

Desempeño de brocas de metal duro sin revestimiento en taladrado de aceros dulces con y sin refrigeración

Performance study of mild steel drilling with carbide uncoated tools with and without cutting fluids

Jeferson Alecsander Rigo¹, Luiz Airton Consalter¹, José Antônio Portella¹, Orlando Durán^{II}

I. Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo. Brasil

II. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Mecánica. Valparaíso. Chile

Correo electrónico: orlando.duran@pucv.cl

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 12 de noviembre de 2016

Aceptado: 20 de marzo de 2017

Resumen

Este trabajo presentó un estudio comparativo del desempeño en el taladrado con brocas helicoidales no revestidas en la confección de piezas perforadas de acero de bajo contenido de carbono. Fue usado como criterio de fin de vida el colapso final de la herramienta. Se contabilizó el número de agujeros fabricados usando dos tipos diferentes de fluidos de corte. Los resultados obtenidos apuntan a una pequeña diferencia entre los rendimientos

de la operación para ambos medios de lubrefrigeración. Esta constatación es importantísima en ambientes productivos debido a que la diferencia de costo entre ambos fluidos está en el orden de 1:10.

Palabras claves: taladrado, fluidos de corte, productividad.

Abstract

This paper presented a comparative study of performance in drilling with uncoated twist drills in the manufacture of mild steel parts. Using the final collapse of the tool as the criteria of end of life, the numbers of manufactured holes using two different types of cutting fluids were compared. The results point to a slight difference

between the yields for both lubrefrigeration media. This finding is important in production environments if one have in mind that the cost difference between the two fluids is in the order of 1:10.

Key words: drilling, cutting fluids, productivity.

Introducción

El uso de las mejores condiciones de corte en procesos de mecanizado constituye un factor crucial en la búsqueda de altas eficiencia y productividad como factores de mayor competitividad en la industria [1]. Hoy en día se puede realizar un gran número de agujeros por unidad de tiempo, esto genera la necesidad de desarrollar nuevas técnicas de mecanizado, nuevas herramientas y fluidos de corte capaces de soportar adecuadamente las exigentes condiciones a las que son sometidas [2]. Muchos de estos avances van acompañados de un aumento en los costos, de manera tal que se hace importante maximizar el uso de esos recursos, principalmente de las herramientas, estableciendo de manera confiable las condiciones de trabajo para establecer la duración de su vida útil y así no retirarlas anticipadamente perjudicando su rendimiento y productividad [3, 4].

El acero dulce, material ampliamente utilizado en la industria, se caracteriza por su bajo contenido de carbono con porcentajes de Silicio y Manganeso que no superan los 0,6 % y 1,65 % respectivamente, además de Aluminio (0,1 %), Cobre (0,3 %) y Plomo (0,35 %). Productos tales como las cuñas de fortificación, tuercas, entre otros, son fabricados en grandes series en este material y cuentan al taladrado entre sus procesos el taladrado. Una de las características predominantes de este acero es su baja dureza y muy alta ductilidad.

Las principales formas de desgaste que se forman en la punta de la herramienta son comentadas en [5]. Estas son el desgaste del flanco y el cráter en la cara.

Sin dejar de lado cuestiones ambientales [6, 7], otro aspecto que concita el interés en el uso de fluidos lubrefrigerantes es su impacto en las condiciones productivas de una operación de taladrado. Aspectos ligados a la precisión de los agujeros, acabados superficiales y durabilidad de las herramientas son también materia de estudio.

Según [8] muchos de los resultados indeseables en el proceso de perforación se deben a la selección errónea del método de aplicación de los fluidos. Esto se ve agravado conforme aumenta la profundidad de los agujeros, independientemente de las condiciones de corte. Según [9] en su trabajo comparativo entre los fluidos de corte semi-sintéticos en la perforación de hierro fundido vermicular, la presencia de aceite mineral en

la lubricación refrigerante permitió una mayor duración de la herramienta. Los fluidos de tipo EP mostraron mejores resultados en comparación con el fluido sin aditivos y el de corte en seco. En el mecanizado en seco, el exceso de adherencia de material en la punta de la broca, prácticamente hizo imposible medir el desgaste.

Naves, V. T. G.; Silva, M.B. en su tesis de maestría, mostraron en sus experimentos (torneado de acero inoxidable 316) que la presión del fluido lubricante refrigerante aplicado a la zona de corte, modifica el desgaste de la herramienta debido a la cantidad de material adherido. Se probaron mecanizado a seco, con chorro y presiones de 10 MPa, 15 MPa y 20 MPa. El autor explica que cuando el líquido se aplica bajo presión sobre el área de salida de la viruta, formando una cuña hidráulica entre viruta y la superficie de salida de la herramienta se logran menores desgastes.

En [10] se propone un método para estimar la exactitud de pequeños agujeros (1 mm de diámetro), en aceros dulces. Como resultado, se demostró que la resistencia a la flexión de la broca y el adelgazamiento de la punta de la broca ejercen una gran influencia en la exactitud agujero perforado.

Este trabajo presenta los resultados del estudio del taladrado de acero dulce con brocas integrales de metal duro sin revestimiento cuyo objetivo es verificar el efecto que dos tipos de fluidos de corte pueden generar en el desempeño productivo de la operación

Métodos y Materiales

Para verificar la durabilidad y el comportamiento de las brocas, los experimentos de taladrado se realizaron en placas de acero con brocas nuevas al inicio del experimento. Se analizó la cantidad de agujeros realizados como criterio de desempeño hasta que la broca perdía su capacidad de remoción. El número de agujeros realizados permite dimensionar la durabilidad de una herramienta tal como definido por ISO 3685 (*Tool-life testing with single-point turning tools*, 1993). La máquina utilizada fue un centro de mecanizado vertical marca ROMI, D800 modelo con motor de 15 kW. Su cabezal vertical es de cono ISO 40 y rotación máxima de 7500 rpm. El avance rápido de los ejes son de hasta 30 m/min y posee una bomba del sistema de fluido de corte que desarrolla un flujo de 20 l/min a 7 bar de presión. Fueron utilizadas brocas de metal duro sin recubrimiento y sin refrigeración interna, diámetro de 4 mm modelo R100 Dormer. El diámetro inicial de las brocas utilizadas era de 4 mm. El ángulo de punta es de 120°. Según el fabricante de esas brocas, para las condiciones de perforación en agujeros ciegos en piezas de acero con porcentaje de carbono de 0,1 % y resistencia a la tracción inferior a 700 MPa, dureza inferior a 125 HB, con refrigeración externa y uso de emulsión como fluido de corte, las velocidades de corte recomendadas están entre 67 y 82 m/min y los avances están entre 0,019 y 0,031 mm/rot.

Se utilizaron dos fluidos de corte en el desarrollo de esta investigación. El fluido de corte número 1: aceite de corte semi-sintético. Las partículas emulsionadas de este líquido, que contiene aceite mineral, poseen reducido tamaño generando una solución transparente, en lugar de una lechosa. Al ser una microemulsión, es menos susceptible al ataque bacteriano. Este líquido es adecuado para su uso en sistemas centralizados o depósitos individuales de máquinas herramienta en el mecanizado de metales ferrosos y no ferrosos. El fluido de corte número 2 corresponde a un aceite semisintético Superedge 6552 fabricado por CASTROL.

El material utilizado para los especímenes es acero SAE 1012 laminado con 12,7 mm de espesor. La composición química del acero se muestra en la tabla 1, obtenida por análisis químico con tres repeticiones. El equipo utilizado fue un espectrómetro de medición óptica marca OXFORD. La dureza media del material fue obtenida a través de un durómetro marca Heckert, escala HB 111.41. El acero utilizado en los experimentos fue sometido a tracción para evaluar la resistencia al flujo y la tracción. El diseño experimental utilizado para el análisis estadístico de los datos fue un factorial 3 x 2 con 5 % de significación, con tres velocidades de corte y dos fluidos. Los resultados se analizaron con el software libre SISVAR [11]. Producto del diseño experimental y del interés por probar dos direcciones para realizar los agujeros (número de agujeros y tamaño de la mesa de la máquina), se ensayaron cuatro muestras tomadas de la dirección longitudinal y cuatro muestras tomadas de la dirección transversal de los especímenes. Para los experimentos se utilizó una máquina de ensayo de tracción universal marca SCHENCK Upm modelo 200 con una capacidad de 200 N/20T.

Tabla 1. Análisis químico del material de los especímenes

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
99,2 %	0,143 %	0,0151 %	0,471 %	0,0184 %	0,0142 %	0,04 %	0,003 %	0,003 %	0,0452 %
Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	B	Ca
0,001 %	0,0048 %	0,0104 %	0,0032 %	0,0051 %	0,015 %	0,0077 %	0,0010 %	0,0006 %	0,0005 %

La figura 1 muestra el diseño del cuerpo de prueba con la perforación planificada. Las dimensiones de la probeta son 250 mm de largo y 220 agujeros con 26 mm de ancho con 22 agujeros. Todas las placas fueron fresadas en ambos lados para eliminar las irregularidades provenientes de la laminación. El espesor resultante de las muestras varió de 11,5 mm a 12 mm. La figura 1 muestra un detalle de la placa perforada.

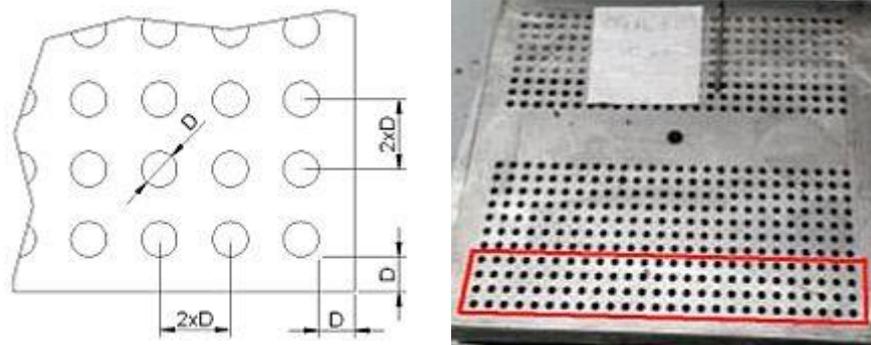


Fig.1. Disposición de los agujeros en los especímenes y fotografía de placa perforada después de un ensayo

Los cuerpos de prueba fueron fijadas en una base de acero rectificando con la ayuda de cuatro sujetadores en los extremos y un tornillo central. La figura 2 muestra el sistema de fijación. La base de soporte se muestra en la figura por el número 1. La muestra 2, las mordazas 3 y el tornillo central 4. Debido a la delgadez de las muestras se colocó el tornillo central para garantizar una fijación rígida. Las muestras se centralizan en la máquina, a través de la perforación central y guiados en el agujero de tornillo, fijado a la base, que se sujeta a la mesa de la máquina.

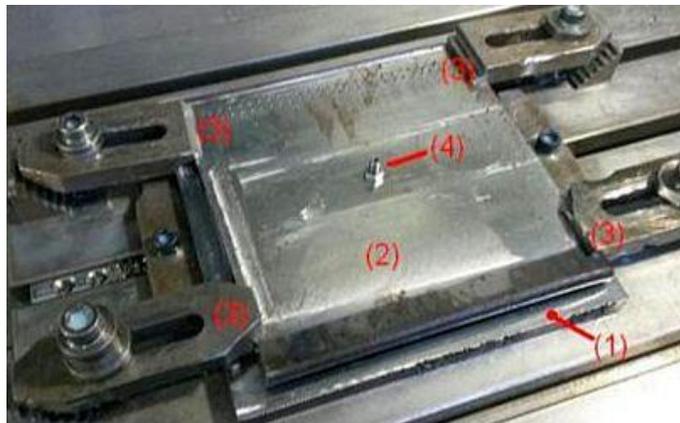


Fig. 2. Fijación del cuerpo de prueba

Experimentos preliminares

Las pruebas iniciales de perforación se hicieron con velocidades de corte y avances superiores a los valores recomendados por el fabricante para así determinar los mejores parámetros de corte a utilizar en los experimentos definitivos. La primera prueba se realizó con el aumento de velocidad de corte hasta 120 m/min, dejando el avance indicado por el fabricante (0,031 mm/rev). La segunda prueba se hizo con un aumento del avance hasta 0,1 mm/rev, permaneciendo la velocidad de corte máxima indicada por el fabricante (82 m/min). La tercera prueba se realizó con un avance intermedio de 0,07 mm/rev. El cuarto ensayo se realizó con el aumento simultáneo de la velocidad de corte a 120 m/min y el avance a 0,1 mm/rev.

Experimento de perforación

Para cada uno de los dos fluidos de corte, se probaron tres condiciones de velocidad de corte. Se utilizaron las velocidades máximas y mínimas de corte especificadas por el fabricante. La tercera condición fue una velocidad de corte promedio entre la mínima y la máxima. El avance utilizado fue el máximo especificado por el fabricante (0.031 mm/rev). Para cada velocidad de corte se realizaron tres repeticiones. Las herramientas se utilizaron hasta su colapso final por torsión. La profundidad de los agujeros fue de 10 mm, lo que correspondía a 2,5 veces el diámetro de la broca. Esta profundidad se establece en función del espesor de las muestras de ensayo que oscilan entre 11,5 y 12 mm (agujeros no pasantes o ciegos). Los agujeros se hicieron en secuencias de 26 instancias a lo largo del eje X. A cada línea de perforación, la máquina volvió a la coordenada cero en X de cero y se trasladó 8 mm en el eje Y para luego ejecutar nuevas perforaciones.

Las imágenes para la evaluación de las brocas se realizaron con la ayuda de un microscopio binocular estéreo, marca ZEISS, modelo STEMI 2000-C, con ampliación máxima de cincuenta veces. Para una evaluación detallada de desgaste y el daño producido, se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM), la marca Tescan, modelo VEGA LM3, con la ampliación máxima de trescientos mil veces, con la energía análisis de espectrometría dispersiva de rayos X (EDS), marca OXFORD.

Resultados y Discusión

Los experimentos se hicieron con el fin de elevar las condiciones hasta el extremo. Se esperó que este aumento pudiera causar desgaste o daño marcado en un tiempo menor de corte, y así reducir el tiempo de ejecución de los experimentos. Como criterio se usaron las condiciones recomendadas para una broca similar pero recubierta y con canales internos para el paso de fluido de corte. Brocas con estas características son ampliamente utilizadas en la industria con buenas tasas de productividad (velocidad de corte orden de 120 m/min; avance 0,1 mm/rev).

La primera prueba realizada con el aumento de velocidad de corte de 120 m/min y el avance máximo indicado por el fabricante de 0,031 mm /rev no proporcionó resultados satisfactorios. En estas condiciones, la broca se rompió antes de que los primeros cincuenta agujeros. Esto se puede explicar por las temperaturas excesivas generadas en la punta de la herramienta y la dificultad de acceso del fluido a la región, asociados con la ausencia de revestimiento, lo que aumenta el coeficiente de fricción, generando más calor. En la segunda prueba (con avance de 0,1 mm/rev y velocidad de corte de 82 m/min), la broca se rompió antes de los primeros treinta agujeros. Esto se puede explicar por el excesivo espesor de viruta y las dificultades encontradas para eliminarla a través de los canales helicoidales. Esto último debido a la falta de lubricación y alto coeficiente de fricción causados por la falta de recubrimiento en la herramienta. Como resultado, el aumento del momento torsor causó la rotura de la herramienta. La tercera prueba se realizó con un valor de avance intermedio (0,07 mm/rev). En esta condición no hubo cambio en los resultados en relación a la prueba anterior. En la cuarta prueba realizada con aumento simultáneo de la velocidad de corte a 120 m/min y del avance a 0,1 mm / rev, la cantidad de agujeros fabricados también no superó los cincuenta. Basándose en estos resultados, y observando que no fue posible intensificar los desgastes, daños y reducir los tiempos de los experimentos mediante el aumento de los parámetros de corte se optó por utilizar datos de corte dentro de los límites especificados por el fabricante. Se evaluó el número de agujeros realizados con cada una de las velocidades de corte y el número de metros lineales perforados.

El primer análisis con el número de orificios realizados en cada condición, resultó en un coeficiente de variación del 33 %. Esta alta variabilidad hizo que los dos fluidos se presentaran estadísticamente iguales, mediante la prueba de Tukey. Esta variabilidad se justifica por la distribución del fluido en cada velocidad, se observó que no había ninguna diferencia significativa en la forma como este actuaba. Debido al gran coeficiente de variación, los resultados estadísticos no pueden ser concluyentes sobre las diferentes velocidades de corte y fluidos de corte. En la búsqueda de mejores resultados, se optó por el uso de una normalización de los datos usando el software mencionado. Se optó por la raíz cuadrada de los valores de los agujeros, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Tabla de resultados normalizados

Fluido	v_c (m/min)	N	Raíz cuadrada Número de agujeros	Fluido	v_c (m/min)	N	Raíz cuadrada Número de agujeros
Fluido 1 – Cutting Oil 351	67	1	43,63	Fluido 2 – Superedge 6552	67	1	63,97
		2	40,84			2	47,92
		3	43,36			3	47,13
	Media		42,60		Media		53,00
	74,5	1	41,80		74,5	1	30,84
		2	41,15			2	29,02
		3	40,52			3	25,61
	Media		41,16		Media		28,49
	82	1	39,61		82	1	35,94
		2	33,01			2	29,44
		3	34,91			3	34,26
	Media		35,85		Media		33,22
Media total			39,87	Media total			38,24

En el análisis realizado en el software con la raíz cuadrada del número de agujeros, el coeficiente obtenido de variación fue de 11,6 %, un valor aceptable para una distribución de datos con resultados significativos. Para los fluidos, y de acuerdo con la prueba F (número de grupos iguales a 2 y el número de observaciones igual a 18), el F calculado, igual a 0,586 (menor que el F esperado), no indica diferencia significativa entre ambos fluidos, teniendo en cuenta el número variable de agujeros perforados hasta la rotura de la herramienta. Para velocidades de corte (número de grupos = 3 y el número de observaciones = 18), F es igual a 16,817 mayor que F esperada, esto denota la existencia de una diferencia significativa entre los niveles del factor velocidad de corte teniendo en cuenta el número variable de agujeros perforados hasta la rotura de la

herramienta. Para la interacción entre velocidad de corte y fluido, el F recomendado es igual a 3,11. Como resultado, el F calculado es igual a 9792, mayor que el F recomendado. Por lo tanto, existe una interacción significativa entre los niveles de factores de fluido y velocidad de corte, a un nivel de significación de 5 %. Por lo tanto, hubo un hallazgo significativo: el número de orificios realizados con cada fluido depende de la velocidad de corte, así como el número de agujeros realizados para cada velocidad de corte depende del fluido utilizado. La prueba de Tukey hecha para comparar los dos fluidos, no mostró ninguna diferencia significativa entre el número medio de agujeros para los dos fluidos. La diferencia entre las medias estuvo por debajo de la diferencia significativa mínima que resultó ser de 4,65. En el análisis de las medias para cada una de las velocidades de corte, la velocidad de 82 m/min y 74,5 m/min, no mostró diferencias significativas. En cuanto a la velocidad de 67 m/min, el resultado fue superior a la menor diferencia significativa de 6,98. El número de orificios obtenidos a la velocidad de 67 m/min fue 38,5 % mayor que a la velocidad de 82 m/min y 37,3 % superior a la velocidad de 74,5 m/min. La figura 3 muestra la gráfica de los promedios de cada velocidad de corte, donde la velocidad de 67 m / min dio lugar a 37,9 % más agujeros en comparación de la media de los otros dos velocidades.

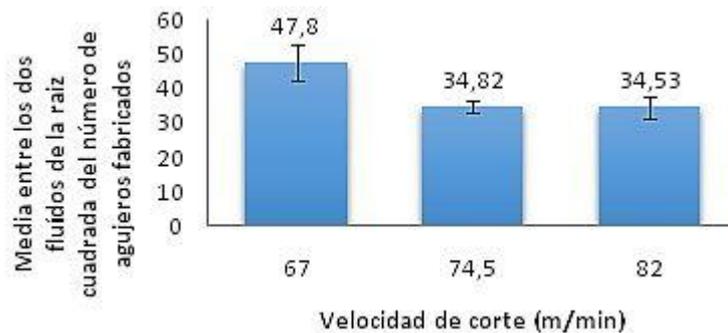


Fig. 3. Gráfico de las medias de la raíz cuadrada del número de agujeros para cada velocidad

En la comparación para cada fluido en función de la velocidad de corte, la diferencia mínima significativa fue 8,06. Para una velocidad de 67 m/min, el fluido 2 Superedge 6552 arrojó una diferencia significativa de 24,4 % más de agujeros hechos en comparación con el primer fluido (aceite 351). Para la velocidad 74.5 m/min, el fluido 1 generó una diferencia significativa de 44,5% más de agujeros hechos en comparación con el fluido 2. En cuanto a la velocidad de 82 m/min, no hubo gran diferencia, siendo que la variación fue menor que la diferencia mínima significativa. El gráfico de la figura 4 muestra los resultados comparativos.

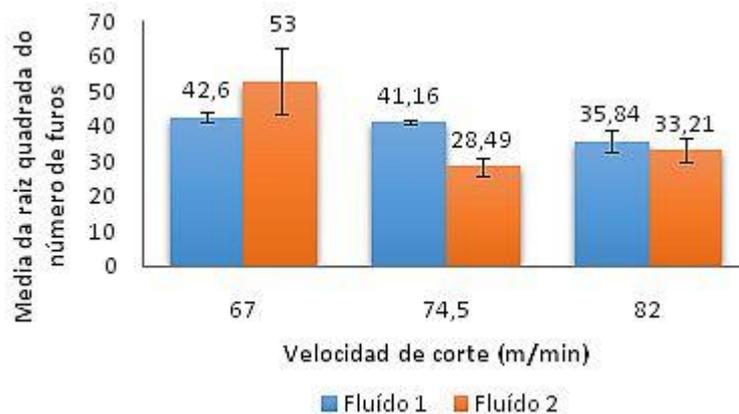


Fig. 4. Gráfico de las raíces cuadradas de las medias de la cantidad de agujeros para las velocidades en cada fluido

Con respecto al sentido en que se efectuaron los agujeros no hubo diferencia significativa en los resultados obtenidos con respecto a la dirección que se tomaron las muestras. Se encontró que la tensión media de fluencia fue de 204,34 MPa y el esfuerzo de tensión máxima fue de 321,43 MPa.

En primer lugar, se debe tener en cuenta que estos resultados se aplican dentro del rango de velocidades en que se efectuaron los ensayos y para el material en cuestión, SAE 1012. No es recomendable generalizar en las conclusiones puesto que en pequeñas variaciones de composición se sabe que el comportamiento de las herramientas puede variar significativamente.

Por otro lado, y como se menciona durante el trabajo, las herramientas traen de fábrica microagrietamientos que, desde cierto punto de vista, pueden afectar la integridad del filo durante los ensayos. La independencia de los resultados es por lo tanto imposible de determinar.

Conclusiones

Las evaluaciones de los rendimientos realizadas demostraron que el rendimiento de la broca para cada combinación fue diferente. A la velocidad de 82 m/min, no hubo una diferencia significativa entre los dos fluidos. A la velocidad de 74,5 m/min, con el fluido 1 - Aceite de corte 351 se logró hacer un 44,5 % más de agujeros.

Con la velocidad de corte de 67 m/min, el fluido 2 - 6552 Superedge permitió realizar un 24,4 % más agujeros de que con el fluido 1. Se ha demostrado que el número de orificios realizados con cada fluido depende de la velocidad de corte, así como el número de agujeros realizados para cada velocidad depende del fluido utilizado. Se observó que el primer fluido introducido se comportó de manera más estable al compararse con el fluido 2. Esto se repitió en todas las velocidades de corte analizadas.

Existe una pequeña diferencia (4,1 %) entre las raíces de los promedios de los números de agujeros obtenidos usando ambos fluidos, Esta diferencia es menor que la diferencia mínima significativa recomendada por la prueba estadística. Esta constatación se constituye como la más importante del estudio, puesto que, la diferencia de costo entre ambos fluidos está en el orden de 1:10.

Referencias

1. LW HG, Pérez Rodríguez R, Zambrano Robledo P, et al. Análisis experimental del torneado de alta velocidad del acero AISI 1045. *Ingeniería Mecánica*. 2012;15(1):10-22.
2. Martínez Aneiro F, Sánchez Battaille T, Frías Figueroa G, et al. Comportamiento del acabado superficial de la pieza y el desgaste de la herramienta al fresar aluminio con altas velocidades de corte en fresadoras CNC convencionales. *Ingeniería Mecánica*. 2006;9(2):7-12
3. Cabrera Pena A, Rodríguez Parra Rivas T. Determinación de la vida útil de las herramientas utilizadas en el barrenado de materiales no metálicos. *Ingeniería Mecánica*. 2002. 5(2):47-52
4. Rajesh S, Marimuthu K. On-line Drill Wear State Monitoring by Virtual Instrumentation in Machining of Mild Steel. *Journal of Applied Sciences*. 2012 (12):1456-64.
5. Denkena B, Biermann D. Cutting edge geometries. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2014;63(2):631-53
6. Silva V, Batista L, De Robertis E, et al. Thermal and rheological behavior of ecofriendly metal cutting fluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2016;123(2):973-80.
7. Najiha M, Rahman M, Yusoff A. Environmental impacts and hazards associated with metal working fluids and recent advances in the sustainable systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016 (60):1008-31.
8. Zeilmann R, Vacaro T, Bordin F, et al. Effects of the cutting fluid reduction on the dimensional quality of hole. *Journal of Engineering Manufacture*. 2015;229(8):1314-23.
9. Alves S, Schroeter R, Bossardi J, et al. Influence of EP Additive on Tool Wear in Drilling of Compacted Graphite Iron. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2011;33(2):197-202.
10. Hiroki E, Toshihiko M, Etsuo M. Accuracy estimation of drilled holes with small diameter and influence of drill parameter on the machining accuracy when drilling in mild steel sheet. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007;47(1):175-81.
11. Warner R. *Applied Statistics: From Bivariate Through Multivariate Techniques*. 2nd ed. NY, USA: SAGE Publications Inc; 2013.