

INFLUENCIA DEL AFILADO DE LA BROCA SOBRE LOS ESFUERZOS DE MECANIZADO EN DISTINTOS METALES

Alejandro Simoncelli ^{1,3}, Daniela Perez ^{1,3}, Germán Abate ^{1,3}, Alberto Pereyra Osenda ², Pablo Gayol ³ y Daniel Martinez Krahrmer ^{1,2}

¹ Departamento de Procesos de Mecanizado y Conformado, INTI-Mecánica - asimoncelli@inti.gob.ar ; djperez@inti.gob.ar ; gabate@inti.gob.ar ; dmartinez@inti.gob.ar

² Instituto de Tecnología e Ingeniería, Universidad Nacional de Hurlingham pereyraosenda@unahur.edu.ar

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora pgayol@ingenieria.unlz.edu.ar

RESUMEN

Entre los procesos de mecanizado de metales el agujereado es el más utilizado seguido por el fresado y el torneado respectivamente.

Sobre el diseño original de las brocas helicoidales realizado por Stephen Morse en 1861, estas herramientas han evolucionado principalmente en tres aspectos: 1) el material con que se fabrica la herramienta; 2) el uso de recubrimientos y 3) el afilado de la punta.

En el caso específico de las brocas de acero rápido usadas en este trabajo es la Norma DIN 1414-1 aquella que establece los valores nominales así como las tolerancias para cada una de las variables geométricas que estas herramientas poseen.

Si bien la citada Norma define tres ángulos de hélice posibles: W para materiales blandos (hélice rápida), H para materiales duros (hélice lenta) y N para uso universal, trabajos previos indican un mejor comportamiento global de las brocas con hélice N.

Haciendo foco en el afilado de la punta, interesa analizar la influencia del ángulo de incidencia, el ángulo de punta y el espesor de núcleo considerando un amplio rango de valores normalizados para cada una de ellas, sobre los esfuerzos de corte en tres metales distintos (acero, latón y aluminio).

Para ello se realizaron ensayos de agujereado utilizando treinta y seis brocas, combinando las distintas geometrías de afilado, los metales a agujerear y las condiciones de corte, obteniendo como respuesta las señales dinamométricas correspondientes a las fuerzas de avance y los momentos torsores para cada combinación.

La importancia de este estudio radica en que mayores esfuerzos de corte son un indicativo de una broca sometida a condiciones más exigentes que impactan negativamente sobre la duración del filo de la herramienta y es así que el resultado del trabajo mostrará aquella combinación de geometría óptima para minimizar estos esfuerzos.

Palabras clave: Brocas helicoidales; Afilado; Esfuerzos de corte; Mecanizado

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de mecanizado por arranque de viruta son una de las técnicas más utilizadas para la fabricación de piezas en el sector metalmecánico [1].

Con relación específica al agujereado con brocas helicoidales tal es su importancia entre las operaciones de corte de metales a nivel mundial que comprende aproximadamente el 30 % de todas ellas. Estas herramientas, desde su creación en 1861 han evolucionado principalmente en tres aspectos: a) el material con que se fabrica la broca; b) el uso de recubrimientos duros y c) el afilado de la punta [2].

Para su fabricación y control de calidad existe una Norma específica [3] que entre otros aspectos define la posibilidad de construirlas con tres ángulos de hélice según sea el material a agujerear. Así, la hélice W es la indicada para materiales blandos (hélice rápida), la H para materiales duros (hélice lenta) y la N para uso universal. Sin embargo, trabajos realizados previamente indican un mejor comportamiento general de las brocas con hélice N [4].

Los esfuerzos de corte durante el proceso de agujereado, es decir, la fuerza de avance y el momento torsor, son determinantes sobre la duración del filo y la probabilidad de falla de la broca [5]. Esta situación es descripta de manera más precisa por V. Astakhov [6] quien afirma que, toda la potencia de corte en el mecanizado, que a su vez depende de los esfuerzos de corte, se transforma en calor y es la cantidad de calor que reduce la duración de los filos al activar los mecanismos de desgaste. La ecuación que surge es mayores esfuerzos, mayor consumo de potencia y en consecuencia mayor generación de calor, lo que se traduce directamente en una reducción de la vida útil de la herramienta.

A su vez, estos esfuerzos, para un mismo material a mecanizar y utilizando herramientas sin recubrimiento, dependen principalmente de la geometría de la punta de la herramienta, y en menor medida de la lubricación y las condiciones de corte [7, 8].

Con relación a la geometría de la punta las investigaciones se orientaron principalmente a la influencia del espesor del núcleo [9,10].

Asimismo, la mayoría de los trabajos publicados sobre ensayos de agujereado en los cuales se midieron y modelaron los esfuerzos de corte correspondieron a aleaciones de aluminio, probablemente por las dificultades inherentes que estas aleaciones presentan en la extracción de viruta y que ante los eventuales atascamientos conducen a la rotura súbita de la herramienta, provocando no sólo su pérdida sino también la de la pieza en proceso [11-14].

Específicamente M. Aamir et al [11] trabajando en ensayos de agujereado sobre una aleación de aluminio AA2024 midieron la fuerza de avance en función del número de revoluciones, el avance

y el diámetro determinando que la contribución sobre esta fuerza correspondió en un 67% al avance, un 30% al diámetro y un 0.8% a la velocidad de corte.

En tanto que, S. Tamura y T. Matsumura [12] utilizaron brocas con un ángulo de punta de 180° sobre una aleación de aluminio AA7075 y evaluaron el comportamiento de la fuerza de avance y el momento torsor según el radio de esquina, observando una disminución promedio del 35% para la fuerza de avance en el caso de la broca con radio cero, mientras que con relación al momento torsor no hubo diferencias apreciables.

En el caso de P. Kyratsis y otros [13] también sobre una aleación AA 7075 emplearon una estrategia de diseño factorial 3^3 considerando como factores el diámetro de la broca, el avance y la velocidad de corte, siendo las respuestas la fuerza de avance y el momento torsor. Obtenidos los valores experimentales ajustaron una superficie de respuesta a ambas variables que permitieron predecirlas con errores comprendidos entre 3.4 a 4.7%.

Por último, A. Akhavan et al [14] usando una aleación de aluminio y silicio A383 se plantearon como objetivo determinar la fuerza de avance mínima considerando como variables solo las condiciones de corte velocidad y avance encontrando que el valor mínimo ocurrió para la combinación de la mayor velocidad de corte y el menor avance.

En consecuencia, siendo que la mayoría de los trabajos se centran en establecer las fuerzas de corte en agujereado en función de las condiciones de corte y el diámetro de la broca.

Que la geometría de la punta de la broca se conforma principalmente por el ángulo de punta ϵ , el ángulo de incidencia o destalonado α y el espesor de núcleo s [2], y que para estas variables geométricas hay una Norma específica [3] que indica un rango mínimo-máximo para cada una de ellas, se fabricaron treinta y seis brocas, con el objeto de hacer ensayos dinamométricos tendientes a relacionar los esfuerzos de agujereado (fuerza de avance y momento torsor), con la geometría de la punta de la broca.

Entonces, la finalidad de este trabajo consiste en determinar la combinación óptima de variables geométricas de la punta de la broca (ϵ , α y s), utilizando valores normalizados para cada una de ellas, que permitan minimizar los esfuerzos de corte.

Asimismo, y para darle mayor robustez a los resultados, se emplearon tres materiales con maquinabilidades diferentes como son un acero (viruta larga y mayor tensión unitaria de corte), un latón (viruta corta) y un aluminio (material adhesivo, con viruta larga y menor tensión unitaria de corte) y dos condiciones de corte (Velocidad de corte mínima y Velocidad Máxima).

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

2.1.1 Brocas Helicoidales

Para realizar las pruebas de agujereado, se emplearon treinta y seis brocas helicoidales DIN 338 de 7.5 mm de diámetro, construidas en acero rápido AISI M2, cuya composición química nominal es la siguiente (% peso): 0.9% C; 6% W; 5% Mo; 4% Cr; 2% V; Fe balance.

Con el fin de analizar la influencia de la geometría de la punta de la broca sobre los esfuerzos de agujereado, estas brocas fueron fabricadas fuera del programa de producción estándar con el objeto de disponer de cuatro valores para el ángulo de incidencia o destalonado α (12°; 14°; 16° y 18°), tres valores para el espesor de núcleo s (0.88 mm; 1.18 mm y 1.38 mm) y cuatro valores para el ángulo de punta ε (110°; 118°; 130° y 140°), todos ellos comprendidos en el rango de la Norma específica [3] para las tres variables citadas.

En la tabla 1 se presentan los nueve grupos de brocas ensayadas y su geometría asociada.

Tabla 1. Parámetros de geometría por grupo de broca

Broca	Núcleo	Destalonado	Afilado	Broca	Núcleo	Destalonado	Afilado	Broca	Núcleo	Destalonado	Afilado
G1	1.38 mm	14°	130°	G4	1.18 mm	14°	140°	G7	1.18 mm	12°	118°
G2	1.38 mm	14°	118°	G5	0.88 mm	14°	118°	G8	1.18 mm	18°	118°
G3	1.18 mm	16°	118°	G6	1.18 mm	14°	118°	G9	1.38 mm	14°	110°

Se decidió que todas las brocas fueran de hélice tipo N (25°), por cuanto trabajos realizados previamente mostraron un mejor comportamiento general de las brocas con esta hélice [5].

En la Figura 1 se muestran las variables geométricas del afilado de la punta de la broca consideradas en el trabajo.

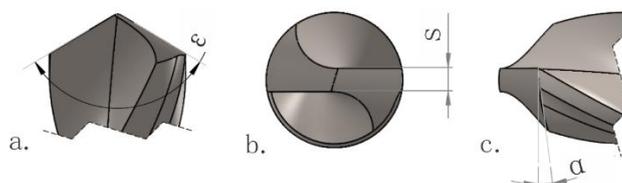


Figura 1: Variables geométricas: a. Ángulo de punta b. Núcleo c. Destalonado

2.1.2 Materiales a mecanizar

Para las pruebas de agujereado, se utilizaron barras trefiladas de sección cuadrada de 19 mm de lado de tres materiales diferentes: acero SAE 1060, aluminio y latón amarillo.

La composición nominal del acero SAE 1060 es la siguiente (% peso): 0.6% C; 0.6 a 0.9% Mn; 0.03% P (máx.); 0.035% S (máx.); 0.35% Si (máx.); Fe balance.

En el caso del latón amarillo fue 60% Cu; 39% Zn y aproximadamente 1% Pb, mientras que el aluminio presentó un porcentaje mayor al 95% de Al.

Se prepararon probetas para su análisis metalográfico. En el caso del acero SAE 1060 la microestructura fue revelada usando nital 2%, mientras que en el caso del latón amarillo y del aluminio se emplearon como reactivos de ataque los N° 1 y N° 36 de la Norma ASTM E 407 – 07 respectivamente.

El examen visual fue efectuado con un microscopio óptico Zeiss AxioTech, mientras que la microdureza fue determinada con un microdurómetro Vickers, marca Shimadzu HMV 2000, usando en todos los casos una carga de 10 N.

2.2 Condiciones de corte y lubricación

Previamente a definir las condiciones de corte a emplear en los ensayos, es decir, la velocidad de corte (V_c), el número de revoluciones del husillo (n), y la velocidad de avance (V_a), a partir de la dureza y el tipo de material de las barras, se procedió a efectuar la búsqueda de condiciones de corte de referencia, utilizando documentación de un instituto de investigación dedicado al mecanizado (ver Tabla 2), para operaciones de agujereado con brocas helicoidales de acero rápido, aplicadas sobre materiales similares a los usados en los ensayos de agujereado.

Estos ensayos de fueron realizados para cada material a dos velocidades de corte recomendadas, una velocidad de corte mínima y una velocidad de corte máxima.

Tabla 2. Condiciones de corte utilizadas durante los ensayos

Fuente	Material	V_c mínima y máxima (m/min)	n (rpm)	V_a (mm/min)
Metcut [15]	Acero SAE 1055 HB 275 a 325	10 - 15	424 – 637	43 – 65
	Latón amarillo	37 - 47	1570 – 1995	157 – 200
	Aluminio puro	40 - 60	1698 - 2546	212 – 318

La totalidad de los ensayos de agujereado fueron realizados en seco.

2.3 Equipamiento

Los orificios se efectuaron en una fresadora de control numérico marca PROMECOR la cual posee un husillo de 8000 rpm y 10 kW de potencia.

Los esfuerzos de mecanizado se midieron empleando un dinamómetro piezoeléctrico Kistler modelo 9271A de dos canales, con sus respectivos amplificadores de carga, en tanto que el registro de datos de ensayos se realizó con un adquirente Labjack T7-Pro.

El procesamiento de datos, filtrado y análisis de las señales se ejecutó mediante scripts en lenguaje de programación Python.

2.4 Procedimiento de ensayo

Se utilizaron tres trozos de barra de 400 mm de longitud aproximada, una por cada tipo de material empleado durante las pruebas experimentales.

Para la realización de las pruebas de agujereado, para cada configuración de afilado de broca (ϵ , α y s), basados en trabajos previos [9], se utilizaron cuatro brocas por cada combinación.

Se efectuaron un total de 216 ensayos de agujereado que surgen de combinar 9 grupos de brocas x 4 repeticiones por grupo x 3 materiales x 2 condiciones de corte.

Las condiciones de corte fueron en cada caso las indicadas en el apartado 2.2, mientras que todos los orificios fueron efectuados ciegos en una sola profundización de herramienta de 10 mm (sin retroceso para extracción de viruta).

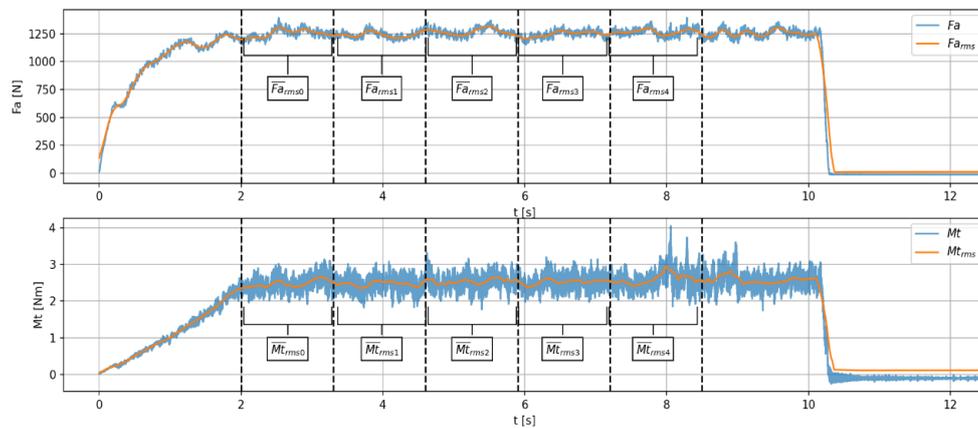


Figura 2: Ejemplo de señales adquiridas

Mediante el adquisidor de datos se registraron las señales de momento torsor M_t y de fuerza de avance F_a , para cada broca en cada condición de ensayo a una tasa de muestreo de 2 kHz para Acero y 4 kHz para el resto de los materiales. Se calcularon los valores F_{aRMS} y M_{tRMS} por ensayo con una ventana de 0.1 segundos. Cada señal fue segmentada en cinco partes iguales correspondiente a los registros obtenidos a profundidades desde los 2.5 y 8.5 mm evitando transitorios y suavizados del filtro. Con cada uno de estos segmentos se calcularon los valores promedios de F_{aRMS} y M_{tRMS} aumentado en un factor de 5 el número de observaciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Brocas Helicoidales

Analizada una muestra de broca por técnicas metalográficas, estas brocas de acero AISI M2, presentaron una microestructura típica para estos aceros, es decir, una matriz de martensita

revenida, con una fina distribución de carburos complejos (Figura 3, izquierda). La dureza promedio resultó ser de HV10 900 ± 20 .

3.2 Materiales a mecanizar

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

Las inclusiones correspondieron al tipo "A" (sulfuros), serie fina N° 1½ y tipo "D" (óxidos), también de serie fina N° 1.

La dureza promedio de la barra de acero SAE 1060 resultó ser HV10 282 ± 5 .

Una imagen metalográfica de la sección transversal de las barras se observa en el Figura 3, derecha.

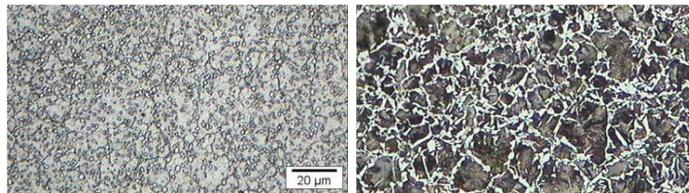


Figura 3: Microestructura del acero AISI M2 (500X) izquierda y del acero SAE 1060 (100X)

En el caso de la barra de aluminio mostró una microestructura de extrusión, constituida por granos alargados de solución sólida de Al y finos compuestos intermetálicos, algunos precipitados al azar, y otros alineados por el proceso de fabricación. Respecto del tratamiento térmico, podemos afirmar que probablemente haya sido un envejecido artificial.

La dureza promedio de la barra de aluminio resultó ser HV10 106 ± 2 .

Una imagen metalográfica de la sección transversal de la barra se observa en el Figura 4 izquierda.

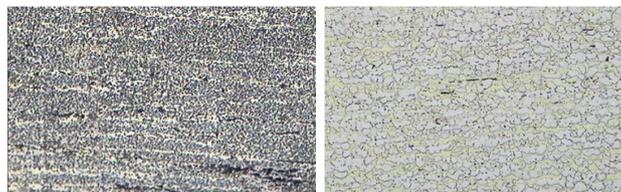


Figura 4: Microestructura del aluminio (500X) izquierda y del latón amarillo (100X)

Por último, el latón amarillo presentó una microestructura laminada en caliente constituida por una matriz de solución sólida Cu (α), solución sólida Cu (β) alineada, con partículas de plomo alargadas distribuidas al azar. Este material no poseía tratamiento térmico.

La dureza promedio de la barra de latón resultó ser HV10 126 ± 3 y una imagen metalográfica de la sección transversal se observa en la Figura 4 derecha.

3.3 Ensayos de agujereado

En Figura 5 y Figura 6 se muestran los diagramas de caja correspondientes a las fuerzas de avance y momento torsor segmentadas por condición de corte y material.

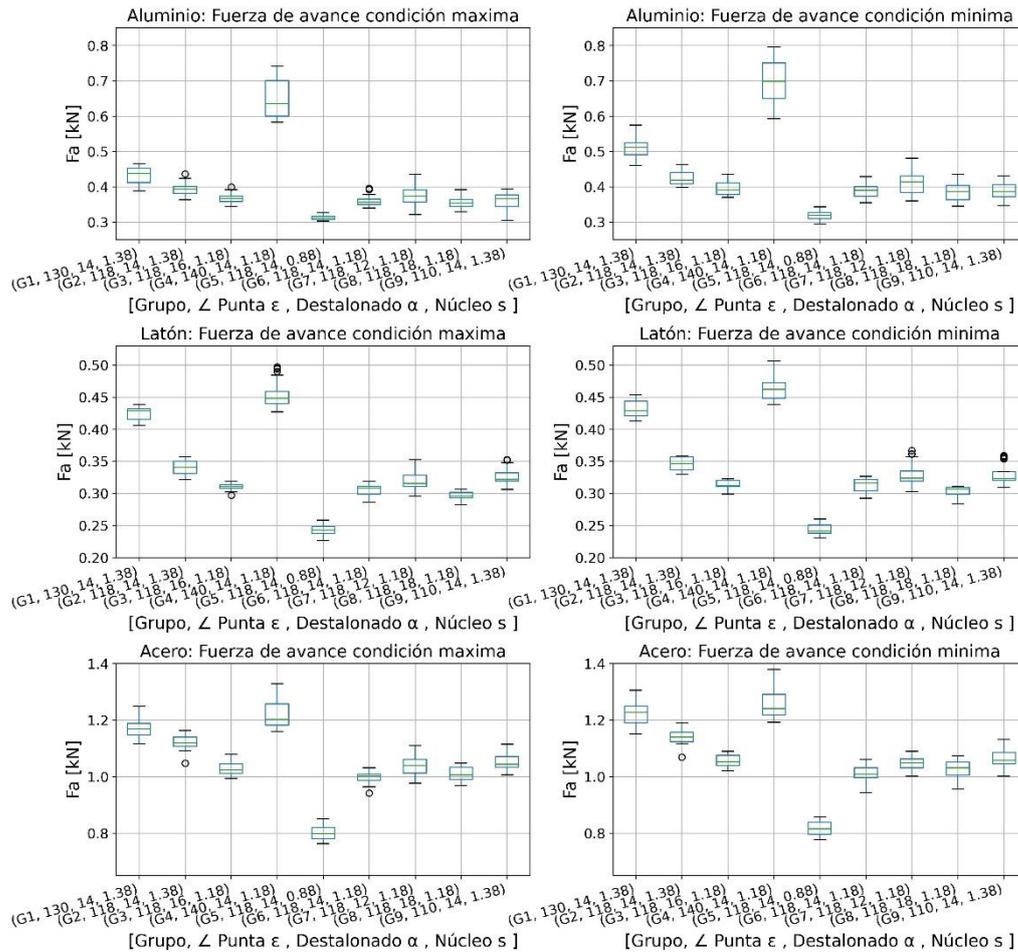


Figura 5: Boxplot para la fuerza de avance en condición de corte máxima y mínima

En principio, cuando se comparan los diagramas de cajas de la fuerza de avance o del momento torsor para los distintos materiales agujereados y en ambas condiciones de corte, fue el acero SAE 1060 aquel que produjo mayores valores de resistencia en tanto que fue el latón quien demandó menores esfuerzos para ser agujereado.

El análisis de los gráficos de cajas pone en evidencia que el aumento de la velocidad de corte produce un leve descenso de la mediana de la fuerza de avance. Esta situación respondería a una reducción de la tensión unitaria de corte con la temperatura [14]. Un comportamiento similar se observa para el momento torsor. Sin embargo, existe una gran dispersión de los datos.

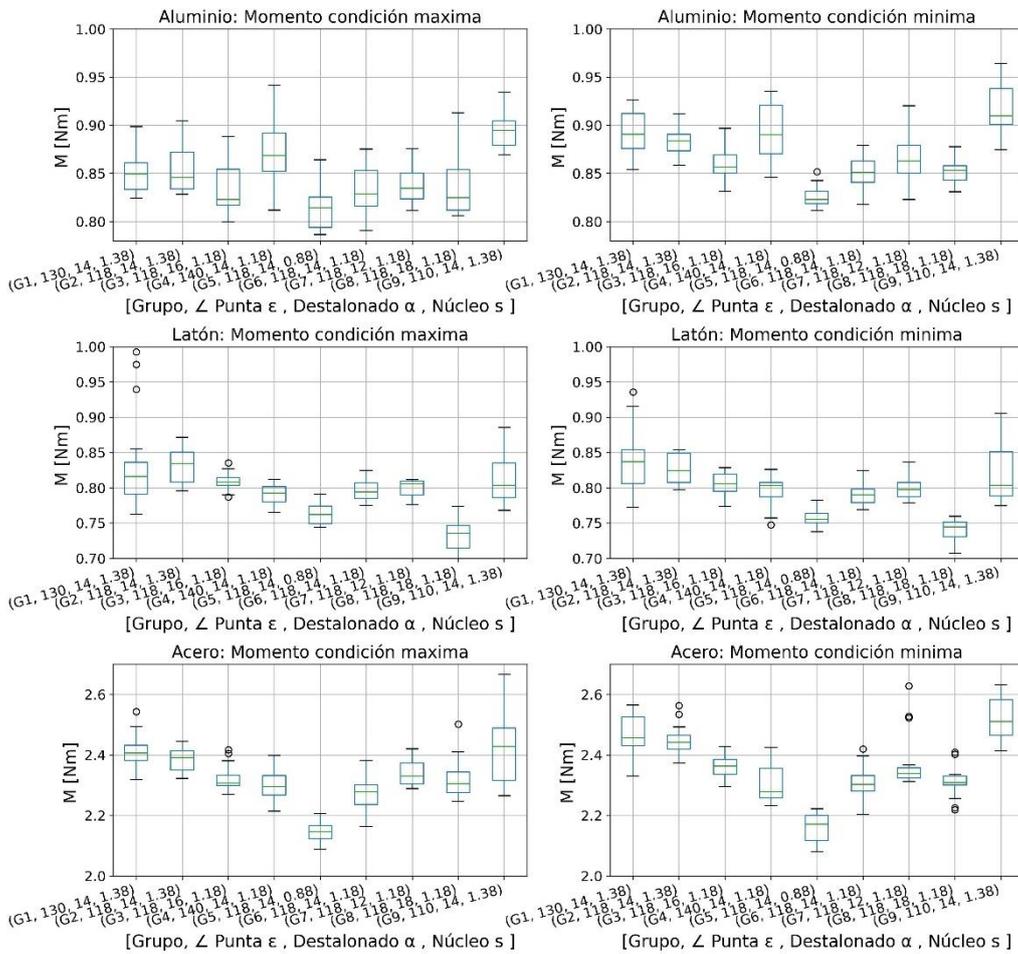


Figura 6: Boxplot para el momento torsor en condición de corte máxima y mínima

En Figura 7 se presenta un resumen de las mediciones experimentales (F_a vs M) para cada grupo de brocas y condición de corte, identificadas respectivamente por color y tipo de marcador. Por proximidad al origen de coordenadas pueden identificarse aquellos Destalones que evidenciaron menores esfuerzos de corte.

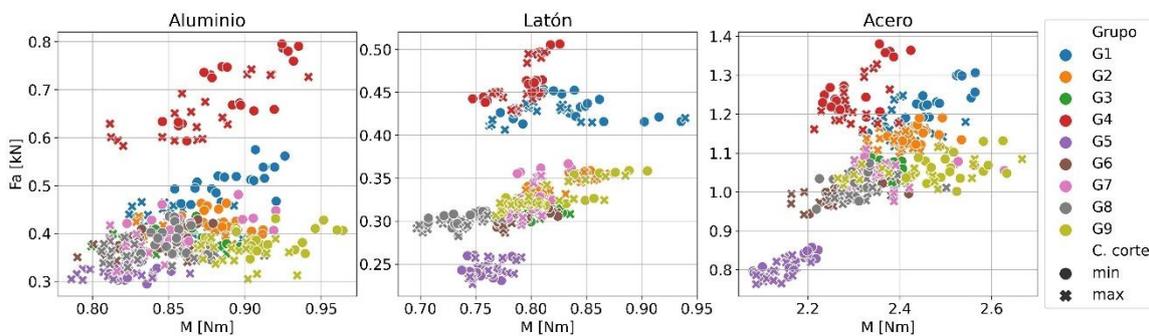


Figura 7: Resumen de resultados

En la Figura 8 se presentan las regresiones para la condición de corte mínima y máxima (línea de trazos y línea de puntos respectivamente) obtenidas para la respuesta fuerza de avance,

evaluada para cada variable geométrica (dispuestas en columnas), con cada fila de gráficos refiriendo al material ensayado. Siguiendo este mismo estilo, la Figura 9 presenta las regresiones para la respuesta Momento torsor.

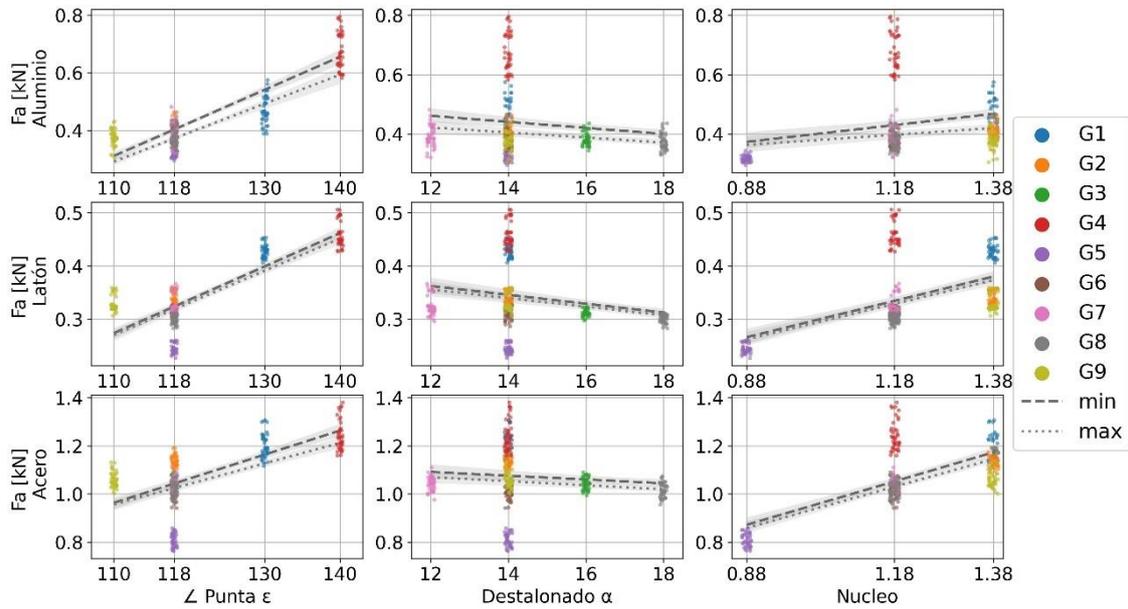


Figura 8: Regresiones para la fuerza de avance en aluminio, latón y acero

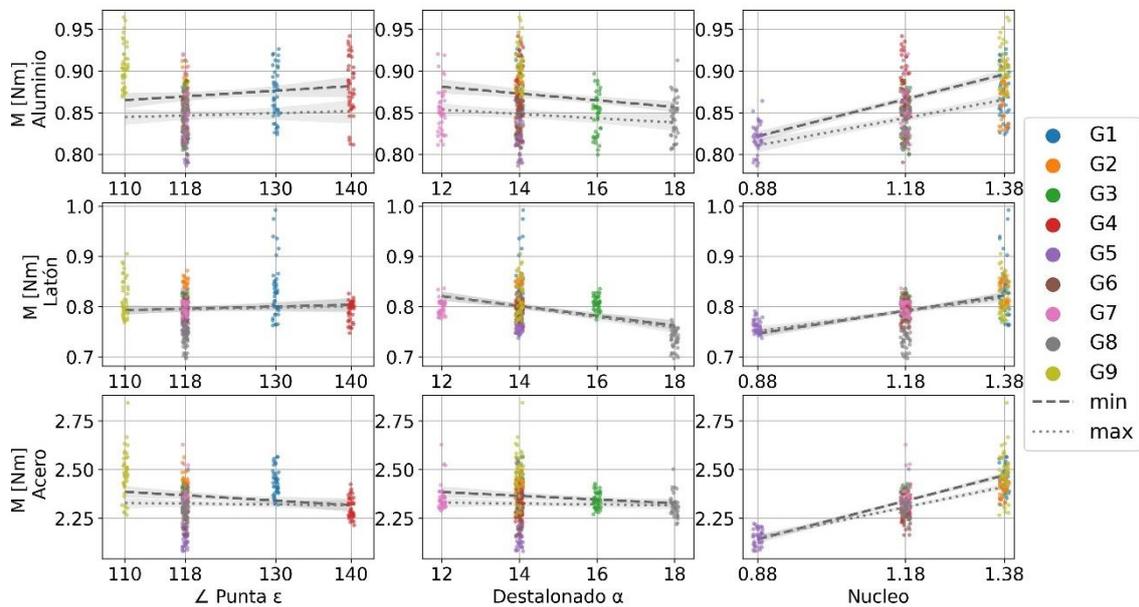


Figura 9: Regresiones para el momento torsor en aluminio, latón y acero

Puede identificarse que solo el aluminio presentó diferencias significativas en los esfuerzos registrados al comparar condiciones de corte mínima y máxima. Esto último es observable en la marcada separación de sus rectas de regresión.

4. CONCLUSIONES

Las principales contribuciones de este trabajo se pueden resumir en los siguientes puntos:

- La combinación geométrica del afilado de la punta que minimiza la fuerza de avance en todos los casos correspondió a un ángulo de punta de 118° , un espesor de núcleo de 0.88 mm y un ángulo de destalonado de 14° (Grupo 5). Particularmente para el caso del acero y el aluminio esta combinación también minimizó el momento torsor.
- Sobre la fuerza de avance en el conjunto de brocas ensayadas, el factor que produjo la mayor contribución fue el ángulo de punta seguido por espesor del núcleo, en tanto que con relación al momento torsor fue el espesor de núcleo.
- Para el caso del aluminio a las velocidades de corte ensayadas se observa una diferenciación significativa de los esfuerzos tanto para la fuerza de avance como para el momento. Esta situación queda pendiente de ser analizada con mayor profundidad.

En trabajos futuros se intentará ahondar la discusión de los resultados alcanzados utilizando simulación por elementos finitos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la empresa argentina Ezeta especializada en herramientas de corte, por la fabricación de las herramientas especiales empleadas en el presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Pervaiz S. *An Extensive Review of The Water Consumption and Cutting Fluid Based Sustainability Concerns in The Metal Cutting Sector*. J Clean Produc, 197:1, 134-153, 2018
- [2] Martinez Kraemer D. *Sobre algunos procesos de agujereado*. Editorial Nueva Librería, Buenos Aires, Argentina, 2010.
- [3] DIN 1414-1. *Technische Lieferbedingungen für Spiralbohrer aus Schnellarbeitsstahl, Teil 1: Anforderungen*. DIN. 1998.
- [4] Martinez Kraemer D, Brunetto P, Maceira G, Szombach J, Papczuk G. *Influencia de las distintas clases de hélices empleadas en brocas helicoidales de acero AISI M2 y del tipo de lubricación sobre los esfuerzos y la calidad de los orificios en procesos de agujereado*. Segundo Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, ISBN: 978-950-605-633-9, 16 al 19 de noviembre de 2010, San Juan, Argentina.
- [5] Diniz A, Marcondes F, Coppini N. *Tecnologia da usinagem dos metais*. Artliber Editora, quinta edición, Sao Paulo, Brasil, 2006

- [6] Astakhov V. *Cutting Force Modeling: Genesis, State of the Art, and Development*. Springer Nature, Switzerland, 2022
- [7] Shaw M. *Metal cutting principles*. Oxford University Press, Second Edition, United States of America, 2005
- [8] Abate G, Martynenko V, Martinez Kraemer D, Bruno A. *Reducción de la variabilidad atribuible a las brocas en la medición de esfuerzos en operaciones de agujereado*. Congreso SAM / CONAMET 2011, ISBN: 987-27308-0-2, 18 al 21 de octubre de 2011, Rosario, Argentina.
- [9] Stemmer C, *Ferramentas de corte II*. Imprensa Univesitaria Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 1995.
- [10] M. Guzmán, *Estimación de las fuerzas de corte en un proceso de taladrado con brocas de geometría mejorada en el filo transversal*. Congreso CAIM 2008.
- [11] Aamir M, Giasin K, Tolouei-Rad M, Ud Din I, Hanif M, Kuklu U, Pimenov D, Ikhlaq M. *Effect of Cutting Parameters and Tool Geometry on the Performance Analysis of One-Shot Drilling Process of AA2024-T3*. Metals, 11, 854, 2021.
- [12] Tamura S, Matsumura T. *Cutting Force in Drilling with Flat Bottom Drill*. Key Engineering Materials, Vol. 926, pp 1636-1642, 2022
- [13] Kyratsis P, Markopoulos A, Efkolidis N, Maliagkas V. *Prediction of Thrust Force and Cutting Torque in Drilling Based on the Response Surface Methodology*. Machines, 6, 24, 2018
- [14] Akhavan A, Sharif S, Alizadeh S. *Statistical analysis, modeling, and optimization of thrust force and surface roughness in high-speed drilling of Al-Si alloy*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 227(6), 808–820, 2013
- [15] Machinability Data Center. *Machining Data Handbook*. Metcut Research Associates Inc., Third edition, Cincinnati, United States of America, 1980.