

RELACIÓN ENTRE LOS ESFUERZOS Y LA GEOMETRÍA DE HERRAMIENTAS DE METAL DURO INTEGRAL, EN EL FRESADO DE ACERO SAE 1060

G. Abate¹, V. Martynenko¹, P. Gayol², D. Martínez Krahmer^{1,2*}

(1) Máquinas y herramientas, INTI-Mecánica, Avenida General Paz 5445, Miguelete, Buenos Aires, Argentina.

(2) Tecnología Mecánica, Facultad de Ingeniería, UNLZ, Ruta 4 y Juan XXIII, Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina. e-mail: mkrahmer@inti.gob.ar

Abstract

The milling process is one of the most important operations, in regard to methods of material elimination by chip removal. The increase of requirements of precision and productivity, has led in recent years the development and use of carbide mills. These tools, due to their high mechanical strength and wear resistance, allow compliance these requirements. If there are lack of publications about cutting forces in turning, drilling and milling operations, in the latter process are substantially less numerous, and particularly, there is no information regarding carbide tools. This situation coupled with the influence of cutting forces in the tool life, show the interest to note what kind of geometric characteristics of mill cutters are the most influential. To perform the experiments, we used carbide mills with a diameter of 12mm, with two helix angles (nominal 30° and 45°), in two different machining conditions, without using lubrication. In those tools, we realize geometric surveys, to determine helix angle (F), core diameter (K), radial rake angle (A), width of the lateral strip (B), and radial clearance angle (D). The milled material was a drawing bar of square section SAE 1060 steel of 19mm by side. The tests were conducted on a CNC milling machine, while the cutting forces (F_y and F_z) were measured using a combination of a 3-component piezoelectric dynamometer, and a digital oscilloscope.

The results were analyzed statistically in order to determine the possible relationship between the magnitude of the F_y and F_z forces, with the geometry of the mills.

Firstly, in connection with the vertical force (F_z) we can affirm that we are not found evidence of any influence of the mills geometry on their magnitude.

In connection with the horizontal F_y force, we can be stated that the increase of the helix angle as the core diameter, produce an increased of the F_y effort. Regarding the radial clearance angle, it would require a larger number of tests to discern any significant difference, while the other geometric variables, didn't influence the measured effort.

Key words: geometry, milling, solid hard metal, SAE 1060 steel.

Resumen

El proceso de fresado, es una de las operaciones de mayor importancia, en lo que se refiere a los métodos de sustracción de material por arranque de viruta. El creciente aumento de los requerimientos de precisión y productividad, ha impulsado en los últimos años, el desarrollo y utilización de las fresas denominadas de metal duro integral. Estas herramientas, en razón de su elevada rigidez mecánica y resistencia al desgaste, permiten cumplir eficazmente estos requisitos. Si bien existen publicaciones sobre los esfuerzos de corte que resultan en operaciones de torneado, agujereado y fresado, las de este último proceso son sustancialmente menos numerosas, y en particular, no se dispone de información referida a herramientas de metal duro integral. Esta

situación sumada a la influencia de los esfuerzos de corte en la vida útil de la herramienta, deriva en el interés por observar que características geométricas son las más influyentes.

Para efectuar la serie de experimentos, se emplearon fresas de metal duro integral de 12mm de diámetro, con dos ángulos de hélice (valores nominales 30° y 45°), en dos diferentes condiciones de mecanizado, sin utilizar lubricación. Sobre las mismas, se realizaron los relevamientos geométricos correspondientes, para determinar: ángulo de hélice (F); diámetro del núcleo (K); ángulo de ataque radial (A); ancho de la faja lateral (B); y ángulo de destalonado radial (D). El material a fresar fue una barra trefilada de sección cuadrada de 19mm de lado de acero SAE 1060. Los ensayos se efectuaron en una fresadora de control numérico, mientras los esfuerzos de corte (las fuerzas F_y y F_z), se midieron empleando la combinación de un dinamómetro piezoeléctrico de tres componentes, y un osciloscopio digital.

Los resultados obtenidos, se analizaron estadísticamente, con el objeto de establecer la posible relación entre la magnitud de los esfuerzos F_y y F_z , con la geometría de las fresas.

En primera instancia, podemos afirmar respecto de la fuerza vertical F_z , que no se hallaron indicios de influencia alguna de la geometría de las fresas, sobre su magnitud.

En cuanto a la fuerza horizontal F_y , se puede aseverar que, tanto un incremento del ángulo de hélice, como del diámetro del núcleo, producen un aumento del esfuerzo F_y . Respecto del ángulo de destalonado radial, se requerirían una mayor cantidad de ensayos para poder apreciar alguna diferencia significativa, mientras que, las demás variables geométricas, no influyeron sobre los esfuerzos medidos.

Palabras claves: Geometría, fresado, metal duro integral, acero SAE 1060.

1. INTRODUCCIÓN

El fresado, es una de las tres operaciones de arranque de viruta, de mayor importancia a escala mundial. Según Tönshoff [1], el número de operaciones de mecanizado que se realizan, corresponden un 33% al agujereado, un 30% al torneado, y un 25% al fresado. En particular, cuando se analiza una actividad como es la fabricación de matrices, el fresado ocupa claramente la posición de liderazgo.

Las operaciones de fresado, tanto pueden ser realizadas con fresas de acero rápido, o fresas con insertos de metal duro intercambiables, o integrales de metal duro con o sin recubrimiento (estas últimas, aparecieron en la década del 80, y se emplean sobretodo cuando se requiere una herramienta menor a los 20mm de diámetro).

Es un hecho conocido, que la magnitud de los esfuerzos de corte, influyen sobre la duración del filo de las herramientas, tal que, una disminución de los esfuerzos, produce un aumento de la vida útil. Por citar un caso, Belluco [2,3], si bien en operaciones de agujereado, realizadas estas sobre un acero inoxidable AISI 316L, encontró que una reducción de un 7% de la fuerza de avance, empleando diferentes aceites de corte, produjo un incremento de hasta un 177% de la vida del filo de las brocas.

Entonces, dada la existencia de fresas comerciales con distintas geometrías, resulta evidente la necesidad de estudiar como esta influye, sobre los esfuerzos de mecanizado.

Una revisión de la bibliografía muestra que, existen una serie de publicaciones que evalúan las fuerzas de fresado. Utilizando fresas con insertos, Alauddin [4], analizó la influencia de las condiciones de corte sobre el Inconel 718, y Li [5], relacionó la magnitud de los esfuerzos, con el desgaste del filo, mecanizando el mismo material. Por otro lado, empleando fresas de metal duro integral, López de Lacalle [6] estudió su influencia, sobre la flexión de la fresa, ya que un aumento de esta variable, empeora la precisión y la uniformidad del acabado.

En consecuencia, en el presente trabajo, analizaremos como resultan los esfuerzos de fresado, cuando se mecaniza un acero SAE 1060, utilizando fresas de metal duro integral recubiertas de 12mm de diámetro, con distintos núcleos y ángulos de hélice.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Material a mecanizar

Para las pruebas de fresado, se utilizaron barras trefiladas de sección cuadrada de 19mm de lado de acero SAE 1060.

La composición nominal de este acero fue la siguiente (% peso): 0,6% C; 0,6 a 0,9% Mn; 0,03% P (máx.); 0,035% S (máx.); 0,35% Si (máx.); Fe balance.

Se prepararon probetas para su análisis metalográfico. La microestructura fue revelada usando nital 2% por examen visual con un microscopio óptico Zeiss Axiotech. La microdureza fue determinada con un microdurómetro Vickers (Shimadzu HMV 2000) usando una carga de 10N.

2.2 Fresas de metal duro integral

Para realizar las pruebas de fresado, se emplearon una serie de fresas de metal duro integral calidad ISO K10, de cuatro cortes Norma EZNA, serie corta, de 12mm de diámetro, y con dos tipos de hélices: 30° y 45°. Se utilizaron cinco fresas (repeticiones), para aquellas de 30°, y tres fresas, para las de 45°. En la figura 1 se muestran una fresa de hélice 30° (arriba), y otra de 45°.



Figura 1. Imagen de una fresa de 30° (arriba) y otra de 45°

2.3 Condiciones de corte

Previamente a definir las condiciones de corte a emplear en los ensayos, es decir, la velocidad de corte (V_c), y el avance por diente (a_z), a partir de la dureza y el tipo de acero de las barras, se procedió a efectuar la búsqueda de condiciones de corte de referencia, utilizando documentación de fabricantes de fresas de metal duro integral (ver Tabla I), para operaciones de fresado con estas herramientas, aplicadas sobre aceros similares al acero SAE 1060.

Tabla I. Condiciones de corte de referencia

Fuente	Operación	Material	Velocidad de corte V_c (m/min)	Avance por diente a_z (mm/v)
SGS [7]	Slotting	Steels 30-45HRc	65	0,06
SGS [7]	Profiling	SAE 10L50 HB \leq 275	192	0,075

Dada la escasez de información recabada, para establecer las condiciones de mecanizado a utilizar en los ensayos de fresado, se consideró adoptar para la velocidad de corte, un valor promedio de los de referencia (125m/min), mientras que para el avance por diente, se estableció un rango de trabajo comprendiendo un valor mínimo de 0,025mm/v, y como máximo el mayor de los de referencia. Con estos valores se calcularon el número de revoluciones n para el husillo, y la velocidad de avance V_a , para la mesa de la fresadora. En consecuencia, hemos definido las condiciones de corte según se indican en la tabla II:

Tabla II. Condiciones de corte fijadas para los ensayos de fresado de acero SAE 1060

Proceso	Número de revoluciones de husillo n (rpm)	Velocidad de Avance V_a (mm/min)
Fresado	3316	332 - 995

2.4 Equipamiento

Las ranuras fresadas se efectuaron en una Fresadora de control numérico PROMECOR, provista de un husillo de hasta 8000 rpm con velocidad de rotación, y gama de avance por vuelta, variables en forma continua.

El número de revoluciones de las fresas, se verificó usando una lámpara estroboscópica Ludwig.

Los esfuerzos de mecanizado se midieron empleando un dinamómetro piezoeléctrico Kistler modelo 9257A de tres canales, con sus respectivos amplificadores de carga, y en combinación con un osciloscopio digital Fluke 196C.

2.5 Procedimiento de ensayo

Con el objeto de analizar estadísticamente, las posibles relaciones existentes entre la geometría de las fresas ensayadas, y los esfuerzos de fresado obtenidos, en las dos condiciones de corte, se relevaron dimensionalmente las ocho fresas, utilizando un proyector de perfiles marca Prazis Modelo: PO/600.

Se midieron las siguientes variables: diámetro del núcleo (K); ángulo de ataque radial (A); ancho de la faja lateral (B); ángulo de incidencia radial (D); y ángulo de hélice (F). Las variables geométricas mencionadas se muestran en la figura 2.

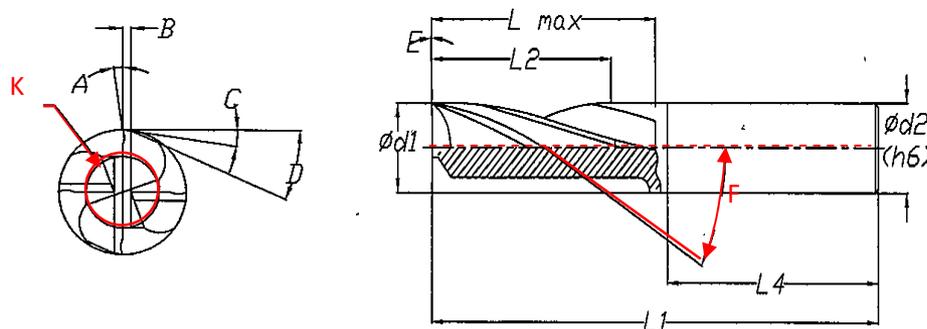


Figura 2. Variables geométricas de relevadas en las fresas

Las 96 ranuras a realizar, resultantes de emplear ocho fresas, por dos condiciones de corte, por seis repeticiones con cada fresa, se efectuaron sobre trozos de barra trefilada de acero SAE 1060, siendo

estas de sección cuadrada de 19mm de lado y 160mm de longitud, obtenidas a partir de una única barra inicial de 2000mm de longitud.

Las fresas fueron designadas como 1; 2; 3; 9 y 11 para las de 30°, y 6; 7 y 8 para las de 45°.

Para la realización de los ensayos, se siguió la siguiente secuencia: condición de corte CC1 (avance mínimo): fresa 1; fresa 2; fresa 3; fresa 9; fresa 11; fresa 6; fresa 7; y fresa 8.

Condición de corte CC2 (avance máximo): idem anterior.

La totalidad de las ranuras de 4mm de profundidad y 8mm de ancho, fueron efectuadas perpendiculares a la longitud de la barra, en una sola profundización de herramienta, sin usar lubricación (en seco).

Dada la capacidad del dinamómetro de medir tres esfuerzos en forma simultánea (F_x ; F_y y F_z), y siendo que el osciloscopio digital disponible, fue de sólo dos canales, se realizaron una serie de pruebas previas, con el objeto de establecer, cual de los tres esfuerzos era el de menor magnitud. Siendo que los resultados obtenidos arrojaron que $F_y > F_z > F_x$ (siendo F_x , el esfuerzo en dirección perpendicular al largo de la barra, aproximadamente nulo), mediante el osciloscopio digital se registraron las curvas de F_y (en azul en la Figura 3) y de fuerza vertical F_z (en rojo en la Figura 3), para cada fresa, y en cada condición de ensayo. A partir de ellas, se determinaron los valores F_{yRMS} y F_{zRMS} por curva, y con el conjunto de estos se calcularon los promedios de F_{yRMS} y F_{zRMS} que se emplearon para realizar el tratamiento estadístico de los datos (obtención de los promedios y de la desviación estándar porcentual).

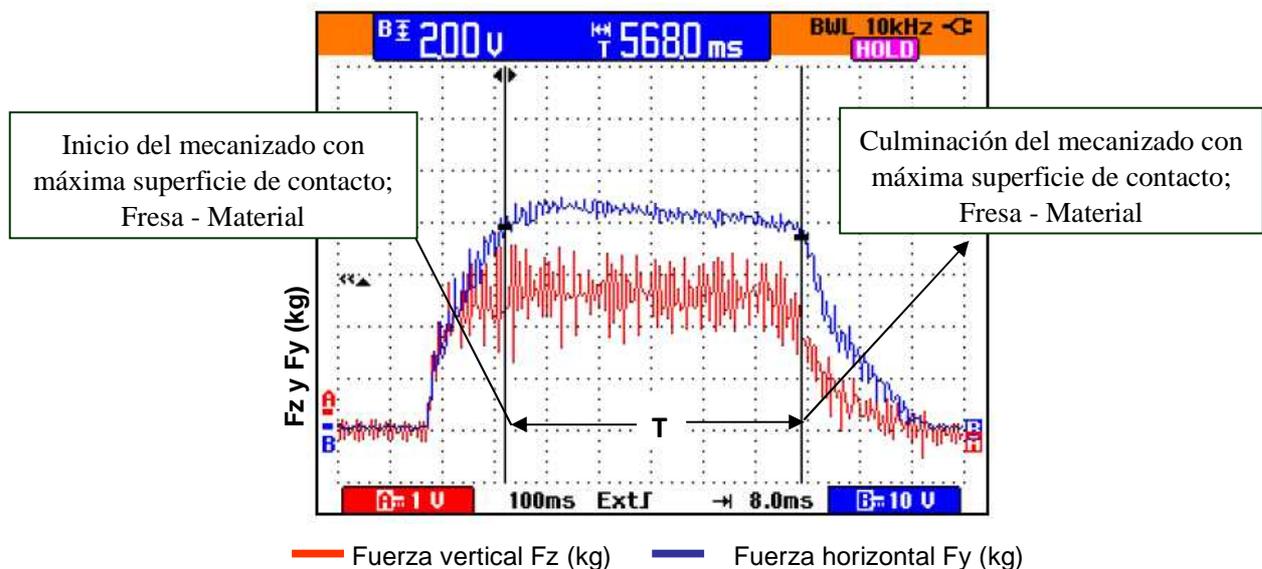


Figura 3. Gráficos tipo de F_y y F_z registrados por el osciloscopio

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Material a mecanizar

El acero SAE 1060 presentó una microestructura laminada en caliente, constituida por granos de perlita levemente orientados y ferrita proeutectoide en red. El tamaño de grano perlítico, determinado en la sección transversal fue de tipo dual, variando entre el número 8 al 9.

Las inclusiones resultaron de los tipos A (sulfuros), serie fina N° 1½ y D (óxidos), serie fina N° 1.

La dureza promedio de las barras resultó ser $HV_{10} 282 \pm 5$.

En la figura 4 se presenta una imagen de la microestructura revelada.

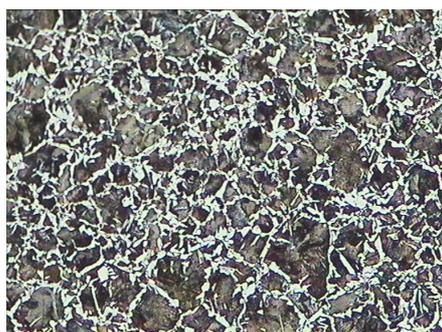


Figura 4. Microestructura del material a agujerear (100X).

3.2 Dimensional de las fresas:

Tabla III. Valores medidos para la geometría de las fresas

Fresa N°	Angulo de hélice F (°)	Diámetro de núcleo K (mm)	Incidencia radial D (°)	Ataque radial A (°)	Ancho de la faja lateral B (mm)
1	30.0	7.86	10.5	6.0	1.08
2	30.0	7.81	10.3	7.0	1.07
3	29.0	7.85	11.0	7.0	1.08
9	30.0	7.85	11.0	7.5	1.10
11	30.0	7.87	11.0	7.0	1.07
6	45.0	7.60	12.0	7.0	1.15
7	45.0	7.63	12.0	7.5	1.15
8	45.0	7.60	11.5	10.0	1.11

3.3 Pruebas de fresado, valores medidos:

3.3.1 Condición de corte CC1

Tabla IV. Valores medidos para los esfuerzos de fresado en la CC1

Fresa N°	Fuerza horizontal F_y (kg)						Fuerza vertical F_z (kg)					
1	36.7	36.8	36.8	36.7	36.7	36.6	4.03	4.09	4.05	4.01	4.01	3.99
2	24.6	24.8	24.9	24.9	25.0	25.1	4.15	4.14	4.14	4.10	4.15	4.00
3	23.9	24.0	24.1	24.2	24.3	24.3	4.01	3.96	3.95	3.96	3.95	3.92
9	35.7	35.6	35.9	35.7	35.7	35.7	4.03	4.02	4.05	4.07	4.07	4.05
11	62.3	62.3	63.7	63.8	63.8	63.8	3.96	4.08	4.07	4.06	4.06	4.07
6	47.1	47.0	47.8	48.3	48.1	47.5	5.07	5.06	5.04	5.04	5.04	5.03
7	72.6	72.4	72.8	72.6	72.6	72.7	5.51	5.52	5.48	5.48	5.56	5.46
8	77.4	77.2	77.2	77.3	77.5	77.2	4.75	4.81	4.90	4.94	4.90	4.95

3.3.2 Condición de corte CC2

Tabla V. Valores medidos para los esfuerzos de fresado en la CC2

Fresa N°	Fuerza horizontal F_y (kg)						Fuerza vertical F_z (kg)					
1	60.5	60.2	60.5	60.7	61.0	60.6	11.9	12.3	12.3	12.4	12.5	12.3
2	51.0	51.2	51.0	51.0	50.8	50.8	11.9	12.0	12.0	12.0	12.1	12.0
3	51.2	51.1	50.9	50.9	50.9	50.8	12.1	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2
9	62.9	63.0	62.9	62.9	63.0	63.1	12.5	12.7	12.7	12.6	12.7	12.6
11	85.5	86.0	86.0	85.7	85.9	86.1	12.2	12.2	12.2	12.1	12.1	12.1
6	72.9	73.0	73.1	73.1	73.1	73.2	18.9	18.9	18.9	18.9	18.9	18.9
7	91.0	94.7	94.6	94.4	94.6	94.5	18.2	18.1	18.1	18.0	18.0	17.9
8	98.6	99.8	101	102	102	100	20.6	20.2	20.2	20.3	20.2	19.2

3.4 Tratamiento estadístico de los valores medidos:

En las tablas siguientes, se presentan discriminados por tipo de esfuerzo, los valores correspondientes para el estadístico p obtenido mediante ANOVA, para cada valor geométrico de las fresas, y condición de corte. Un valor del estadístico p menor a 0.05 (indicados en color negro), estaría indicando la existencia de una influencia significativa de la variable geométrica, sobre la fuerza correspondiente.

Tabla VI: Valores del estadístico p para la fuerza horizontal

Condición de corte	Fuerza horizontal F_y				
	F	K	D	A	B
CC1	0.000	0.000	0.054	0.970	0.061
CC2	0.000	0.000	0.030	0.942	0.052

Tabla VII: Tendencia de la fuerza horizontal en función de los parámetros analizados

Condición de corte	Tendencia de la F_y				
	F	K	D	A	B
CC1					
CC2					

Tabla VIII: Valores del estadístico p para la fuerza vertical

Condición de corte	Fuerza vertical F_z				
	F	K	D	A	B
CC1	0.000	0.002	0.002	0.885	0.001
CC2	0.000	0.001	0.010	0.000	0.000

Tabla IX: Tendencia de la fuerza vertical en función de los parámetros analizados

Condición de corte	Tendencia de la F_z				
	F	K	D	A	B
CC1					
CC2					

3.5 Gráficos de cajas y barras

3.5.1 Condición de corte CC1

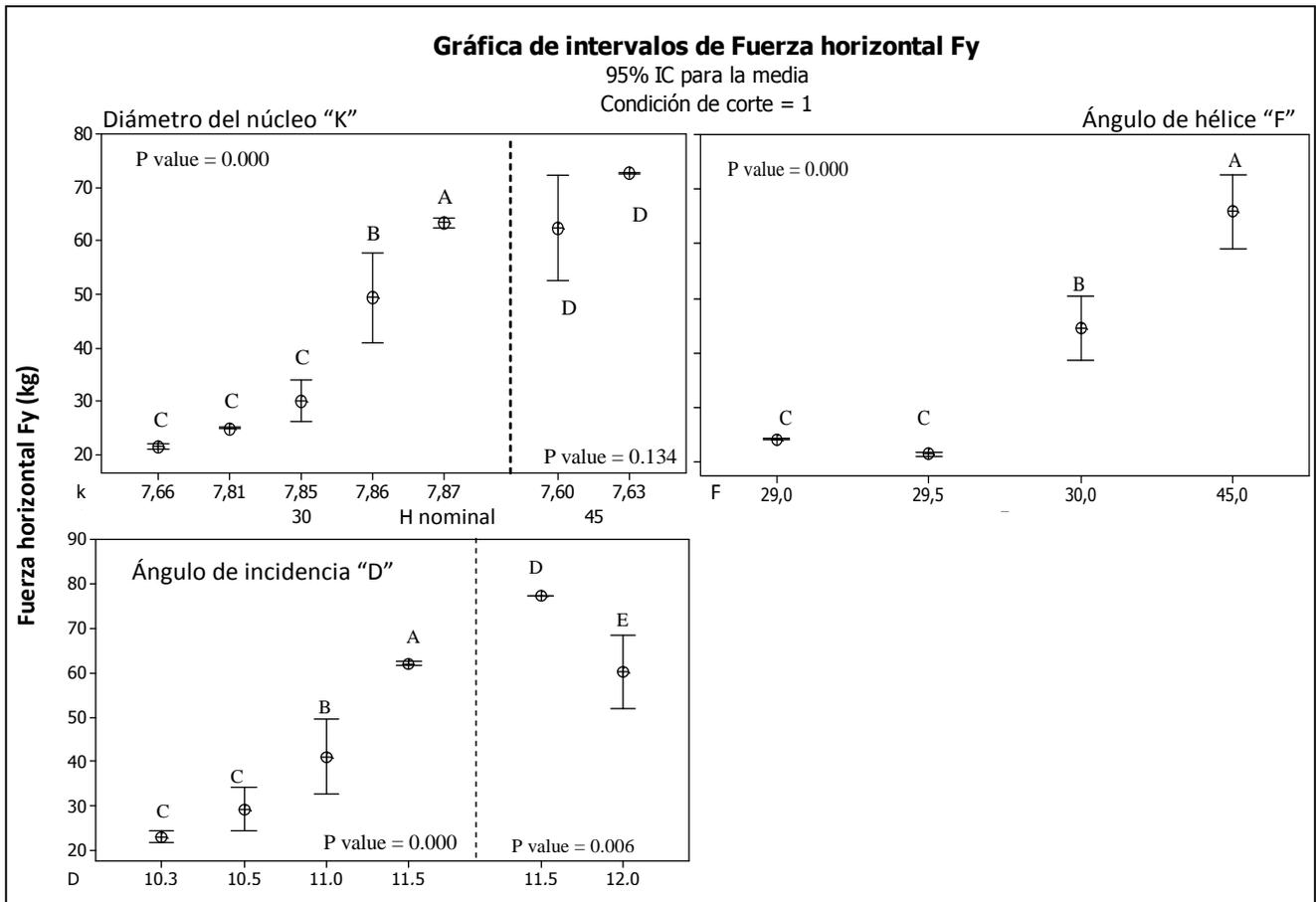


Figura 5. Valores de F_y vs diámetro del núcleo "K", ángulo de hélice "F", e incidencia radial "D"

3.5.2 Condición de corte CC2

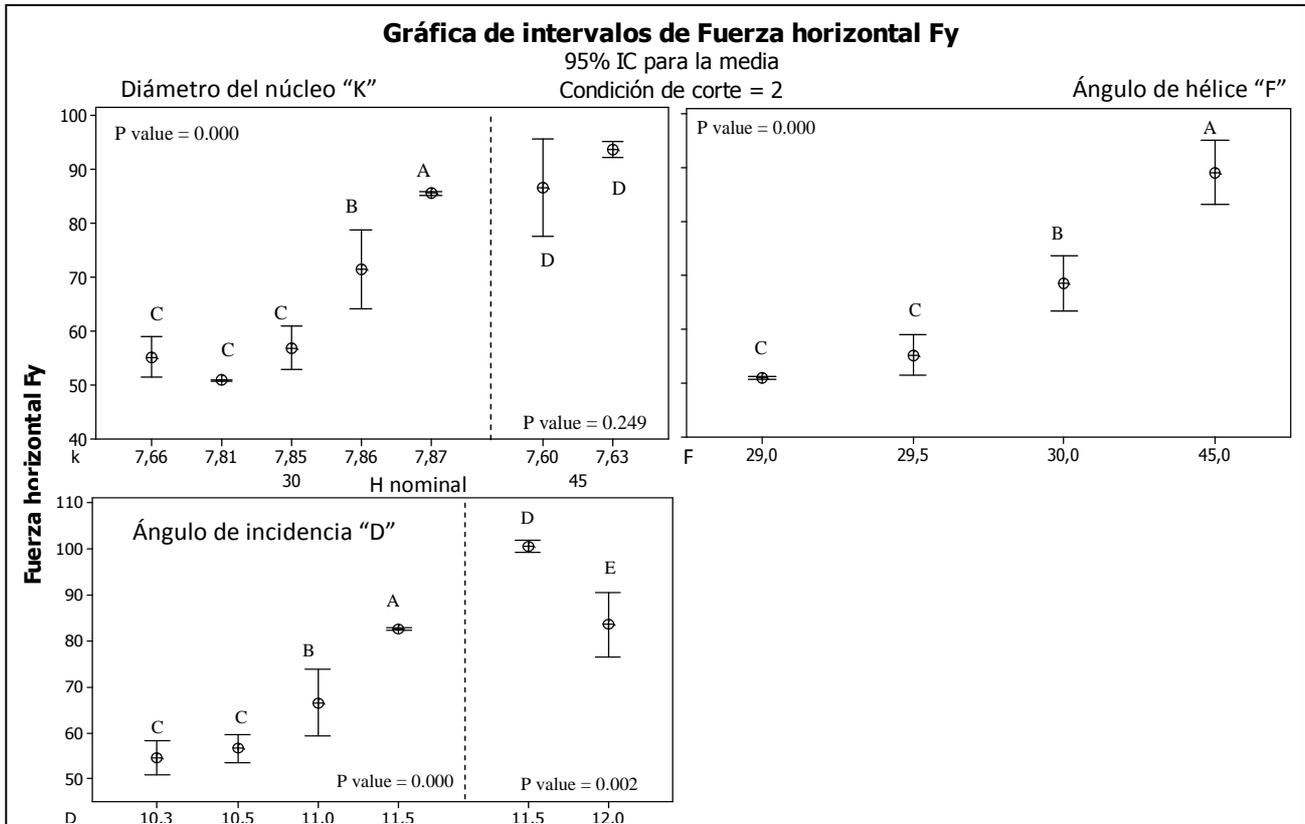


Figura 6. Valores de F_y vs diámetro del núcleo "K", ángulo de hélice "F", e incidencia radial "D"

4. CONCLUSIONES

4.1 Factores que influyeron sobre la fuerza vertical F_z :

Analizando los valores del estadístico p, vemos que hay diferencias significativas entre los valores de esfuerzos correspondientes a las distintas geometrías. Sin embargo, si analizamos dichas variaciones podemos observar que, las mismas no mantienen ninguna tendencia definida, con lo cual, con la cantidad de datos analizados, no podemos concluir que las características geométricas analizadas influyan de manera significativa sobre los valores del esfuerzo vertical F_z .

4.2 Factores que influyeron sobre la fuerza horizontal F_y :

Ángulo de hélice "F": existieron diferencias significativas entre las fresas con distintos ángulos de hélice, como también se pudo observar una tendencia definida de aumento del esfuerzo F_y con el aumento del ángulo de hélice.

Diámetro del núcleo "K": hubo diferencias significativas entre fresas con distintos valores de K, así mismo se pudo observar que, en las condiciones de ensayo y con estas herramientas a mayor valor de K, mayor F_y .

Ángulo de incidencia radial "D": segregando los datos por ángulo de hélice, para las fresas de 30° se observaron diferencias significativas, y una marcada tendencia de aumento de F_y con el aumento de D, tendencia que no sucedió con las fresas de 45° , hecho que pudiera deberse a la existencia de pocos datos.

Ángulo de ataque radial “A”: en este caso, si bien hubo diferencias significativas, solo se apreció una tendencia definida, en las fresas con un ángulo de hélice de 45°.

Ancho de la faja lateral “B”: para esta variable no se observó una incidencia significativa sobre el esfuerzo F_y .

Resumidamente, en cuanto al análisis de la fuerza F_y , los factores de mayor influencia, tomando en cuenta las condiciones de corte empleadas, el tipo de herramienta y el material a mecanizar fueron:

- El ángulo de hélice “F” - $\uparrow\uparrow$ “F” \Rightarrow $\uparrow\uparrow$ F_y
- El largo del filo transversal “K” - $\uparrow\uparrow$ “K” \Rightarrow $\uparrow\uparrow$ F_y
- El ángulo de incidencia “D” - $\uparrow\uparrow$ “D” \Rightarrow $\uparrow\uparrow$ F_y

REFERENCIAS

[1] H. Tönshoff y otros, Machining of holes. Developments in drilling technologies, Annals of the CIRP, Volumen 43 (1994), 551-561 (paper).

[2] Belluco W. y otros, Performance evaluation of vegetable based-oils in drilling austenitic stainless steels, Journal of Materials Processing Technology, 148 (2004), 171-176 (paper).

[3] Belluco W., Ph.D. Thesis, Performance testing of cutting fluids, Technical University of Denmark, Publication no. IPT 198.00 (MM00.63), Dinamarca, Diciembre 2000 (Tesis doctoral).

[4] M. Alauddin y otros, Cutting forces in the end milling of Inconel 718, Journal of Materials Processing Technology, 77 (1998), 153-159 (paper).

[5] H. Li y otros, An experimental study of the tool wear and cutting force variation in the end milling of Inconel 718 with coated carbide inserts, Journal of Materials Processing Technology, 180 (2006), 296-304 (paper).

[6] N. López de Lacalle y otros, Improving the surface finishing in high speed milling of stamping dies, Journal of Materials Processing Technology, 123 (2002), 292-302 (paper).

[7] <http://www.sgstool.com/>