

Estudio de la influencia de los parámetros de corte en la integridad superficial y las desviaciones durante el fresado del acero AISI 1010

Study of influences of cutting variables on superficial integrity and deflections in milling of AISI 1010 steel

Luis Wilfredo Hernández-González ¹, Roberto Pérez-Rodríguez ²,
Luminita Dumitrescu³, Romilio Montero-Sarmiento⁴

Fecha de recepción: 25 de marzo del 2015

Fecha de aprobación: 3 de junio del 2015

Hernández, González, L; Pérez-Rodríguez, R; Dumitrescu, L; Montero-Sarmiento, R. Estudio de la influencia de los parámetros de corte en la integridad superficial y las desviaciones durante el fresado del acero AISI 1010. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 4, Octubre-Diciembre. Pág 26-41.

1 PhD, Profesor Titular. Universidad de Holguín. Cuba. Correo electrónico: wilfredo@facing.uho.edu.cu

2 PhD, Profesor Titular. Director del Centro de Estudios CAD/CAM. Universidad de Holguín. Cuba. Correo electrónico: roberto.perez@facing.uho.edu.cu

3 M.Sc. Profesora Auxiliar. Profesora Principal de Ciencias de los Materiales. Universidad de Holguín. Cuba. Correo electrónico: dumitrescul@facing.uho.edu.cu

4 Ingeniero Mecánico, Profesor Asistente. Correo electrónico: romilio@facing.uho.edu.cu
Universidad de Holguín. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica.
Avenida XX Aniversario s/n. Piedra Blanca. Holguín. GP 57. CP 80100. Cuba.

Palabras clave

Parámetros de corte; integridad superficial; desviaciones; fresado; acero AISI 1010.

Resumen

Este trabajo presenta un estudio experimental de la influencia de la velocidad de corte y el avance en el fresado en seco de una superficie plana de acero AISI 1010, utilizando una fresa cilíndrica de acero de corte rápido, sobre la microestructura, el tamaño del grano, la dureza, la rugosidad superficial y las desviaciones de la pieza maquinada. Los resultados muestran que, para las condiciones de corte establecidas, el fresado no provocó cambios en la microestructura del acero, mientras que aumentaron el tamaño del grano y la dureza de la pieza maquinada con relación a la pieza inicial. Los valores registrados de rugosidad superficial fueron apropiados, el efecto del avance fue variable, mientras que el menor valor de rugosidad se registró para el mayor valor de velocidad de corte. Las desviaciones de la pieza maquinada aumentaron con el incremento de los parámetros de corte, siendo la velocidad de corte la que mostró un mayor efecto. Finalmente, se seleccionaron las condiciones de corte más adecuadas, teniendo en cuenta los resultados obtenidos y las recomendaciones tecnológicas.

Keywords

Cutting variables; superficial integrity; deflections; milling; AISI 1010 steel.

Abstract

This work presents the experimental study of influence of cutting speed and feed in dry plain milling of AISI 1010 steel, with a cylindrical milling cutter of high speed steel, in microstructure, grain size, hardness, surface roughness, as well as workpiece deflections. The results showed for cutting conditions that, milling did not cause changes in steel microstructure, while grain size and hardness grew up, with relation to original workpiece data. The measured values of surface roughness were acceptable; the feed effect was irregular, though the roughness lowest value for highest cutting speed was recorded. The increase of machining conditions caused an increase of workpiece deflections; while cutting speed produced a higher effect. Finally, the most suitable cutting conditions were chosen, in view of the presented results and technological recommendations.

Introducción

El corte de metales es un proceso complejo que involucra un conjunto de variables, tales como deformaciones elásticas y plásticas del material que se mecaniza, generación de calor, endurecimiento de la superficie maquinada, contracción de la viruta, formación de bordes recocidos y aparición de las fuerzas de resistencia al corte, entre otras. El grado de endurecimiento de la superficie maquinada, de la viruta y de su superficie de corte es una característica, junto con la contracción de la viruta, del grado de deformación plástica del metal en el proceso de corte.

Las operaciones de maquinado tienen un gran impacto en importantes variables del corte de metales, entre las que se destacan las siguientes: el desgaste de la herramienta, las fuerzas de corte y la integridad superficial de la pieza maquinada.

Los requerimientos de integridad superficial se pueden catalogar como: integridad superficial geométrica (rugosidad superficial, exactitud dimensional) e integridad superficial física (tensiones residuales, cambios de microestructura, dureza) (Karpát, 2007).

El desempeño funcional de un componente fabricado es altamente afectado por la calidad y la fiabilidad de la superficie elaborada en términos de topografía, así como en el estado metalúrgico y mecánico de la capa subsuperficial. En las últimas décadas, varias investigaciones han indagado en la relación entre los parámetros del proceso de maquinado, la naturaleza de las alteraciones producidas en la superficie y sus efectos en el desempeño funcional del producto. La tendencia ha estado enfocada en satisfacer la creciente demanda en el desempeño, fiabilidad y durabilidad del artículo, lo que estimula el desarrollo de materiales con resistencia mejorada ante condiciones severas de trabajo y ambientes agresivos, junto con el desarrollo de nuevos métodos de fabricación (M'Saoubi, Outeiro, Chandrasekaran, Dillon & Jawahir, 2008).

Existen dos tipos fundamentales de elaboraciones en el maquinado, el desbaste y el acabado. En la pasada de desbaste, se pretende eliminar la máxima cantidad de material y acercarse a la forma final, sin que interese de manera considerable la rugosidad superficial ni las tolerancias. Mientras que en la pasada de acabado, el objetivo es lograr la máxima precisión y la rugosidad superficial establecida en el proceso de diseño.

Entre las operaciones de maquinado, el fresado es ampliamente utilizado en la mayoría de las industrias de fabricación, debido a la posibilidad de obtener superficies geométricas complejas con razonable exactitud y rugosidad superficial. A continuación, se muestra un resumen de los trabajos investigativos más relevantes en el fresado de aceros al carbono.

Análisis del estado del arte

Los principales estudios realizados en el fresado de aceros al carbono se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Principales estudios realizados en el fresado de aceros al carbono.

Autores y año	Fresa / condiciones	Acero a elaborar	Variables independientes	Variables dependientes
(Kumar & Venkateswara, 2005)	Carburo recubierta	AISI 1045	Velocidad de corte, avance, ángulo radial de ataque y radio de la punta	Rugosidad superficial
(Chang & Lu, 2006)	Acero de corte rápido recubierta	AISI 1045	Velocidad de corte, avance por diente, profundidad radial y axial de corte	Rugosidad superficial
(Palanisamy, Rajendran & Shanmugasundaram, 2007)	Acero de corte rápido	AISI 1060	Velocidad de corte, avance por diente, profundidad de corte	Rugosidad superficial, vida útil de la herramienta, tiempo de maquinado y fuerza de corte
(Öktem, 2009)	Recubierta / refrigerante	AISI 1040	Velocidad de corte, avance por diente, profundidad axial y radial de corte	Rugosidad superficial

Continúa...

... Continuación

Autores y año	Fresa / condiciones	Acero a elaborar	Variables independientes	Variables dependientes
(Saffar & Razfar, 2010)	Acero de corte rápido	AISI 1045	Avance, profundidad axial y radial	Fuerza de corte axial
(Nas & Demir, 2010)	Carburo cementado recubierto	AISI 1050	Número de insertos, velocidad de corte, avance por diente y profundidad de corte	Rugosidad superficial
(Patwari, Nurul & Faris, 2010)	Carburo	AISI 1045	Velocidad de corte, profundidad axial y avance por diente	Estabilidad de formación de la viruta
(Rodrigues, Matsumoto, Yamakami, Paulo & Assis, 2010)	Carburo cementado recubierto	De baja aleación	Velocidad de corte, profundidad y avance por diente	Dureza y rugosidad superficial
(Silva et al., 2011)	P40 recubierta / lubricación mínima, con fluidos y en seco	AISI 1047	Velocidad de corte y avance por revolución	Volumen de metal cortado, desgaste y rugosidad superficial
(Zailani, Hamidon, Hussin, Hamzas & Hadi, 2011)	Acero de corte rápido / refrigerante y refrigerante con lubricante sólido	Medio contenido de carbono	Velocidad de corte y avance	Desgaste y rugosidad superficial
(Choubey, Chaturvedi & Vimal, 2012)	Acero de corte rápido / refrigerante	Medio contenido de carbono	Velocidad, avance, profundidad y ancho de corte	Rugosidad superficial y volumen de metal cortado
(Braga, Neves, Silva & Parreiras, 2012)	-	AISI 1045	Número de dientes, ángulo de posición y velocidad de corte	Fuerzas y potencia de corte
(Rodrigues et al., 2012)	Carburo cementado recubierto	Bajo contenido de carbono, con tamaño de grano estándar y ultrafino	Avance por diente, velocidad y profundidad de corte	Microestructura y microdureza
(Thakre, 2013)	Carburo / refrigerante	AISI 1040	Cantidad de fluido, velocidad, avance, profundidad y ancho de corte	Rugosidad superficial
(Syahmi, Mat & Razlan, 2013)	- / lubricación mínima, refrigerante y en seco	AISI 1060	Avance por minuto, profundidad y velocidad de corte	Rugosidad superficial
(Badrinathan & Karunamoorthy, 2013, 2014).	Inserto WIDIA PA120 recubierto	AISI 1045	Avance (progresivo y normal), profundidad y velocidad de corte	Fuerza de corte
(Shaikh, Boubekri & Scharf, 2014).	Carburo / microlubricación	AISI 1018	Avance y velocidad de corte	Desgaste, volumen de metal cortado y microdureza

La revisión anterior muestra la inexistencia de estudios en los que se determine el efecto del avance y de la velocidad de corte en la dureza, el tamaño del grano, la rugosidad superficial y las desviaciones de la pieza maquinada, durante la operación de fresado de una superficie plana de acero al carbono con una fresa cilíndrica. Por tanto, el objetivo de la presente investigación es llenar ese vacío.

Desarrollo

A continuación, se expone el procedimiento experimental utilizado en este estudio, incluyendo la caracterización del material de la herramienta de corte y de la probeta. Además, se analiza el montaje experimental y el diseño de la investigación.

Procedimiento experimental

Material de la pieza

El acero AISI 1010 es el material seleccionado, que se obtuvo en los procesos de fundición y laminado en caliente, es de bajo porcentaje de carbono y límite de rotura, cuya propiedad más importante es su ductilidad. Este acero se utiliza en general para piezas que exigen alta plasticidad, como paneles de automóviles, clavos y alambres (Callister, 2007), además, en la fabricación de ruedas dentadas, árboles y ejes poco cargados. Es decir, para fabricar elementos de máquina que requieren ser fácilmente soldados, maquinados y conformados.

La composición química del acero AISI 1010 se determinó utilizando el método de cuantimetría atómica. En el cuadro 2 se presentan los resultados obtenidos.

Cuadro 2. Resultados de la composición química del acero AISI 1010.

Elementos de aleación	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
Concentración (%)	balance	0,082	0,168	0,57	0,013	0,015	0,117	0,089	0,43

Las dimensiones de las probetas utilizadas para el mecanizado son las siguientes: 48 mm de largo, 33 mm de ancho y 20 mm de espesor.

Selección de la máquina herramienta

Se seleccionó la fresadora universal para utillaje modelo FUS 22, perteneciente al laboratorio de maquinado. Sus principales características son las siguientes: potencia del motor principal 1,4 kW, frecuencia de rotación del husillo del cabezal horizontal de 63 r/min a 1 250 r/min, valores de avance de 12,5 mm/min a 250 mm/min. Además presenta varios accesorios, tales como cabezal vertical, cabezal rápido y cabezal divisor.

Selección de la herramienta de corte

Como herramienta de corte se seleccionó una fresa cilíndrica de dientes helicoidales, fabricada con acero de corte rápido P18, cuya composición química se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3. Composición química del acero de corte rápido P18 (%) (Martínez & Gordon, 1985).

Fe	C	Cr	W	V	Mo	Mn	Si	Ni	P	S
Balance	0,7 - 0,8	3,8 - 4,4	17,5 - 19	1,0 - 1,4	0,2 - 0,3	0,4	0,4	0,4	0,03	0,03

La fresa presenta las características siguientes: ángulo de hélice de $\beta = 24^\circ$, diámetro exterior $D_e = 40$ mm, diámetro interior $D_i = 16$ mm, número de dientes $t = 10$, longitud $L_f = 50$ mm. Para su montaje, presenta un agujero cilíndrico con un chavetero.

Selección de las condiciones de corte

Para el experimento se seleccionaron tres valores de velocidad de corte (7,91; 31,4 y 79,13) m/min y tres de avance (12,5; 50 y 160) mm/min, manteniendo constante la profundidad de corte (1 mm), el fresado se realizó en seco. Estos parámetros de corte fueron seleccionados teniendo en cuenta los aspectos siguientes: los resultados de la revisión del estado del arte, las características de la fresadora, las dimensiones y material de las probetas, las dimensiones y material de la herramienta, así como la rigidez del sistema tecnológico (máquina herramienta - herramienta de corte - dispositivo - probeta).

Diseño y montaje experimental

A continuación, se explica el diseño y montaje experimental utilizado para determinar los efectos de la velocidad de corte (v , m/min) y del avance (f , mm/min), en el tamaño del grano (T_g , mm), microestructura, dureza (HB) y rugosidad superficial (R_a , μm) de la pieza fresada, así como las desviaciones de la pieza (D , mm), durante el fresado en seco de una pieza plana de acero al carbono AISI 1010 con una fresa cilíndrica.

Primero se cortaron e identificaron tres probetas con las dimensiones siguientes: 48 mm de largo, 33 mm de ancho y de espesor 20 mm. Después se realizó el fresado en orden aleatorio, utilizando tres valores de velocidad de corte y tres de avance, manteniendo constante la profundidad de corte. La matriz del experimento se presenta en el cuadro 4.

La probeta se fijó a la mesa de la máquina (ver figura1) por medio de una mordaza. El método de fresado utilizado fue el convencional, con un movimiento de avance longitudinal de la mesa.

Cuadro 4. Matriz del experimento.

Nr.	Orden del experimento	Variables independientes		Variables dependientes			
		v (m/min)	f (mm/min)	T_g (mm)	R_a (μm)	HB (kg/mm ²)	D (mm)
1	4	7,91	12,50	-			
2	9	7,91	50,00				
3	7	7,91	160,00	-			
4	1	31,40	12,50	-			
5	5	31,40	50,00				
6	3	31,40	160,00	-			
7	8	79,13	12,50	-			
8	2	79,13	50,00				
9	6	79,13	160,00	-			

El fresado se realizó con una fresa cilíndrica de acero de corte rápido. Para registrar las desviaciones de la pieza se utilizó un indicador de carátula, que se fijó sobre la columna horizontal, mientras que el palpador se colocó sobre la mesa de la máquina herramienta (figura1).

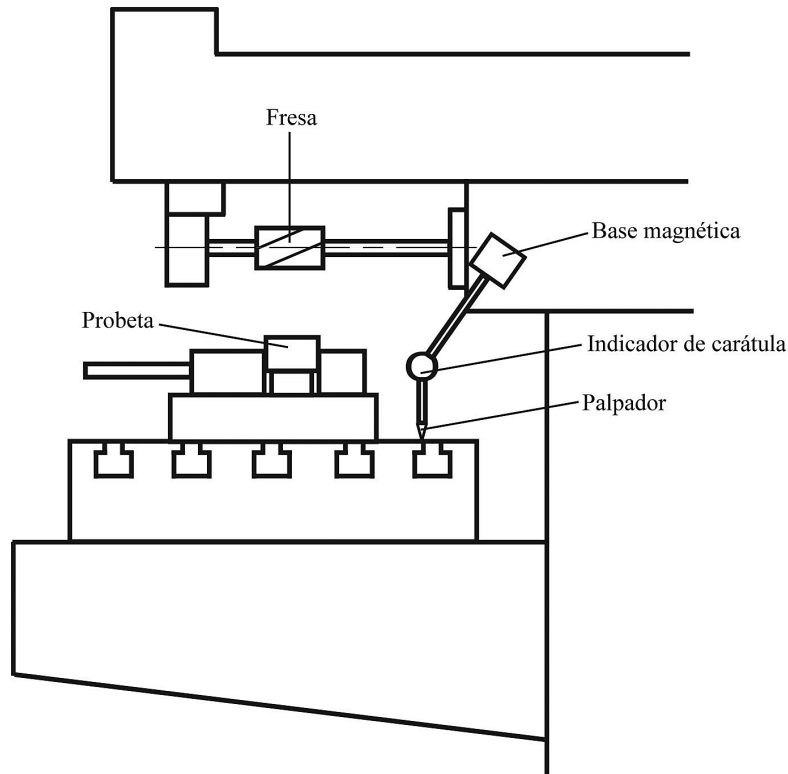


Figura 1. Montaje experimental.

Preparación, pulido, ataque químico y revelación de la microestructura de las probetas

Las dimensiones de las probetas fueron 10 mm x 10 mm x 10 mm, luego se encapsularon en baquelita. Posteriormente, se pulieron con varias lijas de carburo de silicio (SiC), utilizando varios números. Para obtener el acabado final, el pulido se realizó en un paño con partículas abrasivas de alúmina de 0,5 μm . Todas estas operaciones se realizaron utilizando agua.

Además, se seleccionaron tres probetas maquinadas para el análisis metalográfico, de acuerdo con el orden del experimento fueron los números 2, 5 y 8 (cuadro 4), para las tres velocidades de corte y avance constante (50 mm/min). El procedimiento antes descrito también se utilizó para pulir las probetas fresadas.

Para revelar los constituyentes estructurales de la superficie plana de la muestra, se utilizó un microscopio óptico modelo NJF-120A. El tamaño del grano se determinó por comparación, utilizando las diferentes muestras patrones de microestructuras, según la Norma Cubana NC 05-08 (Normalización, 1985).

Medición de la dureza

La dureza fue medida ocho veces en diferentes puntos de las probetas, utilizando un durómetro digital modelo HRS-150.

Análisis estadístico de los valores de dureza

Al realizar mediciones repetidas de un mismo parámetro o característica, pueden obtenerse valores individuales que a simple vista resultan extraños o sospechosos porque presentan una marcada diferencia con respecto a los demás valores obtenidos. En general, aplicando las propiedades de la curva de distribución normal, pueden detectarse y eliminarse los valores anormales procediendo de la siguiente forma:

1. Para el conjunto de los valores obtenidos en la medición, se calculan la media (\bar{x}) y la desviación típica (S).
2. Se establece el intervalo dado por: $\bar{x} \pm T \cdot S$, y se eliminan todos los valores que quedan fuera de dicho intervalo por considerarse anormales.
3. Se realizan nuevamente los cálculos necesarios para expresar el resultado elaborado o final, sin considerar los valores anormales.

Las expresiones para determinar \bar{x} y S son 1 y 2:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Para un 95% de confianza, le corresponde un valor de $T = 1,96$ (Bernard, 1981).

Montaje experimental para medir desviaciones

En la figura 1 se observa el montaje para medir las desviaciones que ocurren durante el fresado. La base magnética del indicador de carátula se colocó en el cabezal y el palpador sobre la mesa de la fresadora.

Determinación de la rugosidad superficial

Varios especialistas de la empresa de la Oficina Territorial de Normalización de Holguín, Cuba determinaron la rugosidad superficial utilizando muestras patrón de comparación.

Resultados y discusión

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la presente investigación, así como su discusión.

Microestructura

En la figura 2 se muestran las microestructuras del acero AISI 1010 de la probeta original (a) y de las fresadas con velocidades de corte $v = 7,91$ m/min (b), $v = 31,40$ m/min (c) y $v = 79,13$ m/min (d), utilizando un avance constante (50 mm/min), para una ampliación 100x. En ellas se aprecia una estructura de 90% de ferrita y 10% de perlita; se considera que no hubo un cambio sustancial de la microestructura del acero después de la operación de maquinado.

En la microestructura maquinada con velocidad de corte de 79,13 (figura 2d), la imagen se ve más oscura porque al parecer tuvo un mayor ataque químico. Se observa una mayor cantidad

de perlita a diferencia de las demás imágenes; esto puede estar relacionado con el proceso de rastreo realizado para la observación de la superficie de la probeta, cuya constitución no es homogénea. También se aprecia un incremento del tamaño del grano.

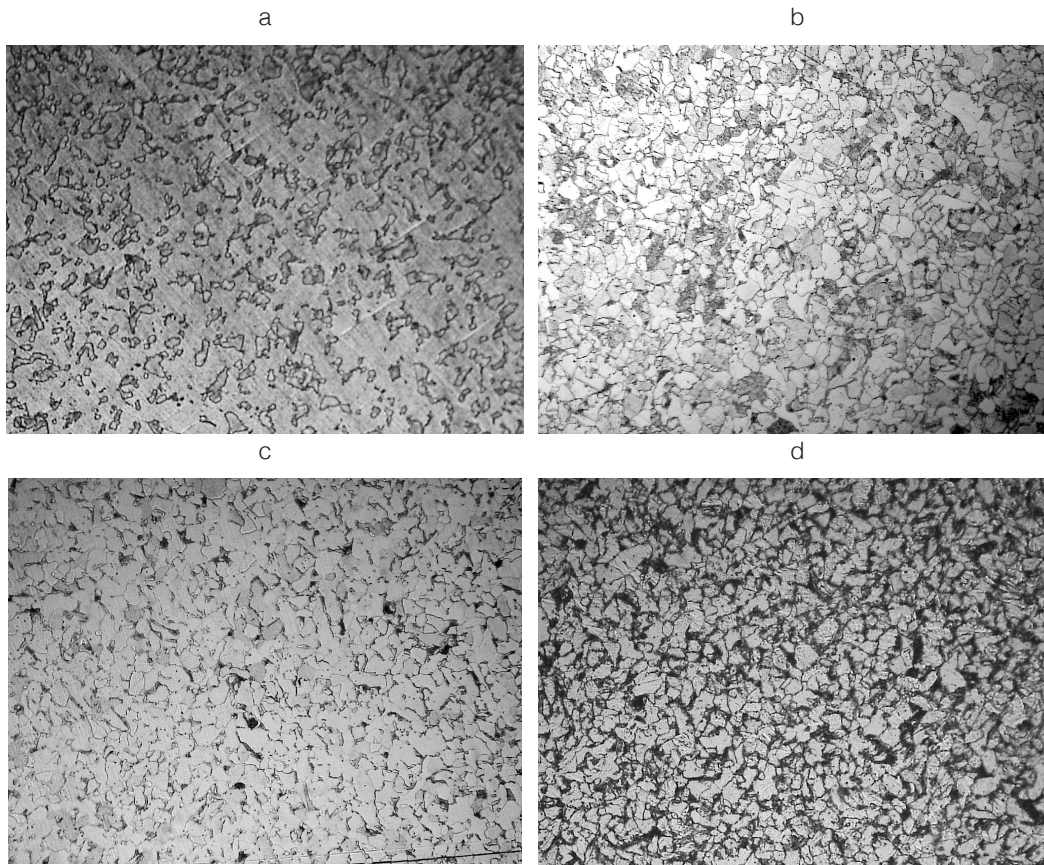


Figura 2. Microestructura del acero AISI 1010 para la probeta original (a), después de maquinada con $v = 7,91$ m/min (b), $v = 31,40$ m/min (c) y $v = 79,13$ m/min (d), para una amplificación $\times 100$.

Tamaño del grano

Según Rodrigues y colaboradores (2012), la microestructura de la superficie maquinada es más sensible para piezas con grano de mayor tamaño, y los parámetros de corte que mayor influencia tienen en la deformación del grano son la velocidad de corte y la profundidad.

En la figura 3 se muestra el efecto de la velocidad de corte en el tamaño del grano del acero AISI 1010 para un avance constante. Al utilizar la menor velocidad de corte (7,91 m/min), el tamaño del grano creció un 100% con respecto al tamaño inicial. Además, cuando se maquinó a las velocidades de corte intermedia y máxima, su tamaño aumentó un 184%, con respecto al original.

Durante el maquinado se producen deformaciones elástico-plásticas. La deformación plástica durante el corte de metales consiste en el desplazamiento de ciertas capas de metal respecto a otras a lo largo de los llamados planos de deslizamiento, los cuales coinciden en su mayor parte con la dirección de las fuerzas cortantes máximas.

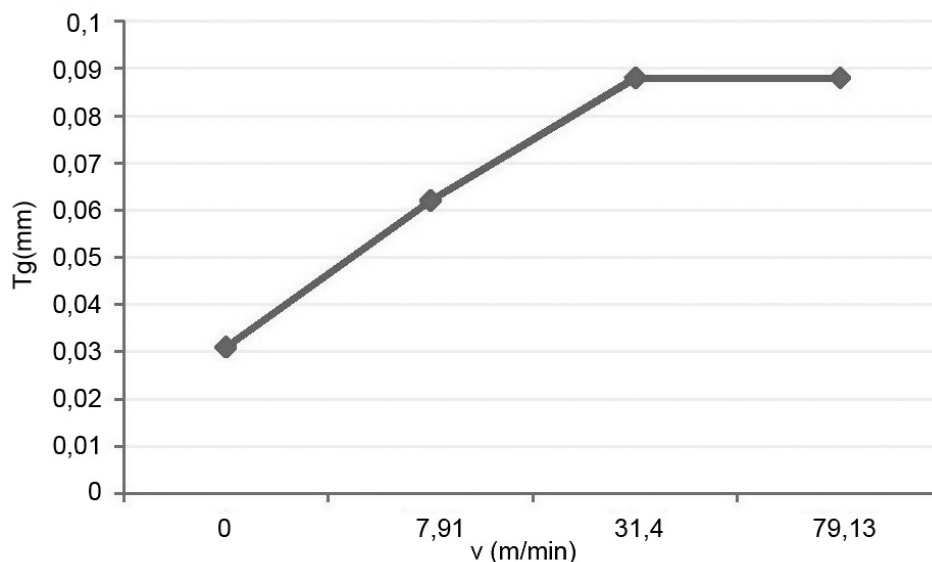


Figura 3. Efecto de la velocidad de corte en el tamaño del grano.

Como resultado de este desplazamiento, cambia la forma de las fibras, su tamaño y posiciones relativas. El proceso de deformación plástica está acompañado de una gran generación calor y cambio en las propiedades del metal. Uno de estos cambios es el crecimiento de su dureza, con el correspondiente incremento de su fragilidad (Arshinov & Alekseev, 1970). Por tanto, el aumento del tamaño del grano está relacionado con la deformación plástica del acero producida por el aumento de la velocidad de corte.

Dureza

La medición de la dureza se efectuó ocho veces en la probeta original y en las probetas maquinadas.

Los valores extraños de dureza HRB fueron los siguientes: para la probeta original (ninguno), para la medición número de orden 1 (77), para el 2 (78,8), para el 3 (79,9), para el 4 (91,8), para el 5 (ninguno), para el 6 (90,4), para el 7 (75,2), para el 8 (98,3) y para el 9 (60,1).

Después de que se eliminaron los valores extraños de dureza y se determinó el promedio, se convirtieron de HRB a HB, según ASM (1998).

La figura 4 muestra el efecto del avance (a) y de la velocidad de corte (b) en la dureza del acero elaborado. Se aprecia un incremento promedio de un 56% de la dureza de la pieza maquinada con respecto a la dureza original, lo que podría estar relacionado con el endurecimiento de la pieza resultante de la deformación plástica que se produce debido al corte.

También se observa una ligera disminución de la dureza de la pieza con el incremento del avance y la velocidad de corte, lo que coincide con el estudio de Rodrigues y colaboradores (2010); esto puede estar vinculado con el hecho de que el aumento del avance y de la velocidad de corte también incrementa la temperatura generada (Silva, 2007) y, por tanto, disminuye la resistencia del material.

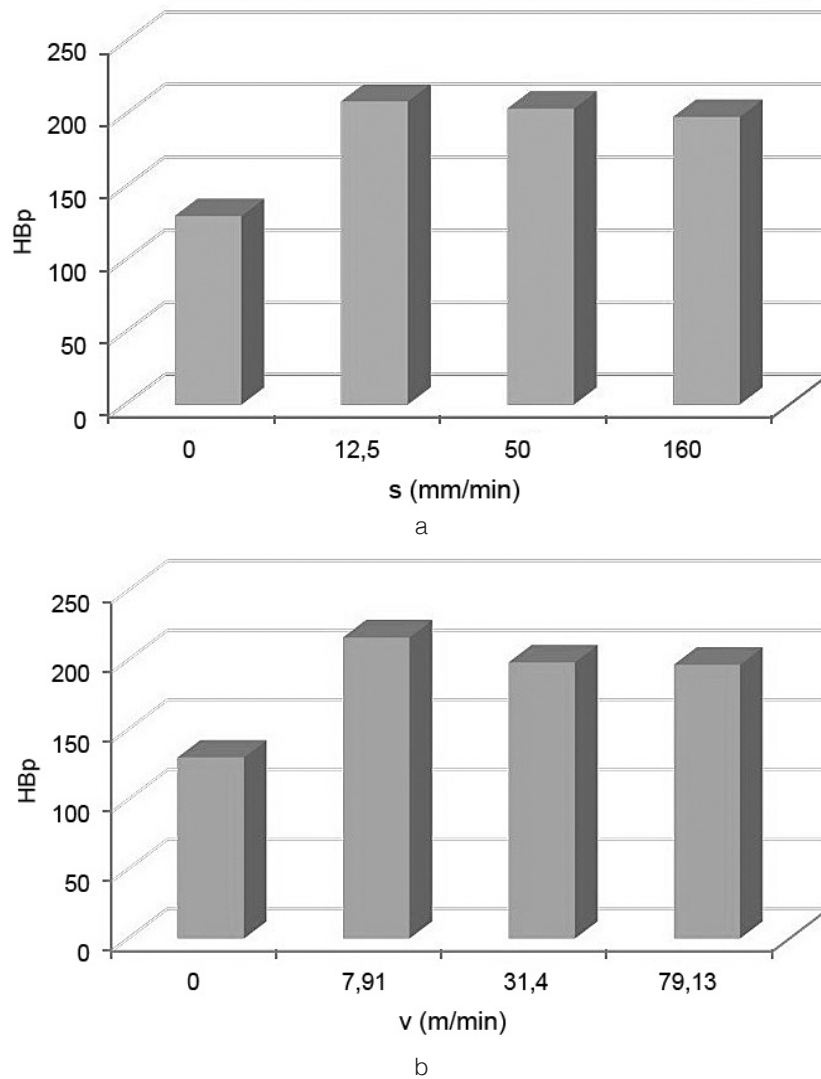


Figura 4. Efecto del avance (a) y la velocidad de corte (b) en la dureza promedio de la pieza.

Rugosidad superficial

En la figura 5 se observa el efecto del avance y de la velocidad de corte en la rugosidad superficial de la pieza maquinada. La rugosidad superficial registrada en las condiciones de elaboración varió entre $0,6 \mu\text{m}$ y $3,4 \mu\text{m}$, valores que se pueden considerar satisfactorios para una operación de fresado con fresa cilíndrica. En general, se obtuvieron mejores resultados después de maquinar a mayores valores de velocidad de corte y medio de avance.

El resultado de la velocidad de corte coincide con lo que generalmente es aceptado y con los estudios de Kumar y Venkateswara (2005), Nas y Demir (2010) y Choubey y colaboradores (2012).

En cuanto al avance, usualmente se admite que la rugosidad superficial aumenta con el aumento del avance, pero no en proporción lineal (Chang & Lu, 2006). En el presente estudio se obtuvo un mayor valor de rugosidad superficial a menor avance, coincidiendo con la investigación de Silva y colaboradores (2011). La causa probable es la formación del borde recrecido en la superficie de ataque de la herramienta.

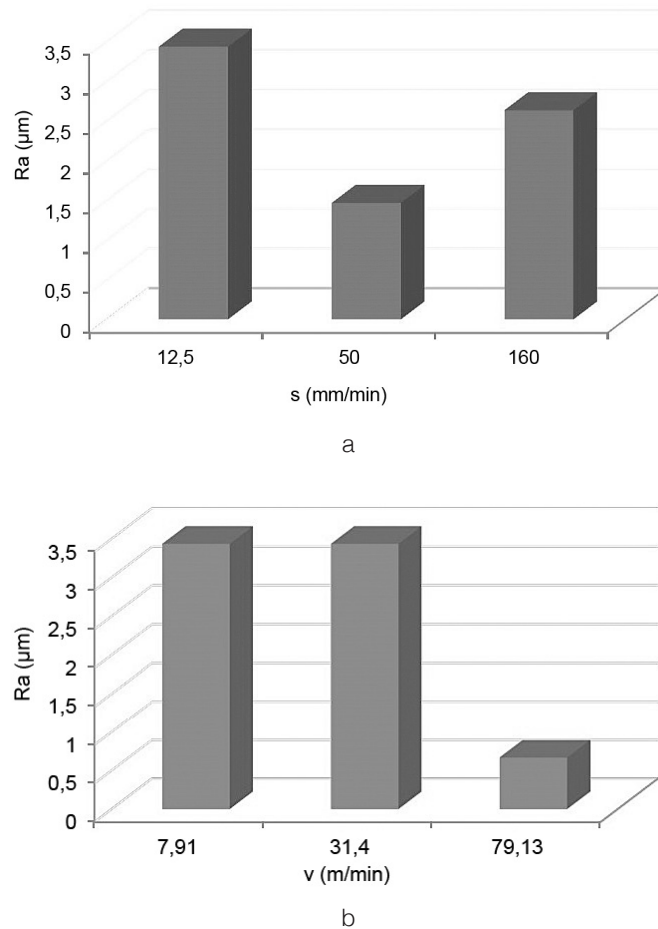


Figura 5. Efecto del avance (a) y de la velocidad de corte (b) en la rugosidad superficial de la pieza maquinada.

Desviaciones

En la figura 6 se observa el efecto del avance y de la velocidad de corte en las desviaciones de la pieza durante el fresado.

Para un incremento de la velocidad de corte de un 90% (de 7,91 m/min a 79,13 m/min), las desviaciones crecieron un 46,4% (de 0,143 mm a 0,267 mm). Por su parte, el aumento del avance en un 92,2% (de 12,5 mm/r a 160 mm/r) provocó un crecimiento de las desviaciones de un 18,1% (de 0,18 mm a 0,22 mm). Lo anterior permite apreciar que el incremento de la velocidad de corte mostró un mayor efecto en el aumento de las desviaciones de la pieza.

Este resultado puede estar vinculado a las particularidades de la operación de fresado, que es un corte discontinuo, es decir, a saltos, en el que cada diente participa en el corte un periodo de tiempo muy pequeño, provocando un aumento de las vibraciones y desviaciones, al aumentar la velocidad de corte y el avance.

El resultado podría considerarse similar al obtenido por Saffar y Razfar (2010), quienes observaron durante el fresado frontal que el aumento del avance incrementó la desviación de la herramienta de corte.

Por otro lado, para el fresado frontal, Patwari y colaboradores (2010) indican que un incremento del avance disminuye la inestabilidad (frecuencia de corte de la viruta), mientras que un incremento de la velocidad de corte aumenta la inestabilidad.

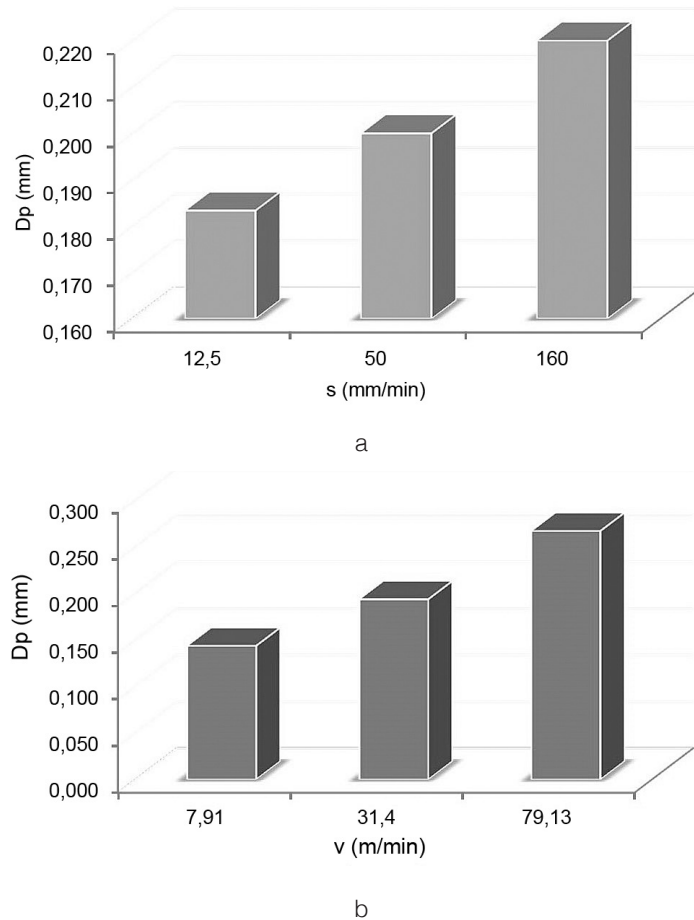


Figura 6. Efecto del avance (a) y la velocidad de corte (b) en las desviaciones de la pieza.

Selección de los parámetros de corte más adecuados

A continuación, se realiza una selección de los parámetros de corte más adecuados para las condiciones de maquinado establecidas, según el tipo de elaboración, es decir, desbaste o acabado (cuadro 5).

Según el tamaño del grano, a medida que este aumenta, crece la maquinabilidad del acero. Por ello, para la elaboración de desbaste se selecciona el valor de velocidad de corte que proporciona mayor T_g , mientras que para el acabado se considera el resultado opuesto.

Para la dureza de la pieza maquinada en la elaboración de desbaste, se seleccionan los valores de avance y velocidad de corte que menor dureza proporcionan, que coinciden con los valores máximos de estos parámetros y, por tanto, también garantizan una mayor productividad. Para el acabado se seleccionan los valores de parámetros de corte que mayor dureza revelaron, lo que podría ser favorable para el desempeño funcional de una pieza fabricada con este acero.

En cuanto a la rugosidad superficial, como en el desbaste no es un factor relevante, se seleccionaron los valores máximos de avance y velocidad de corte para lograr una mayor productividad. Para el acabado se seleccionaron los parámetros de corte que menor rugosidad superficial suministraron.

Finalmente, teniendo en cuenta las desviaciones registradas de la pieza durante el fresado, para el desbaste se seleccionaron los mayores parámetros de corte, puesto que para este tipo de elaboración no resultan trascendentales la exactitud ni la rugosidad superficial. Sin embargo, para el acabado se seleccionaron los valores de f y V que provocaron menores desviaciones.

Cuadro 5. Parámetros de corte más adecuados según el tipo de elaboración.

Tipo de elaboración	Tamaño del grano	Dureza HB	Rugosidad superficial (Ra)	Desviaciones
Desbaste		$f = 160 \text{ mm/min}$	$f = 160 \text{ mm/min}$	$f = 160 \text{ mm/min}$
	$v = 79,13 \text{ m/min}$	$v = 79,13 \text{ m/min}$	$v = 79,13 \text{ m/min}$	$v = 79,13 \text{ m/min}$
Acabado		$f = 12,5 \text{ mm/min}$	$f = 50 \text{ mm/min}$	$f = 12,5 \text{ mm/min}$
	$v = 7,91 \text{ m/min}$	$v = 7,91 \text{ m/min}$	$v = 79,13 \text{ m/min}$	$v = 7,91 \text{ m/min}$

Un análisis global de los resultados nos permite plantear que, para la elaboración de desbaste, los valores máximos de los parámetros de corte son los más adecuados.

Mientras que para el acabado, el avance mínimo fue preferente si se considera la dureza y las desviaciones de la pieza maquinada, el valor medio fue mejor para la rugosidad superficial. Además, la menor velocidad de corte fue destacada excepto para la rugosidad superficial, en la que la mayor velocidad resultó la de menor rugosidad superficial.

Conclusiones

Se realizó un estudio experimental de la influencia de la velocidad de corte y el avance, en el fresado en seco de una superficie plana de acero AISI 1010 con una fresa cilíndrica de acero de corte rápido, sobre la microestructura, el tamaño del grano, la dureza, la rugosidad superficial, así como las desviaciones de la pieza maquinada.

Los resultados muestran que, para las condiciones de corte establecidas, el fresado no provocó cambios en la microestructura del acero.

Al utilizar la menor velocidad de corte, el grano creció un 100% con respecto a su tamaño inicial, mientras que cuando se maquinó a velocidades de corte intermedia y máxima, se incrementó un 184%.

El aumento de la velocidad de corte y del avance provocan un incremento promedio del 56% de la dureza de la pieza maquinada con respecto a la dureza original, lo que puede estar relacionado con el endurecimiento de la pieza resultante de la deformación plástica que se produce debido al corte.

La rugosidad superficial varió entre $0,6 \mu\text{m}$ y $3,4 \mu\text{m}$, valores que se pueden considerar apropiados para esta operación. El efecto del avance fue variable, mostrando el menor valor de

rugosidad para el avance medio, mientras que el mejor valor de rugosidad se registró para la mayor velocidad de corte.

Las desviaciones de la pieza ascendieron 46,4% para un incremento del 90% de la velocidad de corte. Por su parte, el aumento del avance en un 92,2% provocó un crecimiento de las desviaciones del 18,1%. Esto permite apreciar que el incremento de la velocidad de corte mostró un mayor efecto en el aumento de las desviaciones de la pieza.

Finalmente, se seleccionaron las condiciones de corte más adecuadas, teniendo en cuenta los resultados obtenidos y las recomendaciones tecnológicas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los profesores Ing. Frank Adrián Garcés Cedeño, Ing. David Verdecia Fruto y M.Sc. Raúl Reyes Camareno, por el apoyo brindado para realizar esta investigación.

Bibliografía

- Arshinov, V. & Alekseev, G. (1970). *Metal Cutting Theory and Cutting Tool Design*. Moscú: Mir.
- ASM (1998). *Metals Handbook Desk Edition*. New York: ASM International.
- Badrinathan, K. S. & Karunamoorthy, L. (2013-2014). Study of the effect of progressive feed rate on the cutting force in CNC end milling of AISI 1045 steel. *International Journal of Engineering and Technology*, 5(6), 4741-4751. Recuperado de www.enggjournals.com/ijet/docs/IJET13-05-06-231.pdf
- Bernard, O. (1981). *Estadística aplicada*. La Habana: Científico Técnico.
- Braga, D.U., Neves, F., Silva, A. & Parreiras, L. (2012). Evaluación experimental del desempeño del proceso de fresado frontal del acero ABNT 1045 para herramientas con diferentes números de aristas. *Información Tecnológica*, 23, 89-96. doi: 10.4067/S0718-07642012000400011.
- Callister, W.D. (2007). *Materials Science and Engineering*. Danvers: John Wiley & Sons, Inc.
- Chang, C.-K. & Lu, H.S. (2006). Study on the prediction model of surface roughness for side milling operations. *Int J Adv Manuf Technol*, 29, 867-878. doi: 10.1007/s00170-005-2604-2.
- Choubey, A., Chaturvedi, V. & Vimal, J. (2012). The implementation of Taguchi methodology for optimization of end milling process parameter of mild steel. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 4(07), 3261-3267. Recuperado de <http://www.ijest.info/docs/IJEST12-04-07-136.pdf>
- Kumar, N. S. & Venkateswara, P. (2005). Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26, 1202-1210. doi: 10.1007/s00170-004-2110-y.
- Martínez, F. & Gordon, J. (1985). *Teoría y tecnología del tratamiento térmico*. La Habana: Pueblo y Educación.
- M'Saoubi, R., Outeiro, J.C., Chandrasekaran, H., Dillon, O.W. & Jawahir, I.S. (2008). A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. *Int. J. Sustainable Manufacturing*, 1(1/2), 203-236. Recuperado de <http://www.inderscience.com/info/inarticle.php?artid=19234>
- Nas, E. & Demir, H. (2010). The influence of number of inserts and cutting parameters on surface roughness in face milling. *Technology*, 13(1), 1-7. Recuperado de <http://jstech.karabuk.edu.tr/arsiv/2010-01/PDF/H.Demir-%20E.Nas%20,Volume13-1,1.pdf>
- NC05-08 1985. Método de Ensayo.
- Öktem, H. (2009). An integrated study of surface roughness for modelling and optimization of cutting parameters during end milling operation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43, 852-861. doi: 10.1007/s00170-008-1763-3.
- Palanisamy, P., Rajendran, I. & Shanmugasundaram, S. (2007). Optimization of machining parameters using genetic algorithm and experimental validation for end-milling operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, 644-655. doi: 10.1007/s00170-005-0384-3.

- Patwari, A., Nurul, A.K. & Faris, W. (2010). Identification of instabilities of the chip formation and its prediction model during end milling of medium carbon steel (S45C). *American J. of Engineering and Applied Sciences*, 3, 193-200. doi: 10.3844/ajeassp.2010.193.200.
- Rodrigues, A. et al. (2012). Surface integrity analysis when milling ultrafine-grained steels. *Materials Research*, 15, 125-130. doi: 10.1590/S1516-14392011005000094.
- Rodrigues, A., Matsumoto, H., Yamakami, W., Paulo, R.d.R. & Assis, C.F.d. (2010). Effects of milling condition on the surface integrity of hot forged steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 32(1), 37-43. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-58782010000100006>
- Saffar, R.J. & Razfar, M.R. (2010). Simulation of end milling operation for predicting cutting forces to minimize tool deflection by genetic algorithm. *Machining Science and Technology*, 14, 81-101. doi: 10.1080/10910340903586483.
- Shaikh, V., Boubekri, N. & Scharf, T. (2014). Analyzing the effectiveness of microlubrication using a vegetable oil-based metal working fluid during end milling AISI 1018 steel. *International Journal of Manufacturing Engineering*, 2014, 216-226. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1155/2014/261349>
- Silva, R.B.D. et al. (2011). Tool wear analysis in milling of medium carbon steel with coated cemented carbide inserts using different machining lubrication/cooling systems. *Wear*, 271, 2459-2465. doi: 10.1016/j.wear.2010.12.046.
- Syahmi, M., Mat, N. & Razlan, A. (2013). Taguchi method approach on effect of lubrication condition on surface roughness in milling operation. *Procedia Engineering*, 53, 594-599. doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.076.
- Thakre, A. (2013). Optimization of milling parameters for minimizing surface roughness using Taguchi's approach. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(6), 226-230. Recuperado de http://www.ijetae.com/files/Volume3Issue6/IJETAE_0613_39.pdf
- Zailani, Z.A., Hamidon, R., Hussin, M.S., Hamzas, M.F. & Hadi, H. (2011). The influence of solid lubricant in machining parameter of milling operation. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(6), 5221-5226. Recuperado de <http://www.ijest.info/docs/IJEST11-03-06-279.pdf>