



ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DO PROCESSO SOBRE A QUALIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA DA LIGA STAVAX-ESU® NO TORNEAMENTO DE ULTRAPRECISÃO ASSISTIDO POR VIBRAÇÃO ULTRASÔNICA DA FERRAMENTA

Jakson Michael Andretta

Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Universitário Trindade, Florianópolis – SC – Brasil
jakson@imp.ufsc.br

Walter Lindolfo Weingaertner

Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Universitário Trindade, Florianópolis – SC – Brasil
wlw@imp.ufsc.br

Resumo: *O objetivo é avaliar a influência da variação de parâmetros do processo sobre a qualidade da superfície usinada no torneamento de ultraprecisão assistido por vibração ultrasônica da ferramenta. Esta técnica torna possível a usinagem de materiais com afinidade ao carbono utilizando ferramentas de diamante monocristalino, e minimiza o desgaste por difusão através das vibrações excitadas na ferramenta. São analisadas as influências de quatro parâmetros do processo sobre a rugosidade média R_a : avanço (f), profundidade de corte (a_p), velocidade de entrada da peça na ferramenta (v_{ein}) e tempo de contato entre peça e ferramenta (ED). É analisada a influência da variação da dureza da peça, decorrente de quatro diferentes temperaturas de revenimento, sobre a rugosidade. O material da peça é a liga Stavax-ESU®. 1.2083 (X42Cr13). Cada parâmetro do processo foi analisado separadamente, enquanto os demais eram mantidos constantes. As medições com um microscópio de interferometria de luz branca revelaram uma tendência ao aumento da rugosidade média R_a com o aumento do tempo de contato ED e também para valores muito altos ou muito baixos de avanço (devido à rugosidade cinemática). Para estes testes, percebe-se também que um aumento da dureza da peça ocasiona pior qualidade da superfície usinada. Os parâmetros profundidade de corte a_p e velocidade de entrada v_{ein} não revelaram influência significativa sobre a rugosidade.*

Palavras-chave: *Torneamento de ultraprecisão, vibração ultrasônica, diamante monocristalino.*

1. INTRODUÇÃO

O torneamento de ultraprecisão é utilizado na fabricação de componentes com superfícies com rigorosas tolerâncias de forma e rugosidade - dispensando operações posteriores de acabamento – com elevada flexibilidade cinemática, permitindo a produção de geometrias complexas, como lentes Fresnel (Schroeter, 1997). A princípio, este processo era limitado à usinagem de materiais sem afinidade ao carbono, pois na presença deste, as ferramentas de diamante monocristalino empregadas apresentam um elevado desgaste por difusão e grafitização (Rübenach, 2001). Para tornar viável a usinagem de ultraprecisão com ferramentas de diamante monocristalino também para materiais com afinidade ao carbono, Moriwaki e Shamoto desenvolveram um sistema de vibração ultrasônico da ferramenta, ocasionando um corte interrompido com uma interrupção periódica do contato entre ferramenta e zona de corte. Isso proporciona uma redução da temperatura nesta região, devido à melhor ação do fluido lubri-refrigerante e de uma lubrificação aerodinâmica da área de remoção do material (Moriwaki and Shamoto, 1991). Este trabalho apresenta a análise da rugosidade média R_a da superfície usinada em função da variação dos parâmetros do processo: avanço f , profundidade de corte a_p , velocidade de entrada da ferramenta na peça v_{ein} e tempo de contato ED para diferentes valores de dureza da liga Stavax-ESU®. 1.2083.

2. DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O recente avanço tecnológico e desenvolvimento industrial têm exigido uma constante melhora de qualidade das peças produzidas em mecânica de precisão, sendo freqüentes os casos de exigências extremas de forma e rugosidade, muitas vezes na escala nanométrica. No processo de Usinagem de Ultraprecisão a rigidez da máquina, o sistema de posicionamento (acionamento e frenagem), o sistema de guias, as condições ambientais de temperatura, erros de batimento radial e axial da peça, o avanço e a profundidade de corte em escala micrométrica e a qualidade do gume devem ser controlados mais precisamente que na usinagem convencional. Na usinagem de ultraprecisão são empregadas exclusivamente ferramentas de diamante monocristalino, devido à elevada exatidão de forma do gume, proporcionada pela estrutura cristalina favorável, grande densidade atômica e alta resistência ao desgaste deste material. Além disso, os planos cristalográficos podem ser ajustados de tal forma que o plano de maior dureza coincide com a face da ferramenta, justamente a superfície mais exigida devido ao alto atrito imposto pela saída dos cavacos. Alta capacidade de transmissão de calor, baixo coeficiente de dilatação térmica e baixo coeficiente de atrito são outras qualidades do diamante monocristalino (Schroeter, 1997).

A principal dificuldade no uso de ferramentas de diamante monocristalino na usinagem de materiais com afinidade ao carbono é o rápido desgaste do gume, fato que, somado ao alto custo de uma ferramenta nova e de sua afiação, torna o processo muito dispendioso (Rübenach, 2001).

Na usinagem de ultraprecisão de materiais como titânio ou ferro, que aliam a afinidade ao carbono a elevadas temperaturas de usinagem, este desgaste é de sobremodo acentuado. O contato entre a superfície recém-trabalhada - que apresenta alta reatividade química - e a ferramenta, a altas temperaturas, é capaz de reduzir drasticamente o tempo de vida desta, devido à difusão entre o carbono presente no diamante e sua combinação ao ferro ou titânio da peça (Moriwaki and Shamoto, 1991). Soma-se a esse problema o fato de, na presença de ar, a grafitação do diamante se iniciar a temperaturas abaixo de 900° C. No caso da usinagem de materiais muito duros, as solicitações mecânicas podem então se tornar suficientemente grandes a ponto de causar microtrincas na parte cortante da ferramenta de diamante monocristalino (Schroeter, 1997).

Um novo conceito de usinagem de ultraprecisão foi proposto por Moriwaki e Shamoto. Trata-se da imposição de um movimento periódico de alta freqüência à ferramenta, geralmente na direção de corte, o que resulta em um corte interrompido. O principal objetivo deste processo é possibilitar um menor aquecimento da região de corte, devido à diminuição do tempo de contato entre peça e ferramenta e com isso, reduzir o desgaste desta. Foi mostrado em diversas publicações que a aplicação do sistema de vibração leva a uma considerável redução do desgaste, de forma que o tempo de vida da ferramenta é aumentado em até 100 vezes.

A cinemática do processo mostrado na figura 1, mostra que só se tem uma interrupção do processo de corte se a velocidade máxima de oscilação do gume da ferramenta (na região da linha tracejada na parte superior da figura) for maior que a velocidade de corte. Assim, a ferramenta se desprende da raiz do cavaco no seu movimento descendente e só reencontra a peça em seu curso ascendente, reiniciando o corte. Esta interrupção periódica do corte é responsável pela redução do desgaste da ferramenta, devido aos seguintes fatores (Rübenach, 2001):

- Redução do tempo de contato (ED) entre peça e ferramenta, o que diminui a temperatura da zona de corte;
- Ação mais efetiva do fluido lubri-refrigerante,
- Redução das componentes das forças de usinagem;
- Redução da fricção.

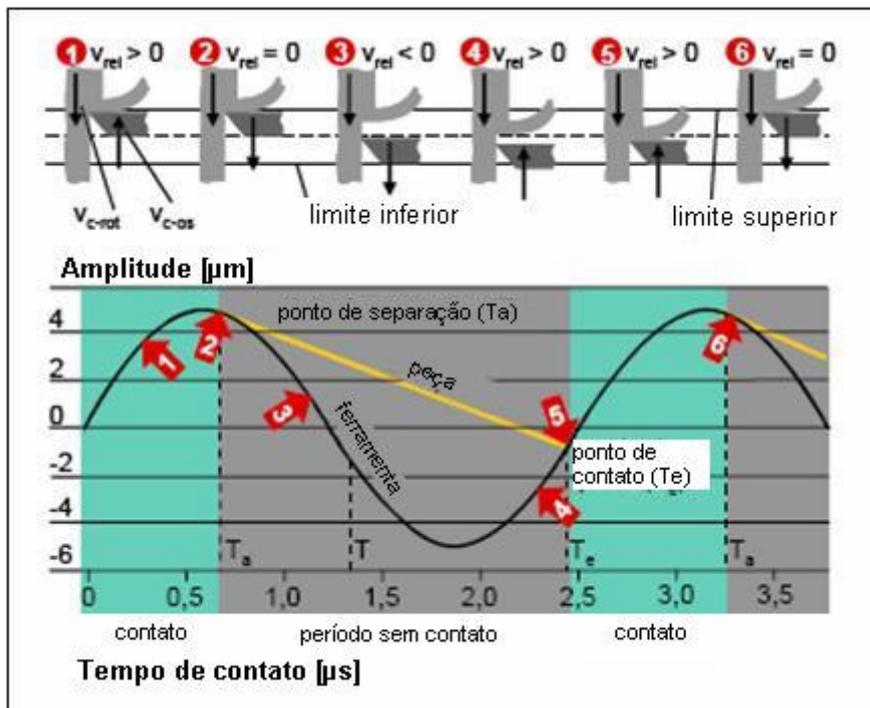


Figura 1: Cinemática do processo assistido por vibração ultrassônica da ferramenta

A cinemática do processo é descrita pela equação da velocidade relativa (equação 1) e da velocidade para o movimento oscilatório (equação 2),

$$v_{c-rel} = v_{c-rot} + v_{c-os} \quad (1)$$

$$v_{c-os} = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \quad (2)$$

onde v_{c-rel} é a velocidade de corte relativa, v_{c-rot} é a velocidade tangencial do ponto na peça a ser usinado, v_{c-os} é a velocidade de um ponto sobre o gume da ferramenta, devido ao movimento oscilatório, A representa a amplitude da vibração, ω é a velocidade angular e t é o tempo.

A amplitude e a frequência de vibração devem ser relacionadas com parâmetros do processo, como a rotação da peça e seu raio.

A posição e a velocidade da peça, da ferramenta e os valores relativos entre ambas podem ser obtidos conhecendo-se as equações referentes às posições relativas T_a (momento em que a ferramenta penetra na peça) e T_e (momento em que a ferramenta se separa da peça). No entanto, estas não são deduzidas analiticamente, devido ao surgimento de equações diferenciais transcendentais.

O gráfico da figura 2 representa a solução numérica das equações diferenciais e estabelece uma relação entre os parâmetros amplitude da vibração, velocidade de corte, tempo de contato entre peça e ferramenta ED (tempo efetivo de corte) e velocidade relativa de entrada da ferramenta V_{ein} (no momento T_a), para um valor constante de frequência (neste caso, 40kHz). Tais parâmetros são utilizados para *set-up* do experimento, adicionalmente à profundidade de corte a_p e ao avanço f .

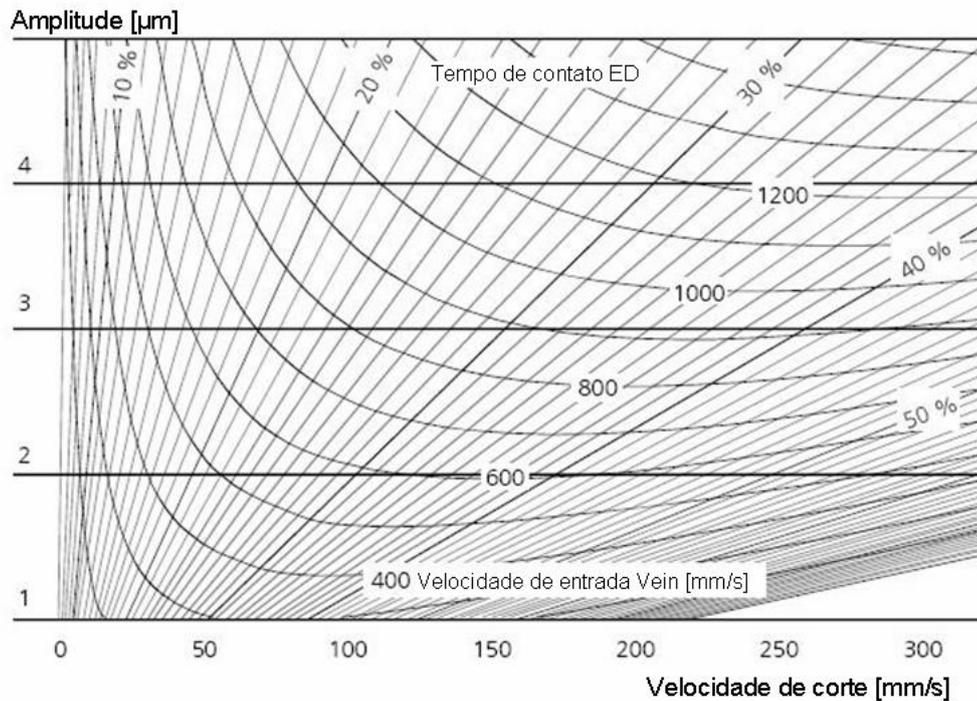


Figura 2: Relação entre os parâmetros do processo para uma frequência de 40kHz

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados em uma torno de ultraprecisão MSG 325, do fabricante Rank Pneumo Precision, com comando numérico, num ambiente com temperatura controlada em 25°C.

As ferramentas utilizadas foram de diamante monocristalino, fixadas sobre um sonotrodo cilíndrico de titânio, de raio 15 mm e comprimento 60 mm (comprimento igual a meio comprimento de onda de ressonância no titânio). A excitação do sonotrodo se dá por um transdutor piezelétrico com a mesma frequência de ressonância, acoplado ao sonotrodo. Os cristais piezelétricos transformam pulsos elétricos em mecânicos, aumentando e diminuindo o comprimento dos cristais, de acordo com a polaridade do pulso elétrico, figura 3. A ferramenta de diamante, fixada sobre o sonotrodo, oscila verticalmente.

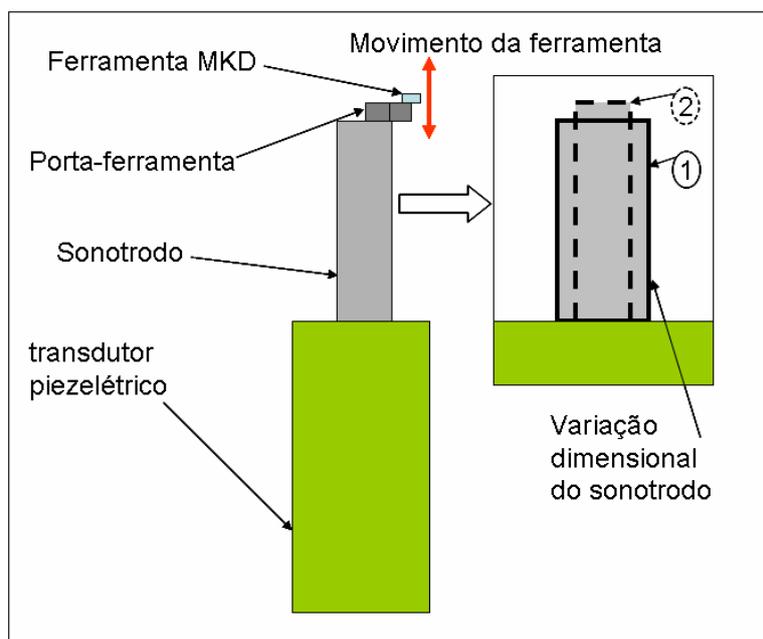


Figura 3: Transdutor piezelétrico e sonotrodo com ferramenta de diamante monocristalino

As ferramentas de diamante empregadas possuem um raio de quina de 1,0 mm e foram fixas sobre um suporte de metal-duro. O fluido lubri-refrigerante empregado foi o Dovent®.

O torneamento transversal foi feito em peças cilíndricas de 22 mm, da liga 1.2083 (Stavax® ESU, X42Cr13), as quais foram temperadas e revenidas para quatro diferentes durezas: 35, 40, 45 e 53HRC.

Os parâmetros de corte utilizados foram selecionados de modo a permitir a verificação da influência da variação de cada um deles sobre a qualidade da superfície usinada (rugosidade R_a). Em cada seqüência de ensaios, um parâmetro foi alterado, enquanto os outros foram mantidos constantes. Os parâmetros são descritos na tabela 1. Os valores em negrito correspondem aos valores-padrão iniciais. A frequência de excitação do sonotrodo foi mantida constante em 40kHz.

Tabela 1: Parâmetros utilizados nos ensaios

f (μm)	ap (μm)	Vein (mm/s)	ED (%)
1	1	400	20
3	3	600	30
5	5	700	40
10	10	800	50
15			
20			

As medições de rugosidade foram feitas num microscópio de interferometria de luz branca Wyko NT1100. Foram realizadas medidas em dois graus de ampliação: 10 e 50 vezes. Para cada grau de ampliação, foram tomadas 12 medidas, 4 em cada uma das 3 diferentes posições radiais.

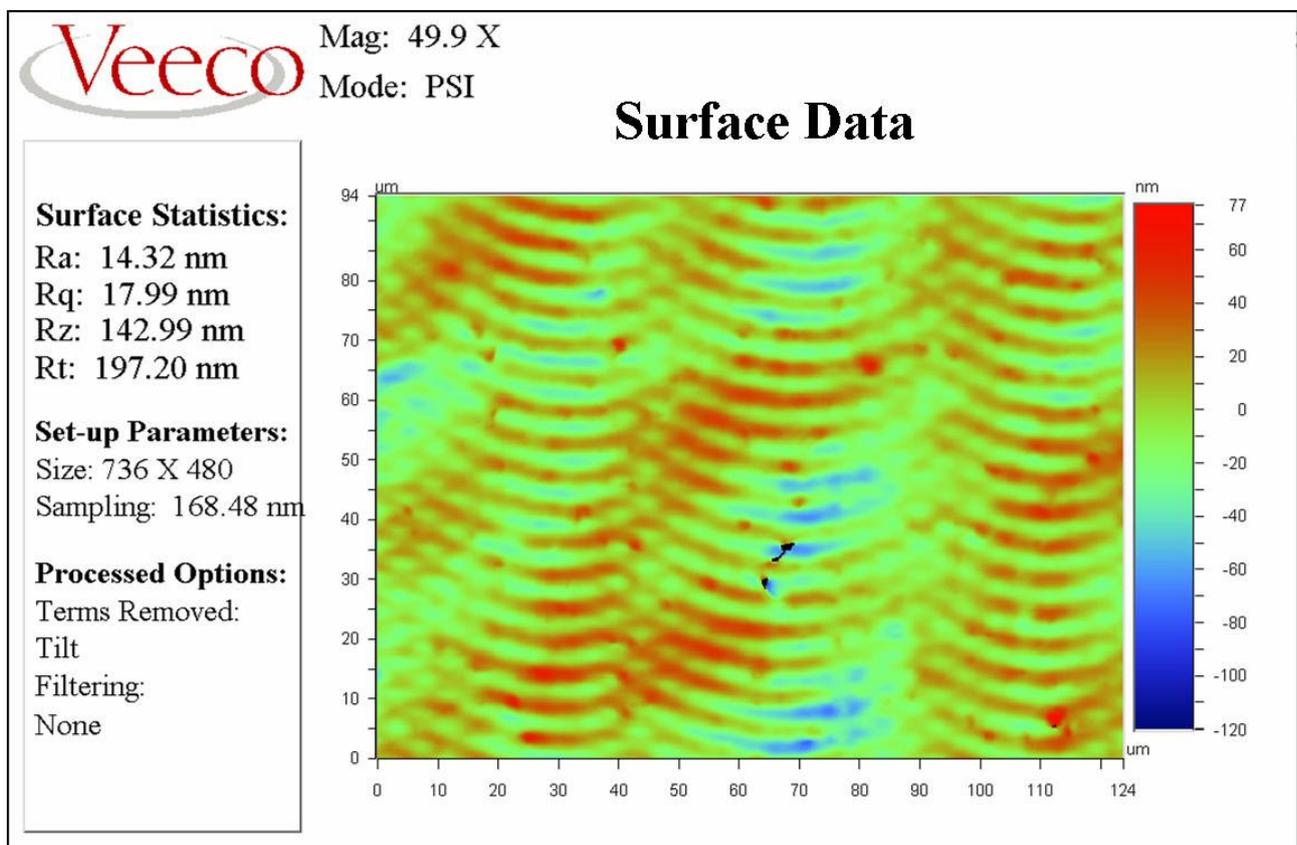


Figura 4: Imagem da interferometria de luz branca obtida na análise de uma superfície usinada com excitação ultrasônica da ferramenta (ED=40%, 40HRC)

4. ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos dados consistiu na avaliação da influência de um parâmetro específico do processo sobre a rugosidade da superfície usinada (R_a).

4.1. Influência da profundidade de corte sobre a rugosidade

Os valores utilizados para a profundidade de corte a_p foram de: 1, 3 e $10\mu\text{m}$. O gráfico da figura 5 mostra que para valores mais altos da profundidade de corte a dispersão dos resultados é menor. Para as amostras com dureza de 45 e 53 HRC não foi possível obter uma superfície com qualidade satisfatória para a profundidade de corte de $1\mu\text{m}$. Isso se deve provavelmente ao erro decorrente da variação da dimensão radial do sonotrodo durante o seu alongamento e sua contração. Não é possível afirmar que a variação da profundidade de corte causou uma alteração significativa na qualidade superficial da peça.

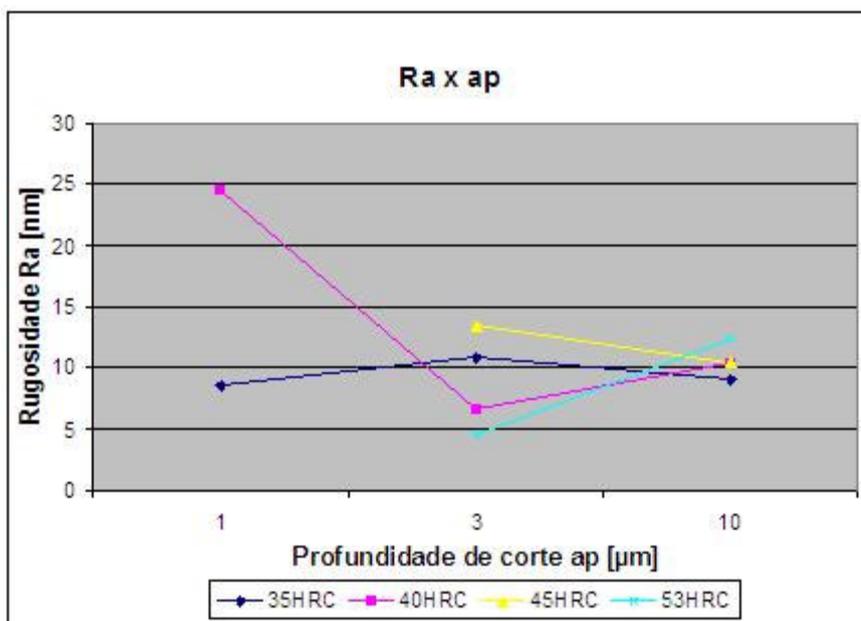


Figura 5: Rugosidade R_a em função da profundidade de corte a_p (ampliação de 50x)

4.2. Influência do avanço sobre a rugosidade

Para a análise da influência do avanço f sobre a qualidade superficial R_a , foram utilizados os valores de avanço: 1, 3, 5, 10, 15 e $20\mu\text{m/rot}$.

Os melhores resultados foram obtidos para os valores de avanço de 5 e $10\mu\text{m/rot}$. Para valores menores ou maiores que esses, verificou-se um decréscimo da qualidade da superfície usinada. Estes resultados conferem com rugosidade cinemática (devido ao raio de quina e ao movimento relativo entre peça e ferramenta) para os desvios verificados para os avanços maiores e instabilidade do processo a partir de um avanço mínimo.

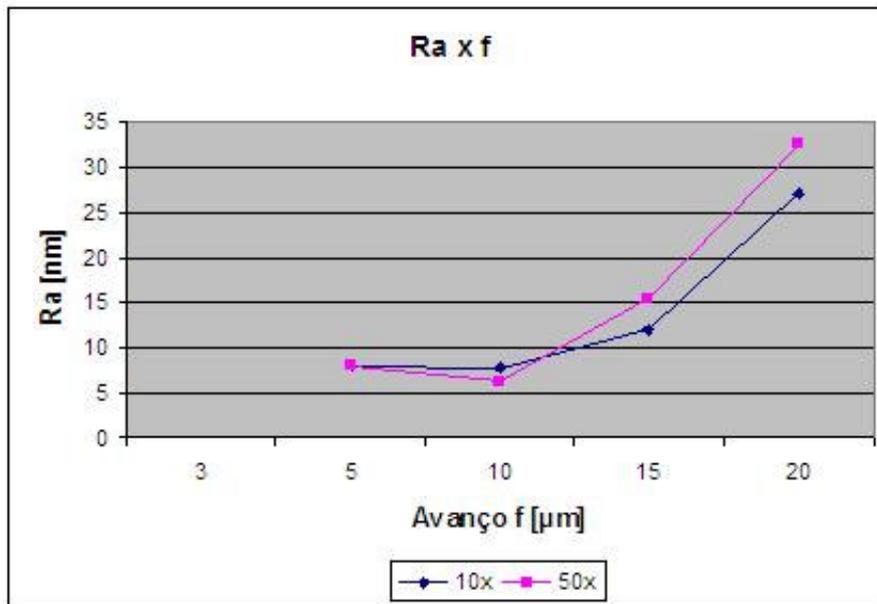


Figura 6: Rugosidade R_a em função do avanço f (peça com dureza de 40HRC)

4.3. Influência da velocidade de entrada sobre a rugosidade

Como um dos parâmetros específicos do processo, foi avaliada a influência da variação da velocidade de entrada da ferramenta na peça sobre a qualidade da superfície usinada. Os valores analisados da velocidade de entrada (v_{ein}) foram: 400, 600, 700 e 800 mm/s. Não foi percebida nenhuma influência relevante sobre a qualidade da superfície usinada.

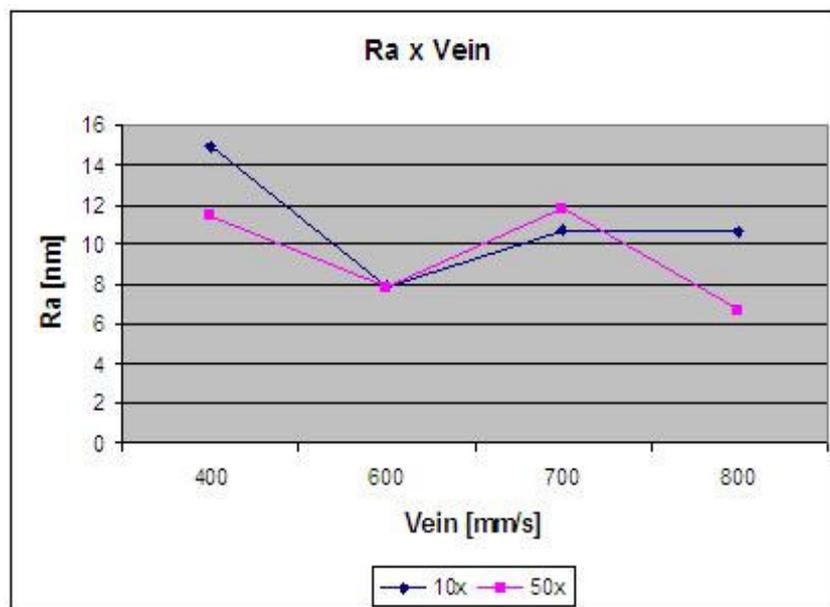


Figura 7: Rugosidade R_a em função da velocidade de entrada v_{ein} (dureza de 40HRC)

4.4. Influência do tempo de contato peça/ferramenta sobre a rugosidade

O tempo relativo de contato entre peça e ferramenta (ED, do alemão Eingriffsdauer) foi outro parâmetro analisado. Foram utilizados quatro níveis: 20%, 30%, 40% e 50%.

Os mecanismos de desgaste da ferramenta também são afetados pela alteração do tempo de contato ED. Para valores menores de ED, os mecanismos predominantes são os de difusão e oxidação. Já para valores maiores, ocorrem lascamentos da superfície e abrasão.

Foi observado que para tempos de contato entre peça e ferramenta maiores, a qualidade da superfície usinada foi reduzida. Tal comportamento já era esperado da cinemática do processo. Valores menores de ED são obtidos pelo aumento da velocidade de corte e/ou redução da amplitude de vibração da ferramenta. Assim, um ponto da superfície usinada coincide com a região de corte menos vezes do que para valores menores de ED. Para valores menores de ED, um mesmo ponto da peça é usinado mais de uma vez, gerando uma melhor qualidade superficial.

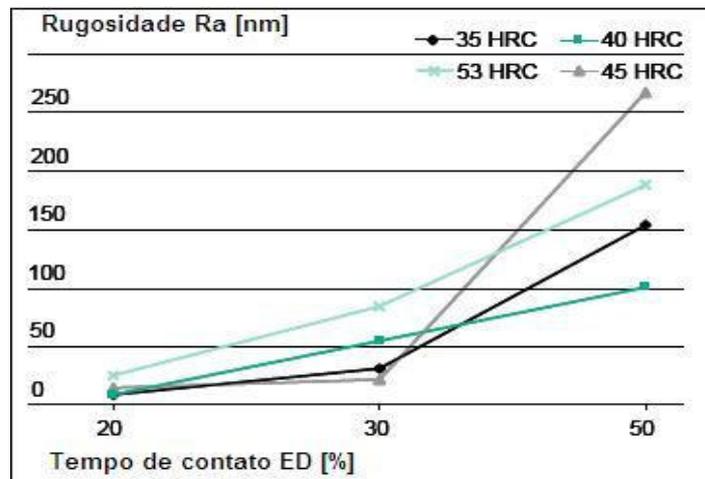


Figura 8: Rugosidade R_a em função do tempo de contato ED

4.5. Influência da dureza da peça sobre a rugosidade

Foi identificada uma relação entre a dureza e a rugosidade média apenas para os ensaios com variação do avanço f e de tempo de contato entre peça e ferramenta ED.

Os demais ensaios, com variação da profundidade de corte a_p e da velocidade de entrada v_{ein} não evidenciam qualquer influência.

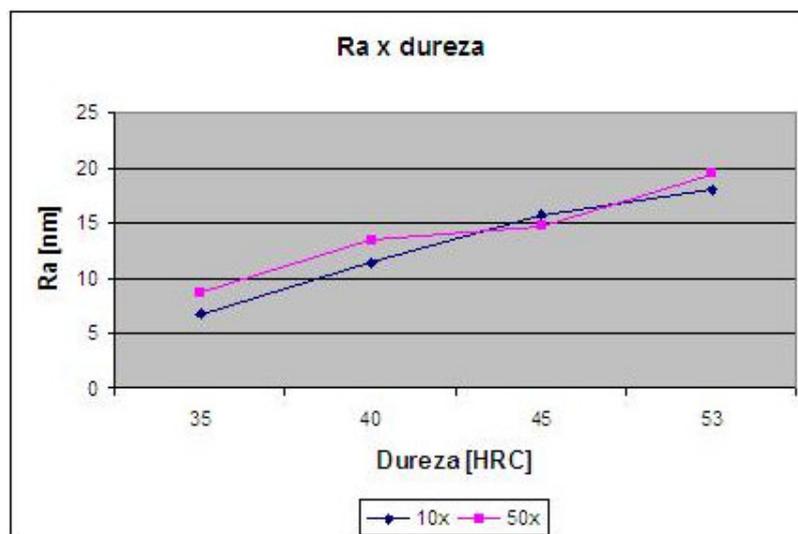


Figura 9: Rugosidade R_a em função da dureza para ED=40%

5. CONCLUSÕES

A análise dos resultados revela que a variação de apenas dois parâmetros de corte (avanço f e tempo de contato ED) possui influência significativa sobre a rugosidade média R_a da superfície usinada. Para o primeiro, valores pequenos (menores que $5\mu\text{m}$) e grandes (maiores que $10\mu\text{m}$) reduzem a qualidade superficial devido à rugosidade cinemática e esmagamentos para avanços muito pequenos. O aumento do tempo de contato ED também aumenta a rugosidade média, pelo fato de a ferramenta passar menos vezes pela zona de corte durante um período de sua oscilação. Os demais parâmetros (profundidade de corte a_p e velocidade de entrada da ferramenta v_{ein}) não apresentaram qualquer influência.

O aumento da dureza da peça causou uma redução da qualidade superficial apenas para os ensaios com variação de avanço e de tempo de contato ED . Para os demais ensaios, não se percebeu influência.

6. REFERÊNCIAS

- Dohmen, H.G., 1964, “Zerspanungsuntersuchungen beim Drehen mit periodisch bewegtem Schneidwerkzeug”, Tese de PhD, Universidade de Aachen, Alemanha.
- Moriwaki, T., 1991, “Ultraprecision Diamond Turning of Stainless Steel by applying Ultrasonic Vibration”, Anais do CIRP, Vol. 40/1, pp 559-562.
- Rübenach, R., 2001, “Schwingungunterstützte Ultrapräzisionsbearbeitung optischer Gläser mit monokristallinen Diamantwerkzeugen”, Tese de PhD, RWTH Aachen, Alemanha.
- Schroeter, R., 1997, “Usinagem de Ultraprecisão de Elementos Ópticos Transmissivos no Espectro”, Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

7. DIREITOS AUTORAIS

Por motivo de segredo industrial, os resultados supracitados são aproximados. No entanto, a proporcionalidade entre eles foi mantida, afim de retratar as tendências dos dados.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SOME PROCESS PARAMETERS OVER THE SURFACE QUALITY OF THE ALLOY STAVAX-ESU® ON THE ULTRAPRECISION TURNING ASSISTED BY AN ULTRASONIC TOOL VIBRATION SYSTEM

Jakson Michael Andretta

Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Universitário Trindade, Florianópolis – SC – Brasil
jakson@lmp.ufsc.br

Walter Lindolfo Weingaertner

Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Universitário Trindade, Florianópolis – SC – Brasil
wlw@lmp.ufsc.br

Abstract: *The present work intends to analyze the influence of some process parameters variation over the surface quality on the ultraprecision turning assisted by an ultrasonic tool vibration system. This system makes possible the machining of materials with carbon affinity by using monocrystalline diamond tools (MKD), because of the minimization of diffusion wear by excited vibrations over the tool. On the tool's side were analyzed the influences of four process parameters over the mean roughness R_a : feed rate (f), cutting depth (a_p), entrance speed of the tool on the workpiece (v_{ein}) and the time of contact between them (ED). On the workpiece's side was analyzed*

the influence of hardness variation (obtained from four different annealing temperatures) over the mean roughness. The workpiece material was the alloy Stavax-ESU®. 1.2083 (X42Cr13). Each parameter was analyzed separated, while the others were kept constant. The measurements with a white light interferometry microscope revealed a tendency of an increase of the mean roughness R_a with an increase of the time of contact ED as well as too high or too low values of feed rate (because of the kinematic roughness). For these tests it was also verified that a hardness increase caused a worse surface quality too. The parameters cut depth a_p and entrance speed v_{ein} do not revealed any influence.

Keywords: *Ultraprecision turning, ultrasonic tool vibration, monocrystalline diamond.*