineering - Centro Universitário Instituto Mauá de Tecnologia - Praça Mauá, 1 S. Caetano do Sul – SP - [ecb@maua.br](mailto:ecb@maua.br)

### Carlos Oscar Corrêa de Almeida Filho

Dept. of Mechanical Engineering - Centro Universitário Instituto Mauá de Tecnologia - Praça Mauá, 1 S. Caetano do Sul – SP - [cocaf@maua.br](mailto:cocaf@maua.br)

### Marco Stipkovic Filho

Laboratório de Engenharia de Fabricação - Dpt. Mechatronics and Mechanical Systems Engineering – av. Prof. Mello de Moraes, 2231, Cidade Universitária CEP 0580-900, São Paulo, SP [kovic@osite.com.br](mailto:kovic@osite.com.br)

### Gilmar Ferreira Batalha

Laboratório de Engenharia de Fabricação - Dpt. Mechatronics and Mechanical Systems Engineering – av. Prof. Mello de Moraes, 2231, Cidade Universitária CEP 0580-900, São Paulo, SP- [gfbatalh@usp.br](mailto:gfbatalh@usp.br) /

***Abstract.** This work aims to study the burr formations during the drilling process of steel and aluminum with HSS twist drills. For this, many variations of cutting parameters were used and the cutting forces were monitored by a strain-gage dynamometer. The burrs were measured and they were compared against the cutting parameters and cutting forces, being possible to find correlations between the main factors that affect the burr formation.*

***Keywords:** Burr, drilling, twist drill, dynamometer.*