

## INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA E DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM NO TORNEAMENTO DE ALUMÍNIO COM DIAMANTE MONOCRISTALINO

### INFLUENCE OF THE TOOL GEOMETRY AND THE CUTTING PARAMETERS ON TURNING OF ALUMINIUM WITH SINGLE CRYSTAL DIAMOND TOOL

José Ricardo Lenzi Mariolani  
UNICAMP - Centro de Tecnologia  
Cidade Universitária "Zeferino Vaz", C.P. 6131  
13081, Campinas, SP  
Brasil

Uwe Hessel  
Günter Roth  
Institut für Werkzeugmaschinen  
Universität Stuttgart  
Holzgartenstraße 17, 7000 Stuttgart 1  
FRG

#### RESUMO

São apresentados os resultados de um estudo experimental sobre a influência da geometria da ferramenta e condições de usinagem no acabamento superficial de alumínio faceado com diamante monocristalino. Os melhores acabamentos foram obtidos com ferramenta de facetas definidas com comprimento da aresta de corte de 1,5 mm, posicionada a  $0,5^{\circ}$  em relação à superfície da peça. O avanço mostrou-se o parâmetro de maior influência, com os menores valores de rugosidade obtidos para 3,6 e 7,2  $\mu\text{m}/\text{volta}$ . A profundidade apresentou pouca influência (dentro da gama ensaiada) e a velocidade de corte não apresentou influência. Observou-se que a refrigeração correta da zona de corte é fator decisivo para a obtenção de bom acabamento.

**Palavras-chave:** Torneamento com Diamante ■ Torneamento de Ultra-Precisão ■ Ferramenta de Diamante Monocristalino

#### ABSTRACT

The results of an experimental investigation on the influence of the tool geometry and the cutting parameters on the surface quality of Aluminium faced with single crystal diamond tools are presented. The best surface qualities were obtained with a faceted cutter with cutting edge of 1,5 mm at a tool setting angle of  $0,5^{\circ}$ . The cutting parameter of most influence was the feed, being the smallest values of roughness obtained for 3,6 and 7,2  $\mu\text{m}/\text{rev}$ . The depth of cut exhibited few influence (in the tested range of depths) on the surface quality and the cutting speed showed no influence. It was realized that the right cooling of the cutting zone is decisive for a good surface quality.

**Keywords:** Diamond Turning ■ Ultra Precision Turning ■ Single Crystal Diamond Tools

## INTRODUÇÃO

Por usinagem de ultra-precisão com diamante entende-se o processo de usinagem no qual é empregada ferramenta monocortante de diamante monocristalino obtendo-se peças com desvio de forma inferior a  $0,2 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$  e rugosidade superficial inferior a  $0,02 \mu\text{m}$  [7]. Para que isso seja possível, deve ser empregada máquina ferramenta de ultra-precisão dotada de mancais e guias hidrostáticos, hidrodinâmicos ou aerostáticos.

Inúmeros fatores exercem influência na precisão e no acabamento das peças usinadas com diamante. Esses fatores podem ser divididos em quatro grupos [5,7], ou seja, fatores relacionados ao ambiente (variações de temperatura e vibrações externas), à máquina ferramenta (rigidez estática, dinâmica e térmica, precisão de posicionamento, repetibilidade, tipo de comando, precisão do eixo árvore, sistema de medição, frequências naturais, sistema de fixação da peça), ao processo (condições de usinagem, tipo do diamante, desgaste e geometria da ferramenta, refrigeração) e ao material da peça (pureza, estrutura cristalina, propriedades térmicas, peso, rigidez).

Dentre os fatores citados acima, o presente trabalho se ocupa com a influência das condições de usinagem (avanço, profundidade e velocidade de corte) e com alguns aspectos da geometria da ferramenta no acabamento superficial. Trata-se da primeira fase de uma pesquisa sobre a usinagem de ultra-precisão com diamante monocristalino, cujos resultados deveriam fornecer subsídios para a programação da segunda fase, prevista para estudar a influência do comportamento dinâmico da máquina sobre o acabamento.

Em relação à geometria da ferramenta, são recomendados para a usinagem de metais não ferrosos ângulos de folga entre  $2^\circ$  e  $5^\circ$  e ângulos de saída entre  $0^\circ$  e  $-5^\circ$ . Ângulos de saída negativos seriam recomendáveis na usinagem de materiais constituídos por uma matriz mole na qual existam inclusões duras (por exemplo, inclusões de silício em alumínio) [7]. O acabamento superficial seria melhor quanto maior o raio de ponta da ferramenta (para usinagem de superfícies não planas). Para alumínio, são recomendados raios de ponta entre 2 e 10 mm na usinagem de superfícies côncavas e de 0,5 a 4 mm na usinagem de superfícies convexas [7]. Na usinagem de superfícies planas,

somente ferramentas de diamante com facetas definidas permitiriam a obtenção de superfícies espelhadas [3].

A influência do ângulo formado entre a superfície da peça usinada e a aresta de corte de uma ferramenta com facetas definidas (Figura 1) no acabamento superficial também já foi objeto de investigação, tendo sido obtido o melhor acabamento quando o referido ângulo era de  $-0,01^{\circ}$  [11].

As condições de usinagem recomendadas ou empregadas por diferentes pesquisadores na usinagem com ferramentas de diamante monocristalino diferem consideravelmente umas das outras. Em relação à velocidade de corte, que segundo Becker [1] exerce pouca influência no acabamento superficial, podem ser encontrados na literatura valores tão diversos como: 1500 a 45000 m/min [1], 300 a 860 m/min [13], 9 a 720 m/min [12], 6 m/min [2], 450 a 990 m/min [8], 2000 m/min [5] e 100 e 1000 m/min [4]. Na usinagem de alumínio, porém, existem faixas de velocidade dentro das quais pode ocorrer a formação de aresta postiça de corte, o que pode ser evitado por meio de uma refrigeração eficiente da zona de corte [7].

Os avanços recomendados não diferem muito uns dos outros. São encontrados na literatura como valores ótimos  $9 \mu\text{m/volta}$  [12],  $10 \mu\text{m/volta}$  [10] e de 3 a  $15 \mu\text{m/volta}$  [7]. Quando são empregados grandes avanços, a rugosidade medida na superfície usinada normalmente aproxima-se da rugosidade teórica para aquela condição, o que não ocorre quando se empregam avanços pequenos. Este fato seria devido à influência de vibrações durante o processo, que provocariam a deterioração do acabamento superficial no caso de avanços pequenos, mas cuja amplitude não seria suficientemente grande para deteriorar o acabamento no caso de avanços maiores [13], e à influência dos grãos do material [7].

Aceita-se que quanto menor a profundidade de corte, melhor o acabamento. Não existe unanimidade, porém, em relação aos valores considerados ótimos. Para a usinagem de metais não ferrosos recomendam-se profundidades de 1 a  $3 \mu\text{m}$  [7] e de  $15 \mu\text{m}$  [12], já tendo sido citados valores da ordem de  $0,0025 \mu\text{m}$  [10]. Para profundidades desta ordem, propriedades do material como tamanho de grão assumem grande importância [2].

Outro fator relacionado à ferramenta que influi no acabamento superficial é o desgaste. Segundo Sugano & Takeuchi [12], existiriam na usinagem de alumínio

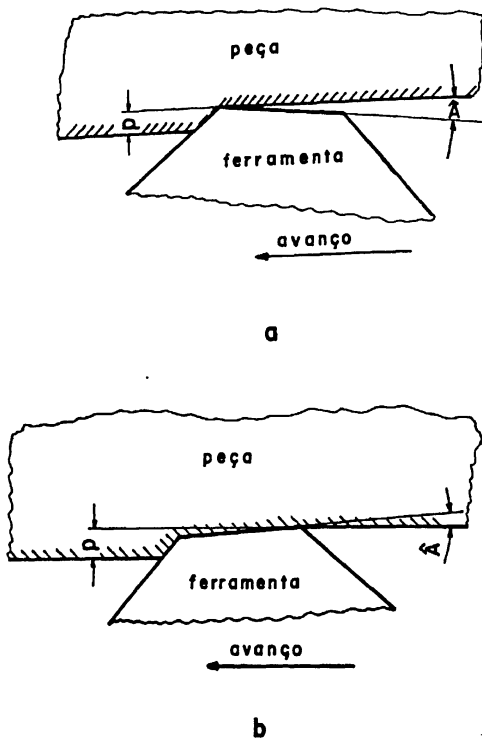


Figura 1. Ângulo  $\hat{A}$  formado entre a aresta de corte da ferramenta e a superfície da peça. a)  $\hat{A}$  positivo. b)  $\hat{A}$  negativo. (Modificado de Nishiguchi et al. [11]).

com ferramenta de diamante monocristalino quatro fases definidas de desgaste, ou seja:

- de 0 a 100 Km usinados encontra-se a primeira fase de corte instável, causado pelo início do desgaste da ferramenta;
- de 100 a 300 Km usinados encontra-se a primeira fase de corte estável (estabilização do desgaste);
- de 300 a 400 Km usinados encontra-se uma segunda fase de corte instável;
- e
- de 400 a 900 Km usinados encontra-se uma segunda fase de corte estável.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram executados em um torno de precisão Boley DW4-HD-P-A dotado de mancais hidrodinâmicos que dispunha de três rotações fixas (1340/1800/2500 rpm).

Os corpos de prova eram discos da liga DIN AlMg3 com as seguintes dimensões: diâmetro externo = 130 mm, diâmetro interno = 40 mm e espessura = 2,5 mm. Os discos eram fixados na placa por meio de vácuo (cerca de -90 mbar).

Foram utilizadas três ferramentas de diamante monocristalino, sendo duas com facetas definidas (comprimentos da aresta de corte  $L = 1,2$  mm e  $1,5$  mm) e uma arredondada (raio de ponta =  $0,8$  mm) e com ângulos de folga de  $5^{\circ}$  e ângulo de saída de  $0^{\circ}$ . As ferramentas foram fixadas rigidamente na máquina, com o menor comprimento em balanço possível.

Empregou-se como refrigerante uma emulsão na proporção 50:1 [3] do concentrado "Oel-Held Rotorol Plus EP aminfrei", a qual era pulverizada antes de ser direcionada à zona de corte.

A execução dos ensaios obedeceu ao seguinte procedimento:

Usinagem de desbaste de ambos os lados dos discos com profundidade de 0,1 mm. Usinagem de acabamento do primeiro lado do disco com as condições escolhidas. O desbaste e o acabamento eram executados sempre com a mesma ferramenta. Antes da operação de acabamento inspecionava-se a aresta de corte da ferramenta. Caso fosse notada a presença de aresta postiça, esta era

removida com o auxílio de um bastão de madeira mole. A remoção do cavaco durante a usinagem era efetuada por meio de um potente aspirador. Após a usinagem, removia-se a emulsão remanescente sobre a superfície da peça com o emprego de água corrente.

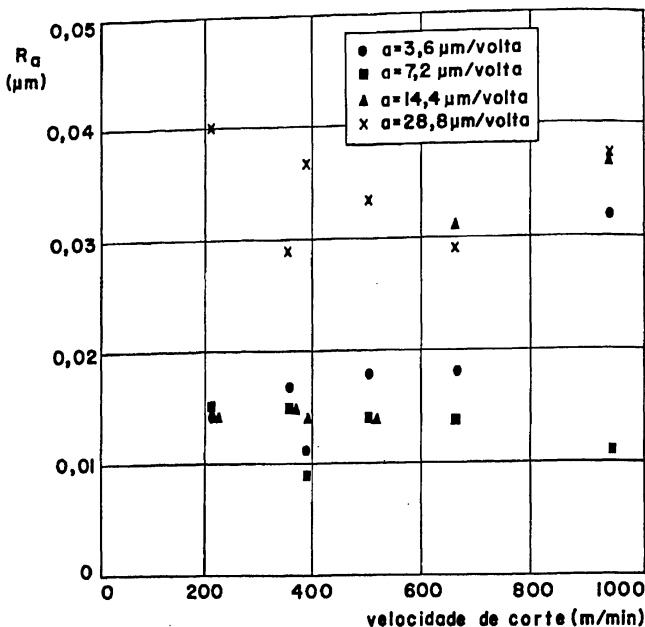


Figura 2. Valores médios de  $R_a$  versus velocidade de corte obtidos com ferramenta de facetas definidas ( $L = 1,5 \text{ mm}$ ) e profundidade de corte de  $15 \mu\text{m}$ .

Tabela I. Valores médios de  $R_a$  e  $R_{max}$  e respectivos desvios padrão obtidos na primeira etapa dos ensaios.

$L$ (mm)	*	$a$ ( $\mu\text{m}/$ volta)	$R_a \pm s$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{max} \pm s$ ( $\mu\text{m}$ )
1,2	$-0,5^\circ$	3,6	$0,055 \pm 0,017$	$0,585 \pm 0,192$
		7,2	$0,091 \pm 0,060$	$0,872 \pm 0,411$
	$0^\circ$	3,6	$0,024 \pm 0,014$	$0,294 \pm 0,278$
		7,2	$0,013 \pm 0,001$	$0,173 \pm 0,101$
	$+0,5^\circ$	3,6	$0,036 \pm 0,024$	$0,352 \pm 0,327$
		7,2	$0,029 \pm 0,003$	$0,710 \pm 0,171$
1,5	$-0,5^\circ$	3,6	$0,185 \pm 0,042$	$1,370 \pm 0,289$
		7,2	$0,193 \pm 0,027$	$1,450 \pm 0,228$
	$0^\circ$	3,6	$0,049 \pm 0,018$	$0,479 \pm 0,213$
		7,2	$0,056 \pm 0,031$	$0,723 \pm 0,345$
	$+0,5^\circ$	3,6	$0,013 \pm 0,002$	$0,164 \pm 0,071$
		7,2	$0,013 \pm 0,003$	$0,147 \pm 0,050$
Ferramenta arredondada $r = 0,8$ mm		3,6	$0,034 \pm 0,014$	$0,493 \pm 0,475$
		7,2	$0,028 \pm 0,005$	$0,430 \pm 0,285$

\* Ângulo entre a aresta de corte e a superfície da peça

 $L$  = comprimento da aresta de corte.

Tabela II. Valores médios de  $R_a$  e  $R_{max}$  e respectivos desvios padrão obtidos na segunda etapa dos ensaios.

$n$ (rpm)	$a$ ( $\mu\text{m}/$ volta)	$p$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_a \pm s$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{max} \pm s$ ( $\mu\text{m}$ )
1340	3,6	15	0,016 $\pm$ 0,003	0,147 $\pm$ 0,037
		25	0,016 $\pm$ 0,003	0,138 $\pm$ 0,025
	7,2	15	0,015 $\pm$ 0,003	0,149 $\pm$ 0,039
		25	0,017 $\pm$ 0,005	0,150 $\pm$ 0,056
	14,4	15	0,014 $\pm$ 0,002	0,376 $\pm$ 0,194
		25	0,018 $\pm$ 0,003	0,343 $\pm$ 0,447
	28,8	15	0,034 $\pm$ 0,007	0,991 $\pm$ 0,334
		25	0,019 $\pm$ 0,002	0,804 $\pm$ 0,266
2500	3,6	15	0,021 $\pm$ 0,009	0,145 $\pm$ 0,050
		25	0,013 $\pm$ 0,002	0,164 $\pm$ 0,071
	7,2	15	0,011 $\pm$ 0,002	0,111 $\pm$ 0,032
		25	0,013 $\pm$ 0,003	0,147 $\pm$ 0,050
	14,4	15	0,027 $\pm$ 0,012	0,359 $\pm$ 0,205
		25	0,020 $\pm$ 0,006	0,234 $\pm$ 0,138
	28,8	15	0,034 $\pm$ 0,007	0,970 $\pm$ 0,287
		25	0,023 $\pm$ 0,002	0,993 $\pm$ 0,407



Os ensaios foram divididos em duas etapas. A primeira objetivava a comparação entre a ferramenta arredondada e as ferramentas com facetas definidas montadas em diferentes posições (ângulos de  $-0,5^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$  ou  $+0,5^{\circ}$  entre a aresta de corte e a superfície das peças, Figura 1) e foi executada com rotação de 2500 rpm, profundidade de corte de  $25 \mu\text{m}$  e avanços de 3,6 e  $7,2 \mu\text{m/volta}$ . A segunda etapa, cujo objetivo era a investigação da influência do avanço, da profundidade e da velocidade de corte no acabamento superficial, foi executada com a ferramenta e a geometria que apresentou o melhor resultado na primeira etapa.

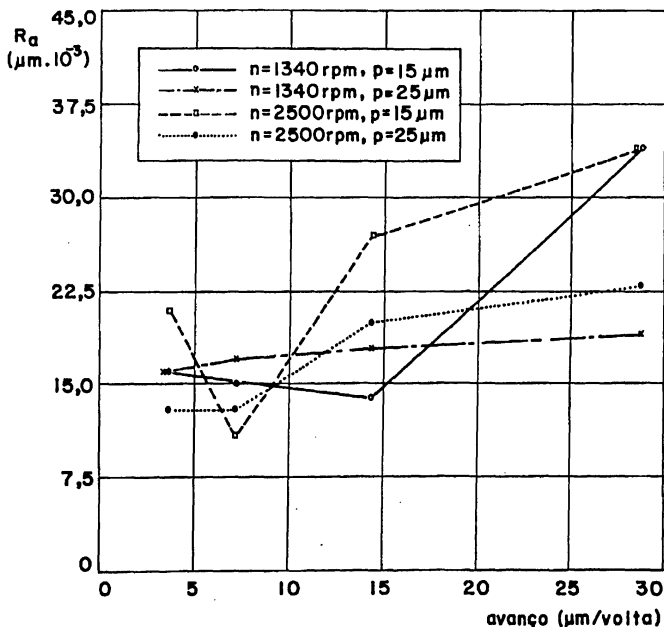


Figura 3. Valores médios de  $R_a$  versus avanço.

A rugosidade das peças foi medida em um rugosímetro *Perthometer S6P* com microapalpador RTH 6-50, dispositivo de avanço PPK, comprimento de avanço de 5,6 mm e velocidade do apalpador de 0,5 mm/seg. Antes das medições a superfície era limpa com um algodão levemente umedecido. Foram tomadas 12 medidas por disco, sendo 4 próximas ao diâmetro interno, 4 em um diâmetro médio e 4 próximas ao diâmetro externo, ou seja, em três velocidades de corte diferentes, pois o torno utilizado trabalhava com rotação constante.

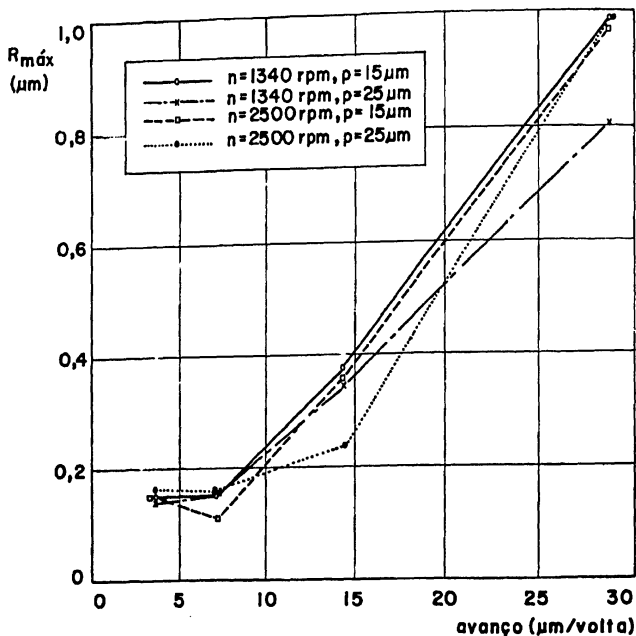


Figura 4. Valores médios de  $R_{\text{max}}$  versus avanço.

## RESULTADOS

As tabelas e figuras a seguir resumem os resultados dos ensaios. A Figura 2 apresenta os valores médios de  $R_a$  (média de 4 medições) plotados em função da velocidade de corte. As Tabelas I e II apresentam os valores médios (média de 12 medições) e os desvios padrão de  $R_a$  e  $R_{\text{max}}$  obtidos respectivamente na primeira e na segunda etapa do trabalho. Os valores médios de  $R_a$  e  $R_{\text{max}}$  listados na Tabela II estão representados graficamente nas Figuras 3 e 4 respectivamente. As Figuras 5, 6, 7 e 8 mostram fotos de algumas das superfícies usinadas.

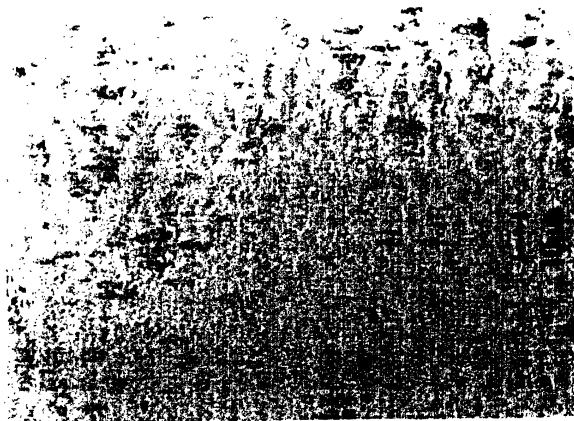


Figura 5. Superfície produzida por ferramenta com facetas definidas ( $L = 1,2$  mm) posicionada com um ângulo de  $0^0$  em relação à peça. Condições de usinagem:  $n = 2500$  rpm,  $a = 7,2$   $\mu\text{m/volta}$ ,  $p = 25$   $\mu\text{m}$ . Acabamento superficial:  $R_a = 0,013$   $\mu\text{m}$ ,  $R_{\text{max}} = 0,173$   $\mu\text{m}$  (valores médios).

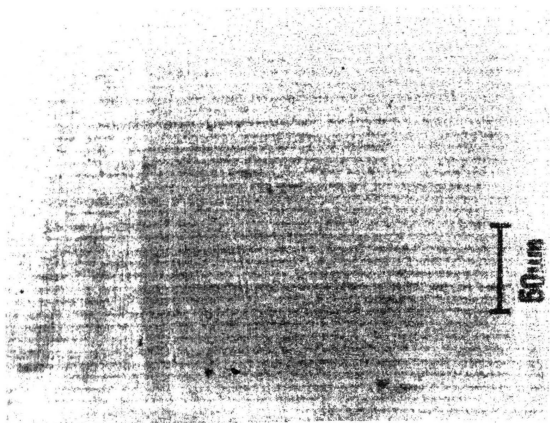


Figura 6. Superfície produzida por ferramenta com facetas definidas ( $L = 1,5$  mm) posicionada com um ângulo de  $+0,5^\circ$  em relação à peça. Condições de usinagem:  $n = 2500$  rpm,  $a = 7,2$   $\mu\text{m/volta}$ ,  $p = 15$   $\mu\text{m}$ . Acabamento superficial:  $R_a = 0,011$   $\mu\text{m}$ ,  $R_{\text{max}} = 0,111$   $\mu\text{m}$  (valores médios).

## DISCUSSÃO

Antes da discussão dos resultados faz-se necessário discutir brevemente o processo de medição de rugosidade empregado. Embora a rugosímetro utilizado apresentasse resolução na faixa de nanômetros, o fato da medição ser com contato poderia influir nos resultados. Para o tipo de superfície obtido neste trabalho são recomendados métodos de medição ópticos [6] ou interferométricos [9]. De fato, observou-se que o processo de medição produzia um risco na superfície, não tendo sido possível determinar se esse risco era produzido durante a medição ou no retorno do microapalpador. Este fato coloca em questão até que ponto os valores medidos são confiáveis. Porém, a aparência



Figura 7. Superfície produzida por ferramenta arredondada ( $r = 0,8$  mm). Condições de usinagem:  $n = 2500$  rpm,  $a = 7,2$   $\mu\text{m/volta}$ ,  $p = 25$   $\mu\text{m}$ . Acabamento superficial:  $R_a = 0,028$   $\mu\text{m}$ ,  $R_{\text{max}} = 0,430$   $\mu\text{m}$  (valores médios).

das superfícies mostrou-se coerente com a magnitude das rugosidades medidas (vide p.ex. Figuras 6 e 7 e os respectivos valores de  $R_a$  e  $R_{\text{max}}$ ), o que nos levou a concluir que qualitativamente os dados são confiáveis, enquanto que quantitativamente devem ser considerados com cautela.

Embora o material empregado na confecção dos corpos de prova pudesse conter até 0,5% de silício, o qual pode formar inclusões duras e não usináveis na matriz mole de alumínio [7], considerou-se o mesmo adequado para este ensaio, uma vez que o objetivo primordial era a obtenção de subsídios para a programação do prosseguimento dos trabalhos.

Na primeira etapa do trabalho o acabamento produzido por ferramentas

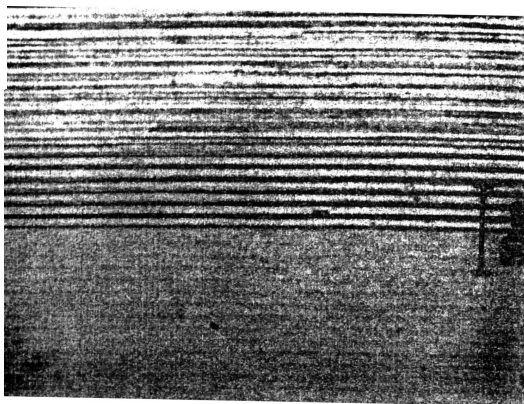


Figura 8. Efeito da interrupção fluxo de fluido refrigerante.

com facetas definidas (desde que convenientemente posicionadas) mostrou-se superior ao produzido pela ferramenta arredondada utilizada (Tabela I). O melhor acabamento foi obtido com a ferramenta de  $L = 1,5$  mm posicionada com um ângulo de  $+0,5^{\circ}$  entre a superfície da peça e a aresta de corte ( $R_a = 0,013 \mu\text{m}$  e  $R_{\text{max}} = 0,147 \mu\text{m}$  para  $a = 7,2 \mu\text{m/volta}$ ). Para a ferramenta de  $L = 1,2$  mm, obteve-se o melhor acabamento com a aresta paralela à superfície da peça ( $R_a = 0,013 \mu\text{m}$  e  $R_{\text{max}} = 0,173 \mu\text{m}$  para  $a = 7,2 \mu\text{m/volta}$ ). Entretanto, a aparência da superfície era ruim, com aspecto de queimada (Figura 5), sem que os dados obtidos permitam afirmações sobre a causa deste fenômeno, o qual não foi observado com a ferramenta de  $L = 1,5$  mm montada na mesma posição. Neste caso, porém, o acabamento obtido foi pior (Tabela I). Ferramentas montadas com ângulo negativo entre a aresta de corte e a superfície da peça produziram acabamento claramente pior (Tabela I).

Comparando-se qualitativamente os resultados obtidos com a ferramenta de  $L = 1,2$  mm com os obtidos por Nishiguchi et al. [11], que utilizaram ferramenta com aresta de corte desse mesmo comprimento, vê-se que há concordância. No presente ensaio, obteve-se para ângulos entre a aresta de corte e a superfície da peça de  $-0,5^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$  e  $+0,5^{\circ}$  respectivamente os seguintes valores médios de  $R_{\max}$ :  $0,87 \mu\text{m}$ ,  $0,17 \mu\text{m}$  e  $0,71 \mu\text{m}$  ( $n = 2500$  rpm,  $a = 7,2 \mu\text{m/volta}$  e  $p = 25 \mu\text{m}$ ). Aqueles pesquisadores obtiveram para os mesmos ângulos respectivamente os seguintes valores aproximados de  $R_{\max}$ :  $0,4 \mu\text{m}$ ,  $0,1 \mu\text{m}$  e  $0,4 \mu\text{m}$  ( $n = 1440$  rpm,  $a = 50 \mu\text{m/volta}$  e  $p = 10 \mu\text{m}$ ), e obtiveram o melhor acabamento quando o ângulo em questão era de  $-0,01^{\circ}$  ( $R_{\max} \cong 0,02 \mu\text{m}$ ), valor não empregado neste trabalho pela impossibilidade de se ajustá-lo confiavelmente na máquina utilizada. Os autores citados não utilizaram ferramenta de  $L = 1,5$  mm.

Como na primeira etapa o melhor acabamento foi obtido com a ferramenta de  $L = 1,5$  mm montada com um ângulo de  $+0,5^{\circ}$  em relação à superfície da peça, decidiu-se executar a segunda etapa com esta ferramenta. Esta etapa tinha por objetivo investigar a influência do avanço, da profundidade e da velocidade de corte no acabamento superficial, e seus resultados estão sumarizados na Tabela II e nas Figuras 2 a 4.

A Figura 6 mostra o aspecto da superfície que apresentou o melhor acabamento ( $R_a = 0,011 \mu\text{m}$  e  $R_{\max} = 0,111 \mu\text{m}$ ). Nesta figura pode-se notar claramente as marcas do avanço ( $7,2 \mu\text{m/volta}$ ), e vê-se também a presença de alguns pontos mais escuros na superfície usinada que poderiam ser de inclusões no material. A Figura 7 apresenta uma superfície com acabamento pior que a anterior ( $R_a = 0,28 \mu\text{m}$  e  $R_{\max} = 0,430 \mu\text{m}$ ). Nesta figura, os pontos mais escuros que eventualmente seriam inclusões parecem favorecer o aparecimento de sulcos que prejudicam o acabamento superficial. As duas superfícies foram produzidas com mesmos avanço e rotação, mas com ferramentas diferentes. O mesmo fenômeno visto na Figura 7 também foi observado em superfícies produzidas por ferramentas com facetas definidas posicionadas em ângulo diferente do utilizado na usinagem da peça da Figura 6. Estas observações parecem sugerir que outros fatores geométricos além do ângulo de saída determinam se as inclusões serão cortadas ou arrancadas, produzindo sulcos na superfície. Estudos mais aprofundados seriam necessários para o entendimento deste fenômeno.

Não se observou qualquer correlação, dentro da faixa de velocidades empregada, entre a velocidade de corte e o acabamento superficial, como pode ser visto na Figura 2. Essa inexistência de correlação indica que não se incorre em erro ao se calcular os valores médios de  $R_a$  e  $R_{max}$  incluindo medidas tomadas em diferentes diâmetros dos discos, e conseqüentemente produzidos com diferentes velocidades de corte.

Em relação ao avanço, nota-se das Figuras 3 e 4 que os valores menores (3,6 e 7,2  $\mu\text{m/volta}$ ) produziram melhores acabamentos que os valores maiores (14,4 e 2,8  $\mu\text{m/volta}$ ), fato mais evidente na Figura 4. Os resultados obtidos sugerem que o avanço ótimo em termos de acabamento estaria entre 3,6 e 7,2  $\mu\text{m/volta}$ , com ligeira vantagem deste último. Apesar de os valores de  $R_{max}$  terem apresentado maior dispersão que os de  $R_a$  (Tabela II), as curvas formadas pelos valores médios do primeiro apresentaram forma mais coerente que as formadas pelos valores médios desses últimos (Figuras 4 e 3 respectivamente), sugerindo ser o parâmetro  $R_{max}$  mais adequado para a avaliação dos resultados. Observando-se por exemplo o ponto referente ao valor médio de  $R_a$  para  $n = 2500$  rpm,  $a = 3,6$   $\mu\text{m/volta}$  e  $p = 15$   $\mu\text{m}$  na Figura 3, nota-se que ele apresenta um valor anormalmente alto em relação aos pontos vizinhos. Observando-se agora na Figura 4 o ponto referente ao valor médio de  $R_{max}$  para as mesmas condições de usinagem, não se nota a discrepância observada na figura anterior. Estas discrepâncias poderiam ter se originado de artefatos do processo de medição que, como citado anteriormente, não era o mais adequado ao tipo de superfície a ser medida. A influência desses artefatos teria sido mais pronunciada no parâmetro  $R_a$  pela baixa magnitude dos valores envolvidos (0,01 a 0,02  $\mu\text{m}$ , contra valores superiores a 0,1  $\mu\text{m}$  de  $R_{max}$ ).

Em relação à profundidade de corte não se observou diferença significativa entre os valores empregados neste trabalho, o que não significa que esse parâmetro não exerça influência sobre o acabamento, pois a faixa de profundidades testada foi estreita, em virtude de limitações de programação da máquina ferramenta utilizada.

Observou-se ainda que a refrigeração da zona de corte exerce influência fundamental no acabamento obtido, como pode ser visto na Figura 8. Na parte de baixo da figura vê-se a superfície obtida com refrigeração correta, e na parte de cima a superfície formada sem refrigeração. A falta de refrigeração provoca a



formação imediata de uma aresta postiça que danifica totalmente a superfície. Na usinagem de ultra-precisão com ferramenta de diamante são empregados normalmente como refrigerantes etanol [7] e querosene [8,11]. Eventualmente também são empregados pentano, isopentano, 2,3 dimetilbutano, isopropano e parafina [7]. Como frequentemente as peças usinadas com ferramentas de diamante necessitam possuir boas propriedades ópticas, são escolhidos refrigerantes que evaporem sem deixar manchas, de modo a se evitar o emprego oneroso de solventes ou a danificação da superfície por limpeza mecânica. Como fluidos desse tipo são facilmente inflamáveis e potencialmente explosivos, o seu emprego exige que a máquina esteja instalada em um local provido de um sistema adequado de ventilação/exaustão, o que não era o caso da máquina utilizada neste trabalho. Como as propriedades ópticas da superfície não eram importantes no presente trabalho, utilizou-se como fluido refrigerante uma emulsão de óleo solúvel na proporção de 1:50 pulverizada antes de atingir a zona de corte e que, do ponto de vista de refrigeração da ferramenta desempenhou-se a contento, provocando porém dificuldades na limpeza da peça.

A presente pesquisa encontra-se em prosseguimento com a investigação da influência do comportamento dinâmico da máquina sobre o acabamento superficial, cujos resultados serão objeto de futura publicação.

## AGRADECIMENTO

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que através do Programa de Formação de Recursos Humanos em Áreas Estratégicas (RIAE) forneceu apoio financeiro para que um dos autores (J.R.L.M.) desenvolvesse este trabalho no Instituto de Máquinas Ferramenta da Universidade de Stuttgart - República Federal da Alemanha.

## REFERÊNCIAS

- [1] BECKER, W. Glanzdrehen und - fräsen mit Naturdiamant - Werkzeugschneiden, *Werkstattechnik* 75(5), pp. 317-319, 1985.
- [2] FURUKAWA, Y. & MORONUKI, N. Effect of material properties on ultra precise cutting processes, *Annals of the CIRP* 37(1), pp. 113-116, 1988.

- [3] BOLEY, G. Plattendrehmaschine Boley DW4-HD-P-A - Bedienungsanleitung, Fa. Boley, Esslingen (Catálogo técnico).
- [4] HARTEL, R. Ultrapräzisionsmaschinen für Bearbeitung von Metalloptiken, *Feinwerktechnik & Messtechnik* 96(9), pp. 361-363, 1988.
- [5] KNOL, P.H. & SZEPESEI, D. Präzisions-Drehmaschine Höchster Genauigkeitsklasse, *Feinwerktechnik & Messtechnik* 95(1), pp. 17-21, 1987.
- [6] KNOL, P.H. & SZEPESEI, D. Manufacturing and measuring of aspherics integrated in one ultra precision machine, *Proceedings of SPIE* 1015, pp. 7-16, 1988.
- [7] KÖNIG, W.; WECK, M.; SPENRATH, N.; LUDERICH, J. Diamond Machining Technology (tutorial), 6th International Precision Engineering Seminary, Braunschweig, 96p., 1991.
- [8] MASUDA, M.; MAEDA, Y.; NISHIGUCHI, T.; SAWA, M. A Study on Diamond Turning of Al-Mg Alloy, *Annals of the CIRP* 38(1), pp. 111-114, 1989.
- [9] MODEMANN, K. Schwingungsbedingte Werkstückoberflächenmodulationen bei der Ultrapräzisionsdrehbearbeitung, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, Aachen, 145 p., 1989.
- [10] MORIWAKI, T. Machinability of copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting, *Annals of the CIRP* 38(1), pp. 115-118, 1989.
- [11] NISHIGUCHI, T.; MAEDA, Y.; MASUDA, M.; SAWA, M. Mechanism of Micro Chip Formation in Diamond Turning of Al-Mg Alloy, *Annals of the CIRP* 37(1), pp. 117-120, 1988.
- [12] SUGANO, T. & TAKEUCHI, K. Diamond Turning of an Aluminium Alloy for Mirror, *Annals of the CIRP* 36(1), pp. 17-20, 1987.
- [13] TAKASU, S.; MASUDA, M.; NISHIGUCHI, T. Influence of a Steady Vibration with Small Amplitude Upon Surface Roughness in Diamond Machining, *Annals of the CIRP* 34(1), pp. 463-467, 1985.