

EFFECTO DEL MAQUINADO EN DURO EN LA REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE FABRICACIÓN DE CAVIDADES PARA MOLDES

EFFECT OF HARD MACHINING ON REDUCING THE MANUFACTURING TIME OF MOULD CAVITIES

JOSÉ MANUEL ARROYO OSORIO

Prof. Dr. Ing., Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, jmarroyoo@unal.edu.co

MARCELO MENDES DE AGUIAR

M.º Eng., Emicol Eletro Eletrônica S/A, S.P., Brasil, aguiar@emicol.com.br

RODOLFO RODRÍGUEZ BARACALDO

Prof. Dr. Ing., Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, rodriguezba@unal.edu.co

Recibido para revisar Noviembre 20 de 2011, aceptado Abril 27 de 2012, versión final Mayo 5 de 2012

RESUMEN: La tecnología de maquinado a alta velocidad (High Speed Machining o HSM) ha permitido el maquinado de aceros en estado endurecido. En este trabajo se comparó experimentalmente el tiempo fabricación de una cavidad de molde de pequeñas dimensiones utilizando la secuencia de procesos convencional que incluye electroerosión y utilizando una secuencia en que se realiza el proceso de fresado en duro con estrategias HSM tanto para desbaste como para acabado. El uso de la secuencia de procesos con maquinado HSM en duro resultó en una reducción de 55% en el tiempo de manufactura comparado con el proceso tradicional usando electroerosión. Sin embargo, es importante anotar que en aplicaciones específicas debe realizarse un análisis de la secuencia de procesos adecuada para cada caso particular considerando los costos y beneficios pues no hay una secuencia que sea mejor en todos los casos.

PALABRAS CLAVE: maquinado en duro, maquinado a alta velocidad, cavidades para molde, tiempo de fabricación

ABSTRACT: The high speed machining (HSM) technology has allowed the machining processing of hardened steels. In this paper we compared experimentally the manufacturing time to produce a mould cavity of small dimensions using the conventional process sequence that includes EDM and using a sequence with hard HSM milling strategies for both roughing and finishing. The sequence with hard HSM milling resulted in a reduction of 55% of total manufacturing time compared with the traditional process using EDM. However, it is important to note that for specific applications it should be done an analysis of the appropriate processes sequence for each particular case considering the costs and benefits, because there is no sequence that is best in all situations.

KEYWORDS: hard machining, high speed machining, mould cavities, manufacturing time

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de fabricación dominante para la producción en masa de componentes plásticos para electrónica de consumo, partes para automotores, equipo médico y artefactos domésticos en general es el proceso de inyección de plástico. Adicionalmente, un número creciente de partes metálicas están siendo reemplazadas por partes de plástico debido a que este material facilita la obtención de piezas con geometría más compleja y mejores relaciones resistencia-peso. Debido a la fuerte competencia internacional en este sector, el objetivo permanente de los productores de moldes para inyección es reducir el *lead-time* sin comprometer los requisitos de calidad, esta dinámica se origina

directamente en las demandas del mercado pues los clientes de la industria de moldes deben a su vez mantenerse en posición competitiva con productos que tienen ciclos de vida cada vez más reducidos.

El proyecto de fabricación de un molde incluye las etapas de diseño, manufactura y ensayos, la fase de manufactura a su vez involucra las etapas de planeación de procesos, programación CAM/CNC, maquinado de los componentes y finalmente el ensamble del molde completo. Los moldes y matrices se componen de partes estructurales y funcionales. Dentro de las partes estructurales se destaca la base del molde que es típicamente subcontratada e incluye varias placas con gran cantidad de ranuras y agujeros, los otros componentes estándar como pines, *nipples* y deflectores

se obtienen también de proveedores especializados. Las partes funcionales del molde involucran con gran frecuencia superficies complejas esculpidas en las llamadas cavidades del molde. Las intrincadas geometrías y la elevada dureza final de los materiales utilizados convierten el trabajo de diseño y fabricación de cavidades de molde en una tarea de ingeniería demandante y difícil, de hecho la fabricación de las partes funcionales del molde ocupa más del 60% del tiempo total de manufactura [1,2].

Los procesos de fresado convencional y electroerosión son las operaciones de maquinado más utilizadas en el proceso de fabricación de cavidades para moldes. Sin embargo la introducción de la tecnología de maquinado a alta velocidad (*High Speed Machining* o HSM) ha permitido el fresado de cavidades en aceros endurecidos produciendo una ampliación en la gama de aplicación de procesos de fresado para la fabricación de cavidades de molde. En la secuencia tradicional de procesos para fabricar los núcleos y las cavidades del molde, el tratamiento térmico se realiza como un paso intermedio después del desbaste y antes del acabado y pulido. Pocas fábricas de moldes han incursionado en el desbaste en duro utilizando HSM a pesar de que realizar el tratamiento térmico antes del proceso de desbaste produciría reducciones en el *lead-time* así como un flujo de proceso más estable [3].

El proceso de pulido de las cavidades del molde se puede realizar manualmente por abrasión o mediante procesos automáticos como electroerosión o maquinado electroquímico pero frecuentemente los procesos de pulido automáticos no son aplicables en el caso de moldes de inyección de plástico debido a que los requerimientos de calidad de superficie de las cavidades de este tipo de moldes son generalmente muy exigentes y a que las geometrías son demasiado complejas. El uso de tecnología HSM ofrece la posibilidad de reducir el *lead-time* debido también a la disminución del esfuerzo en las operaciones de pulido y a que puede reemplazar varios pasos de electroerosión en desbaste y acabado [4]. De hecho con la aplicación de las estrategias correctas, el proceso HSM ofrece dos beneficios principales a saber, la posibilidad de remover material más rápidamente y la habilidad para producir acabados de superficie tan buenos que no se requiere pulido manual adicional [5]. En función de la geometría de la cavidad puede elegirse maquinado HSM o electroerosión o una combinación de los dos procesos para fabricarla pues en muchos casos no todas las regiones de la cavidad de un molde pueden

fresarse y dependiendo de las restricciones de geometría algunas deben obtenerse por electroerosión [6,7].

El concepto de maquinado a alta velocidad (HSM) para procesar acero endurecido involucra la posibilidad de maquinar aceros con dureza mayor a 50 HRC utilizando para ello velocidades de corte entre 5 y 10 veces las utilizadas para maquinado convencional [8]. En particular el fresado HSM involucra generalmente procesos con fresas de punta esférica de diámetro pequeño (≤ 10 mm) utilizando elevadas frecuencias rotacionales (≥ 10.000 r.p.m.) y altas velocidades de avance (entre 2000 y 10000 mm min⁻¹). Un factor determinante en el desarrollo exitoso de la tecnología HSM para el fresado de aceros endurecidos ha sido el avance en materiales para herramientas de corte. Un caso emblemático son las fresas de punta esférica con sustrato de metal duro micrograno (tamaño de grano $< 1 \mu\text{m}$) y con recubrimientos incluyendo AlTiN en su estructura. Este tipo de fresas han permitido el maquinado de aceros con durezas de hasta 60 HRC [9,10]. Para prevenir la deflexión y desviaciones de la fresa preservando altos niveles de precisión (tolerancias y geometría) de la cavidad fabricada se recomienda que las profundidades de corte tanto axial (a_p) como radial (a_e) no excedan 0.2 mm [6]. De acuerdo con Zurek [11], el fresado exitoso en duro es el resultado de implementar un sistema completo que incluye la máquina, las herramientas de corte, los portaherramientas y el sistema CAD/CAM.

Las ventajas de producir componentes en estado endurecido incluyen: reducción de los costos de producción, reducción del *time to market*, reducción de la cantidad necesaria de máquinas herramienta, mejoramiento de la calidad de superficie de las piezas, disminución de las operaciones de acabado, eliminación de distorsiones resultantes del tratamiento térmico y la obtención de elevadas tasas de remoción de material en comparación con el proceso de electroerosión [12]. Con el objetivo de evaluar en términos cuantitativos el beneficio de utilizar tecnología HSM para maquinado en duro en el proceso de fabricación de cavidades de molde, en este trabajo se comparó experimentalmente el tiempo fabricación de una cavidad de molde de pequeñas dimensiones utilizando dos secuencias de procesos: la tradicional utilizando electroerosión para el maquinado de la cavidad y una segunda secuencia en que se realizaron tanto el desbaste como el acabado en duro utilizando HSM.

2. MATERIALES Y METODOS

Los ensayos se ejecutaron en un centro de maquinado vertical Hermle C_600_V, con controlador Heidenhain TNC 430, potencia máxima de 15 kw, frecuencia de rotación entre 20 y 16000 r.p.m., velocidad de avance programable máxima de $30000 \text{ mm min}^{-1}$, velocidad de avance rápido de $35000 \text{ mm min}^{-1}$, volumen de trabajo $X \times Y \times Z$ de $600 \times 450 \times 450 \text{ mm}$, equipado con sistema de fijación de precisión HSK_A_63, función *look ahead* de 128 líneas, tiempo de procesamiento de bloque entre 3 y 4 ms y aceleración de 5 m s^{-2} .

El proceso de electroerosión se realizó en una máquina Infresa Compact 2 con recorridos $X \times Y \times Z$ de $300 \times 220 \times 200 \text{ mm}$ y rango de amperaje entre 1 y 60 A. El material de trabajo utilizado fue acero para herramienta de trabajo en caliente AISI_H13 en estado recocido y en estado endurecido (50-52 HRC) en bloques con dimensiones de $25 \times 100 \times 110 \text{ mm}$ y con composición química declarada por el fabricante de: 0.40% C, 1.00% Si, 5.30% Cr, 1.40% Mo, 1.00% V y Fe completando el balance. Este acero se utiliza para la fabricación de matrices de forjado, moldes para inyección de plásticos o zamak, herramientas para corte en caliente, matrices para fundición de aleaciones de aluminio, plomo, estaño, zinc, herramientas para extrusión de aleaciones leves, etc. [13]. Al igual que con muchas otras clases de aceros, para este es necesario un ciclo de tratamiento térmico de temple y revenido para aumentar su dureza y principalmente su resistencia al desgaste en procesos como el descrito en [15].

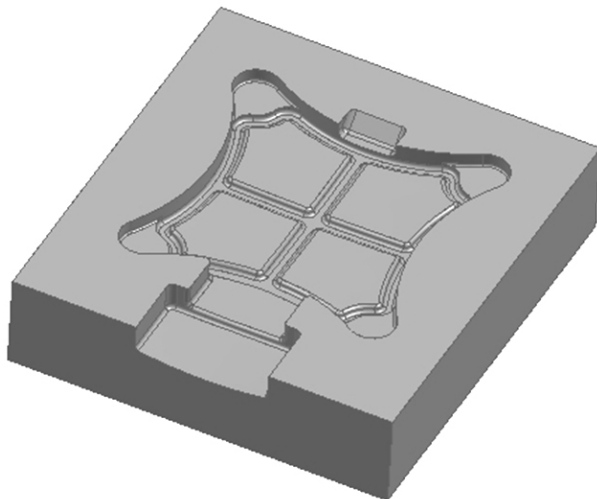
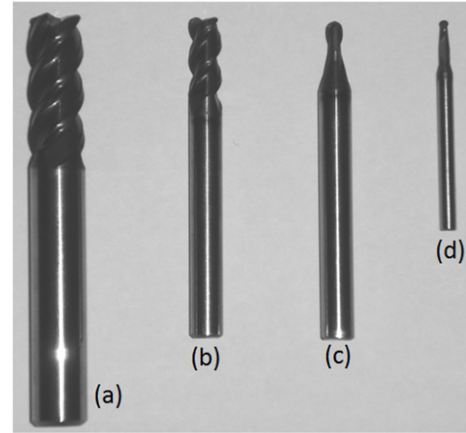


Figura 1. Diseño de la cavidad de molde sobre un bloque de $25 \times 100 \times 110 \text{ mm}$



Herramienta	v [m min ⁻¹]	a_p [mm]	a_e [mm]	f_z [mm]
(a) Fresa toroidal D10.0, R1.0, 4 filos	130	0.50	4.00	0.040
(b) Fresa toroidal D6.0, R1.0, 3 filos	130	0.35	3.00	0.030
(c) Fresa punta esférica D3.0, 2 filos	130	0.25	0.25	0.028
(d) Fresa punta esférica D2.0, 2 filos	130	0.15	0.10	0.025

Figura 2. Herramientas de corte y parámetros de proceso recomendados por el fabricante

En la figura 1 se ilustra la cavidad de molde diseñada para los experimentos, en cuya concepción se utilizaron como base elementos geométricos utilizados en componentes de electrodomésticos. Para el diseño CAD de la cavidad del molde y los electrodos necesarios así como para el diseño CAM de los procesos de maquinado relacionados, se utilizó el sistema Siemens-NX4.

Las herramientas de corte utilizadas para los ensayos se muestran en la figura 2, fueron cuatro fresas enterizas comerciales, de alto desempeño, de metal duro micrograno con recubrimiento PVD de TiAlN, con microdureza de 3500 HV y que resisten bien a temperaturas de hasta $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Las fresas de tipo punta toroidal o esférica son recomendadas para aplicaciones HSM debido a que presentan menor susceptibilidad al astillamiento que las fresas de punta recta.

Aunque algunos autores han sugerido velocidades de corte de hasta 200 m min^{-1} para esta aplicación [14], en este trabajo se adoptó una posición conservadora y se utilizaron los parámetros de corte (velocidad de corte v , profundidad de corte axial a_p , profundidad de corte radial a_e y avance por diente f_z) próximos a los

recomendados por el fabricante de las herramientas (ver figura 2) o limitados por la máxima frecuencia rotacional de la máquina (16000 r.p.m.).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 1. Tiempos de desbaste cavidad en estado recocido

Operación	v [m min ⁻¹]	n [r.p.m.]	f_z [mm]	a_p [mm]	a_e [mm]	t [min]
Preparación						20
Programación CNC						30
Desbaste (D10.0)	200	6410	0.07	0.25 a 0.75	Max. 0.8D	6
Re-desbaste 1 (D6.0)	200	11966	0.05	0.25	Max. 0.8D	5
Re-desbaste 2 (D3.0)	75	16000	0.03	0.2	Max. 0.8D	8
Tiempo desbaste cavidad en estado recocido [min]						69

En la Tabla 1 se listan los tiempos de proceso medidos experimentalmente para las operaciones de desbaste de la cavidad en estado recocido.

Para el proceso de electroerosión por penetración se proyectó el juego de tres electrodos mostrados en la figura 3, siendo necesario un juego para desbaste y un juego para acabado.

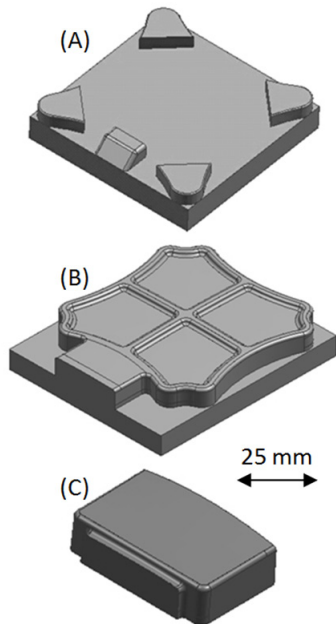


Figura 3. Diseños del juego de electrodos necesario

Del juego necesario de electrodos, se fabricó el electrodo (A) de desbaste y el de acabado con diferencia total entre la medida nominal y la medida del electrodo de 0.50 mm y 0.10 mm respectivamente. En el caso de este electrodo, se midió experimentalmente el tiempo de fabricación respectivo.

Para estimar el tiempo de fabricación de los otros dos electrodos se sumaron el tiempo de escuadramiento del electrodo (A) en la fresadora convencional y el tiempo de corrida en vacío de los programas de fabricación respectivos en el centro de maquinado. Para el proceso de electroerosión con el electrodo (A) se utilizaron datos de proceso basados en la experiencia del operador. Para desbaste se utilizó una corriente de 14.0 A y para acabado 4.0 A. El tiempo para el proceso de electroerosión de desbaste y acabado se midió directamente en el caso de las cavidades fabricadas con el electrodo (A). El tiempo respectivo para desbaste y acabado con los otros dos electrodos se estimó proporcionalmente al tiempo obtenido con el electrodo (A) y al volumen de material a remover estimado con el programa CAD/CAM en cada caso. En la tabla 2 se ilustran las mediciones de tiempo y los tiempos calculados respectivos para todos los procesos relacionados con la electroerosión de las cavidades. La figura 4 es una fotografía de la pieza después del proceso de electroerosión junto con el electrodo (A) también mostrado.

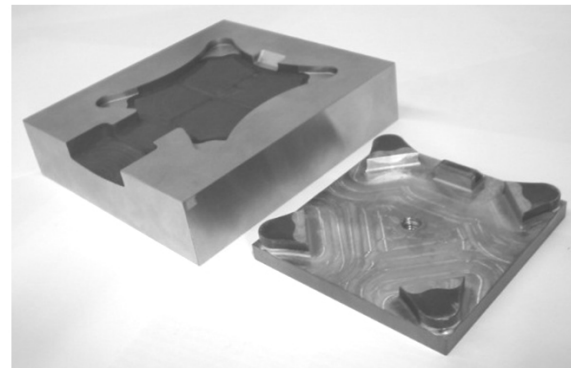


Figura 4. Pieza y electrodo (A) maquinados en la secuencia tradicional de procesos

Para el diseño de cavidad propuesto, es posible realizar todas las operaciones de desbaste y acabado en el centro de maquinado de tres ejes disponible. Con el material en estado endurecido se realizaron las operaciones de fresado HSM listadas en la Tabla 3 para obtener la cavidad respectiva.

Tabla 2. Tiempos asociados a la electroerosión de la cavidad

	Tiempos fabricación [min]		Volumen de material a remover [mm ³]		Tiempos electroerosión [min]	
	Fresadora	Centro de maquinado	Desb.	Acab.	Desb.	Acab.
Electrodo [A]	30	20	209	42	25	35
Electrodo [B]	30	50	628	125	75	104
Electrodo [C]	30	15	132	26	16	22
Tiempo total maquinado	175Desb.+ 175Acab.= 350		Tiempo total electroerosión		277	
Tiempo diseño, programación CNC [min]						70
Tiempo preparación (fresado, centro de maquinado, electroerosión) [min]						180
Tiempo total fabricación de electrodos y electroerosión [min]						877

Tabla 3. Tiempos fresado HSM de la cavidad en estado endurecido

Herramienta	Operación	v [m min ⁻¹]	n [r.p.m.]	f_z [mm]	a_p [mm]	a_e max. [mm]	t [min]
Fresa D10.0	Desbaste	130	4252	0.04 a 0.05	0.5 a 0.25	4.0	4
Fresa D6.0	Redesbaste 1	130	8194	0.03	0.15	3.0	12
Fresa D3.0	Redesbaste 2 (De \approx 1.3)	65	16000	0.028	0.15	0.25	30
Fresa D6.0	Acab fondo plano	130	8191	0.02	3.0	0.1	1
	Acab paredes	130	6897	0.03	1.0	0.15	12
Fresa D3.0	Acab rampa (De \approx 2.1)	106	16000	0.03	0.08	0.10	6
	Acab fondo rampa (De \approx 1.08)	54	16000	0.02	0.1	0.08	1
	Acab tope (De \approx 1.08)	54	16000	0.025	0.1	0.08	47
Fresa D2.0	Acab fondo tope	100	16000	0.02	0.1	0.07	38
	Acab fondo tapa (De \approx 0.90)	45	16000	0.02	0.1	0.07	14
	Acab radios	100	16000	0.025	0.05	0.10	9
Programación CNC							100
Preparación							30
Tiempo maquinado HSM cavidad en duro con HSM							304

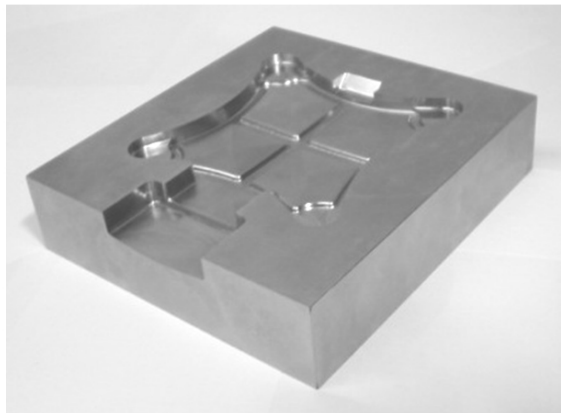


Figura 5. Pieza fabricada con desbaste y acabado HSM en estado endurecido

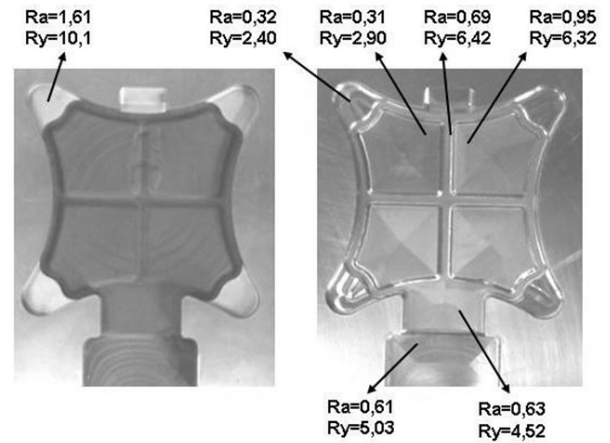


Figura 6. Comparación de la rugosidad Ra y Ry [μ m] obtenida las piezas de prueba

La Figura 5 es una fotografía de la pieza fabricada con el material en estado endurecido. En la Figura 6 se muestra la diferencia de rugosidad entre las superficies obtenidas por electroerosión y las superficies obtenidas mediante fresado HSM en estado endurecido. Esta

diferencia en rugosidad explica porque es menor el tiempo de pulido manual para las superficies obtenidas por fresado HSM en duro que el requerido para pulir las superficies obtenidas por electroerosión.

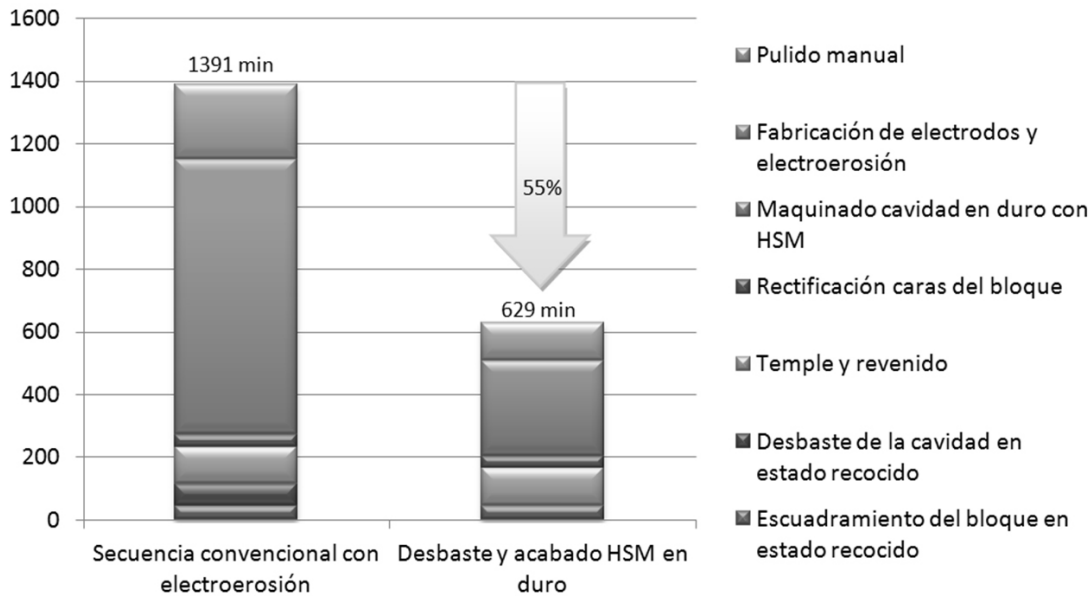


Figura 7. Comparación tiempos de fabricación [min] para cada secuencia de procesos

En la Figura 7 se resumen los resultados de tiempo de fabricación para las dos secuencias de fabricación utilizadas. Para la cavidad propuesta que tiene un volumen relativamente pequeño, la secuencia de procesos utilizando maquinado HSM en duro presentó un claro beneficio con una disminución del tiempo de fabricación de 55%. En el caso de cavidades en que sea necesario remover grandes volúmenes de material debe evaluarse la opción de realizar el desbaste con el material en estado recocido y el acabado en duro con maquinado HSM. Adicionalmente para cavidades cuya geometría no pueda ser obtenida mediante procesos de fresado es posible que deba realizarse una combinación de procesos utilizando maquinado HSM y electroerosión. Otro factor a considerar es el acabado previsto en la pieza de plástico inyectada, debido a que en determinados productos se desea que la superficie tenga la textura producida por electroerosión.

4. CONCLUSIONES

En el caso particular de la cavidad fabricada en este trabajo, el proceso de desbaste y acabado por fresado

HSM es claramente ventajoso frente al proceso tradicional usando electroerosión desde el punto de vista de tiempo de fabricación. Para decidir la secuencia de procesos más conveniente en situaciones de fábrica reales, suponiendo que se cuenta con la tecnología HSM necesaria, debe realizarse un análisis para el caso particular considerando los costos y beneficios pues no hay una secuencia de proceso que sea mejor en todos los casos.

Comparado con el proceso tradicional, el proceso de maquinado HSM en acabado es ventajoso siempre y cuando las características geométricas de la pieza fabricada permitan su utilización pues no siempre es posible terminar totalmente una cavidad con operaciones de fresado debido a posibles limitaciones geométricas de la misma, por ejemplo, radios de esquina muy pequeños o cavidades muy profundas que demandarían voladizos inaceptables en el montaje de las herramientas. También deben considerarse las limitaciones en cuanto a máquina, herramientas de corte, sistemas CAD/CAM y disponibilidad de profesionales con capacidad técnica para gestionar las tecnologías asociadas al maquinado HSM.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Colombia por su política de apoyo a estudios de Doctorado de sus profesores. Al ingeniero Giulio Cesar Colombini Massarelli por sus contribuciones al trabajo y por la consecución de las herramientas de corte utilizadas.

REFERENCIAS

- [1] Fallböhrer, P., Altan, T., Tönshoff, H-K. and Nakagawa, T., Survey of the die and mold manufacturing industry - Practices in Germany, Japan, and the United States, *Journal of Materials Processing Technology*, 59, pp. 158-168, 1996.
- [2] Low, M. L. H. and Lee, K. S., Mould data management in plastic injection mould industries, *International Journal of Production Research*, 46, pp. 6269-6304, 2008.
- [3] Fallböhrer, P., Rodríguez, C. A., Özel, T. and Altan, T., High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, 98, pp. 104-115, 2000.
- [4] Altan, T., Lilly, B., Yen, Y. C. and Altan, T., Manufacturing of Dies and Molds, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 50, pp. 404-422, 2001.
- [5] Dickin, P., Modern mould machining, *Machinery*, 164, pp. 53-54, 2006.
- [6] Krajnik, P. and Kopač, J., Modern machining of die and mold tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 157-158, pp. 543-552, 2004.
- [7] Mahajan, K. R., Knoppers, G. E., Oosterling, J. A. J. and Van Luttervelt, C. A., Knowledge based design of EDM electrodes for mould cavities pre-machined by high-speed milling, *Journal of Materials Processing Technology*, 149, pp. 71-76, 2004.
- [8] Dewes, R. C., Ng, E., Chua, K. S., Newton, P. G. and Aspinwall, D. K., Temperature measurement when high speed machining hardened mould/die steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93, pp. 293-301, 1999.
- [9] López De Lacalle, L. N., Lamikiz, A., Salgado, M. A., Herranz, S. and Rivero, A., Process planning for reliable high-speed machining of moulds, *International Journal of Production Research*, 40, pp. 2789-2809, 2002.
- [10] Toh, C. K., Design, evaluation and optimisation of cutter path strategies when high speed machining hardened mould and die materials, *Materials and Design*, 26, pp. 517-533, 2005.
- [11] Zurek, G., The secrets to hard milling success, *MoldMaking Technology*, 4, pp. 14-18, 2004.
- [12] Aslan, E., Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC), *Materials and Design*, 26, pp. 21-27, 2005.
- [13] Axinte, D. and Dewes, R., High-speed milling of AISI H13 hot-work tool steel using polycrystalline cubic boron nitride ball-nose mills: From experimental investigations and empirical modelling to functional testing of the machined surfaces, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 224, pp. 1 -24, 2010.
- [14] Coldwell, H., Woods, R., Paul, M., Koshy, P., Dewes, R. and Aspinwall, D., Rapid machining of hardened AISI H13 and D2 moulds, dies and press tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 135, pp. 301-311, 2003.
- [15] Higuera, O., Moreno, C. y Ramirez, C., Efecto del precalentamiento y la severidad de temple sobre la resistencia al desgaste adhesivo del acero austenítico al manganeso, *Dyna-Colombia*, 164, pp. 76-87, 2010.