

REMOCIÓN DE MATERIAL EN DIVERSOS ELECTROLITOS DURANTE EL MAQUINADO ELECTROQUÍMICO DE ACEROS DE ALTA RESISTENCIA

E.E. Granda-Gutiérrez.^{1,*}, J.C. Díaz-Guillén^{1,#}, N.P. Hung², H.M. Hernandez-García¹, S. López¹, A. Garza¹, J. Acevedo¹, I.O. Rossano-Díaz³

¹ Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V.
Gerencia de Desarrollo Tecnológico
Ciencia y Tecnología No. 790, Saltillo 400, Saltillo, Coahuila, México
^{*}egranda@comimsa.com [#]Cátedras CONACYT

² Texas A&M University
Engineering Technology & Industrial Distribution (ETID)
College Station, Texas, U.S.

³ Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ingeniería
Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México, México

RESUMEN.

El maquinado electroquímico es un proceso no convencional de manufactura de componentes metálicos, que hace uso de una celda electrolítica como base para la remoción de material de una pieza de trabajo polarizada con corriente directa. Se presentan en este trabajo los resultados experimentales para determinar el efecto que tiene la composición química del electrolito en el proceso de maquinado electroquímico de aceros de alta resistencia, evaluando principalmente la velocidad de remoción del material en dos tipos de acero. Estos experimentos se desarrollaron en una celda de maquinado electroquímico con corriente directa, de diseño propio, y se presentan los principales aspectos de su construcción e instrumentación. Los resultados muestran que una solución acuosa de Cloruro de Sodio constituye el electrolito que permite una mayor velocidad de remoción de material.

Palabras Clave: maquinado electroquímico, electrolitos, aceros de alta resistencia.

ABSTRACT.

Electrochemical machining is a non-conventional manufacturing process for metallic components. This process uses an electrolytic cell for material removal from a work piece biased with direct current. In this paper, we present the experimental results to determine the effect of the chemical composition of the electrolyte in the electrochemical machining of high strength steels; the material removal rate is particularly studied for two different types of micro alloyed steels. The experimental setup was developed in an own-design direct current electro machining cell, which main construction details and instrumentation is also explained. Results show that a Sodium Chloride aqueous solution is the electrolyte with fastest material removal rate in both: high and low concentration.

Keywords: electrochemical machining, electrolyte, high strength steels.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de maquinado electroquímico (ECM, por las siglas en inglés de *Electro - Chemical Machining*) fue introducido en la década de 1960 en aplicaciones para la industria aeroespacial en operaciones de manufactura y acabado de componentes especiales, pero continua siendo un importante campo de estudio debido a su potencial para el maquinado de formas complejas con excelente precisión y acabado superficial [1].

En el proceso ECM, la disolución del material ocurre cuando la pieza que se requiere maquinar se utiliza como el ánodo de una celda electrolítica y el cátodo constituye entonces la herramienta de trabajo, estando ambos elementos separados por una distancia pequeña conocida como separación entre electrodos o simplemente “gap”. Es, por lo tanto, un proceso en el que la remoción de material se realiza eliminando átomos de la superficie de la pieza de trabajo en acuerdo con el principio de Faraday [2]. La Ley de Faraday indica que la masa de un elemento que se desprende de un electrodo en una celda electrolítica es proporcional a la cantidad de carga eléctrica [3], por lo que la cantidad de material que puede removerse de un electrodo depende de la corriente eléctrica aplicada a la celda electrolítica, que a su vez está relacionada con la conductividad del electrolito.

El electrolito, que es definido como un fluido que es capaz de conducir electricidad [4], se utiliza como medio de transmisión de la energía para efectuar el proceso de maquinado mencionado y juega un papel muy importante en lo que se refiere a la velocidad de remoción de material (MRR, por las siglas en inglés de *Material Removal Rate*), por lo que el estudio de la concentración y tipo de electrolito empleado es de suma importancia para dicho proceso.

Derivado de lo anterior, se encuentra que diversos autores han estudiado el efecto de los electrolitos para la manufactura de una variedad de materiales utilizando ECM.

T. Haisch y colaboradores, estudiaron el maquinado electroquímico de un acero 100Cr6 con soluciones de NaCl (Cloruro de Sodio) y NaNO_3 (Nitrato de Sodio), a una alta densidad de corriente (hasta 70 A/cm²), con un flujo turbulento del electrolito y concentraciones del 20% de NaCl y del 40% de NaNO_3 . Los resultados obtenidos por dichos autores muestran mejor eficiencia con un electrolito de NaCl [5].

Wang y colaboradores estudiaron la influencia de algunos parámetros como el voltaje, la velocidad de alimentación y el electrolito sobre la precisión de la pieza de trabajo; estudiaron tres tipos de electrolitos NaCl al 5%, $\text{NaNO}_3 + \text{HCL}$ (Ácido Clorhídrico) al 5% y NaNO_3 al 5%, para un material de acero inoxidable, encontrando que el *gap* se incrementa al incrementarse la densidad de corriente y determinando los efectos del electrolito en la corrosión del material [6].

De un modo similar, M. Neergat y colaboradores estudiaron la disolución electroquímica de un acero inoxidable tipo 304 con diferentes electrolitos: Na_2SO_4 (Sulfato de Sodio), Li_2SO_4 (Sulfato de Litio), NaNO_3 , LiNO_3 (Nitrato de Litio) y $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (Nitrato de Calcio); estos autores encontraron que con los electrolitos sulfatados (Na_2SO_4 y Li_2SO_4) a altas concentraciones la pieza de trabajo sufre picaduras, es decir se recomienda que para estos tipos de electrolitos se manejen soluciones diluidas y bajas densidades de corriente para tener mejor acabado superficial de la pieza de trabajo [7].

En este sentido, en el presente trabajo se pretende realizar un análisis del efecto de emplear diferentes soluciones electrolíticas en la velocidad de remoción del material durante el maquinado de aceros de alta resistencia mecánica del tipo HSLA (acero micro aleado de alta resistencia ó *high strength low alloy* por sus siglas en inglés) y acero E-HSS (aceros de extra alta resistencia o *extra high strenght steel* por sus siglas en inglés), que no han sido particularmente estudiados.

2. DESCRIPCIÓN DE LA CELDA DE MAQUINADO

La celda electroquímica empleada para el desarrollo del experimento (figura 1) ha sido diseñada y construida específicamente para ello y está basada en un equipo de maquinado electroquímico del Departamento de Ingeniería de la Tecnología y Distribución Industrial, ETID, de la Universidad de Texas A&M [8].

El proceso se encuentra monitoreado mediante un programa implementado en un controlador NI C-RIO modelo 9074 (National Instruments). Actualmente únicamente se cuenta con un control en la posición de la herramienta, pero se ha decidido utilizar esta plataforma puesto que se pretende en un futuro incorporar control de voltaje y corriente, así como emplear un sistema de polarización por pulsos de alta frecuencia, como opción a la polarización por corriente directa. El diagrama a bloques del sistema se encuentra representado en la figura 2.

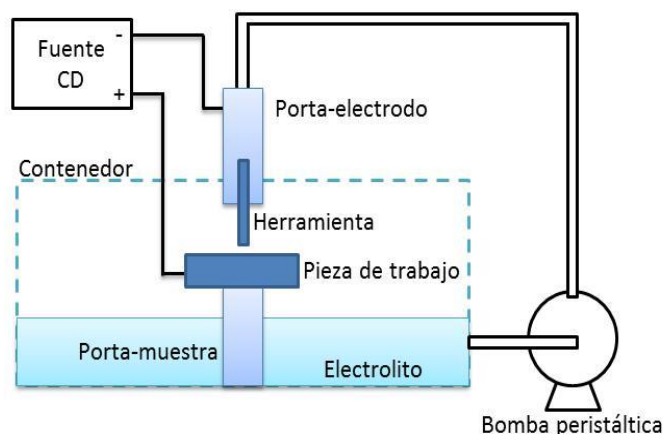


Figura 1. Configuración esquemática de la celda electroquímica

Para regular la velocidad de avance de la herramienta se emplean guías de posicionamiento motorizadas marca Velmex modelo MN-10-0100-M02-21 con motor a pasos, que permite una resolución de 5 μm por paso, para un control preciso de la posición en el eje Z. La distancia relativa entre la herramienta y la pieza de trabajo es medida con un sensor láser, marca Keyence modelo IL-100 acoplado al porta-electrodo, que produce la señal de retroalimentación para conformar un sistema servo controlado.

Para la polarización de la pieza de trabajo y la herramienta, se emplea una fuente de corriente directa marca BK Precision modelo 1902, con capacidad de proveer hasta 15 A de corriente directa con regulación tanto en corriente como en voltaje. Las señales de voltaje y corriente son adquiridas mediante un osciloscopio Tektronix TDS2004C con sonda de corriente Tektronix A622, y recolectadas por una interfaz de usuario desarrollada en LabVIEW. Esta interfaz permite efectuar la comunicación con el osciloscopio y el C-RIO, para proveer los parámetros de referencia a todas las variables del sistema.

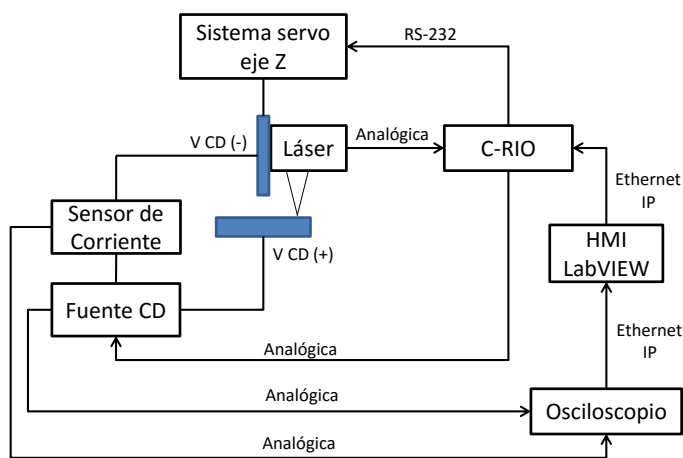


Figura 2. Diagrama a bloques de la instrumentación del proceso de maquinado ECM.

En la figura 3 se presenta la apariencia del panel frontal de la pantalla principal de la HMI (interfaz de usuario) para interactuar con el sistema de maquinado ECM. Esta interfaz permite ajustar el *gap* inicial entre la herramienta y la pieza de trabajo, la velocidad de avance (en pasos múltiples de 5 $\mu\text{m}/\text{seg}$, aunque es posible simular un avance más rápido, aunque con la máxima resolución sigue considerándose como 5 μm).

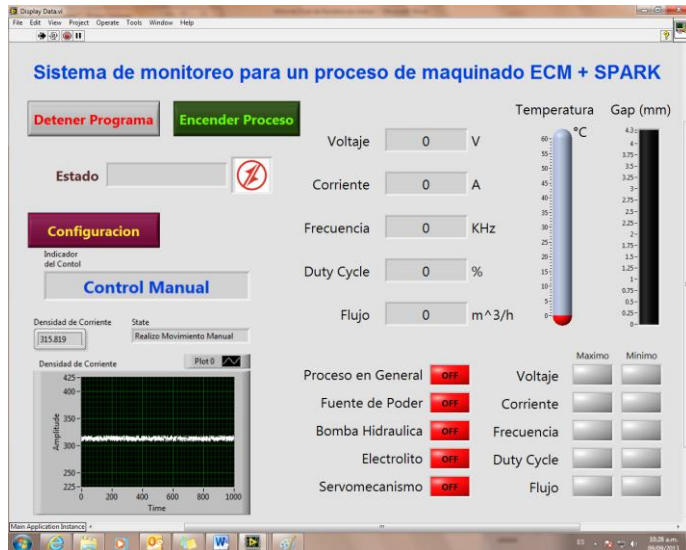


Figura 3. Panel frontal de la HMI para monitoreo del proceso de maquinado ECM

En esta interfaz se realiza la comunicación con la fuente de voltaje para ajustar el valor de voltaje y/o corriente que deberá regularse según el modo de funcionamiento, así como los límites permitidos para estos valores antes de realizar un paro de emergencia (por ejemplo cuando el electrodo toca la pieza y se produce un corto-circuito).

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Con la finalidad de reproducir y validar el maquinado ECM, se utilizaron placas de acero de alta resistencia de los tipos HSLA y E-HSS con dimensiones de 45 mm de lado, con 3.5 mm de espesor.

La composición química de las aleaciones fue determinada experimentalmente mediante la técnica de Combustión Infrarroja para el Carbono y Azufre, y por Espectroscopia de Emisión Óptica para el resto de los elementos.

La aleación E-HSS presenta la siguiente composición química: C 0.14%, S 0.003 %, Mn 1.10 %, P 0.007%, Si 0.18%, Cr 0.01%, Ni 0.04%, Mo 0.01%, Cu 0.008%, V 0.004%, Nb 0.004%, Ti 0.022%, W 0.002%, Fe balance. Mientras tanto, la composición química del acero HSLA es la siguiente: C 0.14%, S 0.003 %, Mn 0.8 %, P 0.014%, Si 0.11%, Cr 0.01%, Ni

0.04%, Mo 0.01%, Cu 0.026%, V 0.004%, Nb 0.004%, Ti 0.005%, W 0.002%, Fe balance.

Se hace notar la presencia de solo pequeñas cantidades de elementos aleantes, por lo que se confirma que ambos aceros pertenecen a la familia de los aceros micro aleados.

Para el desarrollo experimental (tabla 1) se emplearon cuatro diferentes tipos de soluciones basadas en los precursores electrolíticos NaCl, NaBr (Bromuro de Sodio), KBr (Bromuro de Potasio) y NaNO_3 . El nivel de concentración de la solución electrolítica se modificó en “concentración alta” ($\approx 2.5 \text{ M}$) y “concentración baja” ($\approx 1 \text{ M}$) para los electrolitos de NaCl, NaBr y KBr. Para el caso del NaNO_3 la concentración alta se estableció en 7 M y la concentración baja en 3.5 M, debido a que se encontró empíricamente que la velocidad de maquinado con este electrolito es extremadamente baja a las molaridades propuestas para el resto de los precursores.

Tabla 1. Desarrollo experimental para estudiar el efecto del electrolito en el maquinado de los aceros de alta resistencia.

Acero	Electrolito	Concentración
HSLA	NaCl	Alta
		Baja
	NaBr	Alta
		Baja
	KBr	Alta
		Baja
E-HSS	NaNO_3	Alta
		Baja
	NaCl	Alta
		Baja
	NaBr	Alta
		Baja
	KBr	Alta
		Baja
	NaNO_3	Alta
		Baja

Antes y después del proceso de maquinado, las muestras fueron pesadas utilizando una balanza de precisión marca OHAUS modelo 91512, con el objetivo de determinar la pérdida en peso que se presenta durante el maquinado, y de esta forma estimar la velocidad de remoción de material, o MRR, expresada como g/min .

Las probetas metálicas se colocan en el contenedor del electrolito, procurando que las caras queden perpendiculares a la herramienta, que para el caso de este experimento es un electrodo hueco de acero inoxidable tipo 316L, con un diámetro nominal de $\frac{1}{4}$ " (exterior). Utilizando el posicionamiento manual de la misma herramienta (incorporado en la HMI), se

hace tocar ésta con la pieza de trabajo para determinar la posición de origen en el eje Z. Entonces se desplaza el sistema de posicionamiento para ajustar una separación inicial entre electrodo y pieza de aproximadamente 0.25 mm.

En este momento, la bomba peristáltica (Watson Marlow Qdos 30) se enciende, con un caudal constante de aproximadamente 200 ml/min, y se da inicio al proceso de maquinado mediante la aplicación del potencial por la fuente de corriente directa. En este caso, el maquinado realizado es sólo perforación, pues se está ajustando únicamente el avance en el eje Z.

La interfaz de usuario comienza automáticamente la recolección de datos de voltaje, corriente, tiempo transcurrido y posición de la herramienta relativa a la pieza de trabajo. Para este experimento se trabajó con regulación en voltaje, polarizando a los electrodos con 12 V, mientras que el límite superior para la corriente se fijó en 15 A.

Una vez que se observa que el electrolito comienza a fluir en la parte opuesta de la pieza de trabajo, y que la corriente aplicada cae significativamente (como se observará más adelante en los gráficos), se considera que el orificio ha sido terminado y el proceso se detiene; los datos recolectados son recuperados de manera tabular en un formato compatible con Excel.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de obtener la velocidad de remoción de material como una función de la masa eliminada durante el maquinado por unidad de tiempo (estimada como una pérdida en peso), los resultados se resumen en la figura 4. Se aprecia que la velocidad de remoción de material es ligeramente superior para ambos tipos de acero cuando la concentración del electrolito es más alta, aunque la diferencia es relativamente pequeña entre la concentración alta y la baja.

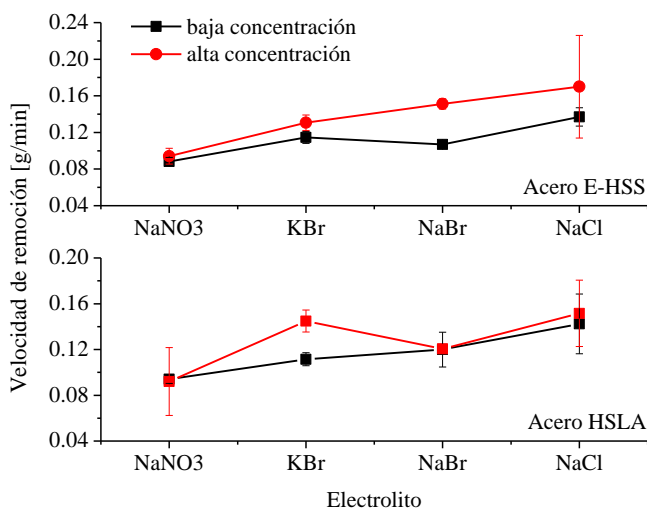


Figura 4. Resumen del resultado del diseño experimental

Es notorio que el acero tipo E-HSS es más susceptible al efecto mencionado en el párrafo anterior que el acero HSLA, y además, este primer tipo de acero es más fácil de maquinar por este método que el segundo, por lo que la velocidad de remoción en el acero E-HSS es ligeramente superior en todos los casos.

Aunque la reacción química que ocurre durante el proceso de disolución anódica por electrolisis se debe fundamentalmente a una oxidación simple de los átomos de hierro, y ambas aleaciones están constituidas en su mayoría por este elemento, el fenómeno anterior se explica en la literatura, en donde se ha observado que en procesos similares los mecanismos de reacción son influenciados por la composición y forma de la matriz de hierro [9]. En este sentido, aunque ambos aceros son aceros micro aleados de alta resistencia, la matriz cristalina no es exactamente igual, debido a que la composición química de las aleaciones tampoco lo es, por lo que es esperada una diferencia en la velocidad de maquinado de las aleaciones, siendo favorecida en este caso la aleación E-HSS que contiene un mayor porcentaje de Manganeso.

Adicionalmente a lo ya mencionado, de la figura 4 también puede verse el efecto que tienen las distintas soluciones electrolíticas. Se aprecia que el electrolito que ofrece la mayor velocidad de corrosión es el NaCl, seguido por el NaBr y posteriormente el KBr. Nótese que el NaNO₃ presenta la menor velocidad de remoción de material, a pesar de que su concentración molar es significativamente mayor a la del resto de las soluciones.

Derivado de lo anterior, se escogieron los dos electrolitos con mayor velocidad de remoción de material, y el acero más susceptible al maquinado ECM (acero E-HSS) para realizar un análisis más profundo de los resultados.

En este sentido, en la figura 5 se presenta el comportamiento de la corriente obtenida por medio de la HMI desarrollada, para el caso del maquinado de acero E-HSS en alta y baja concentración de NaCl. Se puede apreciar que para el maquinado con alta concentración del electrolito NaCl, se presenta una lectura de aproximadamente 9 A desde el comienzo del proceso, cuando el *gap* inicial es de 0.25 mm. En el caso del maquinado con un electrolito NaCl a baja concentración, la corriente inicial es de unos 6 A. Esto se debe a que las soluciones electrolíticas incrementan su conductividad cuando la concentración del precursor en la solución se incrementa [10].

Conforme el electrodo negativo (herramienta) va avanzando en el eje Z y penetrando en la pieza de trabajo, la corriente que demanda el proceso se incrementa puesto que las paredes del electrodo contribuyen a la disolución del material.

Otro fenómeno que puede observarse del gráfico de la figura 5 es que, siendo el espesor de la placa 3.5 mm, la caída de corriente (y el fluido que pasa a través de la placa indicando que se ha realizado un orificio en la misma) se presenta a una distancia más corta. En el caso del maquinado con baja

concentración de NaCl, el orificio se produjo cuando el electrodo se encontraba a una distancia de aproximadamente 2.75 mm, es decir que el *gap* inicial de 0.25 mm se incrementó casi hasta 0.75 mm durante el proceso. Para el maquinado a alta concentración, el proceso terminó aún antes, en unos 2.65 mm, lo que sugiere que el *gap* al finalizar el proceso se incrementó hasta unos 0.85 mm.

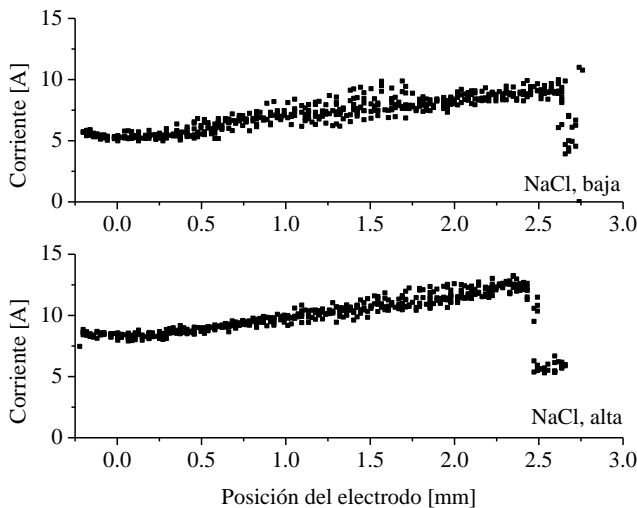


Figura 5. Comportamiento de la corriente en ECM del acero E-HSS con NaCl, en función del avance de la herramienta.

El panorama completo del efecto mencionado anteriormente se tiene cuando se observan los orificios que se han maquinado utilizando NaCl como electrolito (figura 6). Nótese que en ambos casos, el orificio de entrada (en primer plano de la imagen) es de mayor diámetro que el orificio de salida, presentándose un sobre corte o eliminación excesiva del material. En el caso del maquinado a alta concentración, la diferencia entre el orificio de entrada y de salida visualmente parece menor, pero se aprecian irregularidades en la geometría, que se atribuyen a la agresividad del electrolito. Se observó que a mayor concentración, el NaCl ataca y corroe la superficie de la placa, y no solo el orificio que se está maquinando.

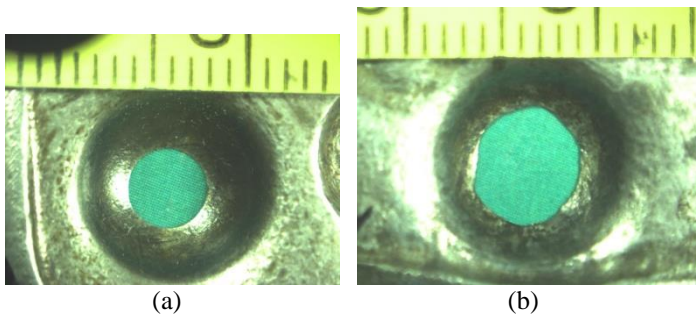


Figura 6. Aspecto de la perforación con a) NaCl a baja concentración, y b) NaCl a alta concentración.

De manera similar, se estudió el efecto del maquinado con NaBr en concentraciones alta y baja para el acero E-HSS, y la gráfica del comportamiento de la corriente se presenta en la figura 7. La corriente se comporta de manera muy similar en cuanto a la corriente inicial, y la tendencia a incrementarse conforme el electrodo penetra en la placa, pero el *gap* al finalizar el proceso es mucho menor: para el caso del maquinado a baja concentración de NaBr, el orificio se presentó un poco después de los 3.25 mm, indicando que el *gap* final prácticamente fue similar al inicial de 0.25mm; mientras tanto, el *gap* para el maquinado con alta concentración de NaBr, se incrementó hasta 0.5 mm aproximadamente.

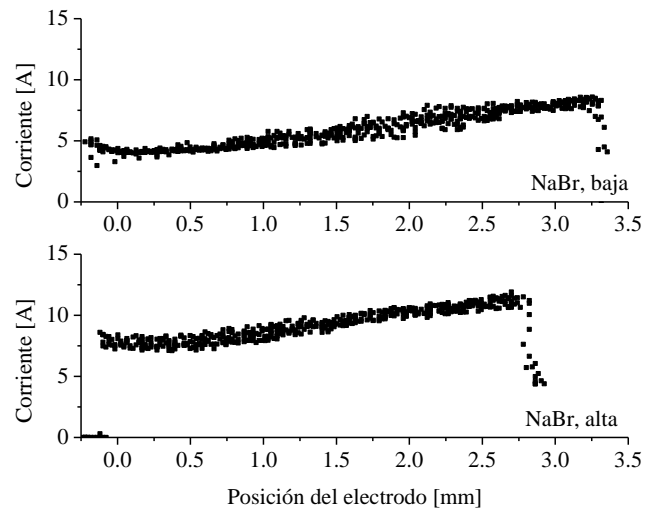


Figura 7. Comportamiento de la corriente en ECM del acero E-HSS con NaBr, en función del avance de la herramienta.

En la figura 8 se presenta el aspecto de las perforaciones realizadas, notándose que en el maquinado a baja concentración con NaBr, se obtiene una superficie menos abrupta, con apariencia más cilíndrica y menos diferencia entre el orificio de entrada y el de salida. Para el maquinado a alta concentración, se vuelve a notar la agresividad del proceso con el material.

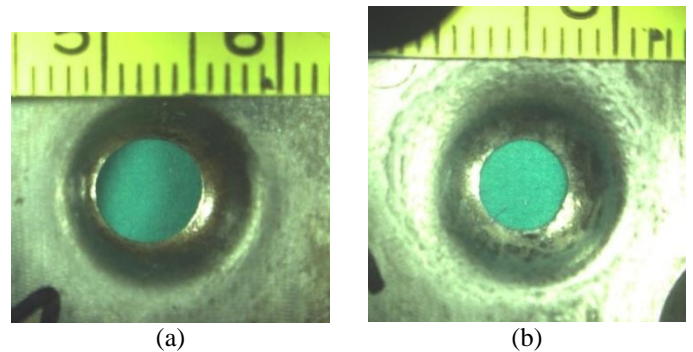


Figura 8. Aspecto de la perforación con a) NaBr a baja concentración y b) NaBr a alta concentración.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a la ley de Faraday, se elimina más material con una mayor densidad de corriente, por lo que al incrementar la concentración del electrolito se incrementa la corriente total de portadores de carga en el mismo (iones), y con ello se favorece el aumento en la velocidad de remoción de material. Sin embargo, se observa que el *gap* entre los electrodos se hace también más grande disminuyéndose así la precisión de las perforaciones.

Para los diferentes electrolitos empleados encontró que el *gap* es mayor para el electrolito no pasivo (NaCl) que para el electrolito pasivo (NaBr), y esto también propició la formación de películas de óxido sobre la pieza de trabajo. El electrolito con base en NaNO_3 presenta una baja remoción de material aún a altas concentraciones en el electrolito, por lo que no es muy viable su uso en este tipo de aceros, por lo menos a escala macro (es decir, perforaciones superiores a las unidades de micrómetros).

Soluciones concentradas presentan ventajas a bajos voltajes y menores requerimientos de energía ya que presentan una mejor conductividad y más alta velocidad de remoción, sin embargo las soluciones pueden sobresaturarse, lo que eventualmente puede favorecer la formación de cristales, los cuales pueden dañar el sistema hidráulico (bombas, válvulas etc.). Por otro lado a bajas concentraciones (soluciones diluidas) los precursores se disuelven más fácilmente, lo cual presentaría menor cristalización dentro del sistema.

El uso de soluciones relativamente diluidas favorece que la geometría del maquinado sea más precisa, y la superficie del material se conserve, evitando la corrosión. Evidentemente, existiendo un compromiso entre velocidad de remoción y calidad del acabado final.

El efecto de sobre corte debido al incremento en la concentración del electrolito ha sido observado en sistemas de micro-maquinado (perforaciones en escala micrométrica). Se ha propuesto que el incremento en la concentración del electrolito favorece el incremento en la cantidad de iones que participan en el proceso de disolución anódica, lo que conlleva a la presencia de una zona de sobre corte, es decir, zonas en donde el electrodo continúa contribuyendo a la remoción de material aunque la separación entre electrodos sea considerable [11]. De acuerdo a lo observado en los experimentos que se reportan en el presente trabajo, esta consideración sigue siendo válida a escalas geométricas mayores, como en este caso, que se utiliza un diámetro en la herramienta de $\frac{1}{4}$ de pulgada.

Como trabajo a futuro para mejorar las capacidades del sistema ECM desarrollado, se pretende la incorporación de un sistema

de polarización mediante pulsos de alta frecuencia, debido a que se ha demostrado que este tipo de polarización permite incrementar la precisión del corte [12]. Para determinadas aplicaciones, incluso se ha demostrado la efectividad de frecuencias de conmutación en el orden de los Mega Hertz, con duración de pulso en el orden de algunos nanosegundos [13].

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al fondo SENER – CONACYT de Sustentabilidad Energética por el apoyo otorgado mediante el proyecto número 174568. Se agradece también la colaboración técnica del M.C. Ricardo Martínez por su apoyo en la realización de los experimentos.

7. REFERENCIAS.

- [1] B. Bhattacharyya, B. Doloi, P.S. Sridhar. Electrochemical micro-machining: new possibilities for micro-manufacturing, vol. 113 (2001), 301-305.
- [2] H. El-Hofy, Advanced Machining Processes: Nontraditional and hybrid machining processes. Mc. Graw Hill, 2005.
- [3] R.G. Kelly, J.R. Scully, D.W. Shoesmith, R.G. Buchheit, Electrochemical techniques in corrosion science and engineering, New York, Marcel Dekker Inc., 2003.
- [4] N. Perez, Electrochemistry and Corrosion Science, Boston, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [5] T. Haisch, E. M., Electrochemical machining of the steel 100Cr6 in aqueous NaCl and NaNO_3 solutions: microstructure of surface films formed by carbides. Electrochimica Acta, 2001, 235-241.
- [6] M.H. Whang, D. Zhu, W. Peng. Experimental Research on Electrochemical Micro-machining. Advanced Design and Manufacture to Gain a competitive Edge, 2008, 775-783.
- [7] M. Neergat, K. W., Electro dissolution of 304 stainless steel in neutral electrolytes for surface decontamination applications, Corrosion Science, 2011, 3983-3990.
- [8] W. Hung, D. Brock, H. Xiao, P. Lomeli, E. Granda, Micromachining and electrochemical nanopolishing of titanium microchannels, Journal of Manufacturing and Design Science, vol. 2(1), 2015, 1-10.
- [9] O. Weber, M. Weinmann, H. Natter, D. Bähre, Electrochemical dissolution of cast iron in NaNO_3 electrolyte. J. Appl. Electrochem., vol. 45, 2015, 591-609.
- [10] A. L. Capparelli, Fisicoquímica básica, La Plata, Argentina, Universidad Nacional de La Plata, 2013.
- [11] B. Bhattacharyya, J. Munda, Experimental investigation into electrochemical micromachining (EMM) process, Journal of Materials Processing Technology, vol. 140, 2003, 287-291.
- [12] A. Kumar-Das, P. Saha, Experimental investigation on micro-electrochemical sinking operation for fabrication of micro-holes. J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng., vol. 37, 2015, 657 – 663.
- [13] A. Spieser, A. Ivanov, Design of a pulse power supply unit for micro-ECM, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 78, 2015, 537-547.