Efectos de la variación de sobremedida debido al uso de 2 ½ ejes en la operación de acabado.

R. Lemes Capla*, A. Fagali de Souza, L. Cardoso Brandão***,**
R. Teixeira Coelho**, F. Martínez Aneiro*****.**
*Escuela de Ingenieria de São Carlos - Universidad de São Paulo,
Trabalhador Sãocarlense Avenida, 400 – São Carlos – São Paulo
**Sociedad Educacional de Santa Catarina,
Albano Schmidt calle, 3333 – Joinville – Santa Catarina
***Universidad Federal de São Joao del Rei, Frei Orlando Square,
140 – São João del Rei – Minas Gerais
****Escuela de Ingenieria de São Carlos – Universidad de São Paulo
Trabalhador Sãocarlense Avenida, 400 – São Carlos – São
***** Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
Calle 114 esq. 127, Marianao 15, Ciudad de la Habana, Cuba
fmartinez@mecanica.cujae.edu.cu

(Recibido el 11 de agosto de 2007; aceptado el 16 de octubre de 2007)

Resumen

En el fresado de moldes y matrices usando una operación de 2 ½ ejes da como resultado una superficie con escalones, en forma de escalera, particularmente en el desbaste con una fresa de cabeza plana. El valor teorico del sobreespesor a cortar en el acabado es usualmente fijado por el CAM y no tiene en cuenta este exceso de material dejado en la operación de desbaste. En general esa variacion significativa de la sobremedida es común y debe ser cortado en la operación de acabado. En el presente trabajo se aplican operaciones de corte con altas velocidades de corte (High Speed Cutting) en una pieza que contiene diferentes superficies y angulos de inclinacion 75, 45 y 7°. Inicialmente la pieza fue desbastada con una fresa de cabeza plana de 12 mm de diámetro con bordes rectos afilados. Dos fresas de cabeza esfericas con 12 y 6 mm de diámetro fueron probadas con 75 y 45 mm de voladizo desde el soporte. La operación de acabado se realizo fresando en direcciones ascendente y descendente en las tres inclinaciones. Los valores de acabado superficial fueron comparados teniendo en cuenta los dos valores de voladizo y manteniendo constante todos los demás parametros de fresado. Los peores valores de acabado ocurrieron con el voladizo mayor, independiente de la inclinación. Los valores de acabado fueron ligeramente superiores que los esperados para una operación de acabado, sin embargo, importantes comparaciones pueden realizarse con los valores de los resultados. Tambien fue verificado que en algunos casos el corte descendente produce mejor acabado, comparado con el corte ascendente.

Palabras claves: Acabado; sobreespesor; fresado ascendente y descendente; alta velocidad de corte; moldes y matrices.

1. Introducción.

La tecnología de maquinado utilizando altas Velocidades de Corte ha sido muy atractiva en las operaciones de fresado de moldes y matrices. Trabajos recientes [2, 3] demuestran la potencialidad de esta tecnología en este sector. En el maquinado de moldes y matrices con formas complejas en 3D las operaciones son generalmente iniciadas en 2 ½ ejes, a partir de un bloque prismático de material. En esta operación la sobremedida a cortar se planifica de acuerdo con la operación de acabado. Sin embargo esta sobremedida es considerada por el sistema CAM como homogénea, sobre todo el perfil final y hay un exceso de material dejado después de la operación de desbaste que no puede ser eliminado debido a las limitaciones geométricas del contacto entre la herramienta y la superficie final [4].

Este exceso de material puede variar en función de tres factores: profundidad de corte (a_p); grado de curvatura, o inclinación de la superficie y la geometría de la herramienta [8]. Sin embargo muchos de los sistemas CAM actuales utilizan sofisticados algoritmos para identificar estas áreas con el propósito de minimizar el problema, esto es algo que siempre ocurre

© 2008 – Ediciones Mecánica

en la producción secuencial de moldes y matrices. Variaciones grandes en el exceso de material tales como las formas escalonadas, pueden producir variaciones de forma y dimensiones.

Este hecho puede ser importante con el uso de altas velocidades de corte (HSC), ya que el resultado final de tal proceso se espera que sea superior a los procesos convencionales [5]. Esta variación comienza cuando los bordes cortantes encuentran mayores profundidades de corte, provocando fuerzas de corte mayores en la operación de acabado, flexionando la herramienta. La rigidez de la herramienta puede ser comparada con una barra empotrada sometida a una fuerza en su extremo. La flexión de la herramienta es directamente proporcional a su longitud e inversamente a su diámetro [6]. Por otro lado, cuando la herramienta comienza a cortar puede excitar la frecuencia natural de la estructura que responde a la excitación produciendo una superficie ondulada, si el sistema no puede absorber la energía, este se convierte en inestable y las vibraciones pueden incrementarse exponencialmente hasta que se rompe la herramienta, o produce una calidad superficial peor [1]. Una pieza de acero AISI P20 fue utilizada para estudiar el efecto de la variación de sobremedida debido al escalonamiento dejado por el desbaste en la operación de acabado. La pieza utilizada para las pruebas contiene tres superficies con diferentes ángulos y fueron usadas dos fresas de cabeza esférica con diámetros diferentes y con dos longitudes diferentes de voladizo en condiciones de corte de acabado.

Trabajo experimental.

La Figura 1 muestra las tres superficies con diferentes ángulos de inclinación. Estas superficies se definen como: superficie “A” con 75º; superficie “B” con 45º y superficie “C” con 7º todas con referencia al plano horizontal.

Las dimensiones de la pieza son de 80 mm x 50 mm x 70 mm de acero AISI P20 con 30 HRc. Inicialmente se desbasto desde un bloque cúbico, produciéndose la forma de la Figura 1. La selección de este material se debió a su amplia variedad de aplicaciones en la industria de moldes y matrices. Los detalles de las herramientas utilizadas en las operaciones de desbaste y acabado se muestran en las Tablas 1 y 2 y figura 2 .

Los ensayos se efectuaron en un centro de maquinado con velocidad de rotación máxima de 24000 rpm y 15 kW de potencia en el motor principal

Figura 2. Aspecto general de las herramientas utilizadas en los ensayos.

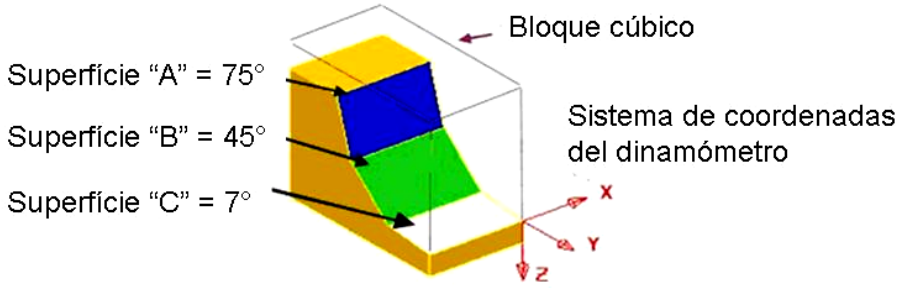


Figura 1. Geometría de la pieza

Tabla 1. Detalles de las herramientas para desbaste y acabado.

Diámetro [mm]	Operación	Ángulo de hélice (º)	Longitud total [mm]	Longitud de corte [mm]	Número de bordes cortantes	Recubrimiento
6	Acabado	30	57	10	2	(TiAl)N
12	Acabado	30	83	22	2	(TiAl)N
12	Desbaste	30	73	16	4	(TiAl)N

Tabla 2. Parámetros de maquinado para desbaste y acabado.

Maquinado	Características de las herramientas	a_e [mm]	a_p [mm]	rot. [rpm]	f_z [mm]	Vc [m/min]	método
Desbaste	Fresa cabeza Ø 12 mm, 4 bordes cortantes	3,0	0,5	2700	0,10	100	Arriba/ Abajo
Acabado	Fresa esférica Ø12mm, 2 bordes cortantes	0,2	0,2	10000	0,08	376	Abajo
Acabado	Fresa esférica Ø 6 mm, 2 bordes cortantes	0,2	0,2	10000	0,08	188	abajo

La fuerza de flexión fue medida con un dinamómetro KISTLER, modelo 9272, usando una tarjetas PCMCIA 16XE con el programa de procesamiento Lab View. La rugosidad superficial fue determinada con Ra y los valores medidos con un rugosimetro Mytutoyo modelo SJ201. La rugosidad fue medida perpendicular a la dirección del avance y la textura superficial fue evaluada por medio de imágenes con una cámara digital en un microscopio óptico.

2. Resultados y análisis.

2.1. Sobremedida resultante de la operación de desbaste.

La pieza fue originalmente desbastada con una fresa de cabeza plana de 12 mm. Consecuentemente, la superficie tiene escalones, en forma de escalera, que serán eliminados por la operación de acabado. La Figura 3 muestra el aspecto de las tres diferentes superficies en la pieza.

El valor teórico de la sobremedida a cortar, introducida y calculada por el programa CAM, fue de 0,2 mm. El contacto de la herramienta y la pieza es definida en función de la superficie inclinada, la geometría de la herramienta (circulo), la sobremedida y la dirección de fresado. La Figura 4 muestra un ejemplo del contacto de la herramienta y la pieza utilizando una fresa de esférica de 6 mm en la superficie “B”. También puede verse la diferencia entre la sobremedida teórica y la real. Durante la operación de acabado hay una importante variación de la profundidad de corte y por tanto una variación de las fuerzas de corte que pudieran causar flexión. Generalmente, para evitar esa variación, las operaciones de semi-acabado se ejecutan con fresas más rígidas, mayores diámetros y valores del voladizo de la herramienta tan pequeños como sea posible.

Basado en la figura 4, se puede notar la variación importante del diámetro efectivo de corte. Por ejemplo, en la dirección de fresado ascendente el radio de contacto cambia entre 2,9 y 2 mm (herramienta de 6 mm diámetro) y en el fresado descendente el cambio es entre 1,9 y 0,5 mm. Estas variaciones son incorporadas a la sobremedida de 0,2 mm en el perfilado de acabado.

2.2. Análisis de la calidad superficial.

La Figura 5 muestra, los valores de rugosidad Ra para los diferentes diámetros de herramientas, longitudes en voladizo y superficies de la pieza.

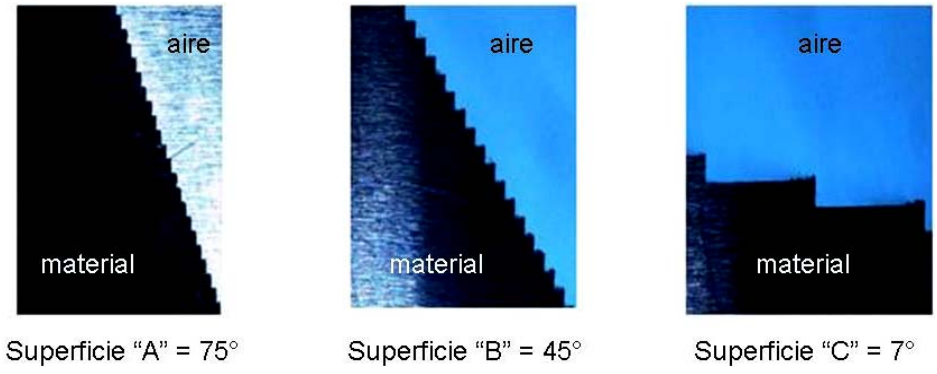
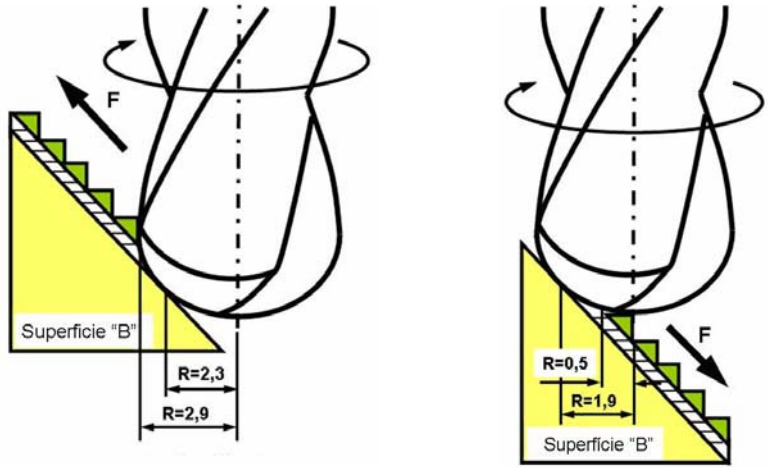
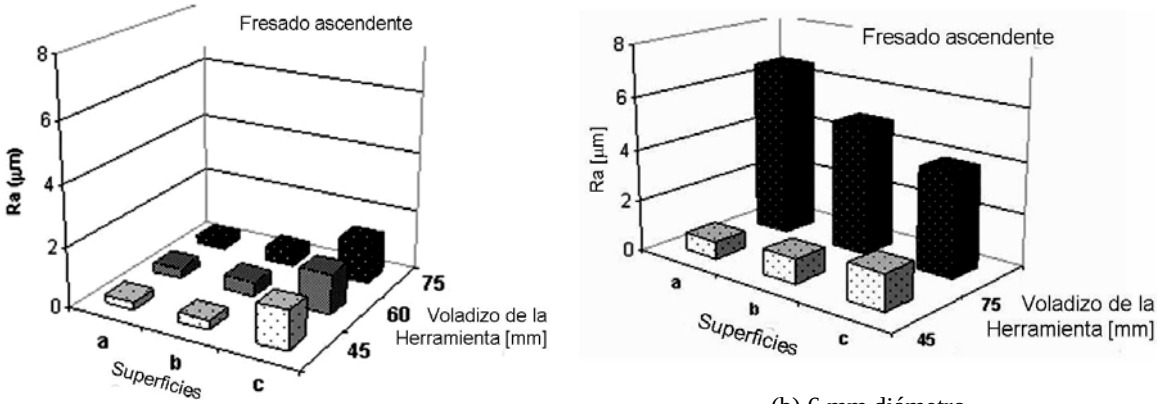


Figura 3. Superficies resultantes a diferentes ángulos.



(a) Fresado ascendente (b) Fresado descendente

Figura 4. Contacto de la herramienta en función de la dirección de fresado



(a) 12 mm diámetro (b) 6 mm diámetro

Figura 5. Rugosidades Ra de acuerdo a las diferentes longitudes en voladizo, diámetros de herramienta y superficies de hla pieza.

La variación de los ángulos de la superficie tienen una influencia menor en la rugosidad superficial. El área central de la herramienta donde la velocidad de corte es cero, es la región mas critica cuando se usan fresas esféricas porque la viruta en el lugar del corte, se obtiene por deformación plástica con elevada intensidad de deformación, especialmente en el plano próximo a los 90 grados con eje de rotación. Adicionalmente, las virutas cortadas en el centro de la herramienta también es más crítico debido al pequeño espacio en la superficie de salida [6]. Por lo tanto, los valores mas pequeños de rugosidad se obtienen con altas velocidades de corte y ángulos de salida positivos, ambos se observan en la superficie "A". Con el incremento de la longitud en voladizo, un pequeño incremento de la rugosidad Ra fue verificado para la herramienta de 12 mm de diámetro. Esto puede deberse a una tendencia de inestabilidad dinámica del husillo. Solamente un experimento fue realizado con una herramienta de 6 mm en fresado descendente.

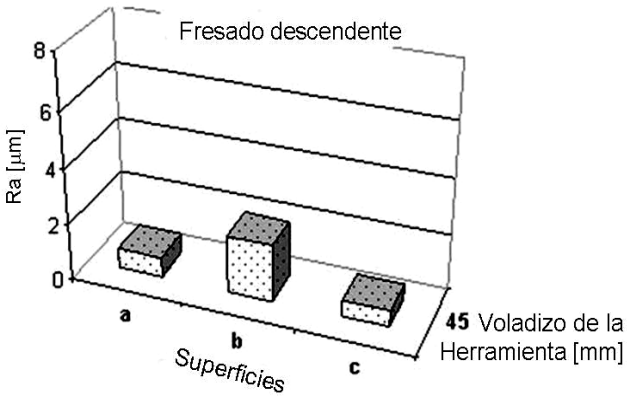


Figura 6. Rugosidad Ra obtenida con la fresa de 6 mm (corte descendente).

En los experimentos realizados con el corte descendente la rugosidad es casi la misma. El fresado ascendente es preferible para elevados ángulos de la superficie, donde los escalones no son muy altos y el efecto del corte, con la parte central de la herramienta puede ser evitado. Este efecto es mucho mas fuerte en planos próximos a la horizontal produciendo picos lo cual incrementa la rugosidad [7]. La Figura 7 muestra el aspecto del desgaste en la herramienta de 6 mm con longitud de voladizo de 75 mm.

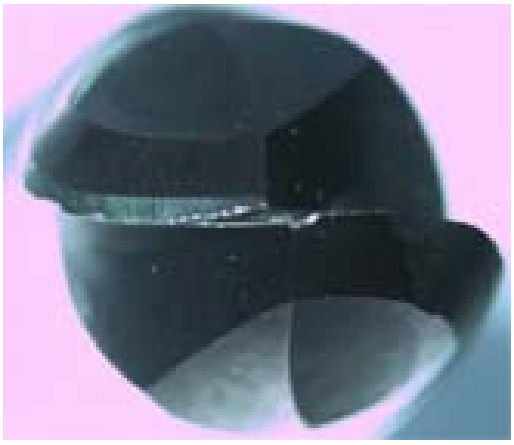


Figura 7. Desgaste de la herramienta generado por la inestabilidad del proceso.

En superficies muy próximas con la horizontal, la mejor rugosidad fue lograda con el corte descendente, al compararla con el corte ascendente, como se muestra en la Figura 8. Esto sucede porque en el corte descendente la herramienta recibe la menor variación de la profundidad de corte, descendiendo más suavemente la pendiente.

2.3. Mediciones experimentales de la rigidez estática de la herramienta.

Para estimar la rigidez estática de la herramienta, ella fue presionada estáticamente contra la superficie fresada, con incrementos de 0,01mm cada vez. En la figura 9 se muestra un esquema del método utilizado. El desplazamiento de la herramienta fue medido con el sistema de coordenadas de la fresadora.

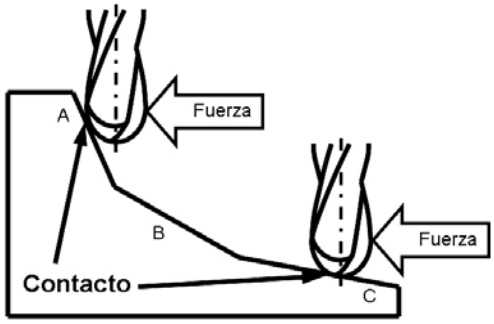


Figura 9. Muestra del método experimental utilizado para estimar la rigidez de la fresa.

Realmente ocurren menores deformaciones en la región de contacto, ya que la pieza no es muy dura (35 HRc), además de la influencia de la inclinación de la superficie por lo que un ligero deslizamiento ocurre en la superficie “C”. Sin embargo, el método da un primer indicio de la rigidez en el sistema del husillo. Por ejemplo, para la herramienta de 6 mm en la superficie “A” la diferencia en la longitud de desplazamiento con respecto a las superficies “B” y “C” es de 2,5 y 4 veces mayor de acuerdo con el cálculo teórico debido a que las alturas de los sobremedidas son mayores en esta zona. La Figura 10 muestra los resultados experimentales para la deformación de la herramienta de 6 mm.

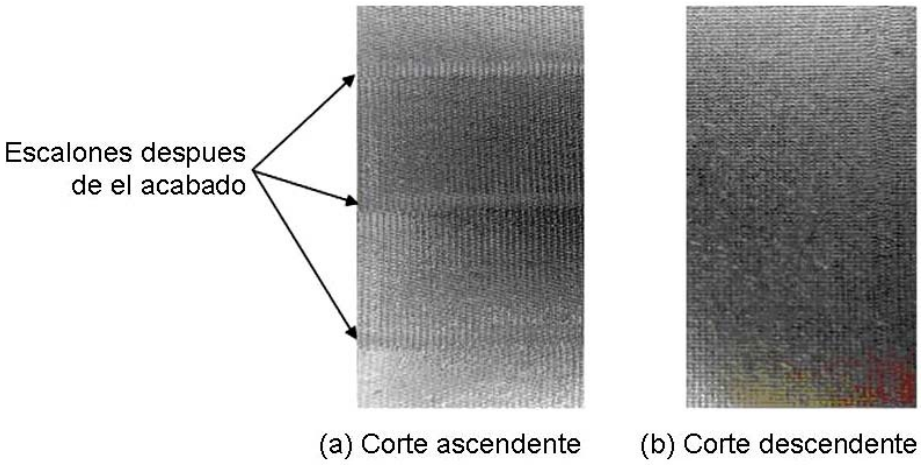


Figura 8. Acabado superficial obtenido en la superficie “C” (herramienta de 6 mm de diámetro y con voladizo de 45 mm)

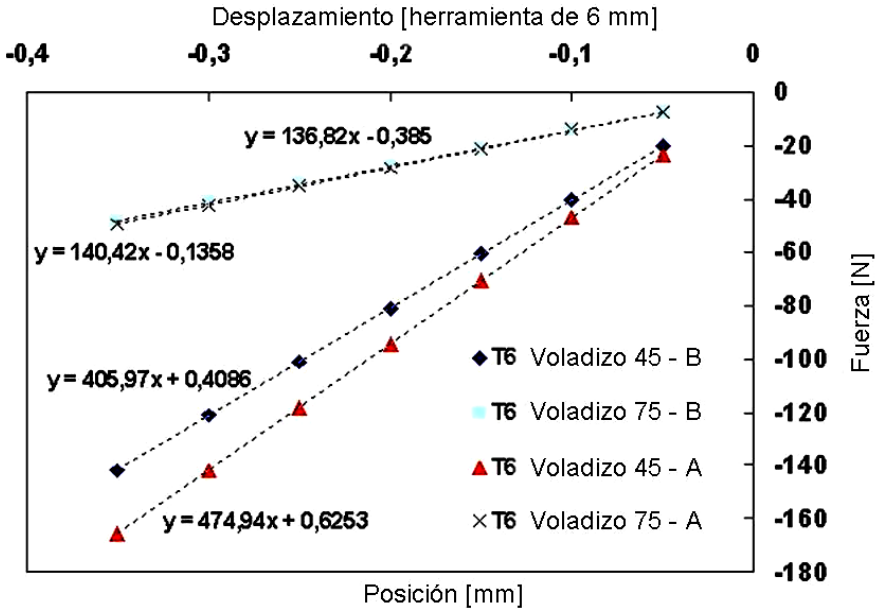


Figura 10. Resultado de las pruebas de rigidez para la herramienta de 6 mm.

Como era de esperar, la rigidez de la herramienta es mayor con voladizo de 45 mm que para 75 mm, en un factor aproximadamente de 3 veces. Se pudiera considerar teóricamente que la herramienta es una barra fija bajo la acción de fuerzas radiales debido al proceso de corte. Siendo así, al reducir el voladizo de 75 a 45 mm, se incrementa la rigidez en una proporción de una razón cúbica con la longitud. En las pruebas efectuadas el valor teórico es de 4,63 siendo mayor que los valores encontrados en los ensayos de rigidez. Esto se debe al fenómeno de que las mediciones incluyen la rigidez del sistema completo husillo/sistema de fijación/pieza y herramienta, ciertamente es menor y se comporta como una combinación de muelles "ideales".

Los valores de rigidez encontrados durante las pruebas, son menores que los calculados teóricamente, en un 87,5% para el voladizo de 75 y un 63,2% para el voladizo de 45 mm. La menor rigidez del sistema es cuando se trabaja con la herramienta de 6 mm y longitud de voladizo de 75 mm, en combinación con el corte interrumpido, típico del proceso de fresado y por las fuerzas variables, debido a los cambios de los espesores de las virutas, lo cual es, probablemente, responsable de los elevados valores de rugosidad Ra obtenidos en este caso. La baja rigidez provoca gran flexión debido a la acción de las fuerzas de corte. Como las fuerzas son variables en el tiempo, el sistema completo tiende a vibrar con una amplitud tal, que muchas veces coincide con los valores variables del espesor de viruta. El proceso de fresado es de corte interrumpido con una frecuencia que depende de los bordes cortantes, próximo a la frecuencia natural del sistema mecánico actuante.

Las Figuras 11, 12 y 13 muestran la forma de los errores del perfil de las tres superficies. Para cada superficie fueron medidos 100 puntos a la o largo de la longitud de la pieza. La Figura 10 muestra el perfil de la superficie "A", donde el mayor valor de error fue menor de 1µm para la herramienta de 6 mm y menos de 0,5µm para la de 12 mm. La Figura 11 muestra los valores de error de forma para la superficie "B", siendo menor que 0,5µm para todas las herramientas. A pesar de que aquí aparece una diferencia entre estos errores en ambas superficies, ellos pueden ser los mismos y las diferencias son del mismo orden de los errores de medición.

En la Figura 12 el error máximo de la superficie "C" es de 1,5 µm cuando el corte es con fresa 6 mm y 75 mm en voladizo. En esta superficie puede notarse también tres picos mayores, los cuales se deben a los tres escalones dejados en la operación de desbaste. Con la misma herramienta, combinado con el fresado ascendente, el incremento en las fuerzas de corte, debido al exceso de material, fueron las causas que provocaron la flexión la herramienta. El flexado causa picos de 1,5 µm, lo cual puede ser un valor significativo para algunas operaciones. En todas las demás condiciones de corte aun con el exceso de material puede ser cortado sin dejar errores mayores de 0,5µm.

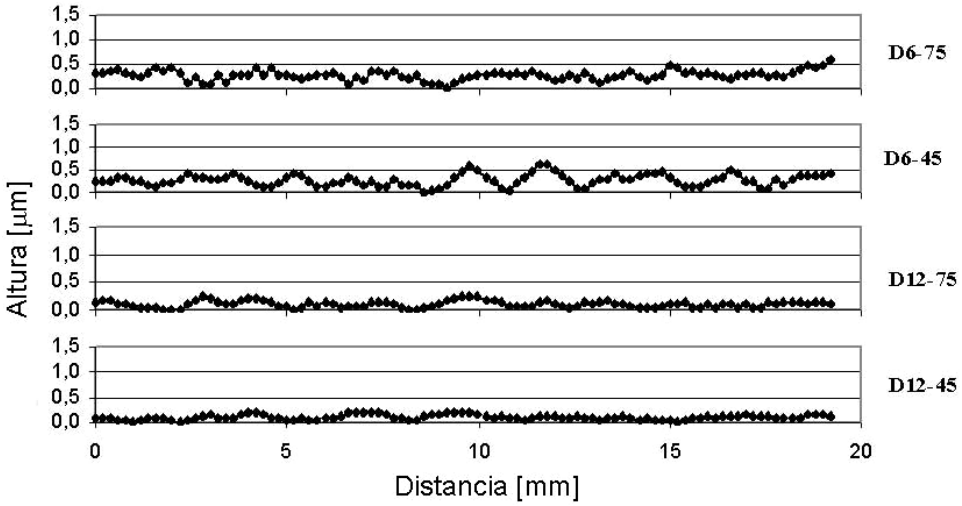


Figura 11. Error de forma en la superficie “A”.

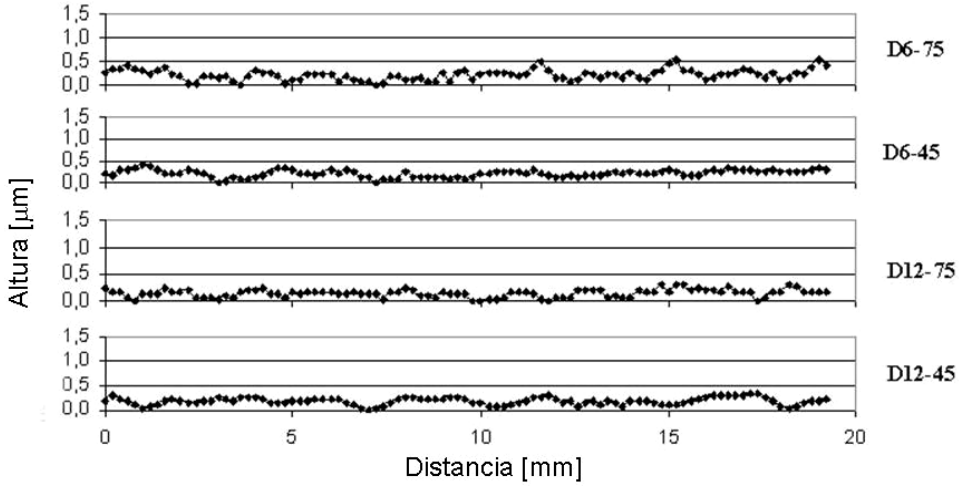


Figura 12. Error de forma en la superficie “B”

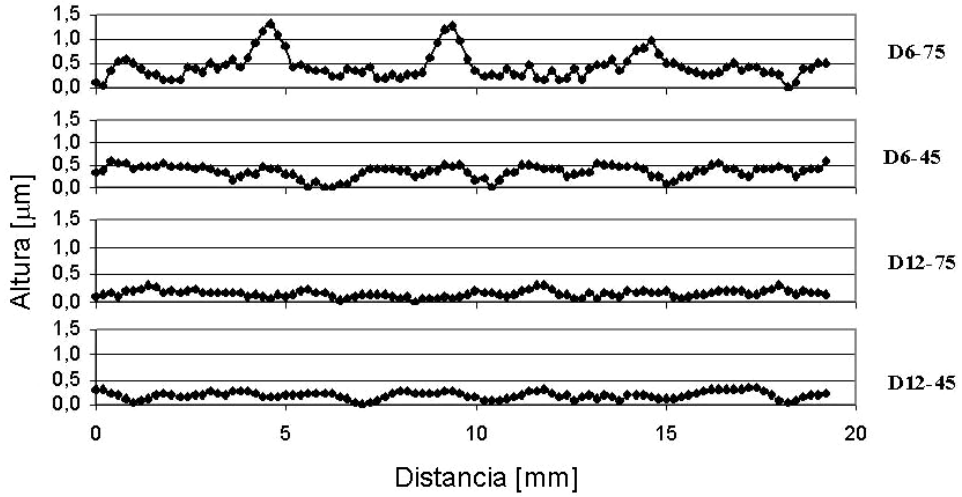


Figura 13. Error de forma en la superficie “C”.

3. Conclusiones.

El presente trabajo investigo experimentalmente algunos efectos de la sobremedida dejada por la operación de desbaste sobre el acabado de superficies fresadas, permitiendo dar las siguientes conclusiones iniciales:

1. En la operación de desbaste en superficies 3D complejas con una herramienta de cabeza plana utilizando Z operaciones, deja un exceso de material adicionalmente a la sobremedida teórica, cuyo volumen varía en función de la inclinación de la superficie. Con la menor inclinación con respecto al plano horizontal, la cantidad de sobremedida es mayor de acuerdo con la figura 3.
2. En el último fresado de aquellas superficies en operación de acabado el punto de contacto entre la pieza y la fresa esférica depende de la inclinación de la superficie. Esto causa una variación significativa en la velocidad efectiva de corte, con consecuencias importantes en el acabado de la superficie.
3. De la misma forma la dirección de corte, ascendente o descendente, altera significativamente la cinemática del corte, modificando el ángulo de contacto y la velocidad efectiva de corte. En el fresado descendente, dependiendo de la inclinación de la superficie, el punto de contacto puede acercarse peligrosamente al centro de la herramienta. Tal situación es muy perjudicial para la formación de la viruta debido a la baja velocidad efectiva de corte.
4. La rugosidad superficial próxima a 1,0μm Ra, puede ser baja lo cual depende completamente del diámetro de la herramienta de acabado y de la longitud del voladizo. Valores superiores, próximos a 6.0 μm Ra fueron obtenidos cuando se uso una fresa de 6 mm de diámetro combinada con 75 mm de voladizo. Valores bajos fueron también obtenidos con corte de 6 mm de diámetro herramienta con 45 mm de voladizo, para operaciones de fresado ascendente y descendente.
5. El método empleado para medir la rigidez de la herramienta mostró resultados efectivos menores que los calculados teóricamente, basados en una viga empotrada, tomando en consideración el sistema completo de rigidez. Si pudiera ser utilizada una pieza muy rígida, el método será aun más apropiado. El método sin embargo, demostró que puede existir una diferencia en rigidez significativa cuando se fresan superficies complejas en 3D, en la cual el punto de contacto en la fresa de cabeza esférica es variable. Esto es particularmente importante cuando se usan fresas de 6 mm de diámetro.
6. La baja rigidez en las fresas de cabeza de 6 mm de diámetro, combinado con mayores sobremedidas a cortar en la operación de acabado, son las principales causas de las variaciones dimensiónales en la superficie "C", teniendo el mismo modelo escalonado. Picos tan altos como de 1,5 μm, pueden ser significativas en algunas aplicaciones

4. Agradecimientos.

Los autores desean dar las gracias a FAPESP por el aporte de los fondos así como al Departamento de Ingeniería de Producción de São Carlos, EESC-USP

5. Referencias.

1. Altintas, Y., 2000, "Modeling approaches and software for predicting the performance of milling operations", In: CIRP 2000 Machining Workshop, v. 07, Sydney University of New South Wales.
2. Eberlein, W., 1999, "Modern CNC control systems for high speed machining", In: 5th International Scientific Conference on Production Engineering. Opatija, Croat.p. ii-108-ii121.
3. Finzer, T., 1998, "High speed machining of sculptured Surfaces in die and mold manufacturing", IN: SSM 98 Sculpetured Surface Conference, Machining Impossible Shape. Auburn Hills, Michigan, USA, p. 9-11.
4. Geist, J., 1999, "Influence of HSC– appropriate machining parameter on NC programming", In: Anais do 4° Seminário Internacional de alta tecnologia – Inovação na manufatura para ano 2000 , pg 57-68, ago 1999, UNIMEP.
5. Gomes, J.O., 2001, "Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado ABNT 420, na liga alumínio AMP8000 e na liga de cobre Cu-Be", (Tese) Tese de Doutorado - UFSC, Florianópolis.
6. SANDVIK, 1999, "Guia de aplicação: Fabricação de moldes e matrizes".
7. Saraiva, M., 2000, "Fresamento por regiões como uma alternativa na usinagem de cavidades para moldes de injeção através de sistema CAD/CAM", (Mestrado) Dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis.
8. Souza, A.F., 2001, "Análise das interpolações de trajetórias de ferramenta na usinagem HSC (high speed cutting) em superfícies complexas", 89p. (Mestrado) Dissertação de mestrado, UNIMEP, Piracicaba.

Effects of the over measure variation due to the use of 2 ½ axes in the finish operation.

Abstract.

In the molds and die milling using an operation of 2 ½ axes gives a surface as a result with steps, in stairway form, particularly in the roughing operations with a plane end milling cutter. The theoretical value of the metal to cut in the finish operation is usually fixed by the CAM and he doesn't take into account this excess material leave in the roughing operation. In general that significant variation of the excess material is common and it should be cut in the finish operation. Presently work is applied cutting operations with high speed cutting (High Speed Cutting) in a piece that contains different surfaces and angles of inclination 75, 45 and 7º. Initially the piece was cutting in roughing operation with an end mill of 12 mm of diameter with straight sharp flutes. The finish operation was carries out in up and down milling in the three inclinations. The values of roughness were compared, keeping take in account the two cantilever values and maintaining constant all the other milling parameters. The worse finish values happened with the biggest cantilever independent of the inclination. The finish values were lightly superior that the hopping ones for a finish operation, however, important comparisons can be carried out with the obtained values. It was also verified that in some cases the down cut produces better finish, compared with the up cut.

Key words: Finish; excess material, up and down milling, high speed cutting, molds and dies.