

DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO DE ESPELHOS ÓPTICOS EM METAIS NÃO FERROSOS

Fabiano dos Santos Correa

Universidade de São Paulo, EESC, Av. Trabalhador São Carlense CEP 13566-590, São Carlos, SP,
Brasil - fabianocorrea@eesc.usp.br

Renato Goulart Jasinevicius

Universidade de São Paulo, EESC, Av. Trabalhador São Carlense CEP 13566-590, São Carlos.

Jaime Gilberto Duduch

Universidade de São Paulo, EESC, Av. Trabalhador São Carlense CEP 13566-590, São Carlos.

***Resumo.** Peças produzidas através de usinagem com ferramenta de diamante devem apresentar superfícies com qualidades ópticas. No entanto, o desenvolvimento das etapas de processo de fabricação sofre diretamente o efeito de diversos fatores; a qualidade da matéria-prima (microestrutura, propriedades mecânicas, etc.), especificação da qualidade da superfície usinada e tolerâncias. O objetivo desse trabalho é apresentar aspectos que podem influenciar na qualidade de componentes de alumínio torneados com ferramentas de diamante. As ligas escolhidas foram: liga Al-Mg e Alumínio 7075-T6. A liga aeronáutica foi escolhida devido a suas propriedades mecânicas excepcionais. A comparação entre o tipo de microestrutura e o efeito sobre a qualidade da superfície usinada e sobre a formação do cavaco será analisado através de técnicas de microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). Resultados mostrando a influência das condições de usinagem sobre o acabamento de duas ligas de alumínio através do torneamento de face com ferramenta de diamante serão apresentados.*

***Palavras-chave:** usinagem de ultraprecisão, torneamento com diamante, fabricação de componentes ópticos.*

1. INTRODUÇÃO

As exigências de qualidade para componentes ópticos são dependentes do comprimento de onda em que o componente trabalha. Por exemplo, para luz infravermelha (IV) e luz visível, os desvios de forma e rugosidade superficial R_a devem ser menores que 0,3 micrômetros/0,05 micrômetros e menores que 0,03 micrômetros/0,005 micrômetros, respectivamente. Em função disso, a especificação de etapas na fabricação de componentes ópticos desde o tipo de material até as condições de usinagem tornam-se essenciais para obtenção de componentes dentro das especificações exigidas. Assim, os materiais devem ser escolhidos de forma a oferecer uma usinabilidade aceitável com um nível de acabamento da superfície usinada de ordem nanométrica. Dentre os materiais típicos que podem ser usinados; o alumínio e o cobre estão entre os mais comumente utilizados em usinagem de ultraprecisão. O diamante, usado no processo da usinagem de ultraprecisão, por ser um material que possui uma elevada dureza, pode ser afiado alcançando um nível de acabamento excelente para sua aresta de corte, sem perder suas propriedades mecânicas. Em função dessa propriedade é possível a obtenção de acabamentos superficiais espelhados ⁽¹⁾.

O objetivo desse trabalho é apresentar aspectos que podem influenciar na qualidade de componentes de alumínio torneados com ferramentas de diamante. A comparação entre o tipo de microestrutura e o efeito sobre a qualidade da superfície usinada e sobre a formação do cavaco será

analisado através de técnicas de microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). Resultados mostrando a influência das condições de usinagem sobre o acabamento de duas ligas de alumínio através do torneamento de face com ferramenta de diamante serão apresentados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As ligas de alumínio escolhidas para esse estudo foram Al-Mg (Kobe) com microdureza *Vickers* nominal $Hv_{100g} = 68 \text{ kgf/mm}^2$ e Alumínio 7075-T6 $Hv_{100g} = 195 \text{ kgf/mm}^2$. Os ensaios foram feitos com o uso de fluido de corte sintético aplicado em forma de névoa (aproximadamente 100 ml/hora), esse fluido, é lançado através de um bico vaporizador direcionado para o ponto de contato entre ferramenta/peça. A máquina ferramenta utilizada nos ensaios foi um “Aspheric Surface Generator” ASG 2500 Rank Pneumo. Esta máquina possui uma base de ferro fundido termicamente livre de tensões, sendo isolada de vibrações externas através de isoladores passivos a ar montados cinematicamente numa estrutura de aço. O eixo árvore é sustentado por mancais aerostáticos de escora que conferem alta rigidez axial. Um CNC Allen-Bradley 8200 é utilizado para controlar o deslocamento e a posição dos eixos simultaneamente. A posição dos eixos é monitorada por transdutores interferométricos a laser. A resolução da máquina é de 10 nanômetros.

Os cavacos foram analisados através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para observar se houve influência do estado metalúrgico do material. As superfícies usinadas foram analisadas através de microscopia óptica com contraste de interferência Nomarski visando obter informações relativas à reprodução do perfil da ferramenta na peça. A geometria da ferramenta e as condições de usinagem são descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições de corte e Geometria da ferramenta usada nos ensaios

Condições de corte e geometria da ferramenta	Valores
Velocidade de avanço ($\mu\text{m}/\text{rev}$)	5, 10, 15 e 30
Profundidade de corte (μm)	10
Rotação do eixo árvore (rpm)	1000
Raio de ponta (mm)	1,514
Ângulo de saída γ ($^\circ$)	0
Ângulo de folga α ($^\circ$)	12

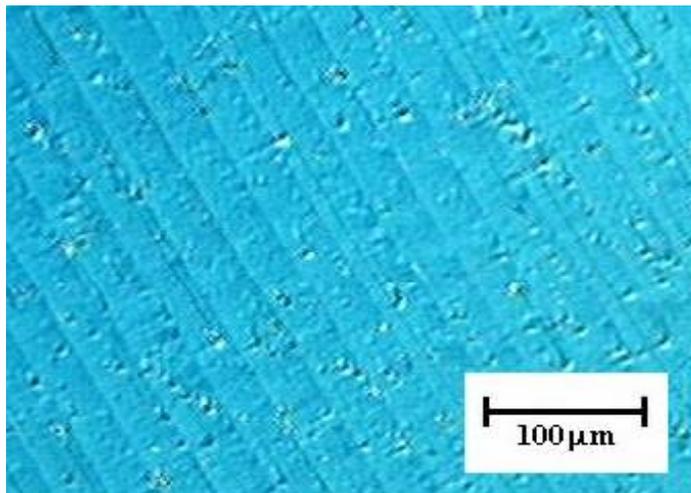
Para a avaliação do acabamento da superfície usinada utilizou-se de um rugosímetro modelo Form Talysurf Intra, da TAYLOR HOBSON PRECISION[®]. O *cut-off* de 0.08 foi escolhido para a avaliação do acabamento da superfície usinada e os parâmetros de saída foram *rugosidade máxima* R_t e *rugosidade aritmética média* R_a . O R_t foi usado com objetivo de se obter informações relativas a diferenças que possivelmente ocorrem em função da diferença nas propriedades mecânicas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

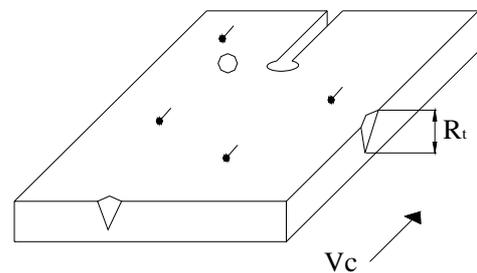
A Figura 1 mostra a imagem feita através de microscopia óptica da superfície gerada com Al 7075-T6. A figura 1a mostra uma imagem da superfície de usinada com avanço de 30 $\mu\text{m}/\text{rev}$ e de profundidade 10 μm em que pode ser observada a presença de inclusões duras na matriz. Estas inclusões são removidas durante a passagem da ferramenta assim como arrastadas sobre a superfície como mostrado esquematicamente na Figura 1b. Essas inclusões tendem a prejudicar o acabamento da superfície usinada, pois esses “riscos” são pontos que provocam a difração da luz podendo causar um efeito arco-íris na superfície⁽²⁾.

A forma encontrada para minimizar a influência dessas inclusões duras sobre o acabamento é através da geometria da ferramenta apresentando ângulos de saída mais negativos os quais removem estas inclusões da matriz ao invés de arrastá-las da superfície o que pode provocar o “riscamento”⁽²⁾.

A Figura 2 apresenta uma imagem da superfície da liga Al-Mg usinada sob as mesmas condições de avanço e profundidade. A observação mais cuidadosa da superfície mostra que houve uma fidelidade na reprodução do perfil da aresta de corte na superfície. Outro aspecto importante é que não se observa a presença de inclusões. No entanto, a imagem mostra que há pequenas variações nas alturas dos grãos, como mostrado esquematicamente na Figura 2b. Esse aspecto já foi tratado anteriormente por Jasinevicius et al ⁽³⁾. Isso ocorre devido a anisotropia em materiais policristalinos. Esse efeito não é tão evidente aqui, pois a profundidade de usinagem foi de 10 μm . Esse efeito também deve ser minimizado sempre que possível, para que o acabamento não prejudique o desempenho do espelho. A forma encontrada para minimizá-lo é diminuir a diferença no grau de deformação e ruptura (fratura) entre os grãos do material, essa diminuição se faz com uso de ferramentas com raio de ponta grande.

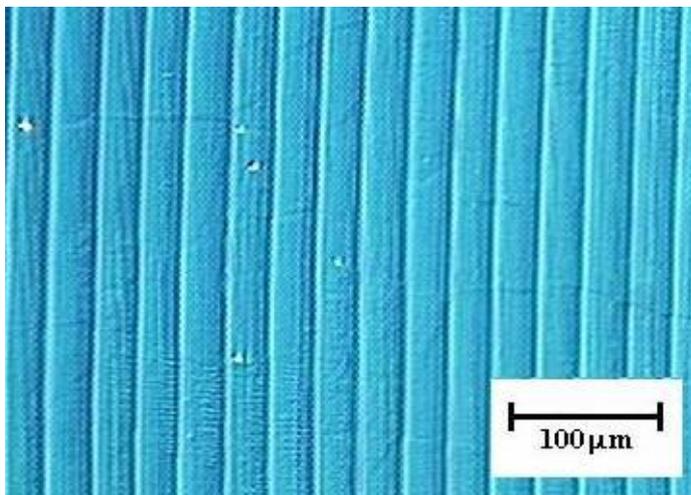


(a)

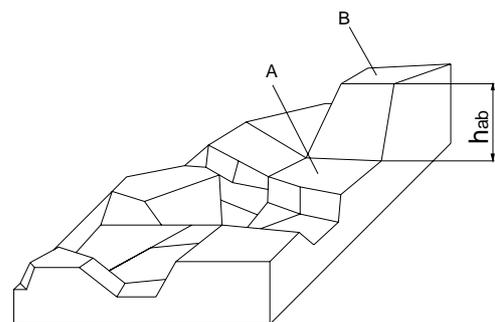


(b)

Figura 1. Imagem da superfície da liga Al 7075-T6; (a) micrografia da peça desbastada aumento de 100x; (b) figura esquematizando as impurezas, contrações e inclusões



(a)



(b)

Figura 2. Imagem da superfície da liga Al-Mg; (a) micrografia da peça desbastada aumento 100x; (b) esquema das estruturas com grãos recuados de materiais policristalinos

As Figuras 3a e 3b mostram gráficos com valores da rugosidade superficial. A Figura 3a apresenta uma comparação dos valores de rugosidade pico a vale (R_t) das duas amostras de alumínio usinadas além do R_t teórico. Pode-se observar que a rugosidade R_t é sempre menor para amostra de 7075-T6. Essa diferença deve-se ao fato que a liga 7075-T6 apresenta dureza maior, e, portanto, uma recuperação elástica maior após a passagem da ferramenta o que gera “ranhuras” menos profundas. A Figura 3b mostra os resultados de rugosidade superficial R_a . Da mesma forma

os valores de Ra são maiores para a liga Al-Mg. Porém deve-se ressaltar que as diferenças nesse caso não são muito grandes.

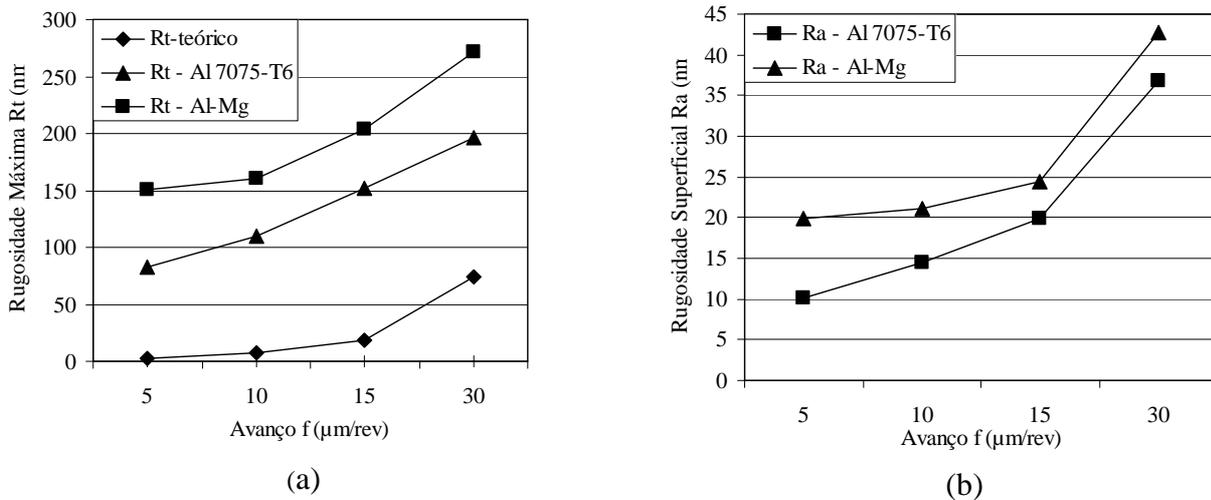


Figura 3. Comparação do Rt e Ra das ligas trabalhadas; (a) gráfico de Rt das ligas e o Rt teórico; (b) gráfico de comparação dos Ra das ligas usinadas

A análise dos cavacos consistiu em observar as diferenças na sua morfologia e topografia ⁽⁴⁾. A figura 4 mostra as micrografias feitas através de microscopia eletrônica de varredura dos cavacos removidos das peças usinadas sob as mesmas condições de corte anteriormente mencionada. Na figura 4a pode-se observar que a presença das inclusões duras deixou marcas no cavaco (pequenos furos mostrados pelas setas) e na figura 4b a presença da variação nas alturas dos grãos.

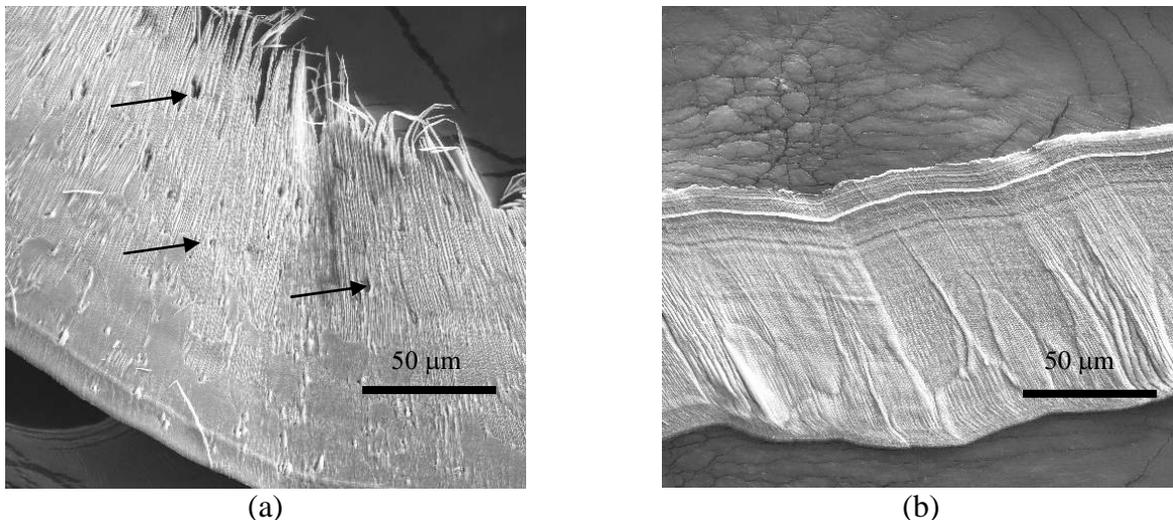


Figura 4. Imagem da parte inferior dos cavacos analisados no MEV; (a) imagem com aumento de 430x do cavaco da liga Al 7075; (b) imagem com aumento de 430x do cavaco da liga Al-Mg

3.1. Fabricação de componentes ópticos

Com base nos resultados obtidos optou-se pela seleção da Liga Al-Mg para fabricação de superfícies com acabamento óptico devido a melhor qualidade demonstrada na avaliação da superfície em termos da fidelidade de reprodução do perfil da aresta de corte e a ausência de inclusões na superfície. Além disso, os valores de rugosidade Ra não foram muito diferentes para ambas as ligas. A partir desses resultados, peças foram usinadas num torno de ultraprecisão e em um torno de precisão (ambos CNC) e os valores de desvio de forma avaliados para as três formas. A seqüência de fabricação adotada para esses componentes está descrita na Figura 5 ⁽⁵⁾.

Foram usinados três tipos de espelhos; cilíndrico, cônico e esférico. Os desvios de circularidade/cilindricidade para os espelhos cilíndricos e cônicos foram de $0,04 \mu\text{m}$ / $0,10 \mu\text{m}$, respectivamente. A Figura 6 mostra o espelho esférico (côncavo e convexo), cilíndrico além do cônico. Os resultados foram comparados e a diferença foi justificada baseando-se em aspectos construtivos das máquinas usadas no processo.

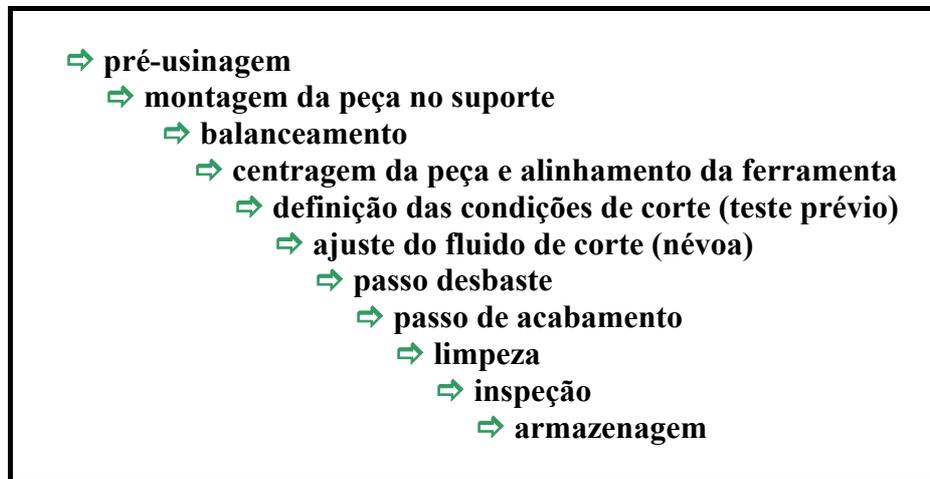


Figura 5. Sequência do processo de usinagem adotada

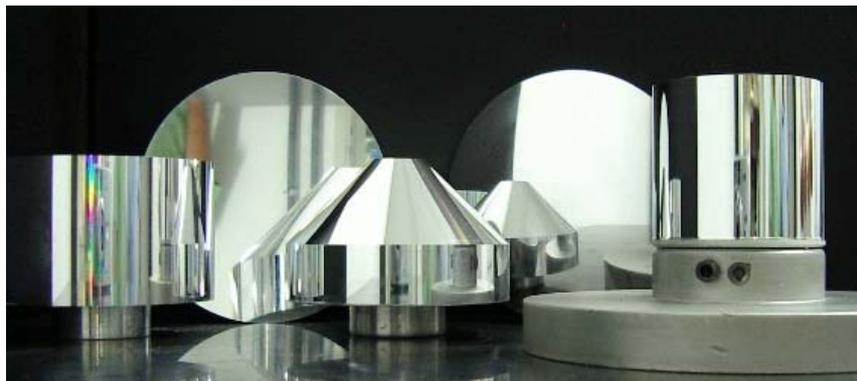


Figura 6. Imagem ilustrativa das peças usinadas com ferramenta de diamante: espelhos esféricos (côncavo e convexo), cônico e cilíndrico

4. CONCLUSÕES

O efeito da microestrutura do material sobre o mecanismo de corte e a melhoria da qualidade da superfície usinada dos componentes foram discutidos. Por causa das dimensões reduzidas de corte, a microestrutura tem papel importante no desempenho do processo de remoção de material e na obtenção de superfícies usinadas com qualidade óptica. Isto se coloca, pois os danos são irreversíveis e podem danificar não somente a qualidade da peça como a afiação da ferramenta. A observação dos cavacos removidos pelo corte pode oferecer informações interessantes e complementares sobre a interação ferramenta/material. A rugosidade superficial das peças foi influenciada por fatores relacionados ao material (contorno de grão, resposta elástica dos grãos, inclusões, propriedades mecânicas, etc.). Estes efeitos podem ser atenuados através do uso de ferramentas com geometria diferente ou condições de corte mais finas. Deve-se, no entanto, ressaltar que, o processo de torneamento com ferramenta de diamante para fabricação de componentes ópticos, comparativamente, é mais rápido que os processos convencionais. Uma das características mais importantes do torneamento é a possibilidade de se fabricar formas anesféricas (espelhos e/ou lentes parabólicos, elípticos, etc). A aplicação de componentes usinados com ferramentas de diamante tem encontrado um mercado em expansão na área de sistemas Mecaoptoeletrônicos.

5. AGRADECIMENTOS

O aluno Fabiano S. Correa agradece a CNPq pelo apoio financeiro, a **Taylor Hobson do Brasil** pelas medidas de rugosidade superficial.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. JASINEVICIUS, R. G.; PORTO, A. J. V.; DUDUCH, J. G. “Influência das Condições de Usinagem no Torneamento de Ultraprecisão de uma Liga de Alumínio com Ferramenta de Diamante”. *XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica e II Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica*. - Universidade Federal de Belo Horizonte - Belo Horizonte - MG, 12 a 15 de dezembro de 1995.
2. OHMORI, G.; TAKADA, S. “Primary Factors Affecting Accuracy in Ultraprecision Machining by Diamond Tool”. *Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.*, Vol. 16(1): 3-7, March 1982.
3. JASINEVICIUS, R.G.; PORTO A. J. V.; DUDUCH, J. G.; PURQUERIO, B.M. “Critical Aspects on the Behaviour of Material from the Mechanical Tool-Workpiece Interaction in Single Point Diamond Turning”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science*. Vol.21 (3): 509-518, 1999.
4. JASINEVICIUS, R. G.; CAMPOS, G. P.; MONTANARI, L.; TSUKAMOTO, R.; GARCIA, J. P.; DUDUCH, J.G.; PORTO, A. J. V. “Influence of Mechanical and Metallurgical State of An Al-Mg Alloy on the Surface Integrity in Ultraprecision Machining” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science* Vol.25 (3): 222-228, 2003.
5. BRINKSMEIER, E.; RIEMER, O.; SCHMUTZ, J. “Ultraprecision Manufacturing Processes”. Tutorial at the 1st euspen **Topical Conference on Fabrication and Metrology in Nanotechnology**. Copenhagen May 28th, 2000.

DEVELOPMENT OF THE PROCESS IN ULTRAPRECISION MACHINING OF OPTIC MIRROR METALS NOT FERROUS

Fabiano dos Santos Correa

Universidade de São Paulo, EESC, Av. Trabalhador São Carlense CEP 13566-590, São Carlos, SP, Brasil - fabianocorrea@eesc.usp.br

Renato Goulart Jasinevicius

Universidade de São Paulo, EESC, Av. Trabalhador São Carlense CEP 13566-590, São Carlos.

Jaime Gilberto Duduch

Universidade de São Paulo, EESC, Av. Trabalhador São Carlense CEP 13566-590, São Carlos.

Abstract. *The fabrication of components by means of single-point diamond turning requires surface finish with optical quality and very tight form tolerances. However, the development of fabrication sequence may be affected by unexpected factors such as: the metallurgical quality of the raw material (microstructure, mechanical properties, etc.), quality specifications for surface finish and form accuracy. The objective of this work is to present some aspects that can influence in the quality and performance of single point diamond turned optical surfaces. Two different aluminum alloys were chosen: Al-Mg and 7075-T6. The 7075 alloy was chosen due to the exceptional mechanical properties. The surface finish was evaluated, both qualitative and quantitatively by means of optical microscopy and contact profilometer. The effect of mechanical property and different in microstructure were taken into consideration in order to select the best material to use in the fabrication of the components. The optical components were machined under the cutting conditions previously selected and form accuracy measurements were carried out.*

Keywords: *ultraprecision machining, diamond turning, manufacturing of optical components.*