

RUGOSIDADE E ESPALHAMENTO LUMINOSO EM SUPERFÍCIES DE ALUMÍNIO TORNEADAS COM FERRAMENTA DE DIAMANTE

Arthur José Vieira Porto

Luciana Montanari

Enrico Di Raimo

Jaime Gilberto Duduch

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-carlense, 400; CEP - 13566-590, Centro, São Carlos, SP, Brasil. E-mail: ajvporto@sc.usp.br

Resumo

O desenvolvimento de novos produtos tem forçado a indústria a desenvolver pesquisas em novos materiais e processos. Um exemplo é o desenvolvimento de componentes ópticos, onde o processo de torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante está sendo pesquisado para substituir os processos convencionais de polimento e lapidação. Para avaliação da qualidade de superfícies ópticas, métodos ópticos, além de não danificarem a superfície, produzem respostas mais rápidas. Neste trabalho, utilizou-se a técnica de espalhamento de luz laser ($\lambda = 633 \text{ nm}$) para a avaliação da superfície usinada, visando uma futura aplicação do método no controle em tempo real da superfície usinada.

Palavras-chave: Torneamento, Ultraprecisão, Espalhamento Luminoso

1. INTRODUÇÃO

Indústrias de alta tecnologia como as de informática, microeletrônica, óptica e mecânica de precisão têm constantemente procurado desenvolver pesquisas em diversas áreas como as dos materiais, de instrumentação, de controle e fabricação, no intuito de produzir componentes e equipamentos cada vez mais precisos e de melhor qualidade.

Para a obtenção de superfícies ópticas, além dos processos convencionais de polimento e lapidação, pode-se utilizar o processo de torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante de ponta única, capaz de produzir componentes ópticos (Church & Takacs, 1985). Estes componentes fabricados através da usinagem de ultraprecisão apresentam superfícies com ótima textura, forma e refletividade.

A presença de luz espalhada é um problema contínuo no projeto e desempenho dos sistemas ópticos. Este espalhamento está relacionado com a qualidade superficial dos componentes ópticos fabricados. No torneamento de ultraprecisão pode-se obter rugosidades superficiais da ordem de 3 a 10 nm.

O espalhamento de luz de uma superfície pode ser resultante dos seguintes fatores:

- irregularidades, tais como riscos, crateras ou partículas que são grandes comparadas ao comprimento de onda da luz incidente;
- irregularidades isoladas, cujo tamanho é comparável ou menor que o comprimento de onda da luz incidente;

- irregularidades que são pequenas em uma ou mais dimensões, mas que têm espaçamento tão pequenos, que não podem ser tratados como centros espalhados independentes. O efeito de cada centro está relacionado com aquele de suas vizinhanças.

Os métodos utilizados para cálculo de espalhamento ópticos citados na literatura são: óptica geométrica, teoria escalar, teoria vetorial, teoria de Mie e métodos numéricos (Elson; Bennett & Bennett, 1979).

Essas irregularidades superficiais podem ser observadas através de uma análise do acabamento superficial de uma peça usinada por processos convencionais ou pelo torneamento de ultraprecisão. E podem aparecer sob as seguintes formas:

- depressões ou ranhuras em forma de rosca;
- marcas de vibração sobre as ranhuras;
- grandes ranhuras espaçadas devido à interação máquina-ferramenta-cavaco;
- irregularidades próprias do material como as inclusões.

As irregularidades geométricas que são introduzidas na superfície de uma peça modificam a estrutura cristalográfica. Quanto mais dúctil for o material mais acentuadas serão as modificações na superfície. Com isso, o acabamento superficial é alterado resultando em mudanças nas condições de refletividade.

Materiais com ligas de alumínio segregam inclusões duras que produzem inchaços (bumps) característicos em superfícies torneadas com diamante. Esses defeitos podem ser os responsáveis pela maior parte do espalhamento luminoso destas superfícies (Bennett, 1992).

Uma extensa variedade de métodos estão disponíveis para medir rugosidade superficial. Estes métodos podem ser agrupados entre aqueles que fornecem a fotografia das superfícies (e às vezes informação quantitativa) e aqueles que fornecem informação estatística quantitativa sobre as superfícies.

Para superfícies lisas, há dois métodos de caracterização superficial que podem informar quantitativamente sobre a rugosidade superficial. São eles:

- perfilômetros mecânicos e ópticos que tomam perfis ao longo de uma linha ou fazem mapas topográficos de uma área;
- métodos de espalhamento de luz que podem dar informação sobre as propriedades estatísticas da superfície tais como a rugosidade RMS ou espectro de potência, mas não a topografia da superfície.

O objetivo deste trabalho é observar a relação entre rugosidade superficial e refletividade de uma liga de alumínio torneada com ferramenta de diamante de ponta única. Esta refletividade é analisada em função da distribuição do espalhamento luminoso.

A avaliação da rugosidade superficial via distribuição do espalhamento luminoso visa o desenvolvimento de um método de monitoramento em tempo real de uma superfície óptica sendo usinada.

O desenvolvimento deste método faz-se necessário em função do altíssimo custo de usinagem de superfícies ópticas de ultraprecisão com ferramenta de diamante monocristalino. O monitoramento em tempo real da usinagem permitirá interromper e/ou corrigir uma usinagem que esteja gerando superfícies com rugosidade superficial fora da especificação.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A máquina-ferramenta utilizada nos ensaios foi um torno *Aspheric Surface Generator ASG 2500 Rank Pneumo*, equipamento que permite um avanço de 10 nm/rev. O material utilizado para produzir superfícies espelhadas foram ligas de alumínio na forma de tarugos cilíndricos com diâmetro e comprimento de 20 mm.

Após a usinagem foram avaliadas as rugosidades superficiais através de um perfilômetro mecânico *Form Talysurf* modelo 120L, de 4 nm de resolução, obtendo-se o perfil da

superfície usinada e os parâmetros característicos de rugosidade (R_a , R_q , R_t , $Delq$, solpe, R_v) de acordo com a norma NBR 6405/1988 (Carpinetti et al., 1996).

Uma fonte laser Opto He-Ne ($\lambda=630$ nm) foi utilizada como luz incidente, fixando-se o ângulo de incidência em aproximadamente 45° .

O espalhamento luminoso foi observado através de uma câmera CCD que contém uma série de fotodiodos de silício dispostos em matriz, da *Hitachi* modelo KP-M1 e software de tratamento da *Global Lab Image*.

Na Figura 1 pode-se observar a representação esquemática da instrumentação para análise do espalhamento luminoso, montada no Laboratório de Engenharia de Precisão (EESC/USP).

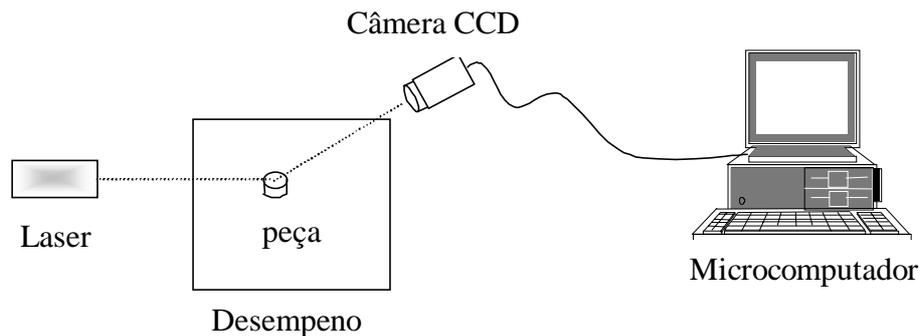


Figura 1. Representação esquemática da instrumentação para análise de espalhamento luminoso

Foram realizados dois ensaios. No primeiro ensaio, apenas condições de usinagem indicados para a geração de superfícies ópticas foram utilizadas. Especificamente, foram usinadas 16 peças avaliando dois materiais com características mecânicas distintas, principalmente quanto à resiliência (Al-2011 e Al-1050). As condições de usinagem utilizadas estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições de usinagem

rotação do eixo-árvore	avanço (a)	profundidade de corte (p)
1000rpm	5 μ m/rev. e 30 μ m/rev.	3 μ m e 30 μ m

Foram utilizadas duas ferramentas de diamante com suas respectivas características geométricas, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2. Características geométricas das ferramentas

	Raio de ponta (R_p)	ângulo de saída (γ)	ângulo de folga (α)
Ferramenta 1	0,76 mm	0°	0°
Ferramenta 2	1,52 mm	0°	0°

No segundo ensaio foram usinadas oito peças, sendo 4 da liga Al. 6061T6 e quatro de liga KOBE. As condições de usinagem permaneceram constantes, com rotação de 1000 rpm, avanço de 5 μ m/rev. e profundidade de corte de 10 μ m. Foram utilizadas três ferramentas diferentes para a usinagem de ultraprecisão: metal duro, diamante nacional e diamante importado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As diferenças no acabamento superficial neste experimento são resultantes das condições de usinagem, geometria da ferramenta e material da peça. Segundo a literatura, os fatores de usinagem que mais influenciam no acabamento superficial de uma peça são o avanço e o raio de ponta da ferramenta.

A Tabela 3 mostra os resultados quanto aos parâmetros de rugosidade: Ra, Rt, Rq, Rv, slope e Delq.

Tabela 3. Resultados obtidos segundo os parâmetros de rugosidade: Ra, Rt, Rq, Rv, slope e Delq.

Rp	Material	p (μm)	a ($\mu\text{m}/\text{rev.}$)	slope ($^{\circ}$)	Rq (μm)	Ra (μm)	Delq ($^{\circ}$)	Rv (μm)	Rt (μm)
0,76	Al-2011	3	5	0,0529	0,0280	0,0168	2,0414	0,2898	0,2905
			30	0,0559	0,0591	0,0489	1,2794	0,1226	0,4298
		30	5	0,0312	0,0184	0,0129	1,3772	0,2165	0,3229
			30	0,0266	0,0506	0,0413	1,5529	0,2378	0,4100
	Al-1050	3	5	0,1187	0,0269	0,0184	1,4856	0,1722	0,3367
			30	-0,0523	0,0560	0,0450	1,8634	0,3917	0,5678
		30	5	-0,0658	0,0251	0,0164	1,8205	0,1287	0,3144
			30	0,1347	0,0575	0,0465	1,8233	0,4055	0,5733
1,52	Al-2011	3	5	0,0562	0,0176	0,0128	1,0062	-	0,2751
			30	0,0547	0,0258	0,0195	1,3450	0,1071	0,2315
		30	5	-0,0846	0,0223	0,0161	1,2024	0,3067	0,3792
			30	0,1669	0,0293	0,0220	1,3234	0,0855	0,2116
	Al-1050	3	5	0,1407	0,0246	0,0165	1,0221	0,3951	0,4827
			30	0,0643	0,0327	0,0221	1,6063	0,4378	0,6040
		30	5	0,1363	0,0227	0,0170	1,7312	0,111	0,2144
			30	0,1250	0,0366	0,0242	1,8753	0,5401	0,6602

O ensaio de espalhamento realizado nas peças usinadas no primeiro ensaio de corte, apresentou saturação na intensidade da luz laser refletida, isto porque todas as peças apresentaram qualidades ópticas, como pode ser verificado nos valores, apresentados na Tabela 3, dos parâmetros de rugosidade.

Em relação ao segundo ensaio de corte, a Figura 2 mostra o espalhamento parcial em superfícies de alumínio de mesma liga usinadas através do processo de torneamento de ultraprecisão com três ferramentas distintas (diamante importado, diamante nacional e metal duro) e através do processo convencional de torneamento (rugoso). As intensidades luminosas foram coletadas através de uma câmera CCD diretamente do feixe refletido da peça, de acordo com as condições de usinagem pré-estabelecidas.

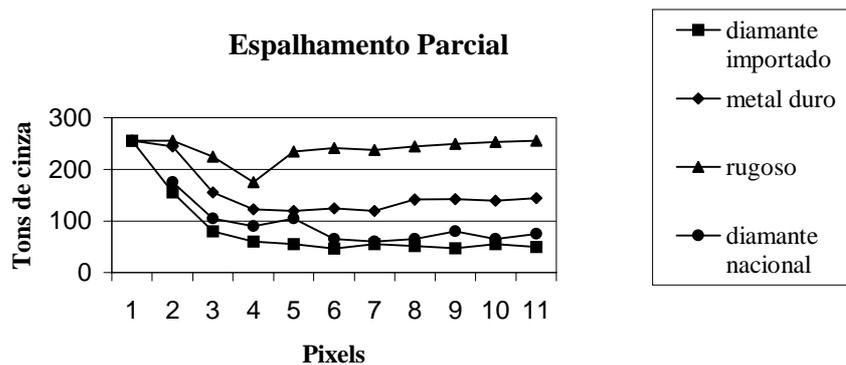


Figura 2. Espalhamento parcial em superfícies de alumínio

No torneamento de ultraprecisão obtém-se superfícies com qualidade óptica da ordem de 10nm (Ra). Pelos resultados obtidos observa-se que a qualidade superficial em termos de textura é bastante afetada pela integridade do gume de corte da ferramenta.

Os resultados de espalhamento luminoso indicam que superfícies de melhor acabamento espalham menos ou tem menos luz difusa. Isto é difícil de ser observado em superfícies usinadas através do processo de torneamento de ultraprecisão.

As superfícies analisadas foram medidas a partir de coordenadas (pixels) que mostram como a curva de intensidade diminui da região de reflexão especular para região de reflexão difusa.

Os resultados da Figura 2 comprovam que a integridade da ferramenta afeta a qualidade superficial e conseqüentemente o espalhamento luminoso. A superfície testemunha, isto é, usinada através do processo convencional de torneamento apresentou altas intensidades de energia espalhada (em torno de 255 grayscale). Esta intensidade diminui a medida que melhoram as qualidades superficiais.

4. CONCLUSÕES

No torneamento de ultraprecisão tem-se resultados próximos de espalhamento luminoso, onde pode ser observado a correlação entre a refletividade e a rugosidade superficial. Esse fato pode ser atribuído à qualidade superficial superior de suas peças.

Os ensaios mostraram que é possível o desenvolvimento de um método, onde a técnica de espalhamento de luz pode ser utilizada, através da calibração da escala de intensidade luminosa refletiva para com a rugosidade superficial, e conseqüente utilização, como indicados, em tempo real da rugosidade superficial de uma superfície óptica sendo usinada.

5. REFERÊNCIAS

- Bennett, J. M., 1992, "Recent developments in surface roughness characterization", Meas. Scie. Technol., Vol. 3, pp. 1119-1127.
- Carpinetti, L. C. R., Gonçalves Filho, E., Porto, A. J. V., Jasinevícius, R.G., 1996, "Rugosidade Superficial- Conceitos e Princípios de Medição", Apostila EESC-USP, 51p.
- Church, E. L. & Takacs, P. Z., 1985, "Survey of the finish characteristics of machined optical surfaces", Optical Engineering, Vol. 24, n. 3, pp. 396-403.
- Elson, J. M.; Bennett, H. E. & Bennett, J. M., 1979, "Scattering from optical surfaces", Applied Optical and Engineering, Vol. 7, pp. 191-244.