

COMPORTAMIENTO ANÓDICO DE ALEACIONES BASE NÍQUEL EN MEDIOS CONTENIENDO BICARBONATO

Zadorozne N.S.^{1,2,3,4a}, Carranza R. M.^{2,3b}, Giordano C.M.^{2,3c}, Rebak R.B.^{5,d}

¹Prog. De Materiales, Modelización y Metrología FCEQyN-UNaM.

²Unidad de Actividad Materiales Centro Atómico Constituyentes, Av. General Paz 1499, (B1650KNA) San Martín, Buenos Aires, Argentina.

³Instituto Sabato, UNSAN/CNEA

⁴CONICET.

⁵GE Global Research, 1 Research Circle, CEB2505, Schenectady, NY 12309, USA.

^anataliazadorozne@gmail.com, ^bcarranza@cnea.gov.ar, ^cgiordano@cnea.gov.ar, ^drebak@ge.com

La Aleación 22 ha sido diseñada para resistir a la corrosión en condiciones tanto oxidantes como reductoras. Gracias a estas propiedades es considerada como una de las candidatas para la fabricación de contenedores de residuos radiactivos de alto nivel. Dado que los contenedores prestarán servicios en ambientes naturales caracterizados por soluciones multiiónicas, se estima que podrían sufrir tres tipos de deterioro: corrosión general, corrosión localizada (específicamente corrosión en rendijas) y corrosión bajo tensión (CBT). Se ha confirmado que para que se produzca fisuración, es necesaria la presencia de iones bicarbonato y cloruros. Además se ha determinado que la susceptibilidad a la CBT podría estar relacionada con la aparición de un pico anódico en las curvas de polarización en estos medios a potenciales por debajo de la transpasividad.

El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento anódico de la Aleación 22 en distintos medios conteniendo iones bicarbonato y cloruro en distintas concentraciones y temperaturas y comparar su comportamiento con otras aleaciones conteniendo níquel para luego relacionarlo con la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión en una etapa posterior de este trabajo

Se realizaron curvas de polarización de las aleaciones 22 (Ni-Cr-Mo), 600 (Ni-Cr-Fe), 800H (Ni-Fe-Cr) y 201 (Ni comercialmente puro), en los siguientes medios: 1,148 mol/L NaHCO₃, 1,148 mol/L NaHCO₃ + 1 mol/L NaCl, 1,148 mol/L NaHCO₃ + 0,1 mol/L NaCl. Las temperaturas a las cuales se realizaron los ensayos fueron: 90 °C, 75 °C, 60 °C y 25 °C.

Se encontró que la Aleación 22 presenta un pico de corriente en la zona anódica, anterior a la transpasividad en el rango de potenciales entre 200 y 300 mV_{ECS}, cuando la temperatura de ensayo fue de 90 °C. El potencial al cual se presentó este pico aumentó al disminuir la temperatura. También se produjo una variación del pico con la composición de la solución. Cuando a la solución de iones bicarbonato se le añadieron iones cloruros, el pico se desplazó hacia potenciales y densidades de corriente superiores, en función de la concentración de iones cloruros añadidos. Se encontró que cuando menor fue el contenido de aleantes, el potencial de pico disminuyó hasta al punto de no mostrarse en la Aleación con menor contenido de aleantes. No se observó dependencia de la corriente del pico con ningún aleante.

ANODIC BEHAVIOR OF NICKEL ALLOYS IN MEDIA CONTAINING BICARBONATE IONS

Alloy 22 has been designed to resist corrosion in oxidizing and reducing conditions. Thanks to these properties it is considered a possible candidate for the fabrication of containers of high-level radioactive waste. Since the containers provide services in natural environments characterized by multi-ionic solutions, it is estimated they could suffer three types of deterioration: general corrosion, localized corrosion (specifically crevice corrosion) and stress corrosion cracking (SCC). It has been confirmed that the presence of bicarbonate and chloride ions is required in order to produce cracking,. It has also been determined that the susceptibility to SCC could be related to the occurrence of an anodic peak in the polarization curves in these media potentials below transpassivity.

The aim of this work is to study the anodic behavior of Alloy 22 in different media containing bicarbonate and chloride ions in various concentrations and temperatures and compare the results with other alloys containing nickel, and relate them to the susceptibility to stress corrosion cracking in a future job.

Polarization curves were made on alloy 22 (Ni-Cr-Mo), 600 (Ni- Cr-Fe), 800H (Ni-Fe- Cr) and 201 (Ni commercially pure) in the following environments: 1.148 mol/L NaHCO₃, 1.148 mol/L NaHCO₃ + 1 mol/L NaCl, 1.148 mol/L NaHCO₃ + 0.1 mol/L NaCl. The tests were performed at the following temperatures: 90°C, 75°C, 60°C and 25°C.

It was found that alloy 22 has a current peak in the anodic domain at potentials below transpassivity between 200 and 300 mV_{ECS}, when the test temperature was 90°C. The potential, at which this peak occurred, increased with decreasing temperature. Also there was a variation of the peak with the composition of the solution. When bicarbonate ions were added to a solution containing chloride ions, the peak potential shifted to higher current densities, depending on the concentration of added chloride ions. It was found that diminishing the content of alloying elements, produced a decrease in the peak potential. No anodic peak was observed in the alloy with the lowest content of alloying elements. There was no dependence of current peak with the presence of alloying elements.

INTRODUCCIÓN

El níquel puede alearse con diferentes metales para producir diversas familias de aleaciones. Una de ellas es la familia Ni-Cr-Mo. La Aleación 22 (56,58%Ni-22,26%Cr-13,9%Mo-3,1%W-3,81%Fe) ha sido diseñada para resistir la corrosión en condiciones tanto oxidantes como reductoras, en los medios más comúnmente hallados en la industria. Gracias a estas propiedades frente a la corrosión, es una de las candidatas para la fabricación de contenedores de residuos nucleares de alta actividad ^[1-5].

Los residuos nucleares de alta actividad contienen isótopos radiactivos con períodos de semidesintegración superiores a 30 años. Estos residuos son emisores de calor y pueden permanecer activos durante miles o decenas de miles de años. Por ello, requieren sistemas de gestión definitiva que aseguren su aislamiento y confinamiento ^[6]. El almacenamiento geológico profundo en formaciones geológicas estables es la alternativa más firme en el ámbito mundial para la disposición final de residuos nucleares de alta actividad ^[6-10].

Los repositorios geológicos se basan en el principio multibarrera, que consiste en interponer una serie de barreras, naturales e ingenieriles entre los residuos y la biosfera ^[6,8]. Las barreras naturales deben contribuir al aislamiento de los residuos, minimizando la cantidad de agua entrante al depósito y limitando el transporte de los residuos a través del sistema natural, para lo cual debe estar ubicado por encima y por debajo de formaciones geológicas muy estables ^[8]. Las barreras ingenieriles son diseñadas específicamente para prolongar el aislamiento de los residuos y limitar su potencial de liberación ^[8]. La principal barrera ingenieril es el contenedor.

Dado que los contenedores prestarán servicio en ambientes naturales caracterizados por soluciones acuosas multiiónicas ^[6,10], se estima que este material podría sufrir tres tipos diferentes de deterioro: corrosión general, corrosión localizada (específicamente en rendijas) y corrosión bajo tensión (CBT) ^[10]. Desde el punto de vista de la corrosión en rendijas, el ion cloruro es el principal ion agresivo ^[11-13], mientras que el agregado de nitratos y otros oxianiones a medios que contienen cloruros disminuye la susceptibilidad de la aleación a la corrosión en rendijas ^[9-11]. La corrosión generalizada y localizada (corrosión en rendijas) ha sido y es extensivamente estudiada en presencia de soluciones que simulan los componentes de aguas subterráneas ^[10,17-39]. Se encontró en general que la aleación es muy resistente a estos tipos de corrosión en los probables medios de un repositorio.

Por el contrario, se han llevado a cabo relativamente pocos estudios experimentales para comprender los procesos de corrosión bajo tensión de la Aleación 22 ^[40-48]. Investigadores del Lawrence Livermore National Laboratory estudiaron el rango de potenciales de susceptibilidad a CBT de la Aleación 22 en varias aguas subterráneas simuladas utilizando ensayos de deformación constante y de tracción a velocidades lentas. Variaron los potenciales, la química de las soluciones y la temperatura ^[43-46]. Sus resultados sugieren que la Aleación 22 es susceptible a CBT en un rango de potenciales entre 0,3 y 0,4 V_{SSC} ($V_{SSC} = V_{ENH} + 0,198V$) en aguas subterráneas concentradas y por encima de 65°C. No observaron CBT en aguas subterráneas básicas saturadas como así tampoco en las acidificadas.

Más recientemente Chiang y col. ^[47,48] estudiaron el efecto de algunos componentes de las aguas subterráneas concentradas sobre la CBT de la Aleación 22 a 95 °C. Los ensayos sugieren que es imprescindible la coexistencia de iones bicarbonato y cloruro para que se produzca CBT. La susceptibilidad parece aumentar al aumentar la concentración de cloruros.

En todos estos estudios se encontró que la probabilidad de fisuración es baja al potencial de corrosión en todos los medios estudiados.

La necesidad de la presencia de iones bicarbonato para producir fisuración fue confirmada por investigadores del South West Research Institute^[49] quienes indicaron que sólo para valores de pH entre 7 y 11 la concentración de bicarbonato es importante. Experimentalmente encontraron que se producía CBT en un rango de pH entre 8,5 y 10,5. Determinaron que la susceptibilidad a CBT podría estar relacionada con la aparición de un pico anódico en las curvas de polarización en estos medios a potenciales por debajo de la transpasividad. La intensidad de este pico anódico aumentaba al aumentar la concentración de bicarbonato en solución. Dunn y colaboradores mostraron que cuando la Aleación 22 sufre CBT en presencia de bicarbonatos y cloruros se observa la presencia de una película anódica gruesa sobre la superficie de la Aleación y esta película está empobrecida en cromo con respecto a la aleación base. Sugirieron causalidad entre estos hechos experimentales^[50,51].

Debido a que la CBT de la Aleación 22 podría estar relacionada con la aparición de un pico anódico previo a la zona de transpasivación, el objetivo de este trabajo está focalizado en estudiar el comportamiento anódico de la Aleación 22 y de otras aleaciones con níquel (las aleaciones 600, 800H y 201) en distintos medios conteniendo iones bicarbonato y cloruro en distintas concentraciones y temperaturas, para determinar las características y dependencias del pico anódico de corriente con estos parámetros y poder comparar los resultados con ensayos de CBT que se realizarán como continuación de este trabajo. Se espera poder caracterizar las condiciones críticas para la aparición de CBT y determinar si el níquel o alguno de los aleantes es el responsable de la CBT de la Aleación 22.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se dispuso de probetas de las Aleaciones 22, 600, 800H y 201, cuyas composiciones reales se muestran en la Tabla 1. Se utilizaron probetas en forma de paralelepípedos de dimensiones aproximadas 12 mm x 12 mm x 15 mm. Cada una se enroscó a una varilla metálica que se utilizó como contacto eléctrico, la cual se introdujo en un portaprobeta de vidrio y fue aislada de la solución con una junta de PTFE (Politetrafluoretileno). En la figura 1 se presenta un esquema del electrodo de trabajo junto a una imagen de una probeta prismática. El área expuesta a la solución fue de aproximadamente 10 cm². Todas las probetas fueron pulidas dentro de la hora previa a cada ensayo con papeles abrasivos hasta una terminación superficial de 600. Se utilizó una celda electroquímica convencional, un contraelectrodo de platino y un electrodo de referencia de calomel saturado (ECS) ($V_{ECS} = V_{ENH} + 0,244$ V). Todos los valores de potencial mencionados en adelante se darán con respecto a éste (V_{ECS}). El electrodo de referencia, montado en un compartimiento exterior refrigerado por agua, se conectó con la solución mediante un capilar de Luggin. La celda se mantuvo en un baño de agua suministrado por un termostato, el cual permitió mantener la celda a la temperatura elegida de ensayo. Además, se evitó la concentración de la solución por evaporación mediante el uso de un condensador refrigerado por agua que contó de una trampa de agua. Se utilizaron soluciones de 1,148 mol/L NaHCO₃, 1,148 mol/L NaHCO₃ + 0,1 mol/L NaCl y 1,148 mol/L NaHCO₃ + 1 mol/L NaCl. La elección de estos medios se basó en la solución multiiónica denominada SCW (Simulated Concentrated Water), utilizada en los trabajos que existen sobre CBT en la Aleación 22^[40-48]. El pH de las soluciones se mantuvo en un rango entre 8 y 8,5 al inicio de los ensayos. La temperatura de ensayo fue de 25°C, 60°C, 75°C y 90°C. En todos los ensayos se desplazó el oxígeno disuelto en la solución mediante el burbujeo de nitrógeno durante 1 hora previo a la experiencia, y a lo largo de toda la misma. Se utilizó un potencióstato LYP[®] M7. Se realizaron curvas de polarización potenciodinámica en donde la velocidad de barrido fue de 0,167 mV/s.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 2 a 5 se presentan las curvas de polarización de las aleaciones 22, 600, 800H y 201 respectivamente, realizadas en la solución que contiene únicamente los iones bicarbonato y a las temperaturas de 25°C, 60°C, 75°C y 90°C. Las curvas realizadas en 1,148 mol/L NaHCO₃ + 0,1 mol/L NaCl y 1,148 mol/L NaHCO₃ + 1 mol/L NaCl presentaron similar comportamiento a las curvas realizadas en 1,148 mol/L NaHCO₃.

La Aleación 22 presentó una amplia zona de pasividad, seguida de un incremento de la corriente la cual luego disminuyó formando un pico de corriente previa a la zona de transpasividad. Luego la corriente volvió a permanecer constante para finalmente aumentar abruptamente dando lugar a la transpasividad del material. La Aleación 600, al igual que la Aleación 22, presentó una zona de pasividad, un pico anódico, una segunda zona en donde la corriente permanece constante y una zona de transpasividad. En la Aleación 600 se observó que luego de presentarse el pico anódico, la corriente alcanza valores más bajos que la Aleación 22. Esto puede deberse a un efecto del Mo en la Aleación 22. Para la Aleación 800H el comportamiento fue distinto. La Aleación 800H presentó una zona de pasividad pequeña comparada con las dos aleaciones anteriores y luego mostró dos aumentos de corriente previos a la zona de transpasividad. El primer aumento se presentó con la forma de un pico bien marcado a un potencial cercano a los 0 mV_{ECS} cuando la temperatura fue de 90°C. Recordando que este material es el que mayor contenido de hierro posee (44,89%), este pico puede atribuirse a la transformación de Fe⁺² a Fe⁺³ en la película de óxido del material. Luego del primer pico, la Aleación 800H presentó un segundo aumento de la corriente. De forma mucho más lenta, la Aleación 800H alcanzó un valor máximo de corriente y luego disminuyó gradualmente. Aproximadamente a un potencial de 670 mV_{ECS} a la temperatura de 90°C, la corriente aumentó bruscamente dando lugar a la transpasivación del material. En el análisis de los datos, se consideró que para la Aleación 800H el potencial de pico anódico corresponde al potencial que presenta mayor valor de corriente alcanzado en la segunda zona.

La Aleación 201 mostró un pico significativo de transición activo/pasivo seguida de una zona de pasividad. Este pico de actividad posterior al potencial de corrosión no se observa en las aleaciones 22, 600 y 800H debido al contenido de Cr en las mismas. La Aleación 201 presentó un pico anódico previo a su transpasividad solamente cuando la temperatura de ensayo fue de 90°C.

Todas las aleaciones, en todos los medios estudiados presentaron una modificación de las curvas de polarización cuando se modificó la temperatura de ensayo. A medida que disminuyó la temperatura el pico anódico que se presentó previo a la zona de transpasividad se desplazó hacia potenciales mayores. La disminución de la temperatura influyó en la aparición del pico anódico, volviéndolo menos evidente al disminuir la temperatura. Las aleaciones 600 y 800H no presentaron un pico bien definido cuando la temperatura fue de 25°C. Al finalizar todos los ensayos, se midió nuevamente el pH de la solución y se observó un aumento de esta variable. El mayor aumento de pH se presentó cuando la temperatura de ensayo fue de 90°C. A esta temperatura el pH de la solución fue de 10,5. Así mismo, cuando la temperatura de ensayo fue de 25°C, la variación del pH fue menor y se alcanzaron valores cercanos a 9. Luego de los ensayos todas las probetas fueron limpiadas por ultrasonido y fueron observadas en el microscopio de barrido. En las figuras 6 a 20 se presentan, micrografías de las probetas de las aleaciones 22, 600, 800H y 201 respectivamente, luego de la curva de polarización realizada en los diferentes medios ensayados en este trabajo y a distintas temperaturas.

De las micrografías obtenidas se observó que la Aleación 22, la cual presenta un pico anódico bien definido, no presentó ataque localizado, mientras que la Aleación 201, en la cual no se observaron picos anódicos presentó picado. Este mismo comportamiento se encontró en las probetas ensayadas a todas las temperaturas y en todos los medios. De estas imágenes se puede inferir que un ataque localizado como la corrosión por picado no tiene una correlación directa con la aparición del pico anódico previa a zona de transpasivación.

De las curvas de polarización logradas se obtuvieron los valores de potencial y densidad de corriente al que se presentó el pico anódico previo a la transpasividad. Se analizó como varió el potencial y la densidad de corriente del pico en función de la temperatura, de la concentración de la solución y en función de la concentración de los elementos aleantes de los materiales utilizados en el trabajo.

3.1 Efecto de la temperatura sobre la aparición del pico anódico.

Epico en las aleaciones 22 y 600 se modificó con la temperatura de ensayo. Epico mostró un aumento a medida que la temperatura de ensayo disminuyó. Mientras Ipico en las aleaciones 22 y 600, no se vio afectada con la variación de temperatura de los ensayos. Este comportamiento se puede observar en la figura 21, donde se presenta la variación del Epico e Ipico con respecto a la temperatura para la Aleación 22 en 1,148 mol/L NaHCO₃. Esta conducta se verificó para los tres medios ensayados. Para la Aleación 800H, tanto Epico como Ipico se modificaron con la temperatura. Mientras que Epico aumentó con la disminución de temperatura, la Ipico disminuyó con ella. Los comportamientos descritos anteriormente se repitieron en los tres medios estudiados en este trabajo.

3.2 Efecto de la concentración de las soluciones en la aparición del pico anódico.

A medida que se agregaron iones cloruro en la solución de bicarbonato, tanto Epico como Ipico mostraron un aumento de sus valores en la Aleación 22 para todas las temperaturas ensayadas. En la figura 22 se presenta la variación del Epico e Ipico con respecto a la concentración de la solución para la Aleación 22 a la temperatura de ensayo de 90°C. La Aleación 600 presentó un aumento en el Epico en función del aumento de iones cloruro en la solución, mientras que Ipico se presentó aproximadamente constante. La Aleación 800H no presentó una relación de Epico e Ipico con las distintas concentraciones de las soluciones ensayadas.

3.3 Efecto de las concentraciones de las aleaciones en la aparición del pico anódico.

Se estudió la variación que presentó el pico anódico, tanto en potencial como en corriente, para los distintos porcentajes de los aleantes de los materiales estudiados. Debido a la ausencia de un pico en las curvas de la Aleación 201, se estima que este pico puede estar asociado primordialmente con uno o varios de los aleantes de la Aleación 22. Se presumió que, debido a que las aleaciones que no presentan Mo en su composición también presentan el pico anódico, este aleante no es el responsable de la aparición del pico anódico. Se buscó correlacionar la variación de Epico con la composición de las aleaciones. No se encontró relación con ninguno de ellos. Sin embargo se observó que a medida que el contenido de níquel de las aleaciones aumentó, el Epico disminuyó. En la figura 23 se presenta la variación del potencial al cual se presenta el pico anódico en función del contenido de níquel de las aleaciones estudiadas en este trabajo. A partir de esta relación se observó que mientras mayor sea el contenido de aleantes Epico aumenta y, por el contrario, cuando menor es el contenido de aleantes Epico disminuye hasta el punto de no mostrarse en la Aleación 201

(99,5%Ni). En cuanto a la densidad de corriente del pico, no se encontró ninguna relación de su variación con el contenido de alguno de los aleantes de los materiales estudiados.

A continuación de este trabajo, se realizarán mediciones adicionales con aleaciones recientemente adquiridas: Ni-20%Cr y Ni-28,5%Mo, antes de realizar los ensayos de tracción lenta para relacionar la susceptibilidad a CBT en las diferentes condiciones aquí ensayadas. Con estas dos nuevas aleaciones se espera contar con más información para saber cómo influyen los aleantes principales de la Aleación 22 en su comportamiento anódico.

4. CONCLUSIONES

- Estudios anteriores relacionaron la susceptibilidad a la CBT de la Aleación 22 con la aparición de un pico anódico que se presenta en la zona previa a la transpasividad del material. En este trabajo se encontró que la Aleación 22, 600 y 800H presentaron un pico anódico cuando se ensayaron en medios conteniendo iones bicarbonatos y cloruros, y se hizo más evidente cuando mayor era la temperatura de ensayo. La Aleación 201 presentó un pico anódico previo a su transpasividad solamente cuando la temperatura de ensayo fue de 90°C.
- El potencial al cual se presentó el pico anódico aumentó cuando disminuyó la temperatura de ensayo. Este comportamiento se cumplió para todas las aleaciones y en todos los medios estudiados. La densidad de corriente que presentó el pico anódico permaneció aproximadamente constante al variar la temperatura en el caso de la Aleación 22 y 600. La Aleación 800 H presentó una disminución en la densidad de corriente del pico anódico con la disminución de la temperatura de ensayo.
- El agregado de cloruros a la solución de bicarbonato provocó un aumento del Epico en las aleaciones 22 y 600. Para la Aleación 22 se vio un aumento de la Ipico cuando se aumentó la concentración de cloruros en la solución.
- Cuando menor es el contenido de aleantes, Epico disminuye. Epico no se presenta en la Aleación con menor contenido de aleantes (Aleación 201: 99,5%Ni).
- Se estima que el pico anódico está relacionado con la oxidación de alguno de los aleantes mayoritarios de la Aleación 22.

REFERENCIAS

- 1.- R.B. Rebak, Metallurgical effects on the corrosion behavior of nickel alloys, ASM Metals Handbook, Vol. 13A, Corrosion: Fundamental, Testing, and Protection, pp 279-286, ASM International, 2003.
- 2.- Hastelloy C-22 Alloy, Haynes International, brochure H-2019F, 2002.
- 3.- M.A. Rodríguez, Aleación C-22: una barrera resistente a la corrosión para contenedores de residuos nucleares de alta actividad. Beca CONICET-CNEA, Doctorado en Ciencia y Tecnología Mención Materiales, Instituto Sabato, UNSAM / CNEA, Categoría CONEAU: A, Resolución: 803/99. 22/09/2008. Calificación: 10 sobresaliente. Disposición IT 16/08.
- 4.- A.I. Asphahani, in Advances in the development of Ni-Cr-Mo-W alloy systems with improved resistance to aqueous corrosion, The Arabian Journal for Science and Engineering, pp. 317-335, 1989.
- 5.- H.M. Tawancy, R.B. Herchenroeder and A.I. Asphahani, High-performance Ni-Cr-Mo-W alloys, Journal of Metals, pp. 37-43, 1983.
- 6.- Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation. Third Worldwide Review, Eds. P.A. Whitterspoon and G.S. Bodvarsson, University of California, Berkeley, CA, USA (2001).
- 7.- K.D. Crowley and J.F. Ahearne, "Managing the environmental legacy of U.S. nuclear-weapons production", American Scientist, 90, 6, 514 (2002).
- 8.- Yucca Mountain Project, Eds. G. S. Bodvarsson, C.K. Ho, and B.A. Robinson, Elsevier (2003).

- 9.- Yucca Mountain Science and Engineering Report, U. S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management, DOE/RW-0539, Las Vegas, NV, USA (2001).
- 10.-G.M. Gordon, *Corrosion* 58, 10, 811(2002).
- 11.-R.B. Rebak, *Materials science and technology. A comprehensive treatment. Corrosion and environmental degradation*, Vol. II pp. 69-111, Vol. Ed. M. Schuntze, Wiley, VCH, Weinheim, Germany (2000).
- 12.-R.B. Rebak, "Factors affecting the crevice corrosion susceptibility of Alloy 22", Paper N°05610, *Corrosion/05*, NACE Intl., Houston, TX (2005).
- 13.-D.S. Dunn, Y.-M. Pan, K.T. Chiang, G.A. Cragnolino and X.He, "The localized corrosion resistance and mechanical properties of alloy 22 waste package outer containers", *Journal of Metals*, p.49, (2005).
- 14.-B.A. Kehler, G.O. Ilevbare and J.R. Scully, *Corrosion* 57/12(2001)1042.
- 15 D.S. Dunn, L. Lang, C. Wu and G.A. Cragnolino, "Effect of inhibiting oxyanions on the localized corrosion susceptibility of waste package container materials", *SBNWM XXVII*, MRS, Warrendale, PA, USA, Symposium Proceedings, Vol. 824, Paper CC1.7.1 (2004).
- 16.-G.O. Ilevbare, *Corrosion*, **62**, 4, 340 (2006).
- 17.-D.S. Dunn, G.A. Cragnolino, Y.-M. Pan, and L.T. Yang, "Effect of Fabrication Processes on Alloy 22," Paper No. 03697, *Corrosion 2003*, NACE International, Houston, Texas, 2003.
- 18.-G.A. Cragnolino, D.S. Dunn, and Y.-M. Pan, "Effects of Potential and Environment on Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Nickel-Chromium-Molybdenum Alloys," Paper No. 03541, *Corrosion 2003*, NACE International, Houston, Texas, 2003.
- 19.-R.M. Carranza, C.M. Giordano, M.A. Rodríguez, R.B. Rebak, Electrochemical methods for repassivation potential measurements, paper 09427, *Corrosion/09*, NACE International, 2009, Houston, TX, pp. 1-19.
- 20.-M.A. Rodríguez, R.M. Carranza, R.B. Rebak, Crevice corrosion of Alloy 22 at the open circuit potential in hot chloride solutions, paper 09424, *Corrosion/09*, NACE International, 2009, Houston, TX, pp. 1-12.
- 21.-R.B. Rebak, R.M. Carranza, M.A. Rodríguez, The corrosion potential of welded and thermally aged Alloy 22 in aerated aqueous solutions, paper 09429, *Corrosion/09*, NACE International, 2009, Houston, TX, pp. 1-18.
- 22.-M.A. Rodríguez, R.M.Carranza, R.B. Rebak, Effect of potential on crevice corrosion kinetics of Alloy 22, *Corrosion Journal*, 2009.
- 23.-M. A. Rodríguez, R. M. Carranza, R.B. Rebak, Passivation and depassivation of alloy 22 in acidic chloride solutions, enviado a *J. Electrochem. Soc.*, junio 2009.
- 24 R.M. Carranza, The crevice corrosion of Alloy 22 in the Yucca Mountain nuclear waste repository, *Journal of Metals*, 60/1, 2008, 58-65. ISSN 0022-2674.
- 25.-R.M. Carranza, M. A. Rodríguez, C. M.Giordano and R. B. Rebak, Effect of organic acid additions on the general and localized corrosion susceptibility of Alloy 22 in chloride solutions, paper 08578, *Corrosion/08*, NACE International, 2008, Houston, TX, pp. 1-20.
- 26.-R. M. Carranza, M. A. Rodríguez and R. B. Rebak, Anodic and cathodic behavior of mill annealed and topologically closed packed Alloy 22 in chloride solutions, paper 08579, *Corrosion/08*, NACE International, 2008, Houston, TX, pp. 1-25.
- 27.-R. M. Carranza, Environmental and metallurgical variables affecting crevice corrosion susceptibility of alloy 22 - A review, paper 08580, *Corrosion/08*, NACE International, 2008, Houston, TX, pp. 1-16.
- 28.-R.M. Carranza, M.A. Rodríguez, R.B. Rebak, Environmental and geometrical conditions to sustain crevice corrosion in Alloy 22, paper 07581, *Corrosion/07*, NACE International, 2007, Houston, TX, pp. 1-15.
- 29.-R. M. Carranza, M. A. Rodríguez, R. B. Rebak, Effect of fluoride ions on crevice corrosion and passive behavior of alloy 22 in hot chloride solutions, *Corrosion*, 63/05 (2007) 480-490. ISSN 0010-9312.
- 30.-R.M. Carranza, M.A. Rodríguez, R.B. Rebak, Inhibition of chloride induced crevice corrosion in Alloy 22 by fluoride ions, paper 06626, *Corrosion/06*, NACE International, 2006, Houston, TX, pp. 1-17.
- 31.-R.M. Carranza, C. M. Giordano, M. A. Rodríguez, R. B. Rebak, Corrosion behavior of Alloy 22 in chloride solutions containing organic acids, paper 06627, *Corrosion/06*, NACE International, 2006, Houston, TX, pp. 1-15.

- 32.-M. A. Rodríguez, R. M. Carranza and R. B. Rebak, Influence of halide ions and alloy microstructure on the passive and localized corrosion behavior of Alloy 22, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36/5(2005)1179-1185. ISSN 1073-5623.
- 33.-M.A. Rodríguez, R.M. Carranza, S.D. Day and R.B. Rebak, Crevice corrosion susceptibility of Alloy 22 in fluoride and chloride containing environments, paper 05599, *Corrosion/05* (NACE International, 2005: Houston, TX) pp. 1-20.
- 34.-M.A. Rodríguez, R.M. Carranza, R.B. Rebak, Effect of fluoride ions on the anodic behavior of mill annealed and thermally aged Alloy 22, paper 04700, *Corrosion/04* (NACE International, 2004: Houston, TX) pp. 1-13.
- 35.-R. B. Rebak, T.S.E. Summers, T. Lian, R.M. Carranza, J.R. Dillman, T. Corbin and P. Crook, Effect of thermal aging on the corrosion behavior of wrought and welded alloy 22, paper 02542, *Corrosion/02* (NACE International, 2002: Houston, TX), pp. 1-17.
- 36.-M.A. Rodríguez, Cinética de corrosión de la aleación Ni-22Cr-13Mo-3W como material estructural de contenedores de residuos nucleares de alta actividad, beca CNEA, Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales, Instituto Sabato, UNSAM / CNEA, Categoría CONEAU: A, Resolución: 498/99, 17/05/2004, Calificación: 10 sobresaliente. Resolución: IT 19/04
- 37.-M. Miyagusuku, Corrosión de la Aleación 22 en soluciones de fosfatos, Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales, Instituto Sabato, UNSAM / CNEA, Categoría CONEAU: A, Resolución: 498/99. Inicio 2009. En curso.
- 38.-N. Zadorozne, Resistencia a la corrosión de aleaciones Ni-Cr-Mo en diferentes condiciones metalúrgicas, Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales, Instituto Sabato, UNSAM / CNEA, Categoría CONEAU: A, Resolución: 498/99. Calificación 10. Acta: CXXIX
- 39.-M. Rincón Ortiz, Corrosión de una superaleación de Níquel en componentes de aguas subterráneas, Beca ANPCyT, PICT 2005 – 32069. Doctorado en Ciencia y Tecnología Mención Materiales del Instituto Sabato, UNSAM / CNEA, Categoría CONEAU: A, Resolución: 803/99. Inicio 2007. En curso.
- 40.-P.L. Andresen, P.W. Emigh, L.M. Young, G.M. Gordon, “Stress Corrosion Cracking Growth Rate Behavior of Alloy 22 (UNS N06022) in Concentrated Groundwater,” Paper No. 03683, *Corrosion 2003*, NACE International, Houston, Texas, 2003.
- 41.-P.L. Andresen, P.W. Emigh, and G.M. Gordon, “SCC Growth Rate Studies on Welded and Aged Alloy 22 in Concentrated Groundwater,” Paper No. 04695, *Corrosion 2004*, NACE International, Houston, Texas, 2004.
- 42.-P.L. Andresen, G.M. Catlin, L.M. Young, and G.M. Gordon, “Crack Initiation of Alloy 22 in Concentrated Groundwater.” Paper No. 04691, *Corrosion 2004*, NACE International, Houston, Texas, 2004.
- 43.-J.C. Estill, K.J. King, D.V. Fix, D.G. Spurlock, G.A. Hust, S.R. Gordon, R.D. McCright, R.B. Rebak, and G.M. Gordon, “Susceptibility of Alloy 22 to Environmentally Assisted Cracking in Yucca Mountain Relevant Environments,” Paper No. 02535, *Corrosion 2002*, NACE International, Houston, Texas, 2002.
- 44.-D.V. Fix, J.C. Estill, G.A. Hust, K.J. King, S.D. Day, and R.B. Rebak, “Influence of Environmental Variables on the Susceptibility of Alloy 22 to Environmentally Assisted Cracking,” Paper No. 03688, *Corrosion 2003*, NACE International, Houston, Texas, 2003.
- 45.-D.V. Fix, J.C. Estill, G.A. Hust, L.L. Wong, and R.B. Rebak, “Environmentally Assisted Cracking Behavior of Nickel Alloys in Simulated Acidified and Alkaline Waters Using U-Bend Specimens,” Paper No. 04549, *Corrosion 2004*, NACE International, Houston, Texas, 2004.
- 46.-K.J. King, L.L. Wong, J.C. Estill, and R.B. Rebak, “Slow Strain Rate Testing of Alloy 22 in Simulated Concentrated Ground Waters,” Paper No. 04548, *Corrosion 2004*, NACE International, Houston, Texas, 2004.
- 47.-K.T. Chiang, D.S. Dunn, and G.A. Cragolino, “Effect of Groundwater Chemistry on Stress Corrosion Cracking,” Paper No. 05463, *Corrosion 2005*, NACE International, Houston, Texas, 2005.
- 48.-K.T. Chiang, D.S. Dunn, and G.A. Cragolino, “Combined Effect of Bicarbonate and Chloride Ions on Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Alloy 22,” Paper No. 06506, *Corrosion 2006*, NACE International, Houston, Texas, 2006.
- 49.-P.K. Shukla, D.S. Dunn, K.-T. Chiang, and O. Pensado, “Stress corrosion cracking model for Alloy 22 in the potential yucca mountain repository environment”, Paper No. 06502, *Corrosion 2006*, NACE International, Houston, Texas, 2006

- 50.-D.S. Dunn, Y.-M. Pan, K.T. Chiang, and G.A. Cragolino, "Surface Analysis of Alloy 22 Under Conditions that Promote Stress Corrosion Cracking," Paper No. 06509, Corrosion 2006, NACE International, Houston, Texas, 2006.
- 51.-K.T. Chiang, D.S. Dunn, and G.A. Cragolino, "Effect of simulated groundwater chemistry on stress corrosion cracking of Alloy 22", Corrosion 63/10 (2007) 940-950.

Tabla 1. Composición real de aleaciones de níquel.

Aleación	Composición real en peso (%)*								
	Ni	Cr	Mo	W	Fe	Si	Mn	C	Otros
22	56,58	22,26	13,90	3,15	3,81	0,02	0,24	0,004	Co: 0,2 V:0,01 S: 0,001
600	73,44	16,56	-	-	8,83	0,27	0,24	0,06	S:<0,001 Cu: 0,03 Al: 0,253
800H	31,49	20,92	-	-	44,89	0,28	1,03	0,09	Al:0,49 Ti:0,57 Cu: 0,22
201	99,50				0,11	0,10	0,23	0,02	S:0,001 Cu: 0,01 Co: 0,03

** Datos reportados por Huntington Alloys Corporation*

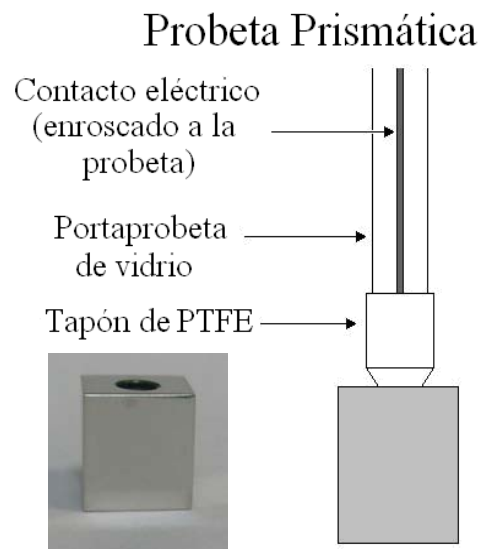


Figura 1: Imagen de una probeta prismática y esquema del electrodo de trabajo

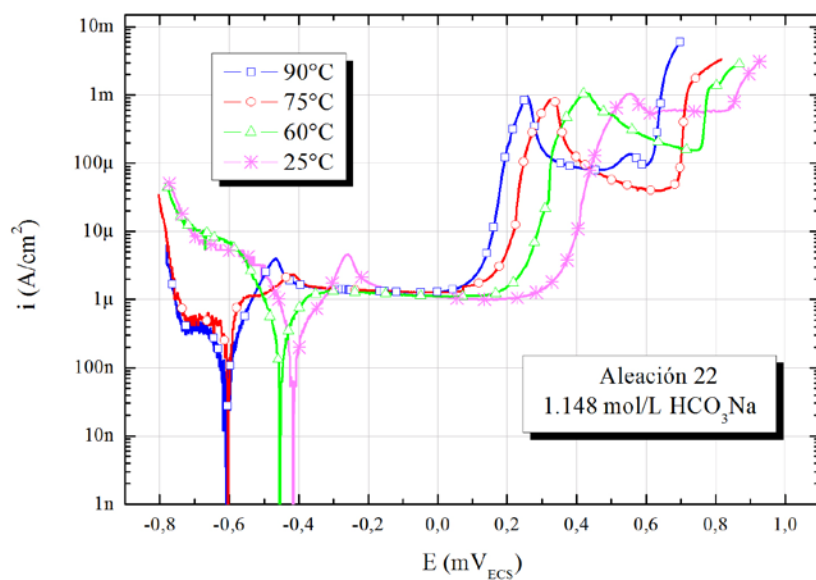


Figura 2. Curvas de polarización de la Aleación 22 realizadas en 1,148 mol/L NaHCO_3 a 25°C, 60°C, 75°C y 90°C.

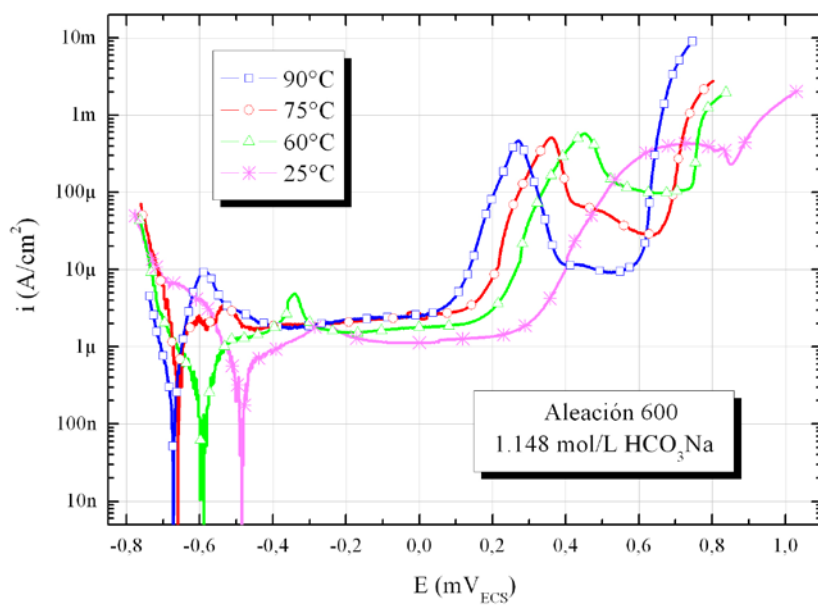


Figura 3. Curvas de polarización de la Aleación 600 realizadas en 1,148 mol/L NaHCO_3 a 25°C, 60°C, 75°C y 90°C.

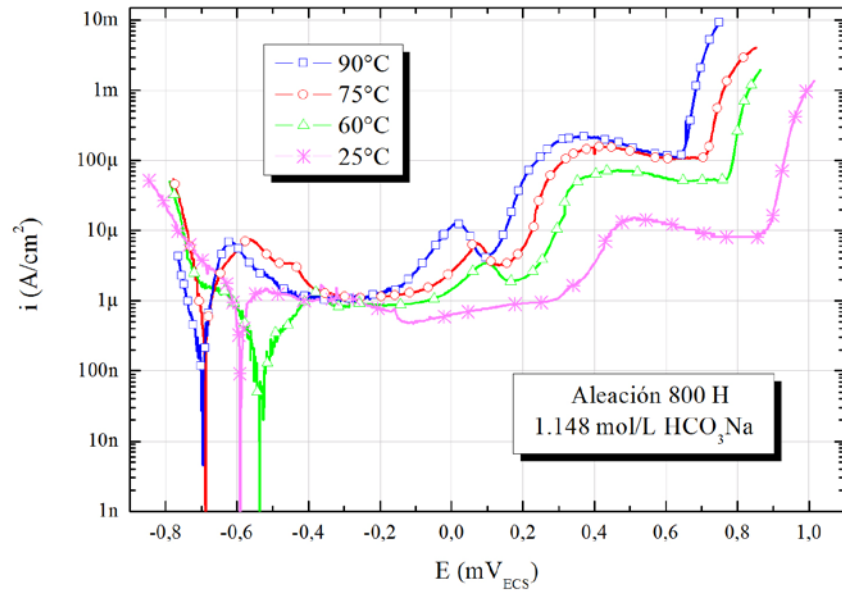


Figura 4. Curvas de polarización de la Aleación 800H realizadas en 1,148 mol/L NaHCO₃ a 25°C, 60°C, 75°C y 90°C.

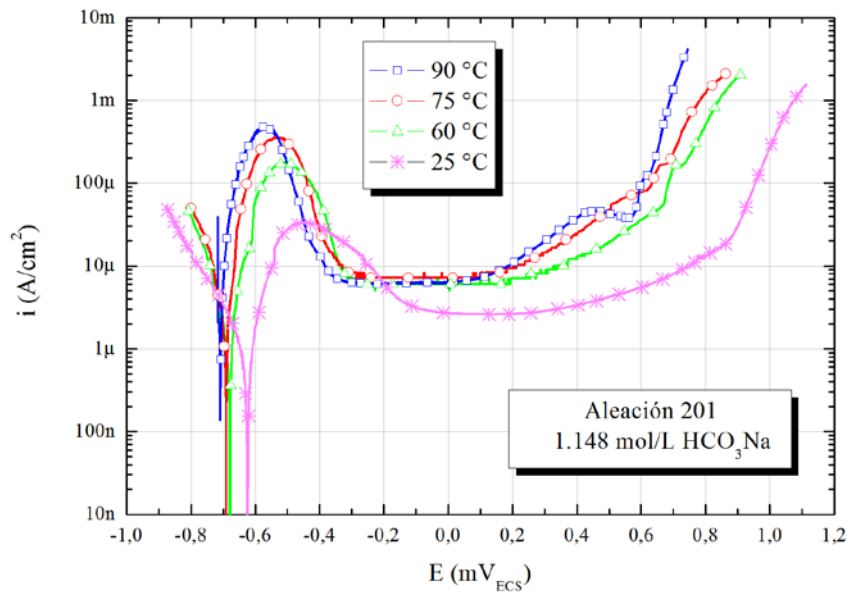


Figura 5. Curvas de polarización de la Aleación 201 realizadas en 1,148 mol/L NaHCO₃ a 25°C, 60°C, 75°C y 90°C.

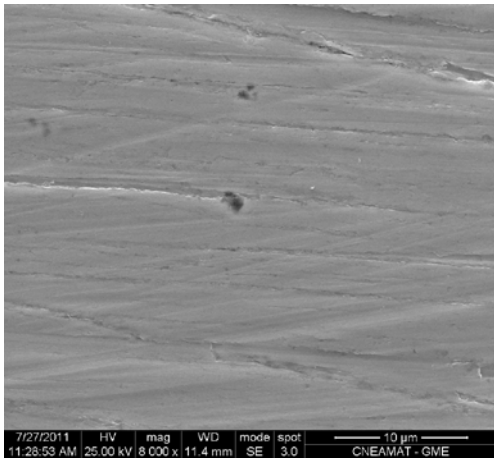


Figura 6. Micrografías de probetas la Aleación 201 luego de realizada la curva de polarización en 1,148 mol/L NaHCO_3 a 25°C.

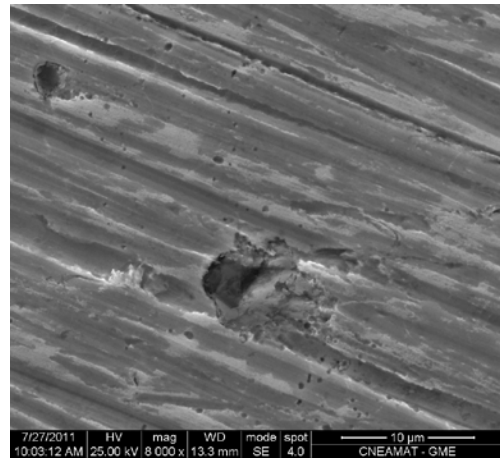


Figura 7. Micrografías de probetas la Aleación 600 luego de realizada la curva de polarización en 1,148 mol/L NaHCO_3 a 25°C.

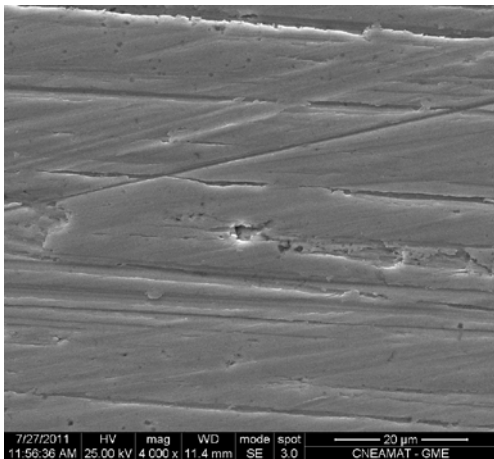


Figura 8. Micrografías de probetas la Aleación 800H luego de realizada la curva de polarización en 1,148 mol/L NaHCO_3 a 25°C.

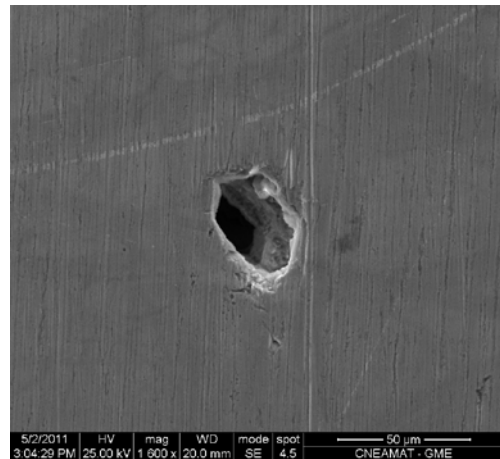


Figura 9. Micrografías de probetas la Aleación 201 luego de realizada la curva de polarización en 1,148 mol/L NaHCO_3 a 60°C.

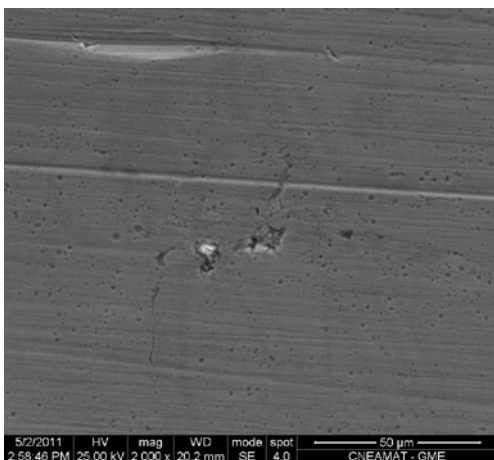


Figura 10. Micrografías de probetas la Aleación 600 luego de realizada la curva de polarización en 1,148 mol/L NaHCO_3 a 60°C.

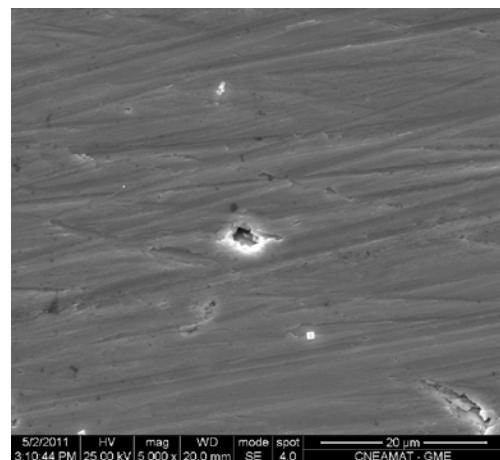


Figura 11. Micrografías de probetas la Aleación 800H luego de realizada la curva de polarización en 1,148 mol/L NaHCO_3 a 60°C.

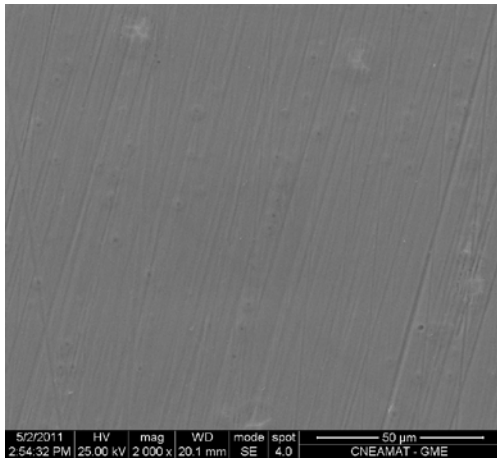


Figura 12. Micrografías de probetas la Aleación 22 luego de realizada la curva de polarización en 1,148 mol/L NaHCO₃ a 60°C.

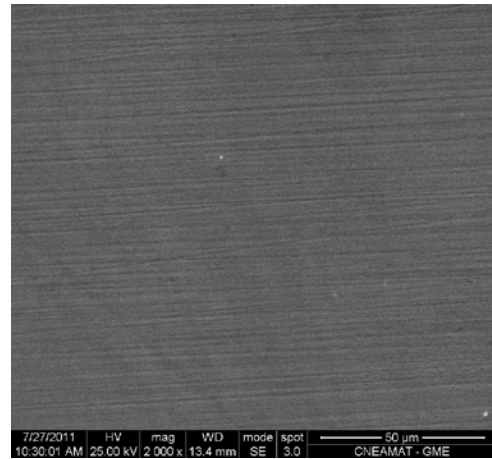


Figura 13. Micrografías de probetas la Aleación 22, luego de realizada la curva de polarización en 1,148 mol/L NaHCO₃ + 1 mol/L NaCl a 75°C.

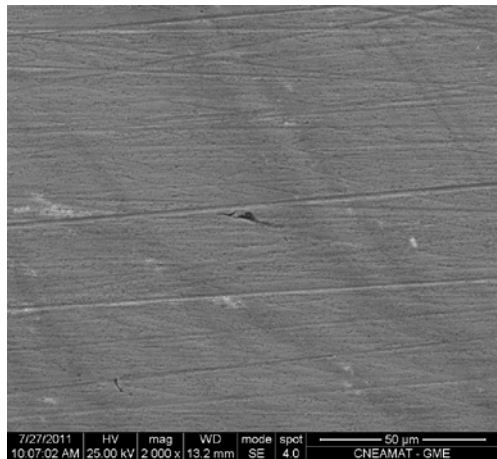


Figura 14. Micrografías de probetas la Aleación 600 luego de realizada la curva de polarización en 1,148 mol/L NaHCO₃ + 1 mol/L NaCl a 75°C.

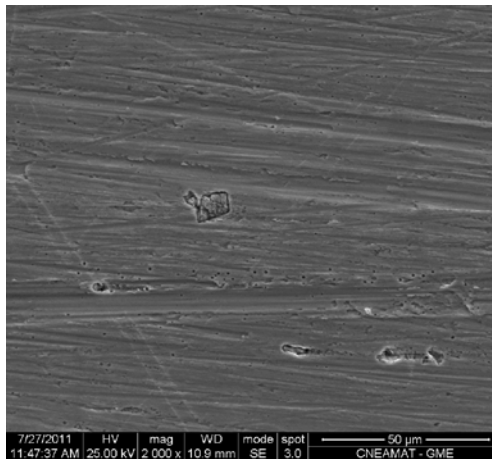


Figura 15. Micrografías de probetas la Aleación 800H luego de realizada la curva de polarización en 1,148 mol/L NaHCO₃ + 1 mol/L NaCl a 75°C.

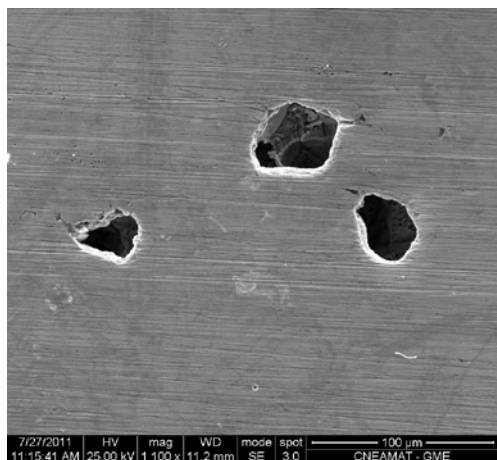


Figura 16. Micrografías de probetas la Aleación 201 luego de realizada la curva de polarización en 1,148 mol/L NaHCO₃ + 1 mol/L NaCl a 75°C.

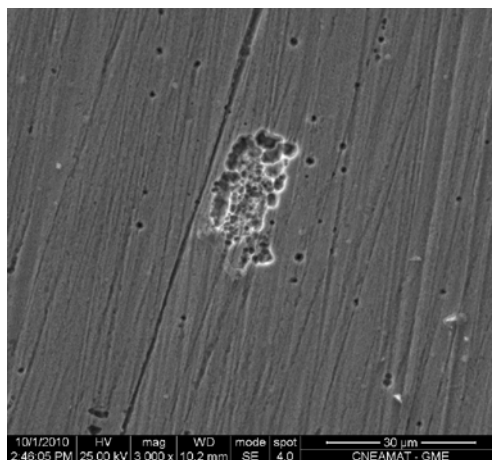


Figura 17. Micrografías de probetas la Aleación 201 luego de realizada la curva de polarización en 1,148 mol/L NaHCO₃ + 0,1 mol/L NaCl a 90°C.

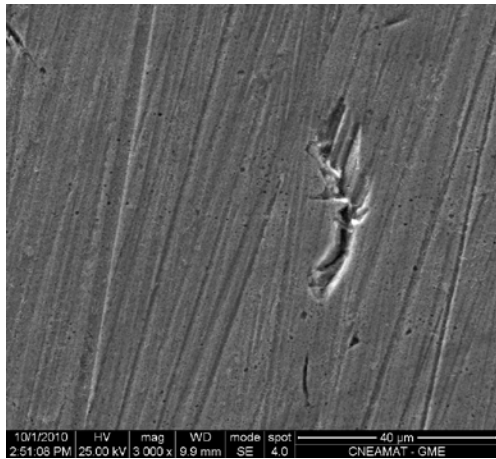


Figura 18. Micrografías de probetas la aleación 600 luego de realizada la curva de polarización en 1,148 mol/L NaHCO_3 + 0,1 mol/L NaCl a 90°C.

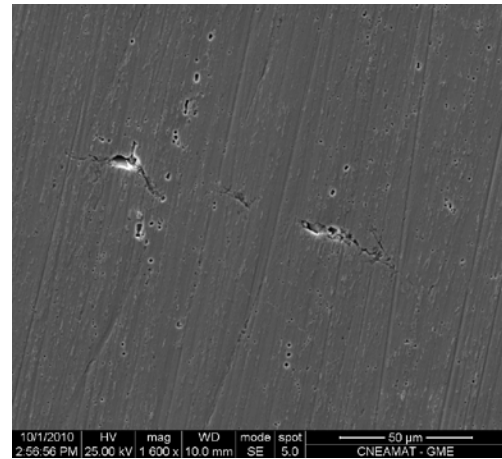


Figura 19. Micrografías de probetas la Aleación 800H luego de realizada la curva de polarización en 1,148 mol/L NaHCO_3 + 0,1 mol/L NaCl a 90°C.

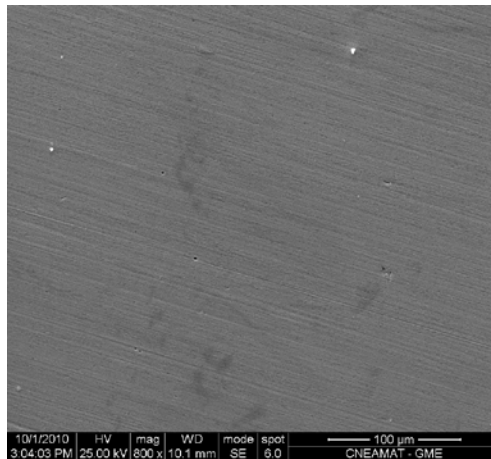


Figura 20. Micrografías de probetas la Aleación 22 luego de realizada la curva de polarización en 1,148 mol/L NaHCO_3 + 0,1 mol/L NaCl a 90°C.

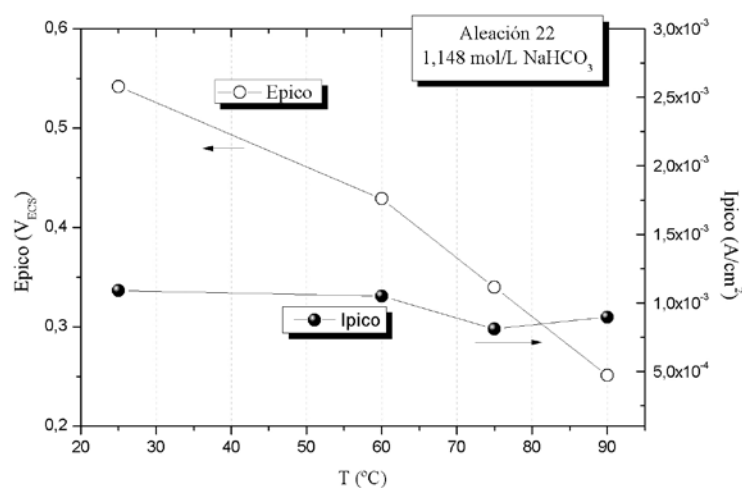


Figura 21. Variación de potencial y densidad de corriente del pico anódico en función de la temperatura.

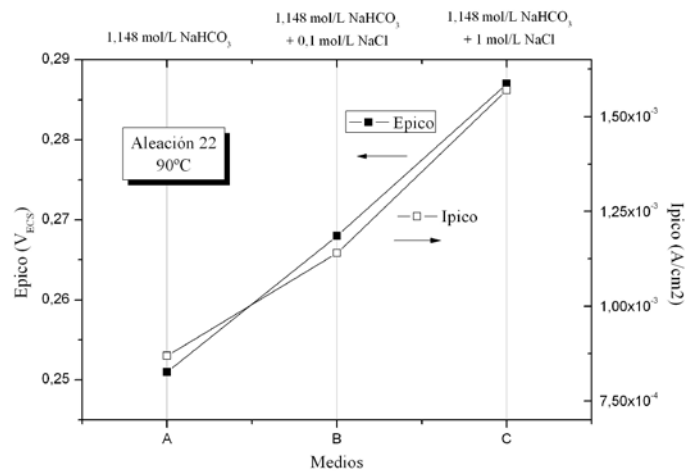


Figura 22. Variación de potencial y densidad de corriente del pico anódico en función de la concentración de las soluciones.

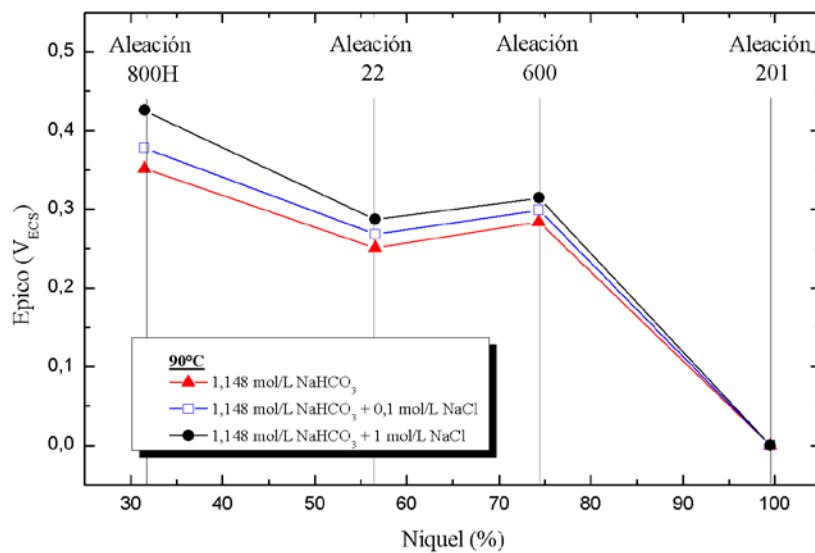


Figura 23. Variación de E_{pico} en función del porcentaje de níquel de las aleaciones.