

## Taladrado profundo para la manufactura de partes estructurales monolíticas

L.N. López de Lacalle, A. Fernández, D. Olvera

Dpto. Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco  
norberto.lzlacalle@ehu.es

D. Olvera (sr).

Dpto. Ingeniería Mecánica. Tecnológico de Monterrey

---

### Resumen

*En este trabajo se presenta el taladrado profundo por brocas helicoidales como alternativa para fabricar componentes de peso reducido y alta rigidez. Una etapa previa se dedicó a la optimización del desempeño de las herramientas para taladrado profundo teniendo en consideración la calidad del agujero en términos de desviación del eje del taladro. La metodología experimental permitió la monitorización del proceso a través de la medición de fuerza de empuje y par. Los materiales mecanizados fueron acero F114, acero inoxidable, titanio y fundición nodular GGG70.*

*El taladrado profundo es propuesto como base tecnológica para eliminar gran cantidad de material con el objetivo de fabricar componentes estructurales monolíticos de peso reducido y alta rigidez. Para mostrar esto, un cubo de acero fue taladrado para reducir el peso de 25kg a menos de 5kg. Las propiedades mecánicas fueron comparadas a través de análisis de elementos finitos respecto a una estructura de configuración común. También se evaluó la repercusión de intermitencias y desgaste de la broca sobre el desvío de los agujeros.*

---

### INTRODUCCIÓN

Dentro de los procesos de formación de viruta el taladrado se diferencia en que el proceso de corte no puede ser observado directamente y por tanto la calidad de la operación sólo puede evaluarse al concluir. Debido a esto en cualquier proceso de fabricación de agujeros existe menor investigación aplicada y relativamente mayor intuición lo cual conlleva a operaciones ineficientes y repercusiones costosas para la industria debido al desconocimiento de los fallos. Por otra parte, la competencia internacional ha motivado el incremento de productividad lo cual obliga la optimización en base a condiciones de corte más exigentes.

La importancia de acercarse al entendimiento del taladrado se puede notar, por citar un ejemplo, en el ala de un avión que puede incluir 45000 taladros. Mejorar en la precisión y tolerancias se reflejaría en un proceso más efectivo para el ensamblaje. Aprender a mecanizarlos de manera más rápida y con menor desgaste reduciría los costos de ensamblaje y fabricación.

#### Taladrado profundo

Un caso especial del mecanizado de agujeros es el llamado taladrado profundo, nombrado así debido a que las capacidades de profundidad axial que alcanzan las herramientas destinadas a esta tarea es más de cinco veces su diámetro, llegando incluso hasta 40 o más. Esta operación es ampliamente utilizada en los sectores de la industria automotriz, ferroviaria y eólica, siendo los materiales empleados principalmente fundiciones dúctiles, fundiciones ADI y aceros de alta aleación.

Una investigación de 145 compañías en el sector del mecanizado muestra al taladrado como uno de los procesos más importantes debido al volumen de operaciones como en consumo de tiempo de máquina [1]. Al igual se deja claro que piezas donde se requieren agujeros con relación longitud-diámetro mayor que 12 mantiene un

sustancial potencial económico ya que casi el 7% de las operaciones de taladrado profundo corresponden a un cuarto de tiempo del proceso, ver Fig. (1).

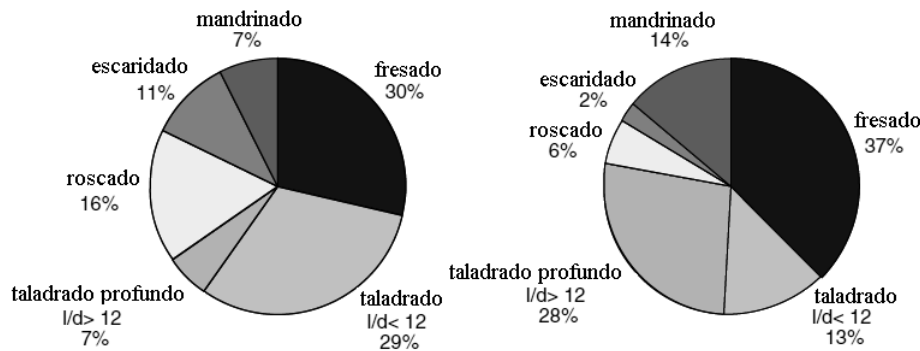


Fig. 1. Distribución del proceso de mecanizado (Izq.) y tiempo de consumo de máquina para distintas operaciones (Der.)

Otra de las razones que marcan la importancia del proceso de taladrado es que, al igual que los tratamientos térmicos y endurecimientos superficiales, es uno de los últimos procesos que añaden valor a las piezas fabricadas. Por ello, es trascendente la operación ya que pone en riesgo la funcionalidad completa de la pieza.

### Brocas cañón

Las primeras herramientas destinadas a realizar las operaciones de taladrado profundo son las denominadas brocas cañón, haciendo referencia a la aplicación en armas de fuego. Hasta ahora ha sido ampliamente usada en la industria automotriz para mecanizar agujeros en monoblocks, partes de transmisión, cigüeñales, etc. Sin embargo, la tasa de penetración no supera los 900mm/min para aleaciones de aluminio, alrededor de 250mm/min para acero fundido y 180mm/min en aceros. Los filos de la broca cañón forman virutas delgadas y curvadas que son evacuadas fuera del agujero mediante la presión del lubricante. El diseño descentrado de los ejes de corte genera una presión dentro del agujero que es soportada por las guías detrás de la punta de la broca, lo cual crea un efecto de pulido sobre la superficie dejando el fino acabado característico del taladrado profundo por brocas cañón. La broca debe ser soportada por un mecanismo que impida la flexión a lo largo de cuerpo además entre los requerimientos indispensables para el éxito del proceso, se debe proveer suficiente refrigerante presurizado (entre 10 y 150 bares) debido a la dificultad de acceso a la zona de la punta dentro de la pieza y la obstrucción de flujo refrigerante que impida la evacuación de la viruta.

### Brocas helicoidales

En el pasado reciente se han desarrollado nuevas tecnologías para las herramientas de corte a través del empleo de brocas de acero rápido y brocas helicoidales de metal duro con refrigeración interna. Las brocas helicoidales constituyen una de las herramientas más importantes, menos comprendidas y posiblemente también más descuidadas de todas las herramientas de corte. Actualmente, los fabricantes de herramientas están lanzando brocas especialmente diseñadas para cubrir la demanda de taladrado profundo de diámetros pequeños. Entre las principales ventajas destaca que son más de cuatro veces eficientes que las brocas de acero rápido y brocas cañón. El diámetro detrás de los filos es ligeramente menor, favoreciendo la evacuación y disminuyendo la fricción a lo largo de las paredes del agujero. Además, incorporan patines que mejoran la rigidez de la herramienta y están equipadas con dos canales para refrigeración para lograr eficiencia y productividad. Es importante mencionar que se recomienda el uso de una broca piloto que alarga la vida de las brocas. La productividad de ambas tecnologías puede observarse cualitativamente en la Fig. (2).

En cuanto a la puesta en funcionamiento, la mejor alternativa para cuantificar la eficiencia de las brocas es mediante la monitorización de las fuerzas durante el taladrado, ya que la vigilancia normal del operario resulta imprecisa e insuficiente para alertar de un posible problema en el proceso. Por otra parte, se puede habilitar el control numérico para tomar decisiones preventivas en función del momento y las cargas, tanto en los ejes como en las mediciones realizadas por la instrumentación. Esto tiene gran valor debido a que el hecho de retirar las brocas rotas de las piezas puede ser tarea complicada, ello sin mencionar el daño provocado a la pieza de trabajo.

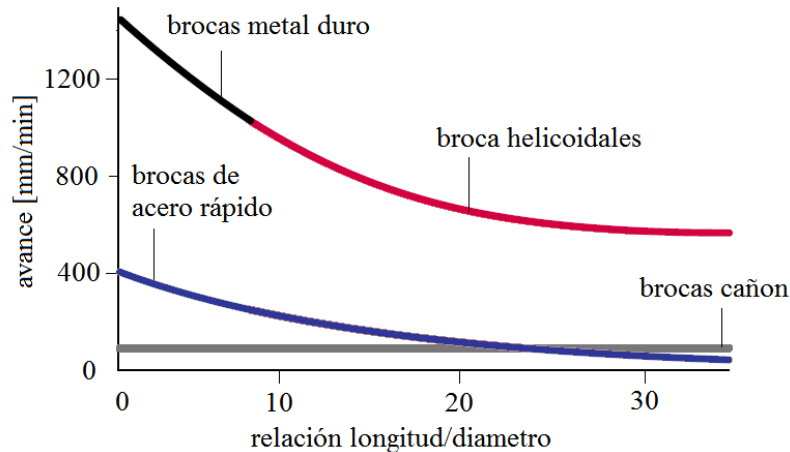


Fig. 2. Comparación de rendimiento de distintas tecnología (Adaptado de Titex).

## INSTRUMENTACIÓN Y ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA MONITORIZACIÓN DE FUERZAS

La caracterización de las fuerzas del proceso-herramienta-material es de gran importancia, porque permiten entender la interacción del proceso de corte y como consecuencia determinar las condiciones bajo las cuales el proceso es óptimo y eficiente. Puesto que cada material posee propiedades mecánicas específicas, su maquinabilidad es una característica específica. El objetivo que se busca en este trabajo se enfoca a cuantificar las fuerzas de mecanizado y lograr parámetros óptimos en materiales principalmente usados en la industria.

En la medición es necesario definir un sistema de referencia en la punta de la broca, como se apunta en la Fig (3), sin embargo, por comodidad se utilizará el sistema de referencia empleado por el dinamómetro. Para la medición del par y las fuerzas de empuje existen en el mercado distintos dispositivos fijos y otras soluciones que se anclan al husillo, las cuales generalmente presentan limitaciones de instalación. Para este trabajo se utilizó una mesa dinamométrica Kistler® 9255B, que permiten la medición de fuerza de empuje, al igual que el momento a partir de las contribuciones en las fuerzas de las direcciones  $X$  e  $Y$  en cada uno de los piezoeléctricos por la distancia al centro de la mesa, ver Fig (3).

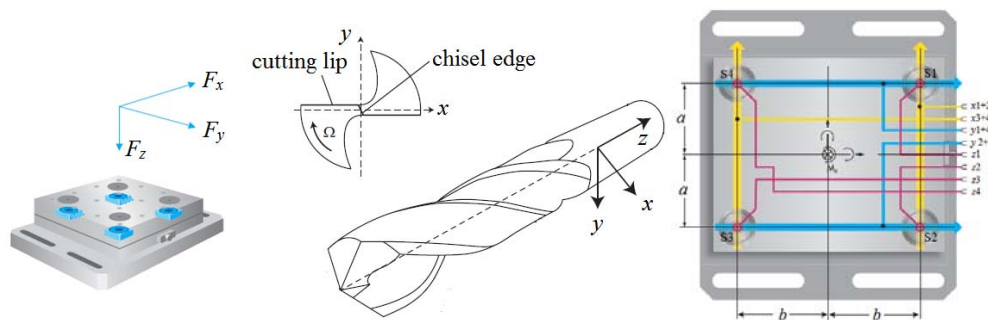


Fig. 3. Sistema de referencia en el dinamómetro y en la punta de la broca.

### Arreglo experimental

Para la medición de par y la fuerza durante el taladrado es indispensable que el centro del taladro coincida con el centro geométrico del dinamómetro, permitiendo precisión en la medición puesto que los piezoeléctricos son equidistantes al centro del dinamómetro. Para garantizar este requisito, se diseñó un utillaje que permite realizar una matriz de taladros con pared mínima de 2mm, evitando que afecte a la desviación de los taladros [2]. Las señales de los piezoeléctricos es sumada analógicamente y amplificadas a un voltaje proporcional. Estos voltajes son acondicionados, visualizados y grabados en tiempo real mediante el analizador LMS® Scada Mobile con el uso del un equipo de cómputo. el esquema de la instrumentación y el utillaje se observa en Fig. (4). Los datos grabados corresponden a las 5 señales.

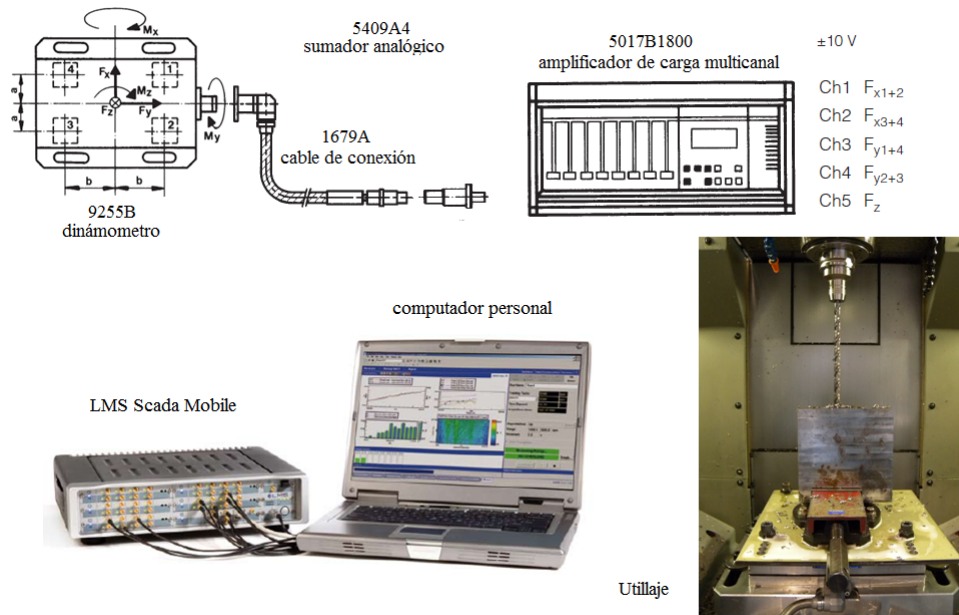


Fig. 4. Instrumentación para las mediciones de par y fuerza de empuje.

### Validación de la utilización de par en el husillo

Un parámetro ampliamente utilizado para observar la evolución del taladro suele ser la monitorización de la utilización del par en el husillo, ya que por ejemplo, el desgaste de los filos bajo las mismas condiciones de corte se refleja en el incremento de las fuerzas para cortar el material. El husillo del centro de mecanizado empleado es el DMS<sup>®</sup> 100.46.4FHS/F de 18000min<sup>-1</sup>, que trabaja en configuración estrella desde 500 hasta 4700rpm, cuya utilización registrada por el PLC corresponde al porcentaje del par nominal (87Nm). Es importante señalar que la curva de par en función de la velocidad de giro del husillo, es constante hasta 2800rpm y posteriormente decrece hasta 4700rpm donde la configuración del husillo cambia a triángulo. Una serie de ensayos en distintos materiales y a diferentes condiciones de corte ( $V_c < 88\text{m/min.}$ ) confirmó que la medición de par mediante el dinamómetro corresponde perfectamente con registro del PLC, inclusive con mayor sensibilidad. Un ejemplo de ello se observa en la Fig. (5), el ensayo corresponde al taladrado en titanio y condiciones de corte  $V_c = 30\text{m/min}$  y  $f = 0.10\text{mm}$ .

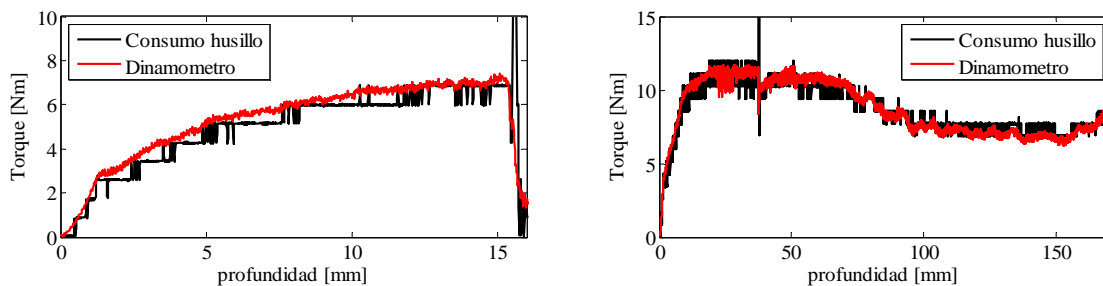


Fig. 5. Comparación entre utilización de husillo y par medido por el dinamómetro. Izq. Taladrado piloto; Der. Taladrado profundo.

### INFLUENCIA DE LA ESTRATEGIA EN LAS FUERZAS Y TOLERANCIAS

La estrategia de taladrado profundo requiere el taladrado con una broca piloto cuya función es proporcionar a la broca de taladrado profundo una mayor rigidez y prevenir desvíos del taladrado debido a imperfecciones o inclinación de la superficie de entrada [3]. El proceso con la herramienta para generar los agujeros de relaciones superiores a 5 veces el diámetro, comienza con un pre-taladro de  $1.5xD$  de profundidad, la cual sirve de guía asegurando que el agujero posea mayor rectitud durante el proceso. Posteriormente la broca de taladrado profundo taladra hasta  $3xD$  al 50% de las condiciones nominales, en esta posición se aumentan las condiciones al 100% hasta concluir la profundidad especificada. La refrigeración es importante durante el proceso de corte,

ya que mantener una presión entre 10 y 30 bares permitirá una evacuación adecuada de la viruta generada. En este trabajo se utilizó una presión constante de 22 bares.

En la Fig. (6) se muestra una comparación del comportamiento que exhiben ambas herramientas bajo las mismas condiciones de corte en acero. En la figura, es posible observar que la fuerza de empuje provocada por la broca piloto es menor, esto se debe a que la rigidez en la broca piloto es superior a la que presenta la broca de taladrado profundo [1] además la geometría de la broca piloto favorece la entrada con un ángulo de  $150^\circ$  mientras que la punta de la broca de taladrado profundo es de  $140^\circ$ . Esto deja claro que la broca piloto está diseñada para una carga mayor de 125% en comparación de la broca de taladrado profundo. Por otra parte, se observa con existe un incremento del par ya que las virutas rozan entre la pared del agujero y los filos, incrementado la resistencia al desalajo según evoluciona el proceso, esta repercusión afecta la formación de viruta y por tanto el incremento de fuerzas.

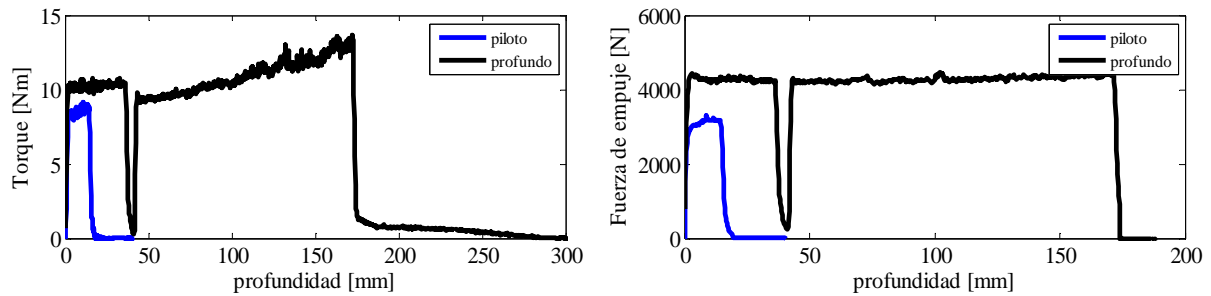


Fig. 6. Comparación del par y fuerzas de la broca piloto y la broca de taladrado profundo bajo igual condiciones de corte.

Las tolerancias son siempre de gran importancia debido a que afecta la función de la pieza fabricada y la intención del diseño. Una serie de 30 taladrados de 130mm de profundidad sobre fundición GGG70 y condiciones de corte  $V_c = 60\text{m/min}$  y  $f = 0.20\text{mm/rev}$  nos permiten cuantificar las tolerancias máxima que se puede lograr en el proceso. Mediante el uso de una máquina de medición por coordenadas se cuantificaron los diámetros a diferentes profundidades, con el fin de observar la influencia de la estrategia de mecanizado. La Fig. (7) muestra que la broca piloto nos permite tener una tolerancia de 0.05mm, esta holgura permite posicionar la broca larga sin fricción para realizar el taladro cuyas dimensiones permanecen dentro de tolerancias de  $\pm 0.005\text{mm}$  a lo largo del taladro. La desviación del eje del taladro respecto a una de las superficies juega también un papel importante en el diseño, en este mismo ensayo permite concluir que no superan los 0.04 grados sexagesimales. Sin embargo, distintos factores como la longitud de la herramienta o sistema de sujeción entre otros podrían ser la causa [4].

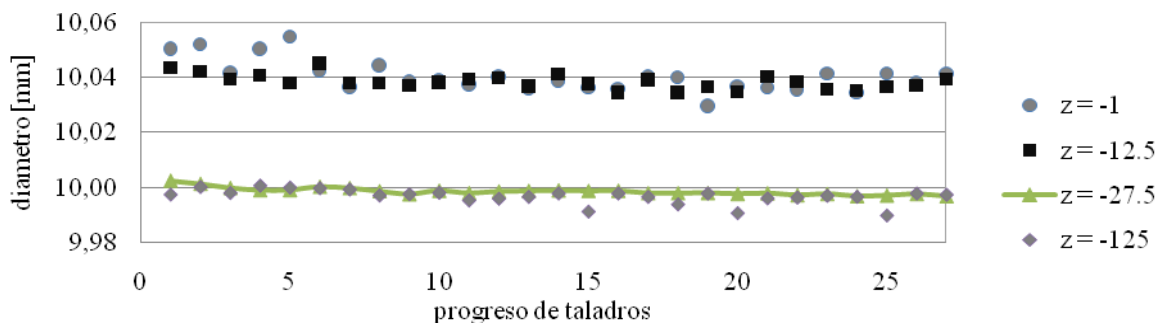


Fig. 7. Diámetros reales a lo largo del taladrado.

### Momento de ruptura de la broca larga

Con el objetivo que medir las capacidades en cuanto al momento de fractura en la broca de taladrado profundo, se realizaron distintos ensayos que llevarán al límite las capacidades de la broca. Para la experimentación se indujo el desgaste en los filos manualmente y los ensayos se comenzaron con condiciones recomendadas por el fabricante. La fractura ocurrió bajo  $V_c = 60\text{m/min}$  y  $f = 0.20\text{mm/rev}$ , justo a la salida del taladro debido al desgaste inducido a la herramienta, registrando un par de 17Nm.

## MEJORA DE LOS PARAMETROS DE MECANIZADO

En esta parte se planearon una serie de ensayos en los cuales se variaban las condiciones de corte teniendo como base las condiciones recomendadas por el fabricante. Cada uno de los ensayos fue monitorizado y registrado para ser observados detalladamente. Los materiales probados en esta primer parte del trabajo fueron: acero F114, acero inoxidable austenítico, Ti6Al4V y fundición nodular (GGG70). Un ejemplo de los ensayos realizados se observa en la Fig. (8).

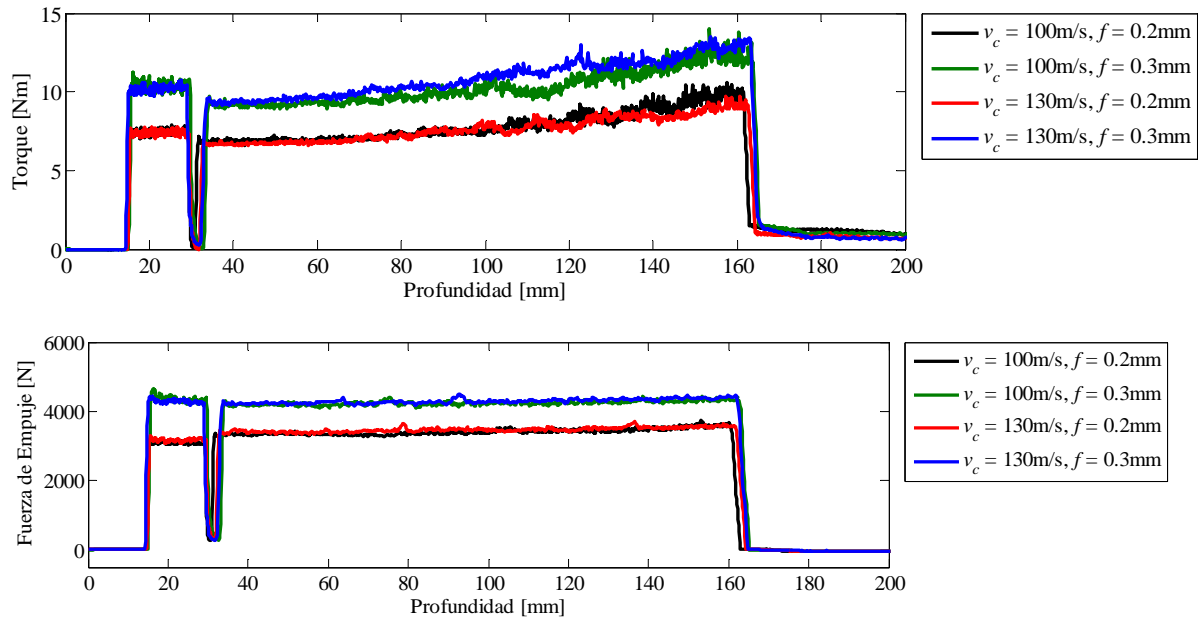


Fig. 8. Monitorización de taladrado profundo en acero F114. Arriba: Medicion de torque; Abajo: Fuerza de empuje.

Esta metodología que se propone permite mediante la observación directa del desgaste en los filos de la broca y el acabado de las paredes del taladros, determinar de manera aproximada las condiciones de corte óptimas que permiten mejorar la eficiencia del proceso sin poner en riesgo la fractura de la herramienta o comprometer la pieza de trabajo, además de mantener la calidad del taladro y las tolerancias que se observaron anteriormente. La Tabla (1) muestra de forma resumida las condiciones de corte logradas en cada uno de los materiales ensayados.

Tabla 1. Velocidad del cuerpo en función del tiempo.

Material	Condiciones recomendadas		Condiciones optimas		Incremento en tiempo de ciclo
	$V_c$	$f$	$V_c$	$f$	
Acero F114	80 – 100	0.18 – 0.25	100 – 130	0.20 – 0.30	36%
Acero austenítico	30 - 50	0.10 – 0.15	60 - 80	0.15 – 0.20	53%
Titanio Ti6Al4V	20 - 30	0.09 – 0.13	30 - 50	0.10 – 0.15	48%
Fundición GGG70	60 - 80	0.20 – 0.30	70 - 90	0.20 – 0.30	11%

Un criterio más para determinar las condiciones óptimas es considerar la forma de la viruta [5]. Se recogió la viruta en cada uno de los ensayos y su evolución al variar las condiciones de corte. Al detectar un cambio significativo tales como viruta mas enrollada, menos fragmentada o con picos, generalmente dificultan la evacuación y por tanto el par necesario para realizar el taladrado. En ese momento se determina, apoyado por mediciones, las condiciones óptimas en cada material. Por ejemplo en la Fig. (9) se muestran las virutas en fundición nodular GGG70, en donde se nota un incremento significativo en el tamaño de las virutas cuando  $V_c = 90\text{m/min}$  y  $f = 0.40\text{ mm/rev}$ , sin embargo el torque registrado en 12Nm aún por debajo del torque de fractura, permite calificar al ensayo como óptimo en este material.

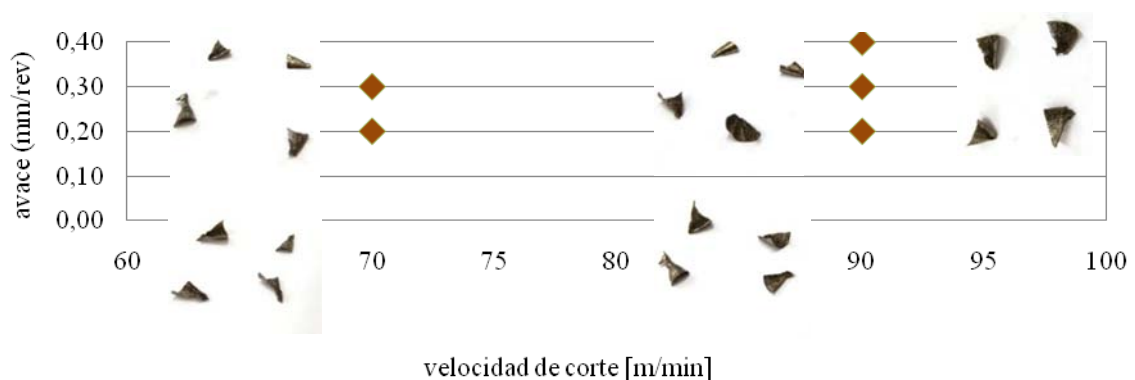


Fig. 9. Virutas para diferentes condiciones de corte en fundición nodular GGG70.

### APLICACIÓN DEL TALADRADO PROFUNDO PARA REDUCCIÓN DE PESO EN PARTES MONOLÍTICAS

Una aplicación potencial del taladrado profundo es el mecanizado de estructuras monolíticas con propiedades mecánicas altas y de baja densidad. La evaluación del uso del taladro profundo mediante brocas helicoidales se realizó sobre una estructura cúbica de acero F114 de 146mm por lado. Esta pieza es taladrada con una matriz de 12x12 agujeros con diámetro de 10mm igualmente separados por una pared de 2mm en tres de las seis caras del cubo, en total 432 agujeros fueron realizados con sólo un juego de brocas nuevas: piloto y de taladrado profundo (ver Fig. 10). Puesto que cada operación requeriría de varios montajes, se empleó un único sistema de referencia sobre la pieza que permitía mantener precisión en el posicionamiento de cada agujero.

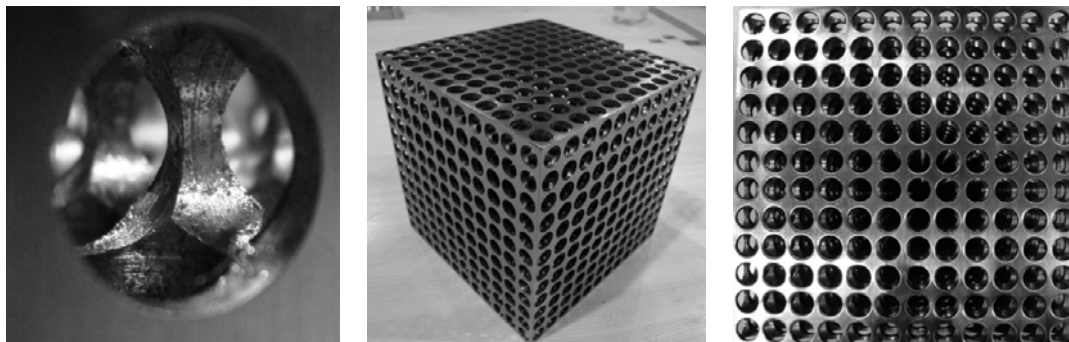


Fig. 10. Distintas vistas del cubo fabricado por taladrado profundo.

#### Influencia del desgaste e intersecciones en el desvío de taladro

La fabricación de la estructura fue planeada para evaluar la influencia del desgaste debido a las intermitencias sobre la desviación del eje de los taladros. El plan puede ser dividido en tres etapas: La primera de ellas consistió en 36 agujeros sin intersecciones en cada una de las tres caras con separación entre ellos de 24mm. El desgaste en esta etapa estuvo únicamente marcado por el desprendimiento del recubrimiento. En la segunda etapa consistió de 36 agujeros por cara con discontinuidad en el material cada 14mm e intersecciones en una sola dirección, en donde el desgaste se manifestó por la aparición de desgaste del flanco y cara de incidencia. Esta dos etapas fueron realizadas con condiciones de corte óptimas  $V_c = 130$  m/min y  $f = 0.30$  mm/rev obtenidas de la Tabla (1). En la tercer etapa se realizó el mecanizado de los 72 taladros restantes en cada cara, es decir, los últimos taladros con intersecciones en dos direcciones. Debido a un incremento considerable del desgaste de los flancos y los filos, las condiciones de corte fueron ajustadas a  $V_c = 85$  m/min y  $f = 0.10$  mm/rev para mantener una utilización del husillo menor al 10% (9Nm). La medición de la desviación para la primer etapa no supera los 0.1 grados mientras que la tercera presentó una desviación máxima de 0.3.

#### Análisis de cubo taladrado mediante MEF

Para comparar el comportamiento de la estructura disminuida en masa mediante el taladrado profundo, se realizó un análisis de elementos finitos de la estructura mecanizada y otra de vértices rígidos de igual dimensiones. La masa ideal de ambos elementos es 4.727 y 4.238 kilogramos para el cubo taladrado y el cubo estructural

respectivamente. La masa real del cubo taladrado fue medida en 4.680kg después del mecanizado, e inicialmente poseía una masa de 24.4 kg, lo cual significó una disminución de la masa en más del 80%.

El análisis estático del elementos finitos en estudio se realizó considerando restricciones de desplazamiento en una de las caras (base del cubo). Las condiciones de carga analizadas fueron dos, en primer lugar la aplicación de una fuerza cortante sobre la cara superior de 10kN junto con una fuerza de compresión de la misma magnitud, y el segundo caso es la fuerza cortante junto con una fuerza de tracción de la misma magnitud. En el análisis se empleo una malla sólida con elementos cuadráticos de alto orden.

En la Fig. (11) se representa los resultados de esfuerzos de Von Misses. Se observó que ambos casos son simétricos para el cubo taladrado tanto bajo una carga de compresión como bajo una carga de tracción, esto es, se consiguen deformaciones máximas y mínimas de exactamente las misma magnitud en las mismas regiones.

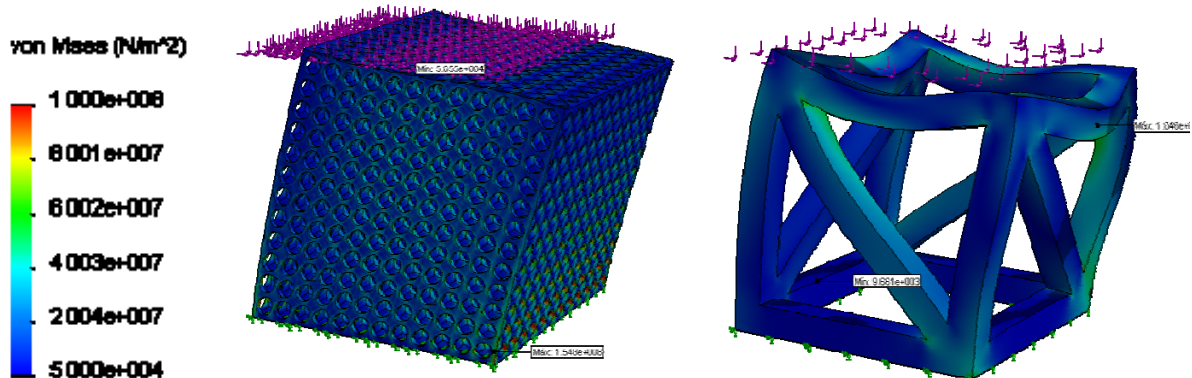


Fig. 11. Resultados de esfuerzos de von Misses. Columna Izq.: carga a compresión; Columna Der.: carga tensión.

Así mismo, los desplazamientos mínimos y máximos son similares para ambas estructuras en las distintas configuraciones de carga. La diferencia principal radica en que para el caso del cubo taladrado los desplazamientos se distribuyen uniformemente en dirección ascendente, mientras que el cubo estructural se concentra en las secciones que se comportan como viga. Como es de esperarse, la concentración de esfuerzos para el cubo estructural se focaliza en los vértices, lo cual indica cierta vulnerabilidad en las uniones. En el caso del cubo taladrado, los esfuerzos al igual que desplazamientos, se concentran uniformemente hacia las restricciones.

## CONCLUSIONES

La propuesta de instrumentación para el dinamómetro Kistler® 9255B que permite la monitorización de la fuerza de empuje y el par que corresponde perfectamente con la utilización del husillo. Durante la experimentación del presente estudio se encontraron condiciones de corte para las herramientas utilizadas, dependientes de cada material, superiores a las recomendadas por el suministrador. Estas condiciones de corte que incrementan la productividad del proceso sin llegar a situaciones de riesgo que involucren el fallo de las herramientas o comprometan la calidad en las superficies mecanizadas.

La investigación que se realizó en referencia a la posible aplicación para la reducción de masa en piezas monolíticas mostró que tanto las deformaciones como los esfuerzos máximos presentes bajo las mismas condiciones de carga son muy similares a los que presentan las estructuras convencionales, sin embargo, la distribución de esfuerzos y deformaciones en piezas de masa reducida son uniformemente distribuidas, mientras que en estructuras convencionales existe una alta concentración de esfuerzos.

## REFERENCIAS

- [1] E. Abele, *Tool length influence on wear behavior of twisted carbide drills*. German Academic Society for Production Engineering, 1 (2007), 51-56.
- [2] A. Katsuki, H. Onikura, H.K. Sakuma, T. Chen, Y. Murakami, *The influence of workpiece geometry on axial hole deviation in deep-hole drilling*, JSME International Journal, 35 (1992), 160-167.

- [3] A. Katsuki, K. Sakuma, K. Taguchi, H. Onikura, H. Akiyoshi, Y. Nakamuta, *The influence of tool geometry on axial hole deviation in deep drilling: comparison of single- and multi-edge tools*, JSME International Journal, 30 (1987), 1167–1174.
- [4] C. Deng, J. Huang,, J. Chin, *Effects of support misalignments in deep-hole drill shafts on hole straightness* International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41 (2001), 1165–1188
- [5] K. Feng, N. Jun, D.A. Stephenson. *Chip thickening in deep-hole drilling*. International Journal of Machine Tools & manufacture, 46 (2006), 1500-1507.