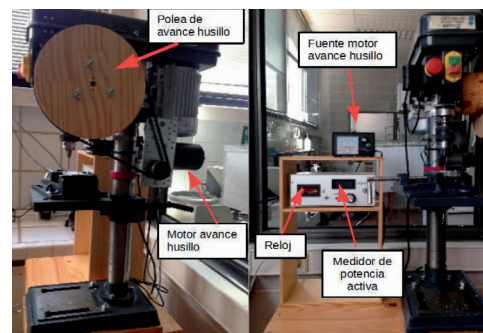


Estimación de la maquinabilidad mediante monitorización del taladrado

Machinability estimation by drilling monitoring



Hernán González-Rojas¹, Amelia Nápoles-Alberro¹ y Antonio Sánchez-Egea^{2,3}

¹ Universitat Politècnica de Catalunya. Dpto. Ingeniería Mecánica (EPSEVG). Av. de Victor Balaguer, 1 – 08800 Vilanova i la Geltrú, Barcelona (España).

² Universidad Pontificia Católica de Chile. Dpto. Ingeniería Mecánica y Metalúrgica. Av. Vicuña Mackenna, 4860. Region Metropolitana (Chile).

³ Universidad del País Vasco. CFAA. Dpto. Ingeniería Mecánica. Alameda de Urquijo, s/n – 48013 Bilbao, Vizcaya (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8821> | Recibido: 03/05/2018 • Inicio Evaluación: 16/05/2018 • Aceptado: 10/07/2018

ABSTRACT

• This article describes the development of a methodology to measure the specific cutting energy (SCE) in drilling. The SCE allows characterizing the machining process, thus obtaining a technologic approach that allows to carry out a planning of the chip removal process. The main frame of this machine consists of a pedestal drill, instrumented with: a meter, a motor that controls the spindle speed, safety elements such as limit switches and an active power meter coupled to the drill motor. The mechanical power is calculated indirectly through the active power. To this end, it must have a previous calibration with a torque dynamometer to record the output curve and, subsequently, display the relationship between the mechanical power and the active electrical power. To validate the capability of this method, the EEC of three different materials is evaluated, an aluminum 7075-T6 and the steels C45E y 34CrNiMo6. It has been verified that the estimated SCE values correspond to those described by the literature. The influence of several parameters, like the cutting speed and the feed rate, on the SCE allows to estimate the sensitivity of this method. Finally, this work shows that the SCE in steel increases with the increase of the feed rate, whereas in aluminum the behavior is the opposite, the SCE decreases as the feed rate increases.

• **Keywords:** Specific cutting energy, material removal rate, cutting power, feed rate, drilling.

RESUMEN

Este artículo describe el desarrollo de un método para evaluar la Energía Específica de Corte (EEC) en el taladrado. Este parámetro permite caracterizar el proceso de mecanizado, obteniendo con ello un modelo tecnológico general que permite realizar una planificación del proceso de arranque de viruta. El cuerpo principal de la máquina está formado por un taladro de pedestal, instrumentalizado con: un motor que controla la velocidad de avance del husillo, los elementos de seguridad para los finales de carrera y un medidor de potencia activa acoplado al motor del taladro. La potencia mecánica se obtiene indirectamente a través de la potencia activa, realización una calibración previa con un dinamómetro de par, de la que se obtiene la curva que relaciona la potencia mecánica con la potencia activa. Para demostrar el correcto funcionamiento del método se evalúa la EEC de tres materiales, un aluminio 7075-T6 y los aceros C45E y 34CrNiMo6. Se ha podido comprobar que los valores estimados de energía corresponden a

los descritos en la literatura. Un estudio de la dependencia que tiene la EEC de los parámetros velocidad de corte y velocidad de avance, permite observar la sensibilidad del método. Finalmente, este trabajo muestra que la EEC en los aceros aumenta a medida que aumenta la velocidad de avance, en cambio en el aluminio el comportamiento es inverso, la EEC disminuye a medida que la velocidad de avance aumenta.

Palabras clave: Energía específica de corte, tasa de material removido, potencia de corte, velocidad de avance, taladrado.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al aumento del precio de la energía, la eficiencia de los procesos de mecanizado se ha ido convirtiendo gradualmente en el centro de atención, tanto del ámbito académico como del industrial. Sobre todo, considerando que en los productos fabricados el impacto económico de los procesos de mecanizado es aproximadamente el 15% [1].

Se puede observar que las investigaciones de mecanizado relacionadas con la geometría de la herramienta y la Energía Específica de Corte (EEC) se han llevado a cabo desde 1950. Han sido realizados varios estudios, ya sea para el mecanizado con velocidad de corte convencional como para el de alta velocidad. La tasa de material removido es uno de los parámetros importantes en los procesos de arranque de viruta ya que en ella se encuentran definidas todas las condiciones de corte, razón por la cual es un parámetro habitual de estudio, al igual que las fuerzas de mecanizado [2]. De forma similar el volumen de material arrancado también es objeto de estudio, tanto para materiales convencionales como para aleaciones de automoción y aeronáuticas, actualmente en auge [3]. Estos materiales son difíciles de mecanizar y la falta de información sobre los parámetros de mecanizado, está retrasando su aplicación a la industria aeroespacial y automotriz.

La EEC puede entenderse como la relación entre la potencia de corte y la tasa de material removido, o lo que es lo mismo, una relación entre la energía de corte y el volumen de viruta arrancada [4]. Esta definición hace posible crear modelos tecnológicos generales los que permiten realizar una planificación precisa del proceso de arranque de viruta. Los modelos clásicos de fuerzas indican que la fuerza de corte específica no se puede modelar utilizando una única función analítica de bajo nivel, debido principalmente a la marcada presencia del efecto-tamaño [5]. El estudio de la EEC tiene una componente empírica importante como se puede ver en los siguientes trabajos. Rodrigues et al. [6] evalúa la EEC

en un fresado frontal de alta velocidad, como una función de la velocidad de corte y la geometría de la herramienta. Las fuerzas en este experimento se miden con una mesa dinamométrica y el volumen de material arrancado se obtiene midiendo la diferencia de masa de material antes y después de mecanizar. Además, a EEC se puede considerar como un parámetro adecuado para estudiar el fresado de alta velocidad (HSC). Esta representa muy bien el fenómeno de corte, ya que está normalizada y es más sensible a la baja profundidad de corte, característica propia de las operaciones de HSC. Jun et al. [7] presenta un modelo para el consumo de energía específica de los procesos de fabricación, con el propósito de obtener la huella energética para un proceso de mecanizado y planificar los procesos que requieren definir condiciones de corte. La energía específica consumida se define como el cociente entre la integral de la potencia activa en el tiempo dividida por el volumen de material arrancado. Wu et al. [8] estudia la EEC en un micro-mecanizado con torno. Donde la formación de viruta se caracteriza por tener un ángulo de desprendimiento negativo, esto produce un aumento no lineal de la EEC. Este parámetro se evalúa como el cociente entre la fuerza de corte y un área de corte, definida por el producto del espesor de viruta no deformada y el ancho de corte. En general en todos los trabajos antes mencionados, la EEC se obtiene como un cociente entre la fuerza de corte medida en forma experimental y la sección de una viruta que se desprende. Normalmente, el objetivo principal suele ser optimizar la energía consumida en el proceso, debido al impacto que tiene este consumo en el medio ambiente [9]. Otra forma de estimar la EEC es la que detalla Sánchez et al. [10], trabajo que estudia el mecanizado en torno asistido por pulsos de corriente. En dicho trabajo se utiliza la EEC para comparar el proceso de mecanizado asistido con respecto al mecanizado convencional, y demuestra que la sensibilidad mostrada por la EEC en la caracterización del proceso de arranque de viruta resulta de gran utilidad para caracterizar ambos procesos. De forma similar, Hammed et al. [11] compara el taladrado convencional con el taladrado asistido con pulsos de corriente, y comprueba que el proceso asistido consume menos energía que el convencional, lo que hace que la EEC también disminuya y por tanto el material es más fácil de mecanizar. En estos dos últimos trabajos la EEC se obtiene como el cociente entre la potencia de corte consumida y la tasa de material removido.

En todos los trabajos mencionados, la evaluación de la EEC ha requerido de tiempo experimentación y del uso de equipos, con su correspondiente coste e incertidumbre, no siempre al alcance de los centros de investigación y de la industria. El objetivo de este trabajo es el desarrollo de una máquina y una metodología que permite estimar de forma rápida la EEC, permitiendo que un taller cualquiera pueda definir las condiciones de corte adecuadas al proceso de mecanizado que está realizando y a los materiales que procesa. Por ello, en este trabajo evaluamos la EEC de tres materiales diferentes, un aluminio y dos aceros, con el propósito de validar dicha instrumentación del proceso. También se estudia la dependencia que tiene la EEC con la velocidad de corte y la velocidad de avance, evaluando con ello la sensibilidad de la máquina y la maquinabilidad de los diferentes materiales. Por último, se debe comentar que el método de estimación de la EEC se puede aplicar a cualquier otro proceso de arranque de viruta como puede ser un mecanizado en el que haya una vibración natural o auto-excitada [12].

2. MATERIALES Y MÉTODO

Los materiales ensayados son aluminio 7075-T6, acero C45E (norma UNE F1140) y acero 34CrNiMo6 (norma UNE F1272). Las

probetas utilizadas corresponden a una barra cilíndrica de 30 mm de diámetro y una longitud de 20 mm, a las que se les realizan taladrados de diferentes diámetros y de entre 10 mm y 15 mm de profundidad, como se muestra en la Fig. 1. Las herramientas usadas en los experimentos son brocas convencionales de acero rápido HSS DIN 338, de diámetro 3,0; 4,5 y 5,5 mm, con ángulo de la punta de 118° y ángulo de la hélice de 25°. Para realizar los agujeros se utilizaron de forma aleatoria, 3 brocas de cada uno de los diámetros antes mencionados.



Fig. 1: Probeta taladrada de acero aleado C45E para medir la maquinabilidad usando diferentes brocas.

Para el cálculo de la EEC, se mide experimentalmente la potencia mecánica consumida por el corte P_m y se calcula la tasa de material removido Q_c . A continuación, se describe el proceso de evaluación y los equipos utilizados. El cuerpo principal de la máquina es un taladro convencional de columna, cuyo avance del husillo es controlado por la polea que ha remplazado a la típica manivela de accionamiento, ver Fig. 2a. Dicha polea es accionada por la correa que es movida por el motor de corriente continua que se ha implementado. Este motor tiene una reducción de tornillo sin fin y es controlado por una fuente de tensión ajustable 5 V a 15 V y 2 A, la cual permite definir diferentes velocidades de avance del husillo y por tanto de la broca, ver Fig. 2b.

Para el cálculo de la EEC, se mide experimentalmente la potencia mecánica consumida por el corte P_m y se calcula la tasa de material removido Q_c . A continuación, se describe el proceso de evaluación y los equipos utilizados. El cuerpo principal de la máquina es un taladro convencional de columna, cuyo avance del husillo es controlado por la polea que ha remplazado a la típica manivela de accionamiento, ver Fig. 2a. Dicha polea es accionada por la correa que es movida por el motor de corriente continua. El motor tiene una reducción de tornillo sin fin y es controlado por una fuente de tensión ajustable, la cual permite definir diferentes velocidades de avance del husillo y por tanto de la broca, ver Fig. 2b.

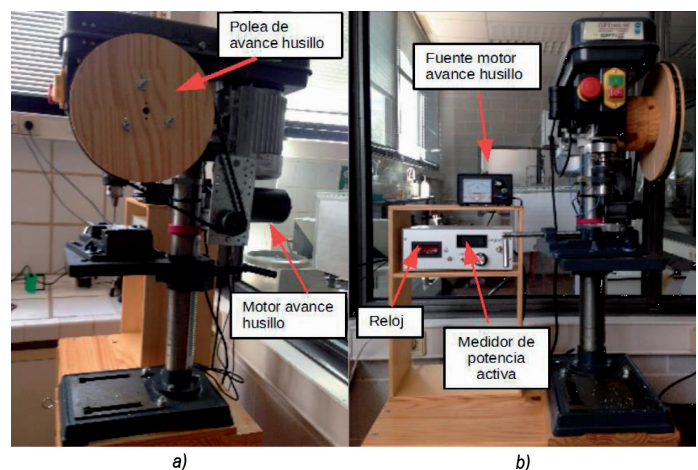


Fig. 2: Instrumentación del taladro y equipos complementarios de medición

La velocidad de avance de la broca se calcula determinando la distancia que la broca recorre en el taladrado y el tiempo que tarda en hacerlo. Para ello, se utiliza un dispositivo óptico que controla el encendido y apagado de un reloj, este último es usado para medir el tiempo durante el desplazamiento. La distancia recorrida está definida por una platina metálica de 5,5 mm de longitud que se desplaza frente al sensor óptico. El avance máximo está limitado por dos finales de carrera que se pueden ajustar para definir la longitud de taladrado. Conocido el diámetro de la broca (Db), la velocidad de avance (Va) y el ángulo de la punta de la broca (α), se puede estimar la tasa de material removida mediante la ecuación (1):

$$Q_c = \frac{\pi \cdot Db^2 \cdot Va}{4 \cdot \sin(\alpha/2)}$$

(1)

La potencia mecánica consumida durante el taladrado se evalúa indirectamente, a través de la medición previa de la potencia activa consumida por el motor del taladro Pa . El dispositivo que mide la potencia activa está construido con un chip analógico, multiplicador de 4 cuadrantes AD633, el que entrega de forma instantánea el producto de la tensión de alimentación del motor y la corriente consumida. Las características eléctricas son: tensión máxima de 350 V, corriente máxima de 2,5 A y tensión analógica máxima de salida de 5 V proporcional a la potencia activa consumida por el motor. La señal de salida es posteriormente digitalizada con un conversor analógico digital. Por otro lado, la potencia mecánica entregada por el motor multiplicada por el rendimiento mecánico del taladro permite obtener la potencia de corte. El rendimiento mecánico no es conocido, como tampoco es conocida la relación entre la potencia activa y la potencia mecánica. Para obtener dicha relación, se ha realizado un experimento en el que se impone una carga mecánica al taladro. Esta carga es aplicada por un freno dinamométrico desarrollado específicamente para esta aplicación [13]. Los experimentos se realizaron para una velocidad de giro del husillo de 584 min⁻¹, siendo esta una velocidad cualquiera, e igualmente válida para verificar el método desarrollado en este trabajo. Con los valores de potencia mecánica debido a la carga y las mediciones de la potencia activa consumida por el husillo, se realiza una regresión lineal que permite obtener una expresión que relaciona ambas potencias, ver Fig. 3. Esta función será aplicada a las mediciones de potencia activa, posteriormente obtenidas en los ensayos de taladrado.

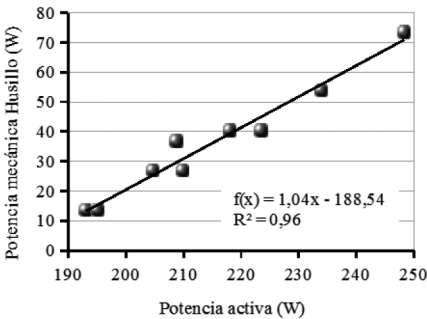


Fig. 3: Regresión entre potencia mecánica y potencia activa durante el taladrado a diferentes cargas

Se realizaron experimentos de taladrado con las condiciones de corte resumidos en la Tabla 1, en los que se utilizaron diferentes diámetros de broca y velocidades de avance, repitiendo cinco veces cada uno de ellos con el objetivo de obtener resultados estadísticamente significativos. Con cada una de las combinaciones

de Va y Db , se realizaron 5 ensayos a los que se les realizó un test de normalidad de Anderson Darling, para definir los intervalos de confianza de la muestra.

Material	Db (mm)	Vc (m/min)	Va (mm/s)
Aluminio Al 7075T6	3	5,5	0,6
	3	5,5	1,4
	3	5,5	2
	4,5	8,2	0,6
	4,5	8,2	1,4
	5,5	10	0,7
	5,5	10	1,5
Acero C 45E	3	5,5	0,6
	3	5,5	1
	4,5	8,2	0,6
	4,5	8,2	0,9
	5,5	10	0,7
	5,5	10	0,9
Acero 34CrNiMo6	3	5,5	0,6
	3	5,5	0,7
	4,5	8,2	0,6
	5,5	10	0,7

Tabla 1: Materiales estudiados y condiciones de corte empleadas durante el taladrado

Para analizar los datos de potencia activa, se ha desarrollado un software en lenguaje Lazarus Pascal para visualizarlos y procesarlos, donde se puede seleccionar gráficamente un tramo de señal para obtener su valor medio en ese intervalo. A cada ensayo se le procesó la señal digitalizada de potencia activa en vacío y potencia activa de corte representada en la Fig. 4. Luego, según la regresión lineal obtenida, se calculó la potencia mecánica para cada etapa y por último, se obtuvo la potencia de corte como la diferencia entre la potencia mecánica en el taladrado menos la potencia mecánica en vacío.

3. RESULTADOS

En la Fig. 4. se representan las lecturas de potencia activa (Pa) durante el taladrado. Aquí, se observa que el comportamiento de esta potencia está caracterizado por dos etapas. En la primera eta-

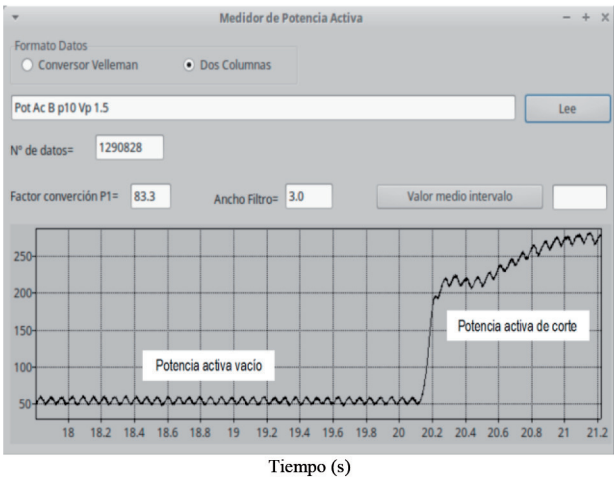


Fig. 4: Software desarrollado en Pascal para determinar la potencia activa en vacío y la potencia de corte

pa, la P_a es constante y corresponde a la potencia consumida por el taladro en vacío. Mientras que en la segunda etapa se puede ver un aumento no lineal de la P_a debido al proceso de arranque de viruta. En esta última etapa se produce un rápido aumento de la P_a durante los primeros segundos, luego la tasa de crecimiento disminuye hasta entrar en una etapa de pseudo-transición. El continuo aumento que se produce en los últimos segundos se debe probablemente a una disipación de energía debido a la profundidad del agujero, el que hace aumentar el rozamiento viruta-cavidad y herramienta-cavidad. La potencia activa usada para determinar la EEC, es el valor medio de la P_a en un intervalo, que comienza a los 3 s del inicio del corte y finaliza con los últimos datos de potencia que se registran.

En la Fig. 5. se representa la energía específica de corte en función del material y del diámetro de la broca. En dichos experimentos la velocidad de giro de la broca es constante e igual a 584 min^{-1} . Todos los experimentos han mostrado un comportamiento normal en la prueba de Anderson-Darling definida por un p-valor mayor o igual a 0,27. Por lo tanto, se decide usar un modelo de distribución tipo t-Student para caracterizar el comportamiento de la EEC. En este modelo los datos quedan caracterizados por la media y su intervalo de confianza. Como se puede ver en esta figura los intervalos de confianza son pequeños y permiten la separación entre grupos, dicho de otra forma, el taladrado con estas brocas genera diferencias estadísticas en el comportamiento de la EEC.

Como era de esperar, la EEC del aluminio 7075-T6 es menor que la EEC de los aceros, y a su vez la EEC del acero C45E es menor

que la EEC del acero aleado 34CrNiMo6. Por otra parte, el comportamiento del aluminio muestra un aumento en la EEC cuando se usa una broca de 4,5 mm describiendo un comportamiento no lineal. Los datos obtenidos de la EEC para el acero están dentro del rango definido por Kalpakjian [14], mientras que el valor de la EEC del aluminio 7075-T6 está por encima del rango definido por este autor. Esto puede que se deba a que la aleación de aluminio 7075-T6 usado en este trabajo presente mayores prestaciones mecánicas, ya que Kalpakjian no explicita el tipo de aluminio fue usado en sus experimentos. Un estudio reciente muestra que la EEC para un acero S45C se encuentra entre 3,8 y $5,1 \text{ J/mm}^3$ [7]. Dicho material es equivalente al C45E utilizado en este estudio y como se puede ver en la Fig.5, la EEC se encuentra dentro del rango mencionado. El comportamiento mostrado por ambos aceros es similar, en ambos casos se puede ver que la EEC depende en forma no lineal del volumen de viruta arrancada, existiendo un óptimo que corresponde a un volumen de viruta asociado a un mínimo de EEC. De forma similar en el artículo antes citado se muestra que la EEC para una aleación de aluminio se encuentra entre 2,2 y $3,8 \text{ J/mm}^3$ [7]. Mientras que la aleación de aluminio 7075-T6 se encuentra dentro del rango antes descrito, como muestra la Fig.5. Otro estudio reciente muestra que el acero S235 en un proceso de cilindrado en el torno, tiene una EEC en el rango entre 4,2 y $5,8 \text{ J/mm}^3$ [15], cuya tendencia de comportamiento indica que, a mayor velocidad de avance y profundidad de corte, menor es la EEC. Sin embargo, manifiesta que la velocidad de corte no influye sobre la EEC, al menos para el rango que se ha indicado.

La relación entre la EEC y el diámetro de la broca se puede entender como una dependencia de la velocidad de corte. Si el diámetro de la broca aumenta, la velocidad de corte promedio sobre el filo aumenta. Luego, la Fig. 5 pone de manifiesto que a medida que aumenta la velocidad de corte en los aceros, la EEC tiende a disminuir como se describe en el trabajo de taladrado [11] y en el trabajo de fresado [6]. Para ir más al detalle, en la Fig.6a y Fig.6b se representa la energía específica de corte en función de la velocidad de avance V_a . Concretamente, en la Fig.6a la velocidad de corte es $5,5 \text{ m/min}$, menor que en la Fig.6b que es de 10 m/min . Estas dos figuras evidencian que el comportamiento de la EEC depende de la velocidad de corte.

Para una velocidad de corte promedio del filo de la broca de $5,5 \text{ cm/min}$, la EEC tiene un comportamiento inverso con la V_a . Es decir a mayor V_a menor EEC lo que implica que es más fácil romper el material, tendencia que se manifiesta en los tres materiales ensayados. En un trabajo futuro se pretende investigar el comportamiento de estos materiales a velocidades de corte aún más

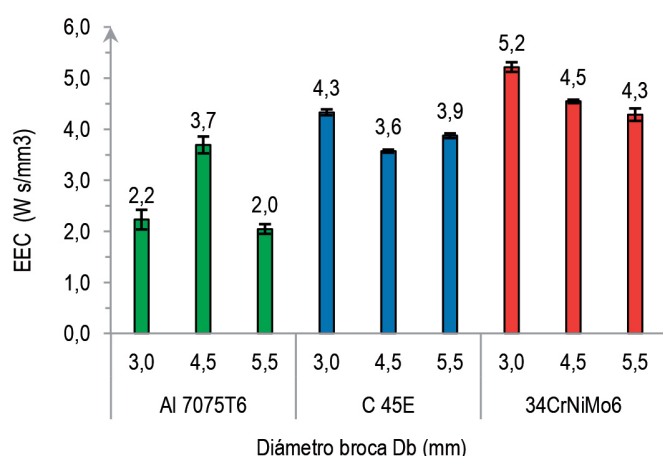


Fig. 5: EEC en función del material y del diámetro de la broca para una velocidad de avance de $0,6 \text{ mm/s}$

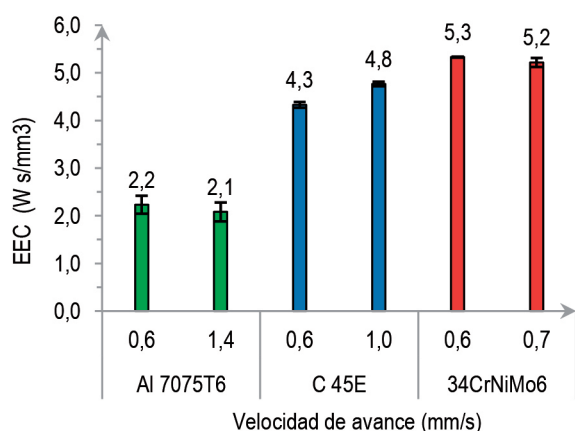


Fig. 6a: EEC en función del material y de la velocidad de avance para una $V_c=5,5 \text{ m/min}$.

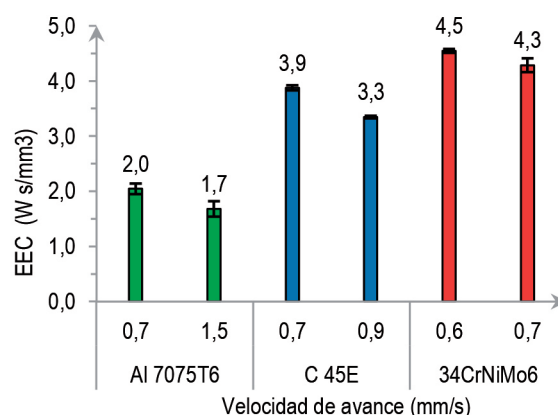


Fig. 6b: EEC en función del material y de la velocidad de avance para una $V_c=10 \text{ m/min}$.

altas con el propósito de verificar si se mantiene esta tendencia. Por otra parte, las Fig.6a y la Fig. 6b dejan en evidencia que la EEC no solo depende del material de la pieza a mecanizar, sino que también depende de las condiciones de velocidad de avance V_a y de la velocidad de corte V_c . Esta última está determinada por los diferentes diámetros de las brocas.

La metodología desarrollada en este trabajo permite obtener la EEC como una función de la potencia activa y de la tasa de material removido. Esta idea es genérica y se puede aplicar a cualquier máquina de arranque de viruta. La potencia activa es un parámetro sencillo de medir y se puede aplicar a cualquier máquina eléctrica. La tasa de material removido depende del proceso de arranque de viruta, siendo ampliamente conocidas las expresiones para el cilindrado, refrentado, fresado frontal o de contornoado y taladrado, como se muestra en la ecuación (1).

La transferencia de esta metodología a una empresa de mecanizado comienza por entender que el modelo de la EEC es sencillo y se puede usar para encontrar unas condiciones de corte que prolonguen la vida de las herramientas, disminuyan las fuerzas de corte, mejoren los acabados superficiales y las tolerancias dimensionales. Una vez entendido el potencial real que tiene el modelo, el ciclo de la transferencia se cierra mostrando como, la modificación e instrumentalización de un taladro de pedestal convencional puede convertir a este dispositivo en un instrumento de medición de la EEC. Este trabajo se enmarca dentro de la visión global del mecanizado de componentes de elevado coste, aspecto que requiere de una fabricación inteligente entendida como un proceso global, lo que está en sintonía con la filosofía *Industry 4.0*. En esta filosofía existe una tendencia a la virtualización e instrumentación de las máquinas herramientas y de los procesos, también llamados Gemelos Virtuales. Una parte fundamental del desarrollo de estos gemelos es la integración de modelos que puedan ofrecer información previa a la ejecución del mecanizado. La EEC es un modelo sencillo capaz de ofrecer información que permite realizar una planificación precisa del proceso de arranque de viruta.

4. CONCLUSIONES

El equipamiento configurado permite una estimación rápida y fiable de la EEC para su uso en la planificación y definición precisa de las condiciones de corte de un proceso de mecanizado. Para ello se requiere la medición de la potencia activa consumida por la máquina y de la velocidad de avance de la broca. Ambas magnitudes son fáciles de medir y los equipos de medición son de bajo coste.

Se ha desarrollado con éxito una metodología para evaluar EEC, en función de la potencia activa consumida por la máquina y la velocidad de avance de la broca. De esta manera, con las mediciones de estos parámetros, solo es necesario calcular la potencia mecánica, la potencia de corte y la tasa de material removido, cuya expresión cambia de forma en función del proceso: torneado, fresado o taladrado.

El método se ha validado estudiando la EEC de tres materiales de diferente constitución y dureza, se ha podido comprobar que la EEC estimada, coincide con los valores medidos por otros autores y por tanto esto valida el método desarrollado, principal objetivo de este trabajo. Además, se ha podido observar la dependencia que tiene la EEC de la velocidad de avance y de la velocidad de corte, destacando con ello la sensibilidad mostrada por el método desarrollado.

Una menor EEC está asociada a una mejor maquinabilidad, menor fuerza en el corte, menor fuerza en los husillos y/o una ma-

yor tasa material removido. Esta última está asociada a las condiciones de corte, parámetros que se pueden modificar en busca de la menor EEC, optimizando con ello el proceso de arranque de viruta, aumentando la vida útil de las herramientas y prolongando la vida de las máquinas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Merchant ME. An Interpretive Look at the 20th Century Research on Sciences and Engineering Modeling of Machining. *Machining Science and Technology*. 1998. Vol.2 p.157-163.
- [2] Fernández-Abia AI, Barreiro J, López de Lacalle LN. Effect of very high cutting speeds on shearing, cutting forces and roughness in dry turning of austenitic stainless steels. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol.57 p.61-71. DOI 10.1007/s00170-011-3267-9.
- [3] Beranoagirre A, Olvera D, López de Lacalle LN. Milling of gamma titanium-aluminum alloys. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol.62 p.83-88. DOI 10.1007/s00170-011-3812-6.
- [4] King RI, Hahn RS. *Handbook of Modern Grinding Technology*. USA: Ed. Chapman and Hall, 1986. 360p. ISBN: 978-1-4613-1965-8.
- [5] Biró I, Szalay T. Extension of empirical specific cutting force model for the process of fine chip-removing milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol.88 p.2735-2743. DOI 10.1007/s00170-016-8957-x.
- [6] Rodrigues AR, Coelho RT. Influence of the tool edge geometry on specific cutting energy at high-speed cutting. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2007. Vol. XXIX-3 p.279-283.
- [7] Xie J, Liu F, Qiu H. An integrated model for predicting the specific energy consumption of manufacturing processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol.85 p.1339-1346. DOI 10.1007/s00170-015-8033-y.
- [8] Wu X, Li L, Zhao M, et al. Experimental investigation of specific cutting energy and surface quality based on negative effective rake angle in micro turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol.82 p.1941-1947. DOI 10.1007/s00170-015-7548-6.
- [9] Camposeco-Negrete C, Calderón-Nájera JD, Miranda-Valenzuela JC. Optimization of cutting parameters to minimize energy consumption during turning of AISI 1018 steel at constant material removal rate using robust design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol.83 p.1341-1347. DOI 10.1007/s00170-015-7679-9.
- [10] Sánchez-Egea AJ, González-Rojas HA, Montilla-Montaña CA, et al. Effect of electroplastic cutting on the manufacturing process and surface properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol.222 p.327-334.
- [11] Hameed S, González-Rojas HA, Sánchez-Egea AJ, et al. Electroplastic cutting influence on power consumption during drilling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol.87 p.1835-1841. DOI 10.1007/s00170-016-8562-z.
- [12] Urbikain G, López de Lacalle LN, Campa FJ, Fernández A, Elías A. Stability prediction in straight turning of a flexible workpiece by collocation method. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2012. Vol.54-55 p.73-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmactools.2011.11.008>.
- [13] V.D. Coronel Asistiri, Estudio de la maquinabilidad de algunos materiales utilizados en la industria, Bachelor thesis, <http://hdl.handle.net/2117/112641>
- [14] Kalpakjian S, Schmid SR. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, Prentice Hall, 2009. 1328p. ISBN: 978-9-7026-1026-7.
- [15] Saqib Hameed, Hernán A. González Rojas, José I. Perat Benavides, Amelia Nápoles Alberro and Antonio J. Sánchez Egea (2018). Influence of the Regime of Electropulsing-Assisted Machining on the Plastic Deformation of the Layer Being Cut. *Materials*, 11, 886: 1-12; <http://dx.doi.org/10.3390/ma11060886>

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad de España (referencia proyecto: FJCI-2016-29297) y la Comisión Nacional de Investigación Científica y tecnológica chilena CONICYT (proyecto Fondecyt 3180006). Además, se agradece la colaboración de la estudiante de Ingeniería Mecánica Vanessa Daniela Coronel Asistiri, en la realización de las mediciones experimentales de la energía específica y el tratamiento estadístico de la información, ya que la medición de la EEC necesita la atención de dos personas.