

INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO POLI(METIL-METACRILATO) (PMMA) EM TORNEAMENTO DE ULTRAPRECISÃO

Igor Basso

Marcel Henrique Militão Dib

José Antonio Otoboni

Alessandro Roger Rodrigues

Renato Goulart Jasinevicius

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Avenida Trabalhador São-Carlense 400, São Carlos, 13566-590, Brasil

igorbasso@usp.br, marcel_tecn@sc.usp.br, brancojao@gmail.com, roger@sc.usp.br, renatogj@sc.usp.br

Resumo. Este artigo se propôs a avaliar a integridade de superfícies geradas por faceamento de poli(metil-metacrilato) com ferramenta de diamante monocristalino. Os experimentos foram realizados no torno de ultraprecisão Rank Pneumo ASG 2500 variando o avanço (5, 15 e 25 $\mu\text{m}/\text{rev}$) e ângulo de saída da ferramenta (-5, 0 e +5°). A integridade superficial foi analisada de forma quantitativa baseado em quatro parâmetros de rugosidade de área: rugosidade média (S_a), rugosidade máxima (S_z), Skewness (S_{sk}) e Kurtosis (S_{ku}). A melhor qualidade superficial foi obtida com avanço de 5 $\mu\text{m}/\text{rev}$ e ângulo de saída +5°. Nesta condição, S_a e S_z mantiveram-se baixas, S_{sk} foi próximo a zero e S_{ku} foi menor que 3. Isto implica numa superfície pouco rugosa, com simetria na altura de picos e vales, e picos e vales tendendo a suavidade.

Palavras chave: Integridade superficial. Ferramenta de diamante. PMMA. Torneamento de ultraprecisão.

1. INTRODUÇÃO

Poli(metil-metacrilato) (PMMA) é um polímero termoplástico amorfo amplamente utilizado em aplicações ópticas, devido a suas excelentes propriedades tais como índice de refração, resistência química, mecânica e à luz ultravioleta (UV) (Ali, *et al.*, 2015; Kogler, 1999). Geralmente, lentes de PMMA são obtidas por técnicas de replicação (Kang, 2004), contudo, o torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante monocristalino apresenta-se como uma alternativa vantajosa na produção de pequenos lotes e processo de desenvolvimento de lentes. Esse processo é uma técnica amplamente utilizada na fabricação de peças em materiais metálicos não-ferrosos e algumas cerâmicas no qual um alto grau de acabamento são exigidos. Desta forma, é possível que elementos de PMMA gerados pelo torneamento de ultraprecisão apresentem características obtidas por replicação.

Kobayashi e Hirakawa (1984) foram pioneiros na usinagem de polímeros com ferramentas de diamante. Os autores demonstraram que, quando considerado a replicação do perfil da ferramenta e rugosidade, o PMMA é o polímero que possibilita a melhor qualidade superficial para fins ópticos. Carr e Feger (1993) demonstraram que propriedades dos polímeros como temperatura de transição vítrea, grau de ligações cruzadas, tempo de relaxação e viscosidade alteram o modo de remoção de material no processo de usinagem de ultraprecisão. Segundo os autores, quando a usinagem apresenta superfície irregular a remoção ocorre de forma frágil e, quando a superfície é lisa e livre de irregularidades, o corte ocorre de forma dúctil. O corte no regime dúctil é desejado para que se possam obter superfícies com qualidade óptica, assim, é possível alterar os parâmetros de corte de tal forma para que o corte ocorra dentro do regime dúctil (Carr e Feger, 1993). Granado (2006) apresentou as características de superfícies geradas em PMMA com ponta única de diamante através da análise de imagens, rugosidade e transmitância. Contudo, superfícies para fins ópticos exigem uma qualidade superficial de ordem submicrométrica, assim, a avaliação qualitativa dos parâmetros de interesse (rugosidade, transmitância, etc.) deve ser criteriosa. Os trabalhos citados acima fazem uso apenas dos parâmetros de rugosidade mais comuns (rugosidade média e máxima), com o intuito de contribuir com uma análise mais ampla, por meio de técnicas mais avançadas, que descrevem melhor a superfície, este artigo apresenta uma análise da integridade superficial do PMMA em torneamento de ultraprecisão com ferramenta diamante monocristalino, utilizando a medição de rugosidade de área: rugosidade média (S_a), rugosidade máxima (S_z), Skewness (S_{sk}) e Kurtosis (S_{ku}). Para tal avaliação foram analisados, de forma conjunta, parâmetros de rugosidade e análises qualitativas das superfícies. Com base nos parâmetros de rugosidade encontrados em cada combinação dos parâmetros de corte foi possível determinar a condições mais apropriadas para aplicações ópticas do PMMA.

2. METODOLOGIA

Este artigo é baseado em experimentos de torneamento de faceamento, com ferramenta de ponta única de diamante monocristalino, de poli(metil-metacrilato) (PMMA). Os ensaios foram realizados no torno de ultraprecisão *Rank Pneumo* ASG 2500. Esta máquina possui isolamento pneumático, os mancais dos eixos Z e X são hidrostáticos, e os mancais do eixo árvore são aerostáticos. É equipado com o comando numérico *Allen-Bradley* CNC 8200. A posição dos eixos é medida através de interferômetros a laser, com retroalimentação do controlador, o que garante a resolução de movimento de 10 nm. A ferramenta com um inserto de diamante da fabricante *Contour Fine Tooling* código SA02250 foi utilizada para realizar os ensaios. Esta ferramenta possui 0,774 mm de raio de ponta, ângulo de saída (γ) igual a 0° , ângulo de folga de $12,5^\circ$. Os ensaios realizados foram torneamento de faceamento com avanço da extremidade para o centro da peça. Não foi usado fluido refrigerante.

Realizou-se planejamento experimental fatorial completo com duas variáveis e três níveis, do tipo 3^k , conforme apresentado na Tab. 1. Os parâmetros de análise foram o avanço (f) e o ângulo de saída da ferramenta (γ). Como os experimentos foram realizados com uma única ferramenta, foi construído um dispositivo para possibilitar a alteração do ângulo de saída da ferramenta, maiores detalhes estão disponibilizados em Militão Dib (2018). A rotação (n) e a profundidade de corte (a_p) foram mantidas constantes em 1000 rpm e 50 μm , respectivamente. A análise estatística foi realizada considerando nível de significância (α) de 5% e intervalo de confiança (IC) de 95% para todas as variáveis.

Tabela 1. Planejamento experimental e valor médio das respostas de rugosidade.

Ensaio	Variáveis		Respostas			
	f ($\mu\text{m}/\text{rev}$)	γ ($^\circ$)	Sa (nm)	Sz (μm)	Ssk	Sku
1	5 (-1)	-5 (-1)	30,4	0,772	-0,03	4,15
2	15 (0)	-5 (-1)	47,2	1,612	0,25	6,38
3	25 (+1)	-5 (-1)	46,0	1,292	0,40	6,15
4	5 (-1)	0 (0)	32,6	0,337	-0,16	2,84
5	15 (0)	0 (0)	72,2	0,754	0,25	2,19
6	25 (+1)	0 (0)	43,6	0,769	0,10	2,53
7	5 (-1)	+5 (+1)	29,0	0,350	-0,03	2,66
8	15 (0)	+5 (+1)	93,8	0,989	0,00	2,12
9	25 (+1)	+5 (+1)	78,2	1,394	0,33	4,49

A integridade superficial foi analisada de forma qualitativa através de imagens de microscópio óptico e quantitativamente através de parâmetros de rugosidade de área. As imagens foram realizadas no microscópio confocal 3D *Olympus* OLS4100. Os parâmetros de rugosidade analisados foram rugosidade média (Sa), rugosidade máxima (Sz), *Skewness* (Ssk) e *Kurtosis* (Sku). Os parâmetros de rugosidade Sa e Sz foram comparados a valores teóricos, calculados através das Eq. (1) e (2):

$$Sa = 0,032 \frac{f^2}{Rp} \quad (1)$$

$$Sz = 0,125 \frac{f^2}{Rp} \quad (2)$$

onde f é o avanço e Rp o raio de ponta da ferramenta (Porto, *et al.*, 2004; Machado, *et al.*, 2009).

Skewness (Ssk) e *Kurtosis* são parâmetros adimensionais, sendo que, o Ssk indica a simetria de alturas de picos e vales da superfície de análise tendo 0 como referência. Valores negativos de Ssk indicam a predominância de vales profundos, e valores positivos de Ssk indicam a predominância de altos picos. Já o Sku indica o quão agudos são os picos, em relação a uma distribuição normal. Seu valor de referência é 3, para $Sku > 3$ os picos e vales são predominantemente agudos enquanto para $Sku < 3$ os picos e vales são mais suaves tendendo a uma superfície do tipo platô (Gadelmawla, *et al.*, 2002). Para realização das análises, cada combinação de parâmetros recebeu cinco medições em regiões distintas escolhidas aleatoriamente na superfície usinada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresentam os resultados médios de Sa, Sz, Ssk e Sku utilizados para a realização das análises estatísticas. A Tabela 2 apresenta o resultado da análise estatística, os fatores estatisticamente significativos, com nível de significância de 5%, apresentam-se destacados. A Figura 1 apresenta de forma gráfica a influência dos fatores investigados nas respostas analisadas.

De acordo com a Tab. 2 e com as Fig. 1a e 1b, a rugosidade média (Sa) e a rugosidade máxima (Sz) são estatisticamente influenciados pelo avanço de forma quadrática e linear, respectivamente. Ambos parâmetros tendem a aumentar com o aumento do avanço. O efeito do avanço provoca um aumento médio de 27,76 nm em Sa 0,665 μm em Sz, quando o nível é alterado de -1 (5) +1 (25). Este comportamento é previsto pela rugosidade teórica (Porto, *et al.*, 2004; Machado, *et al.*,

2009). S_a e S_z medidos foram maiores que os valores teóricos em todas as condições. O aumento do avanço, mantendo-se o raio de ponto constante, acarreta num maior distanciamento dos sulcos (ou marcas de avanço) deixados pela ferramenta e consequentemente numa maior altura de crista. Desta forma, tanto S_a quanto S_z tendem a crescer. As diferenças entre os valores teóricos e experimentais de rugosidade S_a e S_z são atribuídas ao comportamento mecânico do material, como por exemplo a recuperação elástica do material. O modelo utilizado para calcular estes parâmetros de rugosidade considera apenas parâmetros geométricos, desprezando qualquer efeito do material. A rugosidade máxima (S_z) ainda é estatisticamente influenciada de forma quadrática pelo ângulo de saída. Em média, S_z diminui $-0,447 \mu\text{m}$, quando se altera o nível desta variável de -1 para $+1$.

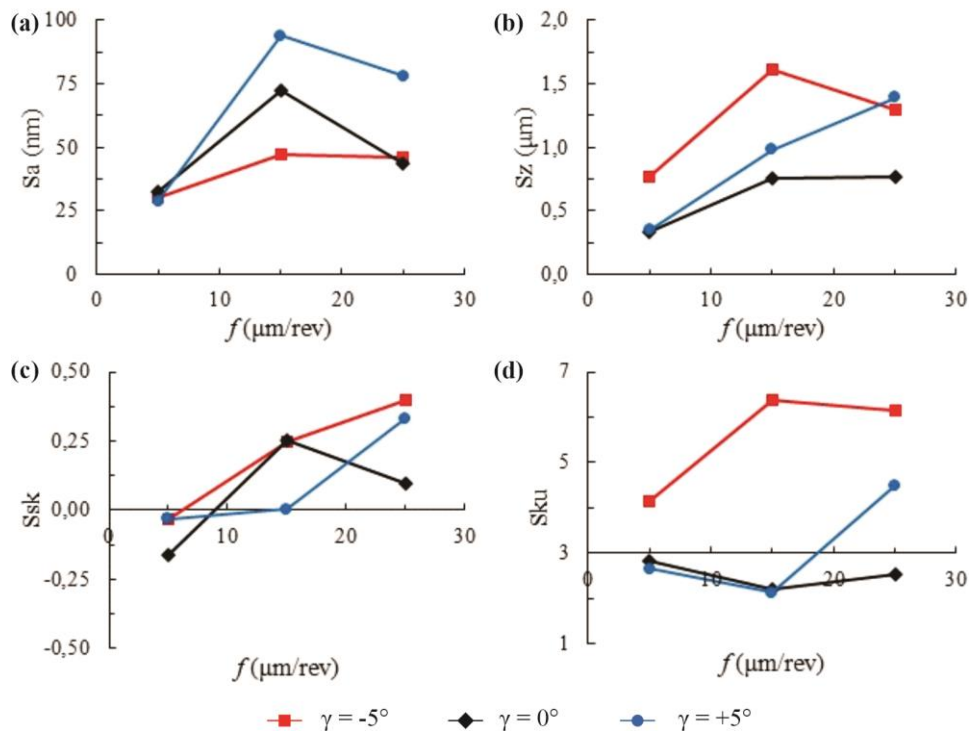


Figura 1. Influência das variáveis sobre S_a , S_z , S_{sk} e S_{ku} .

Os resultados apresentados na Tab. 2 demonstram que o S_{sk} foi significativamente influenciado apenas pelo avanço, de maneira linear. O efeito do avanço é aumentar, em média, $0,35$ do S_{sk} quando se altera o avanço do nível -1 (5) para o $+1$ (25). Este comportamento é apresentado graficamente na Fig. 1c que mostra que, de forma geral, o S_{sk} cresce com o avanço. A Figura 1c indica que para avanços menores S_{sk} tende a apresentar valores próximos a 0 , com exceção do experimento realizado com ângulo de saída neutro (0°), enquanto o aumento do avanço apresenta um aumento de S_{sk} . Isto indica que, para este raio de ponta da ferramenta, os menores avanços tendem a formar uma superfície mais uniforme em relação a alturas de picos e profundidades de vales. Já o S_{ku} é significativamente influenciado apenas pelo ângulo de saída, de maneira linear. Segundo a Tab. 2 o efeito provocado por esta variável é a diminuição do S_{ku} em média $2,47$ quando se altera o ângulo de saída do nível -1 (-5) para o nível $+1$ ($+5$). Ainda, a Fig. 1d mostra que o ângulo de saída neutro apresenta S_{ku} mais próximo ao valor de referência para todos os níveis de avanço.

A partir da apresentação dos resultados acima é possível realizar algumas correlações entre a qualidade da superfície e as condições de usinagem. De forma geral, para aplicações ópticas é desejável que a superfície seja mais lisa quanto possível. Dentro deste contexto, esta condição foi alcançada utilizando avanço de $5 \mu\text{m/rev}$ e ângulos de saída $+5^\circ$ ou 0° . Nestas condições de corte, tanto a rugosidade média (S_a) quanto a rugosidade máxima (S_z) alcançaram os menores valores medidos. Utilizando este nível de avanço com ângulo de saída negativo, o valor de S_z obtido é maior que os demais ângulos testados, inviabilizando assim esta combinação de parâmetros para aplicações ópticas. Considerando apenas as rugosidades S_a e S_z , avanços de 15 e $25 \mu\text{m/rev}$ combinados com ângulos de saída 0° e -5° apresentaram os valores menos satisfatórios.

Para aplicações ópticas é desejável que o *Skewness* seja o mais próximo de zero possível, o que significa que a superfície deve ser simétrica em relação a linha média. A condição que mais se aproxima deste valor foi a usinagem com avanço de $5 \mu\text{m/rev}$ com ângulo de saída positivo. Já com relação ao *Kurtosis*, é desejável que apresente valores menores que 3 , desta forma os picos e vales suaves tendendo a uma superfície platô. Esta situação também é obtida com a condição mencionada acima (avanço $5 \mu\text{m/rev}$ e ângulo de saída $+5^\circ$).

Tabela 2. Análise de significância para Sa, Sz, Ssk e Sku.

Fatores	Efeitos	Erro Padrão	t	p	IC -95%	IC +95%
Sa						
Média	52,5556	4,7125	11,1523	0,0004	39,4715	65,6396
(1) γ (L)	25,8000	11,5433	2,2351	0,0891	-6,2493	57,8493
γ (Q)	-4,6333	9,9968	-0,4635	0,6671	-32,3888	23,1222
(2) f (L)	25,2667	11,5433	2,1889	0,0938	-6,7826	57,3160
f (Q)	27,7667	9,9968	2,7776	0,0499	0,0112	55,5222
Sz						
Média	0,9180	0,0732	12,5498	0,0002	0,7149	1,1211
(1) γ (L)	-0,3167	0,1792	-1,7673	0,1519	-0,8142	0,1808
γ (Q)	-0,4467	0,1552	-2,8784	0,0451	-0,8775	-0,0158
(2) f (L)	0,6655	0,1792	3,7142	0,0206	0,1680	1,1630
f (Q)	0,2970	0,1552	1,9141	0,1281	-0,1338	0,7279
Ssk						
Média	0,1228	0,0441	2,7845	0,0496	0,0004	0,2452
(1) γ (L)	-0,1018	0,1080	-0,9427	0,3992	-0,4016	0,1980
γ (Q)	-0,0890	0,0935	-0,9520	0,3950	-0,3487	0,1706
(2) f (L)	0,3507	0,1080	3,2479	0,0314	0,0509	0,6506
f (Q)	0,0684	0,0935	0,7310	0,5053	-0,1913	0,3280
Sku						
Média	3,7228	0,3382	11,0073	0,0004	2,7838	4,6619
(1) γ (L)	-2,4745	0,8285	-2,9869	0,0405	-4,7747	-0,1744
γ (Q)	-1,8075	0,7175	-2,5192	0,0654	-3,7995	0,1845
(2) f (L)	1,1727	0,8285	1,4156	0,2298	-1,1274	3,4729
f (Q)	-0,2404	0,7175	-0,3350	0,7544	-2,2324	1,7516

A Figura 2 apresenta imagens de microscópio óptico da superfície usinada em duas condições diferentes e imagens de microscópio eletrônico de varredura de seus respectivos cavacos. A superfície apresentada na Fig. 2a foi obtida com a condição de melhor qualidade óptica, conforme discutido acima. Nesta condição é bastante difícil identificar as marcas de avanço da ferramenta, além disso, a aparência da superfície é lisa pois foi formada no regime dúctil de usinagem. A análise do seu cavaco confirma que nesta condição o corte ocorreu no regime dúctil, a aparência lisa do cavaco indica que o corte se deu por cisalhamento. Já a imagem apresentada na Fig. 2b é de uma superfície considerada como uma das piores qualidades obtidas. Nesta condição a superfície apresenta algumas marcas fraturadas, pois provavelmente devido ao grande avanço, o corte se deu num regime de transição entre o frágil-dúctil.

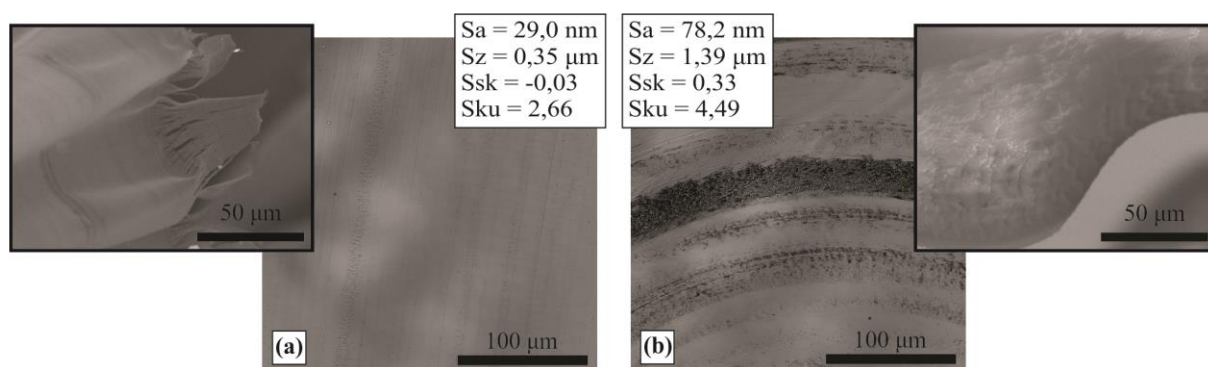


Figura 2. Imagens de microscópio óptico das superfícies (a) $f = 5 \mu\text{m/rev}$ e $\gamma = +5^\circ$; e (b) $f = 25 \mu\text{m/rev}$ e $\gamma = +5^\circ$.

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma análise da qualidade de superfícies geradas por faceamento em torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante monocristalino em amostras de PMMA. Os experimentos foram realizados com um planejamento fatorial completo com 2 fatores (avanço e ângulo de saída) e 3 níveis. As variáveis respostas analisadas foram quatro parâmetros de rugosidade (Sa, Sz, Ssk, Sku). A melhor qualidade superficial foi alcançada usando avanço de 5 $\mu\text{m/rev}$ e ângulo de saída positivo de 5°. Nesta condição a rugosidade foi a menor dentre todas as outras condições (Sa = 29 nm e Sz = 0,35 μm). A superfície obtida nesta condição apresenta altura de picos e vales simétricos

com relação à linha média ($S_{sk} = -0,03 \approx 0$). A superfície apresenta um $S_{ku} = 2,66$ o que denota boa suavização da ondulação dos picos e vales, ou seja, a topografia obtida não apresenta picos extremos.

6. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

7. REFERÊNCIAS

- Ali, U., Karim, K.J.B.A., Buang, N.A., 2015. "A Review of the Properties and Applications of Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA)". *Polymer Reviews*, V. 55, p. 678-705
- Carr, J.W., Feger, C., 1993. "Ultraprecision Machining of Polymers". *Precision Engineering*, V. 15, p. 221-237.
- Gadellmawla, E.S., Koura, M.M., Maksoud, T.M.A., Elewa, I.M., Soliman, H.H., 2002. "Roughness Parameters". *Journal of Materials Processing Technology*, V. 123, p. 133-145
- Granado, R.M., 2006. *Avaliação da Integridade Superficial do Polimetilmetacrilato (PMMA) no Torneamento com Ferramenta de Diamante*. 114 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
- Kang, S., 2004. "Replication Technology for Micro/Nano Optical Components". *Japanese Journal of Applied Physics*, V. 43, p. 5706-5716
- Kobayashi, A., Hirakawa, K., 1984. "Ultraprecision Machining of Plastics. Part 1. Polymethyl Methacrylate". *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, V. 22, p. 15-25
- Kogler, K., 1999. "Selection of Plastics for Optical Applications". *Amptiac*, V. 3, p. 1-4
- Porto, A.J.V., Silva, H.A.T., Duduch, J.G., Rúbio, J.C.C., Jasinevicius, R.G., Almeida, R.M., Schroeter, R.B., 2004. *Usinagem de Ultraprecisão*. RiMA-FAPESP, São Carlos
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T., Silva, M.B., 2009. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Blucher, São Paulo
- Militão Dib, M.H., 2018. *Micro e NanoUsinagem dos Materiais Frágeis*. 137 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Single-Point Diamond Machining of Poly(Methyl-Methacrylate) (PMMA)

Igor Basso

Marcel Henrique Militão Dib

José Antonio Otoboni

Alessandro Roger Rodrigues

Renato Goulart Jasinevicius

University of São Paulo (USP) at São Carlos School of Engineering, 400 Trabalhador São-carlense Avenue, 13566-590, São Carlos, Brazil

igorbasso@usp.br, marcel_tecn@sc.usp.br, brancojao@gmail.com, roger@sc.usp.br, renatogj@sc.usp.br

Abstract. The purpose of these paper was evaluated the surface integrity of the poly(methyl-methacrylate) (PMMA) with a single-point monocrystalline diamond tool. The experiments were conducted on Rank Pneumo ASG 2500 varying feed (5, 15, 25 $\mu\text{m}/\text{rev}$) and rake angle (-5° , 0° , $+5^\circ$). The surface integrity was qualitatively analyzed by four area roughness parameters: mean roughness (S_a), maximum roughness (S_z), Skewness (S_{sk}) and Kurtosis (S_{ku}). The best surface quality was produced with feed of 5 $\mu\text{m}/\text{rev}$ and rake angle of $+5^\circ$. At this condition, S_a and S_z was the smallest, S_{sk} was close to zero and S_{ku} was below three. This results on less rough surface, with height of the valleys and peaks tends to softening and symmetric.

Keywords: PMMA, Single-point diamond, Surface integrity, Ultraprecision machining.

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.