

Variación de la rugosidad y de la dureza en el maquinado de formas complejas en aceros endurecidos utilizando altas velocidades de corte.

L. Cardoso Brandão*, R. Teixeira Coelho**, F. Martinez Aneiro***.

*Universidade Federal de São João del Rei – UFSJ – Praça Frei Orlando 170, centro. Brasil.

**Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP – Avenida trabalhador Sãocarlense, 400 – Centro. Brasil.

***Facultad de Ingeniería Mecánica CUJAE. Avenida 114 Marianao Ciudad Habana. Cuba.

lincoln@ufs.br, rtcoelho@sc.usp.br Ciudad, fmartinez@mecanica.cujae.edu.cu

(Recibido el 10 de octubre de 2007; aceptado el 22 de diciembre de 2007)

Resumen.

Este trabajo evalúa la influencia de la variación de la velocidad de corte en el corte con altas velocidades en superficies con formas complejas. Fueron maquinados cuerpos de prueba con $1/4$ de circunferencia en acero AISI D2 y H13 con dureza de 53 y 50 HRC, respectivamente. Los experimentos fueron realizados utilizando la estrategia “raster” con herramientas esféricas (Ball Nose) en un centro de maquinado de tres ejes. Los valores de rugosidad y dureza HRC fueron medidos perpendiculares a la dirección de corte en cuatro regiones diferentes. Los resultados demuestran que las regiones de diámetro mínimo, próximas a la línea central de la herramienta y en el punto de contacto del diámetro máximo, presentan los menores valores de rugosidad. No ocurren modificaciones significativas en los valores de HRC y no hubo formación de capa blanca en ninguno de los dos materiales. Considerándose los valores de microdureza medidas radialmente en los cuerpos de prueba no se observa ninguna variación de la microdureza.

Palabras claves: Rugosidad Ra; altas velocidades de corte; moldes y matrices; dureza HRC.

1. Introducción.

En la actualidad el control de la calidad de las superficies de moldes y matrices se torna esencial para el éxito de la producción, solamente en las operaciones de acabado cuando se emplea el fresado existen una serie de variables que interfieren en la calidad de la superficie maquinada. En la mayoría de los procesos de fresado de moldes y matrices las herramientas empleadas son de punta esférica denominadas Ball Nose con diámetros diversos.

Con la utilización de herramientas *Ball Nose* en procesos de fresado de superficies de forma, ocurren cambios constantes en las condiciones de contacto entre la pieza y la herramienta debido a la geometría compleja del proceso de corte. Las herramientas *Ball Nose* son las más utilizadas en el acabado de superficies complejas debido a que la geometría de *Ball Nose* se adapta al contorno de forma siendo un prerrequisito en este caso el maquinado con maquinas de tres ejes (6).

En el maquinado de superficies complejas con la utilización de herramientas *Ball Nose* la velocidad de corte varía desde un valor mínimo en la línea central de la herramienta provocando un fenómeno de aplastamiento del material removido, hasta un

mecanismo de corte perfecto cuando corta el diámetro máximo de la herramienta alcanzando así los valores mayores de velocidad (4, 5) lo cual muestra que el aumento de la velocidad disminuye los valores de rugosidad Ra por la disminución de la longitud de contacto herramienta / viruta y la disminución de las fuerzas de corte, disminuyendo en consecuencia las deformaciones.

Las superficies complejas requieren la programación de sucesivas trayectorias separadas por un desplazamiento lateral “ae” normalmente denominado como *off set*. Durante cada trayectoria, el punto de contacto de la arista de corte cambia constantemente debido a la forma específica del perfil de la pieza. Condiciones desfavorables de corte llevan a una calidad superficial deficiente y al desgaste de la herramienta observándose que la rugosidad es particularmente sensible al avance por diente (3). Según (9) el parámetro Ra de rugosidad es uno de los parámetros más utilizados por el sector de moldes y matrices para caracterizar el acabado superficial. Los principales factores que afectan la rugosidad Ra son la velocidad de corte, el avance por diente y la longitud lateral de corte.

44 Variación de la rugosidad y de la dureza en el maquinado de formas complejas en aceros endurecidos utilizando altas velocidades de corte.

Según (7), las peores rugosidades son obtenidas cuando se realiza el fresado descendente, independiente de la condiciones de corte. Las trayectorias descendentes generan valores de rugosidad mayores que en el fresado ascendente, y de forma general el maquinado con movimientos ascendentes y descendentes denominado *raster* no es aconsejable en términos de obtener un óptimo valor de rugosidad. El fresado solo con el sentido ascendente es generalmente preferible para obtener un mejor acabado.

El objetivo de este estudio es observar el comportamiento de la rugosidad de un cuerpo de prueba con una superficie de $\frac{1}{4}$ de circunferencia y relacionar el acabado con los valores de dureza HRC medidos perpendiculares a la trayectoria de la herramienta, además de observar si ocurre la capa blanca en los aceros templados para las condiciones de corte ensayadas.

2. Metodología.

Los ensayos de fresado fueron realizados en un centro de maquinado Hermle 850 U con rotación máxima de 24000 rpm y 15 kW de potencia. Los cuerpos de prueba empleados fueron de acero AISI H13 y AISI D2 con dimensiones de 100 x 48 x 14 mm. (Figura 1a).



Figura 1 Detalle del cuerpo de prueba: (a) forma del cuerpo de prueba; (b) diámetro medio utilizado como punto de contacto de la herramienta para el cálculo de la velocidad de corte media.

El sentido del corte utilizado en los ensayos de fresado fue el *raster*, con movimientos ascendentes y descendentes en $2 \frac{1}{2}$ ejes. Las herramientas de corte empleadas fueron *Ball Nose* con diámetro de 16 mm y

recubrimiento de (TiAl)N y CBN todas con dos aristas de corte. Los valores de velocidad de corte (v_c), la longitud lateral (a_a) y la velocidad de avance (v_f) son especificados en la Tabla (1).

Los valores de rugosidad fueron medidos con un rugosímetro Mitutoyo surfstest 201. El parámetro de rugosidad evaluado fue Ra con cut off de 0.8 mm. Las mediciones de rugosidad fueron realizadas en el sentido perpendicular al movimiento de la herramienta en seis regiones distribuidas radialmente y equidistantes en 18° , (Figura 2). Fueron realizadas tres replicas para cada medición. La primera medición fue realizada en la parte superior del cuerpo de prueba a 1mm del extremo donde trabajó el centro de la herramienta y la sexta a 90° , también a 1mm del extremo inferior, donde ocurrió la mayor velocidad de corte, cortando la parte periferia de la herramienta.

Las mediciones de durezas y microdurezas fueron realizadas en la misma línea donde fueron medidos los valores de rugosidad siendo utilizado un durómetro LECO modelo RT 240, la caga para la dureza Rockwell fue de 150 Kg. con penetrador cónico de diamante. Las medidas de microdureza fueron realizadas en la escala Knoop con carga de 100 gf. y penetrador de diamante. Se realizaron tres mediciones de dureza en cada región del cuerpo de prueba.

Las microdurezas fueron realizadas en el sentido transversal del cuerpo de prueba en las mismas direcciones en que fueron realizadas las mediciones de rugosidad y los ensayos de dureza HRC, (ver Figura 3). Las regiones A, B, C, D y E son las regiones donde se realizaron las mediciones de micro-dureza transversal.

La distancia radial entre los puntos de medición en la región E fue de $5 \mu\text{m}$, el número de experimentos fue disminuido en 1 en cada etapa de realización de las microdurezas, finalizando con una muestra en la región central. En las regiones A y D fue realizada solo una línea de medición de micro-dureza paralela al perfil maquinado a $5 \mu\text{m}$ de distancia del extremo. En las regiones B y C, fueron realizadas las mediciones de micro-durezas mas alejadas de la superficie maquinada a 2,5 milímetros del extremo del cuerpo de prueba en solo dos líneas de medición.

Tabla 1. Valores de velocidad de corte (v_c), longitud de corte (a_a) y la velocidad de avance (v_f) empleados en los ensayos.

Código de las Herramientas	Diámetro efectivo [mm]	ae [mm]	Vc [m/min]	Vf [mm/min]	Tipo de Recubrimiento
R216.42 16030 – AK32G 1610 ¹	11,18	0,10	200	1139	(TiAl)N
F1827R.Z.16.Z2.08 WXK15 ²	11,18	0,10	200	1139	(TiAl)N
F1827R.Z.16.Z2.08 WCB 80 ³	11,18	0,10	400	2278	Placa de CBN

- Herramienta de punta esférica con ángulo de hélice de 30° ;
- Herramienta de punta esférica con ángulo de hélice de 0° ;
- Herramienta de punta esférica con ángulo de hélice de 0° y utilización de una placa de CBN.

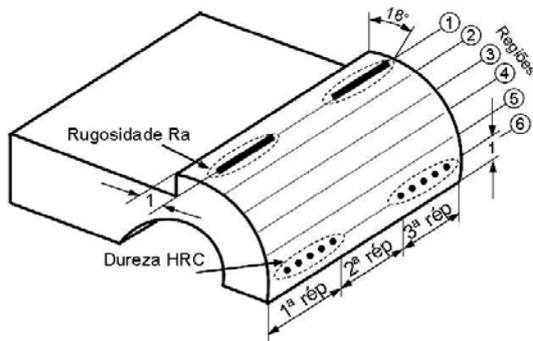


Figura 2. Detalle de los puntos de medición de dureza y rugosidad en el cuerpo de prueba.

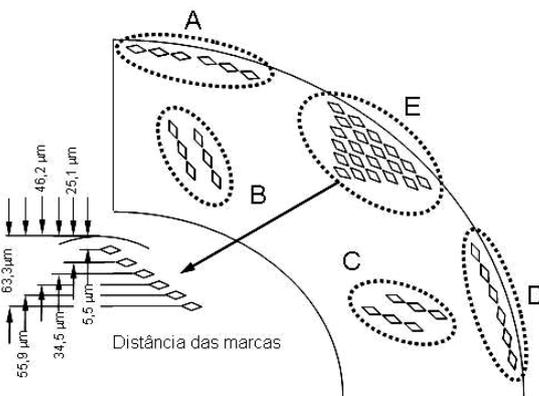


Figura 3. Detalle de los puntos de medición de las micro-durezas en el cuerpo de prueba.

3. Análisis de los resultados.

3.1 Valores de rugosidad Ra.

La tabla (2) muestra los valores de rugosidad Ra para el acero AISI H13 con la herramienta R216.42 16030 – AK32G 1610, la tabla (3) muestra los valores de rugosidad con la herramienta F1827R.Z.16.Z2.08 WXXK15 y la tabla (4) muestra los valores de rugosidad con la herramienta F1827R.Z.16.Z2.08 WCB 80 respectivamente.

Tabla 2. Valores de la rugosidad Ra para el acero AISI H13 con la herramienta R216.42 16030 – AK32G 1610

Acero AISI H13 - R216				
Región	1° ensayo	2° ensayo	3° ensayo	Media Ra [µm]
	Ra [µm]	Ra [µm]	Ra [µm]	
1	0,29	0,52	0,89	0,46
2	0,83	0,67	0,36	0,49
3	0,32	0,33	0,55	0,57
4	0,62	0,29	0,93	0,61
5	0,45	0,80	0,57	0,61
6	0,63	0,60	0,46	0,56

Tabla 3. Valores de rugosidad Ra para el acero AISI H13 con la herramienta F1827R.Z.16.Z2.08 WXXK15

Acero AISI H13 – WXXK15				
Región	1° ensayo	2° ensayo	3° ensayo	Media Ra [µm]
	Ra [µm]	Ra [µm]	Ra [µm]	
1	0,40	0,87	0,64	0,64
2	0,52	0,30	0,61	0,48
3	1,07	0,58	0,31	0,65
4	0,89	0,85	0,56	0,77
5	1,13	0,21	0,78	0,71
6	0,96	0,48	0,78	0,74

Tabla 4. Valores de rugosidad Ra para el acero AISI H13 con la herramienta F1827R.Z.16.Z2.08 WCB 80

Acero AISI H13 - WCB80				
Región	1° ensayo	2° ensayo	3° ensayo	Media Ra [µm]
	Ra [µm]	Ra [µm]	Ra [µm]	
1	1,16	0,44	1,07	0,89
2	1,21	0,55	0,83	0,86
3	0,86	0,65	1,24	0,92
4	0,68	0,83	0,65	0,72
5	0,80	1,06	1,10	0,99
6	0,72	0,56	0,62	0,66

En las tres tablas se puede observar un aumento de la rugosidad Ra para los ensayos realizados con las tres herramientas con el acero AISI H13. Los valores de rugosidad tienen una tendencia al aumento para las diferentes herramientas, la herramienta R216.42 16030 – AK32G 1610 presenta valores menores de rugosidad que la herramienta R216.42 16030 – AK32G 1610, esto se puede explicar debido a la geometría de las dos herramientas. La herramienta R216.42 16030 – AK32G 1610 presenta ángulo de hélice de 30°, ángulo de ataque de 1,5° y el ángulo de salida de 5°. De esa forma la formación de la viruta se facilita proporcionando una mejor rugosidad comparado con la herramienta F1827R.Z.16.Z2.08 WCB 80 que presenta ángulo de la hélice y de ataque igual a 0°.

Además de esto el aumento de la rugosidad también se observa cuando se comparan los resultados de la primera región con los de la sexta región donde los ensayos con la herramienta F1827R.Z.16.Z2.08 WCB 80 se obtienen mayores valores de rugosidad debido al aumento de la velocidad de corte y consecuentemente de las vibraciones del sistema. El hecho de que en todas las primeras regiones los valores de rugosidad son menores a pesar de presentar valores de velocidad mas bajas y el proceso estar ocurriendo próximo al centro de la herramienta, lo cual se debe al fenómeno de aplastamiento del material que se presenta de forma

imperfecta, pero proporciona un deslizamiento de la viruta/arista de corte que tiene una tendencia a mejorar el acabado.

La Figura 4 muestra el comportamiento del perfil de rugosidad Ra para el acero AISI D2 con la herramienta R216.42 16030 – AK32G 1610, la Figura 5 muestra los valores de rugosidad con la herramienta F1827R.Z.16.Z2.08 WXX15 y la Figura 6 muestra los valores de rugosidad con la herramienta F1827R.Z.16.Z2.08 WCB 80. En los gráficos se observa un comportamiento de aumento de de la rugosidad en la región 1 hasta la región 4, así como ocurrió con los valores de rugosidad Ra para el acero AISI H13, pero en las dos ultimas regiones se muestran con valores de la rugosidad menores que en los ensayos con el acero AISI H13. En el caso de la herramienta R216.42 16030 – AK32G 1610, (Figura 4) la disminución fue significativa en la región 6 comparada con la región 1. Para la herramienta R216.42 16030 – AK32G 1610 ocurre la misma disminución de la rugosidad Ra. En tanto para la herramienta F1827R.Z.16.Z2.08 WCB 80 los valores de la región 6 se muestran un poco por encima de los valores de la región 1.

3.2 Valores de Dureza en la escala Rockwell C.

La tabla (5) muestra los valores de Dureza HRC para los aceros AISI H13 y D2 medida en las 6 regiones donde fueron realizadas las mediciones de Rugosidad Ra. Se realizaron tres mediciones de dureza y determinado el valor medio de la dureza a lo largo del cuerpo de prueba. También fue calculado nuevamente el valor medio de las 6 regiones obteniendo así un valor final para el cuerpo de prueba y para cada una de las tres herramientas.

Se observa que para los dos aceros considerándose los valores de la escala HRC, los valores de dureza no se alteran después del maquinado en relación con las durezas iniciales. Los valores de dureza para el acero AISI H13 se mantuvieron dentro del rango inicial de 50 HRC y los valores de dureza para el acero AISI D2 estuvieron en rango de 53 HRC. Se nota lo mismo que en la región 1 donde ocurre un mecanismo imperfecto de cizallamiento de la viruta, generando un fenómeno de aplastamiento en la región de corte, los valores de dureza no fueron significativamente mayores.

3.3 Micro-dureza en la escala Knoop.

La Tabla (6) muestra los valores de la micro-dureza de las 5 regiones del cuerpo de prueba, se observa que en la región E, en el acero AISI H13 la medida de los valores es igual a 610,3 Hk correspondiendo a 63,2 HRC en la capa externa a 5,5 μm . Se observa una tendencia a un ligero aumento para 596,1Hk (64 HRC) en la capa más interna a 63,3 μm . Las mismas variaciones ocurren en las demás regiones definidas en el cuerpo de prueba, como las regiones B y C, donde

prácticamente no ocurre ninguna variación significativa. En las regiones A y D también se observan pequeñas variaciones sin existir una tendencia al aumento o disminución de la micro-dureza.

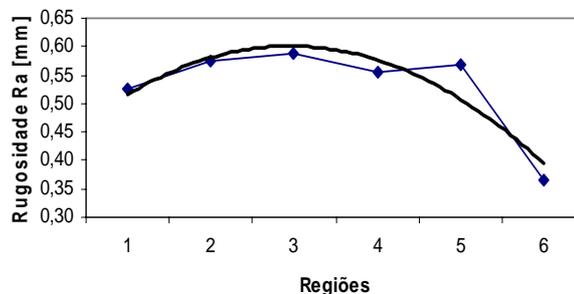


Figura 4. Comportamiento de la rugosidad Ra en las 6 regiones del cuerpo de prueba de acero AISI D2 con la herramienta R216.42 16030 – AK32G 1610.

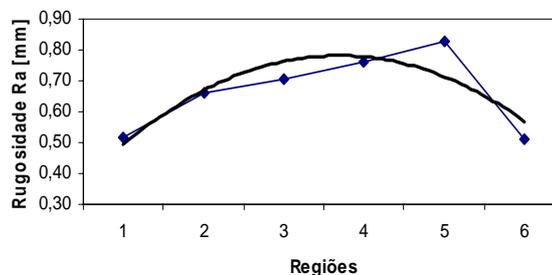


Figura 5. Comportamiento de la rugosidad Ra en las 6 regiones del cuerpo de prueba de acero AISI D2 con la herramienta F1827R.Z.16.Z2.08 WXX15.

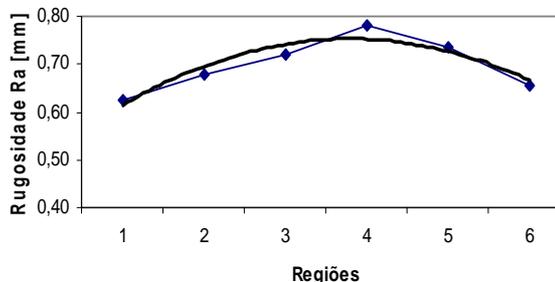


Figura 6. Comportamiento de la rugosidad Ra en las 6 regiones del cuerpo de prueba de acero AISI D2 con la herramienta F1827R.Z.16.Z2.08 WCB 80.

Las variaciones ocurridas en los valores de micro-dureza para el acero AISI D2 también se presentaron de forma aleatoria sin existir la posibilidad de afirmar la ocurrencia de una tendencia significativa de la micro-dureza en las regiones donde fueron realizadas las mediciones.

Esto muestra que los efectos del calor generado durante el fresado no provocaron variaciones estructurales en las capas superficiales del cuerpo de prueba, demostrando que no ocurren alteraciones de los valores de dureza inicial del tratamiento térmico original. Los valores de microdureza encontrados en el

4. Conclusiones.

De acuerdo con los resultados obtenidos de dureza Rockwell HRC, micro-dureza Knoop y rugosidad Ra en el fresado de los aceros AISI D2 y AISI H13 se puede concluir que:

1. Los valores de rugosidad tienen una tendencia al aumento debido al cambio de las herramientas ya que la herramienta R216.42 16030 – AK32G 1610 presenta valores de rugosidad menores que la herramienta F1827R.Z.16.Z2.08 WCB 80 y F1827R.Z.16.Z2.08 WXK 15.
2. Se observa que en todas las primeras regiones de los cuerpos de prueba los valores de rugosidad fueron menores a pesar de utilizarse velocidades de corte más bajas y el proceso estar ocurriendo próximo al centro de la herramienta.
3. Se observa en el caso de la herramienta R216.42 16030 – AK32G 1610 que ocurre una disminución significativa de la rugosidad en la región 6 comparada con la región 1. Para otras herramientas ocurrió la misma disminución de la rugosidad Ra, sin embargo los valores de la región 6 se mostraron un poco por encima de los valores de la región 1.
4. Considerando la escala HRC se observa que para los dos aceros los valores de dureza no se alteraron después del maquinado en relación con las durezas iniciales. Los valores de dureza para el acero AISI H13 se mantuvieron dentro de la media del rango de 50HRC y los valores de dureza para el acero AISI D2 se mantuvieron en el rango de 53 HRC.
5. En relación con los valores de micro dureza en la escala Knoop fue observada una aleatoriedad de los valores en todas las regiones donde fueron realizados los experimentos. En función de los valores encontrados no se puede afirmar que ocurrió una tendencia de aumento

o disminución de la microdureza en la dirección radial del cuerpo de prueba.

5. Referencias.

1. Baptista, R; Simões, J. F. A., 2000, "Three and five axes milling of sculptured surface". *Journal of Materials Processing Technology*. V.103, p. 398-403.
2. Brandão, L.; Coelho, R.T. 2005, "Modelo teórico da condução de calor na usinagem de materiais endurecidos utilizando altas velocidades de corte". *Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, Joinville, SC*.
3. Chen, J. S.; Huang, Y. K; Chen, M. S., 2005, "A study of the surface scallop generating mechanism in the ball end milling process". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. V. 45, p. 1077-1084.
4. Lebrun, J.L.; Salah, N.B.; Sai Bouzid, W., 2001; "Influence of Machining by finishing milling on surface characteristics". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. V. 41, p. 443-450.
5. Kim, B. H.; Chu, C. N., 1994, "Effect of the cutter mark on surface roughness and scallop height in sculptured surface machining". *Computer Aided Design*, v. 26, n. 3, Mar.
6. Klocke, F. Reuber, M., 1998, "Process monitoring in mould and die finishing milling operations challenges Approaches". *Aachen University of Technology*, 1998.
7. Toh, C. K., 2004, "Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel". *Precision Engineering*, v28, p 386-398.
8. Trent, E.M. (1996). *Metal Cutting*, 3. ed, Oxford: Butterworth-Heinemann.
9. Vivancos, J. et. al., 2005, "Analysis of factors affecting the high-speed side milling of hardened die steels". *Journal of Materials Processing Technology*. v. 162-163, p.696-701.

Variation of roughness and of the hardness in machining of complex forms in hardness steel using high speed cutting.

Abstract.

This work evaluated the influences of cutting speed variation in machining with High Speed Cutting on complex surface forms. Work pieces of AISI D 2 e AISI H13 with hardness of 53 and 50 HRC, respectively with a quarter of circumference was milled. Tests were carried out in a vertical machining centre using the raster strategy and Ball-Nose tool. The roughness values and hardness HRC were measured perpendicular the cutting direction in six different regions. The results show that the regions where occur the contact of minimum tool diameter, nearest to tool centre line and the maximum diameter contact point show the lower values of roughness. During the tests, it did not occur significantly modifications in the values of HRC hardness and the white layer not was formed. Considering the values of micro-hardness Knoop, a radial variation of surface hardness could be not observed.

Key words: Roughness Ra; high speed cutting; molds and dies, hardness HRC.