

# ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL EM FRESAMENTO A ALTAS VELOCIDADES DE CORTE DE MATERIAL ENDURECIDO<sup>1</sup>

Ricardo Santin<sup>2</sup>  
Rodrigo Panosso Zeilmann<sup>3</sup>

## Resumo

A indústria de moldes e matrizes consolida-se por utilizar o fresamento a altas velocidades de corte (*HSM – High-Speed-Machining*) como um pré-requisito de produtividade na usinagem de materiais endurecidos, principalmente no processo de acabamento. Entretanto, visto que, não há um domínio completo acerca das variáveis que afetam a qualidade superficial, este trabalho relata um estudo sobre a rugosidade e a textura das superfícies obtidas na usinagem do aço AISI H13 com dureza de 52 a 54 HR<sub>C</sub>. Os ensaios foram realizados utilizando-se uma ferramenta de topo esférico com 6 mm de diâmetro, de metal-duro classe P10/M10 e revestimento TiAlN. Foram utilizadas duas condições de relação comprimento/diâmetro ( $l/d$ ), 4 e 8. Ademais, o corpo-de-prova foi fixado com uma inclinação de 45°, optando-se pelo corte concordante, horizontal, no sentido de baixo para cima. Durante os ensaios, a rugosidade e a textura foram avaliadas através da variação dos parâmetros de corte, avanço por gume ( $f_z$ ) e profundidade axial de corte ( $a_p$ ). Na análise dos resultados, verificou-se que os menores valores de rugosidade foram obtidos para a condição de  $l/d = 4$  e  $f_z = 0,05$  mm. No entanto, para a condição de  $l/d = 8$ , o avanço  $f_z = 0,20$  mm apresentou o melhor acabamento. A deflexão da ferramenta, causada pela condição de  $l/d$  além da inclinação do corpo-de-prova, em regiões de diferente estabilidade de corte, afetaram a qualidade superficial da peça. Além disso, com o aumento da profundidade axial de corte, houve a elevação dos valores de rugosidade para ambas as condições ensaiadas.

**Palavras-chave:** HSM; Fresamento; Qualidade superficial; Aço AISI H13 temperado.

---

<sup>1</sup> Trabalho apresentado no 4º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 2 a 5 de maio de 2006, Joinville, SC.

<sup>2</sup> Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul. E-mail: rsantin@ucs.br. Vinculado ao Grupo de Pesquisa “Grupo de Usinagem”

<sup>3</sup> Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul. E-mail: rpzeilma@ucs.br. Coordenador do Grupo de Pesquisa “Grupo de Usinagem”

## 1 INTRODUÇÃO

Para as indústrias fabricantes de moldes e matrizes, os processos de usinagem assumem importância significativa. A elevada exigência do mercado, aliada ao curto ciclo de vida dos produtos, têm pressionado estas empresas a buscarem novas soluções tecnológicas e otimizar os processos de fabricação. Dessa forma, a utilização do processo de fresamento a altas velocidades de corte (HSM – *High-Speed-Machining*), consolida-se como uma das alternativas na busca pela competitividade.

A utilização da tecnologia HSM possibilita a usinagem completa dos moldes, considerando vantagens como a flexibilidade da produção. Segundo Axinte e Dewes,<sup>(1)</sup> tradicionalmente, a produção de moldes e matrizes envolve a usinagem convencional, com o material no estado normal, seguido de tratamento térmico, utilização do processo de eletro-erosão e, por fim, realização de acabamento e polimento manual. Entretanto, com o processo HSM, permite-se a usinagem dos componentes diretamente em material endurecido.

A redução das etapas de fabricação é uma das principais vantagens do processo HSM. Dessa forma, Outeiro e Astakhov<sup>(2)</sup> descrevem: “o processo HSM permite a redução dos custos e do tempo de produção, pela redução ou eventual eliminação da necessidade do processo de eletro-erosão e do polimento manual”. No entanto, é importante que as empresas observem as restrições de qualidade superficial requeridas para a função do produto.

Uma das principais considerações no projeto de componentes mecânicos é a condição da superfície produzida durante algum tipo de processo de fabricação. De acordo com Toh:<sup>(3)</sup> “a textura das superfícies fresadas é importante para avaliar o processo de acabamento. É um dos critérios mais utilizados para determinar a usinabilidade de um determinado material.” Sendo assim, a textura de superfícies (rugosidades, ondulações e ranhuras de avanço de ferramentas de corte) têm sido aceitas como critérios para a avaliação da qualidade de uma superfície usinada. Hutchings<sup>(4)</sup> define rugosidade como: “irregularidades de pequena escala de uma superfície”.

A natureza da superfície é consequência direta do processo de fabricação a que foi submetida, sendo este o responsável por alterações que afetam as propriedades do material. Segundo Gaspar, Capela e Bolrão:<sup>(5)</sup> “existem muitos fatores, associados às condições de usinagem, que influenciam a textura da superfície em operações de acabamento.” Dentre estes fatores, destacam-se o tipo e a geometria da ferramenta de corte, além da situação de contato entre a ferramenta e a peça. Segundo Toh<sup>(3)</sup> e Ko, Kim e Lee,<sup>(6)</sup> as ferramentas de topo esférico são geralmente utilizadas para o processo de acabamento por se adaptarem a usinagem de superfícies livres. Ko, Kim e Lee<sup>(6)</sup> citam ainda que: “nesse caso a usinabilidade é diferente, de acordo com a direção de corte ou o ângulo de inclinação entre a ferramenta e a superfície a ser usinada.” Este fato ocorre devido à alteração na geometria da seção de corte para diferentes estratégias de usinagem e fixação da peça.

O uso de ferramentas de topo esférico em superfícies planas, 0° em relação à mesa do Centro de Usinagem, não é recomendado, pois, a velocidade de corte teórica no centro da ferramenta é zero. Dessa forma, o desgaste pode ocorrer de maneira

significativa e afetar a qualidade superficial da peça. Sendo assim, de acordo com Ko, Kim e Lee:<sup>(6)</sup> “ajustar o ângulo de inclinação da usinagem entre a ferramenta e a peça, pode melhorar a performance da ferramenta e a rugosidade da peça.” Além disso, devido à geometria complexa dos moldes, faz-se necessário utilizar diferentes condições de relação comprimento/diâmetro ( $l/d$ ) da ferramenta, a fim de se evitar colisões com as superfícies adjacentes.

A correta utilização dos parâmetros de corte é outro fator que influencia a textura da superfície. De acordo com Sai, Salah e Lebrun,<sup>(7)</sup> a profundidade axial de corte ( $a_p$ ) apresenta pequena influência nas características das superfícies e, pequenos valores de avanço por gume ( $f_z$ ) melhoram a qualidade superficial.

Dessa forma, efeitos na qualidade superficial de moldes e matrizes, ocasionados por fatores como comprimento de ferramenta, parâmetros de corte e inclinação da peça, precisam ser melhores compreendidos. Sendo assim, este trabalho relata um estudo sobre a rugosidade e a textura da superfície no fresamento do aço AISI H13 com dureza de 52 a 54 HR<sub>C</sub>. Para se utilizar a ferramenta de topo esférico com eficiência, a superfície foi usinada com uma inclinação de 45°, buscando-se a pré-otimização dos parâmetros de corte para condições de  $l/d = 4$  e 8, através da variação do  $a_p$  e do  $f_z$ .

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Todos os ensaios experimentais foram realizados em um Centro de Usinagem MIKRON, modelo VCP 800, com rotação máxima no eixo-árvore de 20.000 rpm e potência de 40 kW. Foi usinado o aço AISI H13, temperado, com dureza de 52 a 54 HR<sub>C</sub>, no formato de blocos com dimensões de 80 mm x 100 mm x 40 mm. Para o desenvolvimento dos ensaios, em operações de acabamento com corte a seco, foram utilizadas ferramentas de topo esférico inteiriças de metal-duro da classe P10/M10, com 6 mm de diâmetro e revestidas com TiAlN.

A Tabela 1 mostra as principais características das ferramentas de corte.

**Tabela 1.** Características das ferramentas de corte

Tipo	Diâmetro d [mm]	Nº de gumes	Material	Classe	Revest.	Ângulo de saída $\gamma$ [°]	Ângulo de folga $\alpha$ [°]	Raio do gume $r_n$ [mm]
Topo esférico	6	2	Microgrão de WC	P10/M10	TiAlN	0 – 3	13 – 15	0,05

Fonte: Sandvik Coromant

Somente os parâmetros avanço por gume  $f_z$  (mm) e profundidade axial de corte  $a_p$  (mm) foram variados. Os demais parâmetros, velocidade de corte  $v_c$  (m/min) e profundidade radial de corte  $a_e$  (mm), foram mantidos constantes, sendo utilizados neste trabalho parâmetros pré-otimizados de acordo com Zeilmann e Santin.<sup>(8)</sup>

A Tabela 2 mostra os parâmetros de corte utilizados nos ensaios.

**Tabela 2.** Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.

$V_c$ [m/min]	$a_e$ [mm]	$f_z$ [mm]	$a_p$ [mm]
326	0,20	0,05; 0,10; 0,15; 0,20	0,10; 0,15; 0,20; 0,30

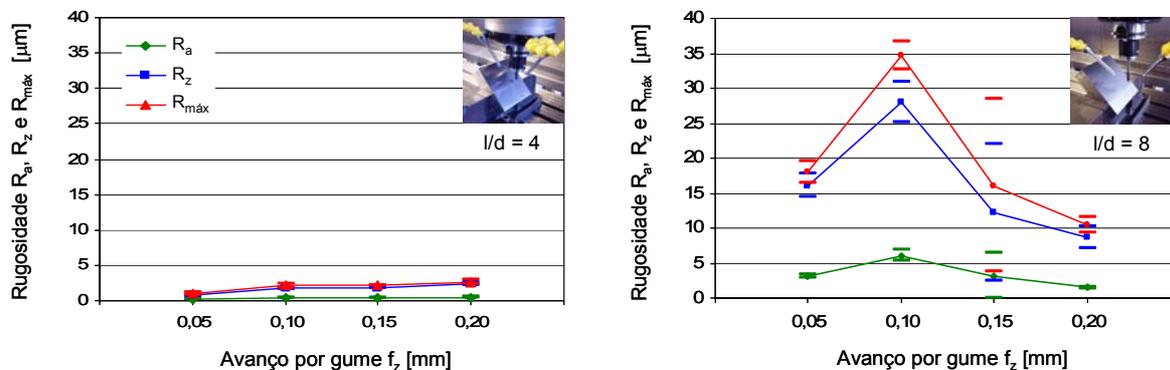
Fonte: Zeilmann e Santin<sup>(8)</sup>

Durante os ensaios foram testadas duas condições de relação comprimento/diâmetro da ferramenta (4 e 8) para um plano de inclinação do corpo-de-prova de 45°. Segundo Kang e outros:<sup>(9)</sup> “a influência do passe da ferramenta diminui se o ângulo entre a ferramenta e a peça for mantido em 45° e o diâmetro efetivo da ferramenta de corte aumenta.” Além disso, foi utilizado corte concordante no sentido horizontal e de baixo para cima, com o objetivo de trabalhar com uma maior velocidade de corte.

A qualidade superficial foi avaliada através da comparação dos valores de rugosidade e da textura das superfícies. Para a medição da rugosidade, utilizou-se um rugosímetro portátil *Taylor-Hobson*, modelo *Surtronic 3+*, com apalpador mecânico tipo estilete e raio de ponta de 5  $\mu\text{m}$ . Foram medidos os parâmetros de rugosidade média aritmética  $R_a$ , rugosidade média  $R_z$  e rugosidade máxima  $R_{m\acute{a}x}$ . De acordo com Faccio,<sup>(10)</sup> os valores similares de  $R_z$  e  $R_{m\acute{a}x}$  indicam um acabamento adequado, enquanto que diferenças significativas destes dois indicam irregularidades na superfície. Para cada variação de parâmetros testada, foram realizadas cinco medições de rugosidade no sentido longitudinal e transversal ao avanço. A imagem da textura das superfícies foi obtida com o auxílio de uma câmera CCD adaptada a um microscópio ótico.

### 3 RESULTADOS

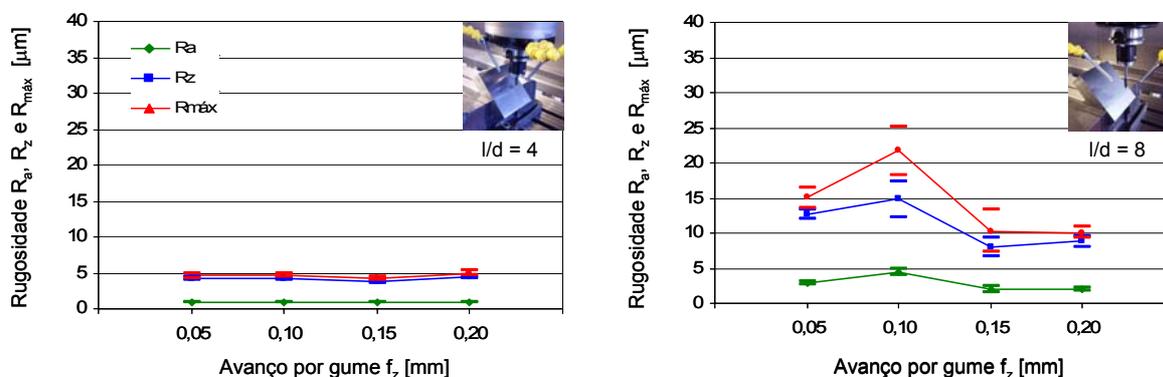
A Figura 1 mostra as curvas dos valores médios do comportamento dos parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$ , e  $R_{m\acute{a}x}$ , com o respectivo desvio padrão, em relação à variação do avanço por gume  $f_z$ , para as condições de  $l/d = 4$  e 8. Estes gráficos correspondem às medições no sentido longitudinal ao avanço.



**Figura 1.** Comportamento da rugosidade para a variação do  $f_z$ ; sentido longitudinal.

É possível observar a elevação dos valores de rugosidade para o aumento do avanço por gume, na usinagem com ferramenta de relação  $l/d = 4$ . Este fato espelha o aumento da crista resultante do maior espaçamento do raio da ferramenta. No entanto, para a condição de  $l/d = 8$ , a partir do valor de avanço  $f_z = 0,10$  mm, contata-se a redução dos valores de rugosidade para o aumento do  $f_z$ . O gráfico mostra a variação não uniforme do  $f_z$ , resultante da instabilidade do processo, ocasionada pela elevada relação comprimento/diâmetro da ferramenta. Para a condição  $l/d = 4$  os valores de rugosidade estão abaixo de  $3 \mu\text{m}$ , enquanto que, para  $l/d = 8$ , a rugosidade  $R_{\text{máx}}$  atinge valores acima de  $35 \mu\text{m}$ .

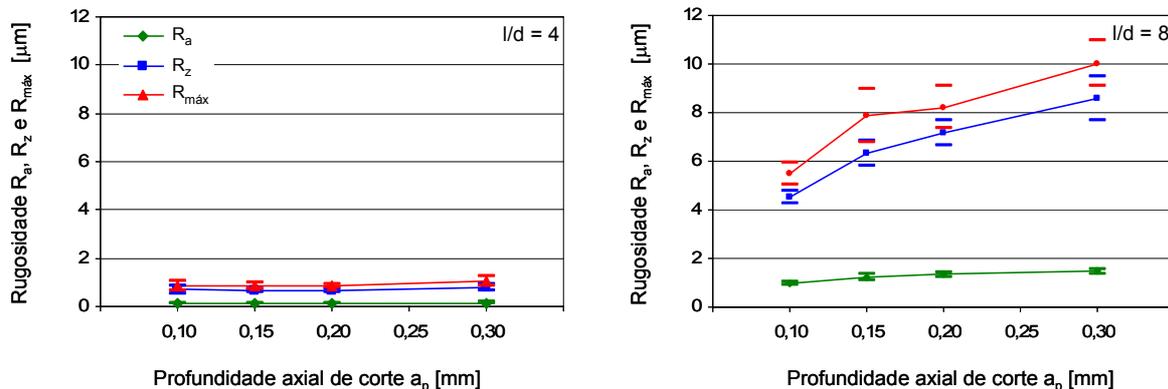
A Figura 2 ilustra as curvas dos valores médios do comportamento dos parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$ , e  $R_{\text{máx}}$ , em relação à variação do avanço por gume  $f_z$ , para as condições de  $l/d = 4$  e  $8$ , respectivamente. Estes gráficos correspondem às medições no sentido transversal ao avanço.



**Figura 2.** Comportamento da rugosidade para a variação do  $f_z$ ; sentido transversal.

Para a condição de  $l/d = 4$ , o comportamento da rugosidade no sentido transversal ao avanço não é semelhante ao comportamento no sentido longitudinal (Figura 1). Isto ocorre devido ao aumento das células onduladas (quadrado resultante entre as cristas das ranhuras do avanço por gume e profundidade radial) – Figura 5 – em relação à elevação do  $f_z$ . Já para a condição de  $l/d = 8$ , o comportamento da rugosidade no sentido transversal ao avanço é similar ao comportamento referente ao sentido longitudinal, exceto para os valores de  $f_z = 0,15$  e  $f_z = 0,20$ . Para estes valores, o comportamento manteve-se praticamente constante. Este fato deve-se a diminuição das células onduladas – Figura 6 – causada, possivelmente, pela maior estabilidade dinâmica. Para a condição  $l/d = 4$  os valores de rugosidade, no sentido transversal ao avanço, estão em torno de  $5 \mu\text{m}$ , enquanto que, para  $l/d = 8$ , a rugosidade  $R_{\text{máx}}$  atinge valores acima de  $20 \mu\text{m}$ .

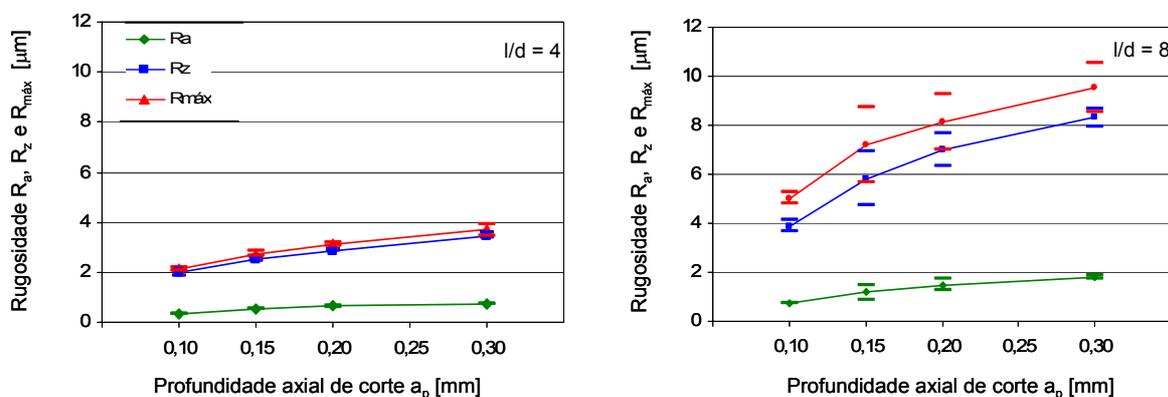
A Figura 3 ilustra as curvas dos valores médios do comportamento dos parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$ , e  $R_{\text{máx}}$ , em relação à variação da profundidade axial de corte  $a_p$ , para as condições de  $l/d = 4$  e  $8$ , respectivamente. Estes gráficos correspondem às medições no sentido longitudinal ao avanço.



**Figura 3.** Comportamento da rugosidade para a variação do  $a_p$ ; sentido longitudinal.

Para a variação da profundidade axial de corte, observa-se uma elevação da rugosidade em relação ao aumento do  $a_p$  para a condição de  $l/d = 8$ , devido à instabilidade do sistema ocasionada pela elevada relação  $l/d$ . Para a condição de  $l/d = 4$  não há uma variação significativa da rugosidade. Para a condição  $l/d = 4$  os valores de rugosidade estão abaixo de  $2 \mu\text{m}$ , enquanto que, para  $l/d = 8$ , a rugosidade  $R_{\text{máx}}$  atinge valores em torno de  $10 \mu\text{m}$ .

A Figura 4 ilustra as curvas dos valores médios do comportamento dos parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$ , e  $R_{\text{máx}}$ , em relação à variação da profundidade axial de corte  $a_p$ , para as condições de  $l/d = 4$  e  $8$ , respectivamente. Estes gráficos correspondem às medições no sentido transversal ao avanço.

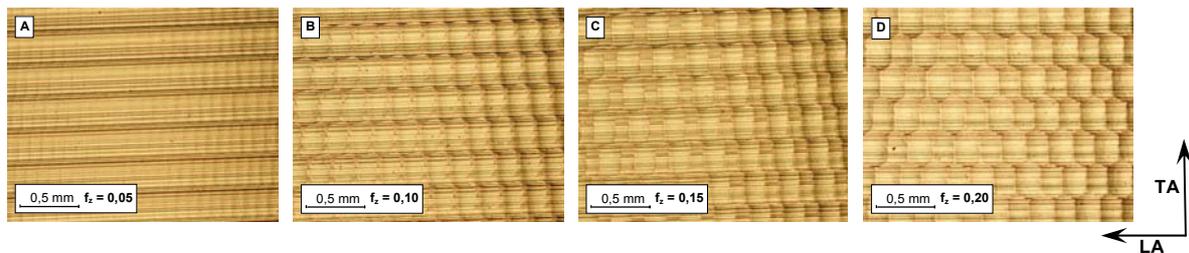


**Figura 4.** Comportamento da rugosidade para a variação do  $a_p$ ; sentido transversal.

É possível observar uma elevação dos valores de rugosidade, no sentido transversal ao avanço para a condição de  $l/d = 4$  em comparação ao sentido longitudinal, pois, o valor do  $a_e$  é  $0,20 \text{ mm}$  e isso aumenta a crista entre as passagens da ferramenta. Já para o sentido longitudinal ao avanço as cristas são próximas, equivalentes ao  $f_z = 0,05 \text{ mm}$ . No entanto, para a condição de  $l/d = 8$ , o comportamento da rugosidade foi semelhante para os dois sentidos avaliados, devido ao fator instabilidade possuir maior influência. Para a condição  $l/d = 4$  os valores de rugosidade

estão abaixo de  $4 \mu\text{m}$ , enquanto que para  $l/d = 8$  a rugosidade,  $R_{\text{máx}}$ , atinge valores em torno de  $10 \mu\text{m}$ .

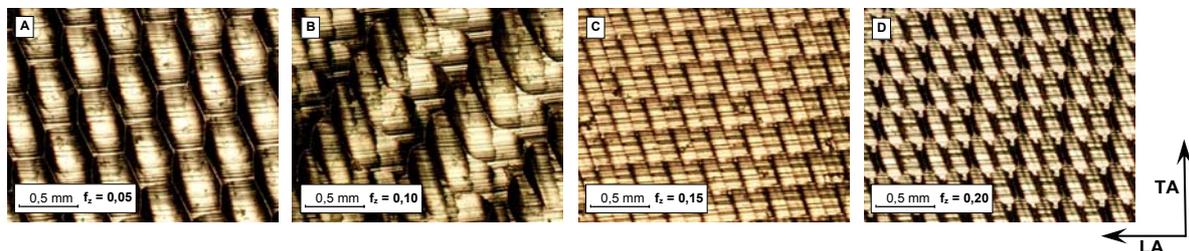
Nas Figuras 5 a 8, os códigos LA e TA correspondem, respectivamente, ao sentido longitudinal ao avanço (LA) e ao sentido transversal ao avanço (TA). A figura 5 mostra a textura das superfícies obtidas, para a variação do avanço por gume  $f_z$ , após a usinagem com uma relação  $l/d = 4$ .



**Figura 5.** Textura para a variação do  $f_z$ ;  $l/d = 4$ .

É possível observar que as ranhuras deixadas pela trajetória da ferramenta são uniformes para A, B, C e D. No entanto, com o aumento do  $f_z$  registra-se um aumento do tamanho das células onduladas (quadrado resultante entre as cristas das ranhuras do avanço por gume e profundidade radial), o que é confirmado pelo valor da rugosidade medida no sentido longitudinal ao avanço (LA).

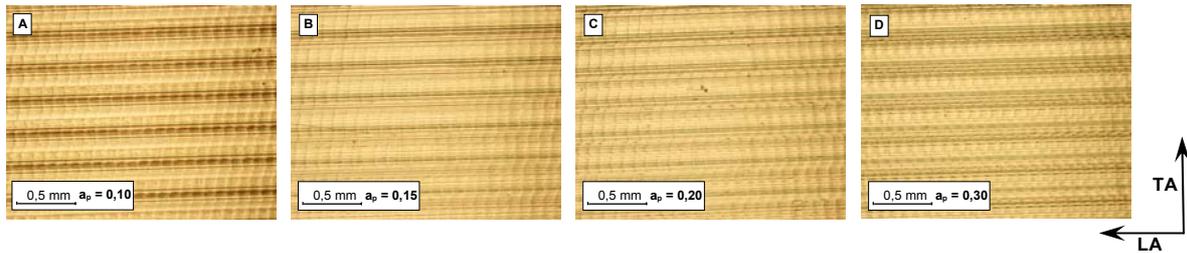
A Figura 6 mostra a textura das superfícies obtidas, para a variação do avanço por gume  $f_z$ , após a usinagem com uma relação  $l/d = 8$ .



**Figura 6.** Textura para a variação  $f_z$ ;  $l/d = 8$ .

Para esta condição, observa-se que as ranhuras da trajetória da ferramenta não são uniformes para todos os avanços ensaiados (A, B, C e D). Na fotografia B ( $f_z = 0,10$  mm) é possível visualizar que as ranhuras da passagem da ferramenta não apresentam uma continuidade regular, situação típica de marcas oriundas de vibração. No entanto, com o aumento da seção de corte, pelo incremento do avanço (fotografia D), a superfície resultante volta a apresentar mais regularidade, com menores valores de rugosidade (Figura 1,  $l/d = 8$ ).

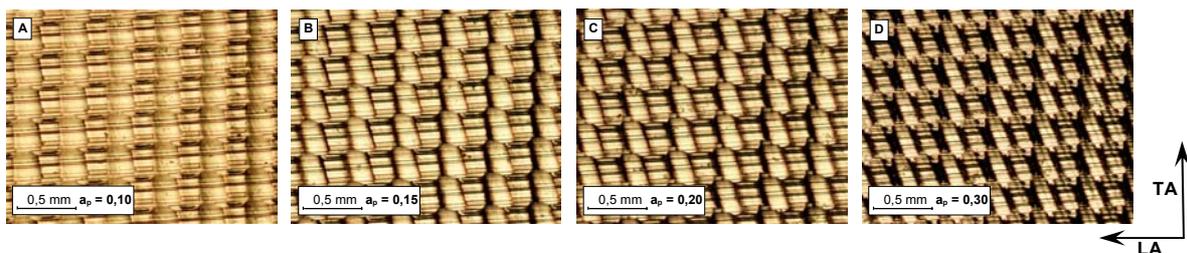
A Figura 7 mostra a textura das superfícies obtidas para a variação da profundidade axial de corte  $a_p$ , após a usinagem com ferramenta utilizando  $l/d = 4$ .



**Figura 7.** Textura para a variação do  $a_p$ ;  $l/d = 4$ .

Para a ferramenta com  $l/d = 4$  e variação do  $a_p$ , é possível observar que as texturas A, B, C e D apresentam marcas regulares para as quatro condições de  $a_p$  ensaiadas. Este fato indica a pequena influência da profundidade axial de corte  $a_p$  sobre a variação dos valores de rugosidade medidos no sentido longitudinal ao avanço (LA), validando resultados encontrados na literatura.<sup>(7,11)</sup>

A Figura 8 mostra a textura das superfícies obtidas, para a variação da profundidade axial de corte  $a_p$ , após a usinagem com ferramenta empregando uma relação  $l/d = 8$ .



**Figura 8.** Textura para a variação do  $a_p$ ;  $l/d = 8$

Para a condição de  $l/d = 8$ , observa-se uma maior clareza na definição das células onduladas (região entre as cristas nos sentidos LA e TA) nas texturas A, B, C e D, para a variação do  $a_p$ , em relação à condição de  $l/d = 4$ . Estas alterações nos formatos das células onduladas foram verificadas através do aumento significativo da rugosidade, que se apresentou crescente ao longo do aumento da profundidade axial. Para  $a_p = 0,30$  mm foram medidas rugosidades,  $R_{m\acute{a}x}$ , acima de  $10 \mu\text{m}$ , enquanto que para a condição  $l/d = 4$ , a rugosidade,  $R_{m\acute{a}x}$ , manteve-se abaixo de  $2 \mu\text{m}$ .

#### 4 DISCUSSÃO

Comparando os resultados obtidos nas medições dos três parâmetros de rugosidade para os ensaios realizados, pode-se observar que as superfícies usinadas com a ferramenta de  $l/d = 4$  apresentaram os menores valores de rugosidade em relação à condição de  $l/d = 8$ . Segundo Polli e outros,<sup>(12)</sup> esse resultado está associado à instabilidade dinâmica devido a elevada condição de  $l/d$ . De acordo com Polli<sup>(13)</sup> e König e Klocke,<sup>(11)</sup> na usinagem com ferramentas de grande comprimento, as forças de corte periódicas excitam a peça e a ferramenta estática e dinamicamente. As deflexões estáticas produzem erros de forma e os deslocamentos dinâmicos prejudicam o acabamento superficial.

Com o aumento do avanço por gume  $f_z$ , constatou-se a elevação dos valores de rugosidade, para  $l/d = 4$ . Já para as superfícies usinadas com a ferramenta de  $l/d = 8$  houve um decréscimo dos valores de rugosidade para o aumento do  $f_z$ , pois, com o aumento da seção de corte pelo incremento do avanço, a superfície resultante apresentou uma maior regularidade, com menores valores de rugosidade. No entanto, foi verificada uma região de instabilidade para a condição de  $f_z = 0,10$  mm, através do pico de rugosidade e da análise da textura resultante.

Para a variação da profundidade axial de corte  $a_p$ , foi observada uma elevação dos valores de rugosidade, porém de forma não significativa para a condição  $l/d = 4$ . Este fato está de acordo com Saï, Salah e Lebrun,<sup>(7)</sup> pois, o  $a_p$  apresenta pequena influência nas características da superfície. Na usinagem com ferramenta de  $l/d = 8$ , a elevação dos valores de rugosidade ocorreu de forma significativa, devido à instabilidade com o aumento da seção de corte. Além disso, para as medições de rugosidade correspondentes à usinagem com ferramenta de  $l/d = 4$ , os valores obtidos apresentaram um desvio padrão pequeno, fato que valida a regularidade da formação da superfície.

A verificação das imagens de textura, através da análise da célula ondulada, confirma que as superfícies usinadas com a ferramenta de  $l/d = 4$  apresentaram maior uniformidade e continuidade na seqüência da ranhura da passagem da ferramenta. Nas imagens das superfícies usinadas com ferramenta de  $l/d = 8$ , observou-se regiões irregulares com a ocorrência de marcas de vibração.

## 5 CONCLUSÃO

Analisando o comportamento da rugosidade para a variação do avanço por gume  $f_z$ , pode-se concluir que os menores valores de rugosidade foram medidos para as condições ensaiadas com a ferramenta empregando  $l/d = 4$ . Além disso, na usinagem com  $f_z = 0,05$  mm foi alcançado o melhor acabamento (valores médios de rugosidade no sentido longitudinal ao avanço –  $R_a = 0,14$   $\mu\text{m}$ ;  $R_z = 0,70$   $\mu\text{m}$  e  $R_{\text{máx}} = 1,04$   $\mu\text{m}$ ). No entanto, para a usinagem com ferramenta de  $l/d = 8$ , a melhor qualidade superficial foi medida para a condição de  $f_z = 0,20$  mm (valores médios de rugosidade no sentido longitudinal ao avanço –  $R_a = 1,48$   $\mu\text{m}$ ;  $R_z = 8,70$   $\mu\text{m}$  e  $R_{\text{máx}} = 10,44$   $\mu\text{m}$ ). A utilização destes valores de  $f_z$  é confirmada através da interpretação das imagens da textura obtidas e marcas de vibração. Outra observação importante é que, os valores de rugosidade não apresentaram mudanças significativas para a variação da profundidade axial de corte  $a_p$ , na usinagem com ferramenta de  $l/d = 4$  (valores médios de rugosidade no sentido longitudinal ao avanço, em torno de  $R_a = 0,12$   $\mu\text{m}$ ;  $R_z = 0,70$   $\mu\text{m}$  e  $R_{\text{máx}} = 0,90$   $\mu\text{m}$ ). Já para a usinagem com a ferramenta de comprimento elevado,  $l/d = 8$ , o melhor acabamento foi obtido para a menor condição de  $a_p$  ensaiada;  $a_p = 0,10$  mm (valores médios de rugosidade no sentido longitudinal ao avanço –  $R_a = 0,97$   $\mu\text{m}$ ;  $R_z = 4,50$   $\mu\text{m}$  e  $R_{\text{máx}} = 5,50$   $\mu\text{m}$ ). Este fato também é confirmado pela interpretação das imagens da textura da superfície obtida e marcas de vibração.

## Agradecimentos

Os autores agradecem as empresas *Matrizes Sadel Ltda. e Indústria Mecânica NTC Ltda.* pelo apoio financeiro e à *ARWI Representações Comerciais Ltda – Distribuidor autorizado Sandvik Coromant* – pelo suporte material e técnico. À Universidade de Caxias do Sul (UCS) pela colaboração dada ao projeto *UsiMold* e pelo apoio com bolsas de iniciação científica. Os autores também agradecem aos demais integrantes do *Grupo de Usinagem da UCS* que participaram deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 AXINTE, D.A.; DEWES, R.C. Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling-experiments data and empirical models. **Journal of Materials Processing Technology**, v.127, n.3, p.325-335, Oct. 2002.
- 2 OUTEIRO, J.C.; ASTAKHOV, V.P. **High speed machining: a reality or a fiction.** Application to die and mould manufacturing.. In: SEMANA DE MOLDES DE PORTUGAL, 2004. **RPD - Rapid Product Development** [S.n.t.].
- 3 TOH, C.K. Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel. **Precision Engineering**, v.28, n.4, p. 386-398, Oct. 2004.
- 4 HUTCHINGS, I.M. **Tribology: friction and wear of engineering materials.** London : Edward Arnold. 1992.
- 5 GASPAR, M.C.; CAPELA, C.; BOLRÃO, J. **Surface topography characterization techniques on moulding areas of injection moulds.** In: SEMANA DE MOLDES DE PORTUGAL, 2004. **RPD - Rapid Product Development** [S.n.t.].
- 6 KO, T.J.; KIM, H.S.; LEE, S.S. Selection of the machining inclination angle in high-speed ball end milling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.17, n.3, p. 163-170, Jan. 2001.
- 7 SAĬ, W.B.; SALAH, N.B.; LEBRUN, J.L. Influence of machining by finishing milling on surface characteristics. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 41, n. 3, p. 443-450, Feb. 2001.
- 8 ZEILMANN, R.P.; SANTIN, R. Tool wear in high speed milling of hardened Steel. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING - COBEM, 2005, 18., 2005, Ouro Preto - MG. **Proceedings...** [S.l. : s.n.], 2005.
- 9 KANG, M.C.; KIM, K.K.; LEE, D.W.; KIM, J.S.; KIM, N.K. Characteristics of inclined planes according to the variations of cutting direction in high-speed ball-end milling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.17, n.5, p. 323-329, Feb. 2001.
- 10 FACCIO I. **Investigações sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte.** São Paulo, 2002. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- 11 KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren - Drehen, Fräsen, Bohren.** 7. ed. Berlin : Springer, 2002.
- 12 POLLI, M.L.; WEINGAERTNER, W.L.; SCHROETER, R.B.; ZEILMANN, R.P. Influência das vibrações decorrentes do processo de fresamento de topo esférico a altas velocidades de corte sobre a qualidade superficial da peça. In: USINAGEM 2004, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo. Aranda, 2004.  
POLLI, M.L. **Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte.** Florianópolis, 2005. 214 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

# SURFACE QUALITY ANALYSIS IN HIGH SPEED MILLING HARDENED STEEL

*Ricardo Santin  
Rodrigo Panosso Zeilmann*

## **Abstract**

Die and molds industries using the High-Speed-Milling as a requisite of productivity in the hardened materials machining, mainly in the finishing process. However, there is not have a complete domain concerning the variables that affect the surface quality. This paper presents a study on the roughness and the texture in High-Speed-Machining (HSM) of hardened steel. The used hardened steel was the AISI H13 with hardness between 52 and 54 HR<sub>C</sub>. The experiments have carried out using ball nose end mill tool of cemented carbide, of grade P10/M10, with 6 mm of diameter and TiAlN coating. Nevertheless the length/diameter relation ( $l/d$ ), 4 and 8 had been used. The workpiece was fixed in an 45° inclination angle towards the Machining Center's table. A vertical upward milling was chosen in the single direction raster. During the experiments, the roughness and texture had been evaluated through the variation of the cut parameters, feed per tooth ( $f_z$ ) and axial depth of cut ( $a_p$ ). The results show lesser values of roughness for  $l/d = 4$  and  $f_z = 0,05$  mm. Nevertheless, for the condition  $l/d = 8$ , the  $f_z = 0,20$  mm presented the better finishing. The tool deflection, caused for  $l/d$  and workpiece inclination, in different cut in stability regions, had affected the surface quality. Moreover, the occurrence of bigger roughness values can be observed to increasing  $a_p$  for both tested conditions.

**Key words:** HSM; Milling; Surface quality; AISI H13 hardened steel.