

EL USO DE LA INTERFEROMETRÍA ÓPTICA PARA EVALUAR CORROSIÓN POR PICADURA EN LA ALEACIÓN COMERCIAL DE ALUMINIO 3003

*Solange Y. Paredes-Dugarte**, *Benjamín Hidalgo-Prada*

Lab. de Caracterización de Materiales. Instituto de Investigaciones en Biomedicina y Ciencias Aplicadas de la Universidad de Oriente. Apartado Postal 245. Cumaná, Edo. Sucre, Venezuela.

* E-mail: padu99@yahoo.com

Recibido: 12-Jul-2006; Revisado: 07-Sep-2006; Aceptado: 14-Sep-2006

Publicado On-Line el 19-Sep-2006

Disponible en: www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html

Resumen

El propósito del presente trabajo consistió en utilizar la interferometría óptica para analizar superficies de una aleación comercial de aluminio 3003 (Al-Mn) corroídas en medio ambiente salino. Los perfiles en 2D y 3D generados por el software del equipo, permitieron determinar con precisión las profundidades de las picaduras y caracterizar las morfologías de las mismas. Las medidas de las profundidades de las picaduras permitieron establecer un factor de picadura, independiente del tiempo, con valor promedio de 2,5 para esta aleación de aluminio 3003, lo cual evidencia un ataque altamente localizado. Esta técnica proporciona un modo directo y confiable para evaluar superficies de aluminio corroídas por picaduras.

Palabras Claves: Aleación de aluminio 3003, corrosión por picadura, factor de picadura, interferometría óptica.

Abstract

Scanning white light interferometry was used to study the surfaces of a commercial aluminum alloy 3003 (Al-Mn), corroded in saline environment. The two and three dimension profiles generated by the software made it possible the accurate determination of pits depths and their morphological characterization. Measurements of pits depths allowed the calculation of a time independent average pitting factor of 2.5 for this 3003 aluminum alloy, suggesting a highly localized attack. This technique is then a direct and reliable procedure for the evaluation of surfaces of aluminum plates corroded by pitting.

Keywords: Aluminum alloy 3003, pitting corrosion, pitting factor, optical interferometry.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han desarrollado equipos automatizados fundamentados en el principio de interferencia óptica de resoluciones verticales del orden de 1 nm y rango de altura por arriba de 100 micrones, capaces de generar perfiles microscópicos en 2 y 3 dimensiones de la superficie observada, con el fin de proporcionar una técnica adecuada para el estudio de defectos superficiales. Esta técnica de no contacto permite caracterizar directamente la superficie bajo observación y posee la capacidad de evaluar grandes áreas del material. Se utiliza ampliamente en tribología, en el análisis de textura, en estudios de recubrimientos por termorrociado [1,2] y recientemente se esta utilizando para estudios de corrosión [3,4] como por ejemplo, para monitorear corrosión en hendidura producida en diferentes muestras metálicas expuestas en soluciones acuosas [5].

El principio básico de la técnica de interferometría óptica es relativamente simple. El haz que emerge de la fuente de luz visible se divide en dos, uno se dirige hacia la superficie de referencia interna (perfectamente plana) y el otro hacia la muestra en estudio. Después de la reflexión los dos haces se recombinan dentro del interferómetro produciendo el fenómeno de interferencia constructiva y destructiva, el cual genera un patrón de franjas brillantes y oscuras, que dan cuenta de una imagen punto a punto de la muestra. La intensidad de luz de cada punto depende de la diferencia de trayectoria entre los dos haces. El patrón es registrado digitalmente por un arreglo de fotodiodos conectados a un microprocesador. Pequeños desplazamientos de la superficie de referencia producen cambios en el patrón de franjas lo que hace posible registrar y computarizar la variación de las diferentes alturas presentes en la superficie. Los

interferogramas almacenados en el computador, son procesados en forma individual para obtener los perfiles de la superficie a través de un software basado en la aplicación computarizada de la transformada de Fourier, con la cual es posible desarrollar altas velocidades de análisis [6].

Existen una gran variedad de parámetros que permiten describir la textura del material, tales como: de altura, de longitud de onda, de forma y combinación de ellos, conocidos como parámetros híbridos. Los parámetros de altura son ampliamente utilizados, entre ellos se encuentran: Ra, (promedio de la rugosidad) definida como la desviación aritmética promedio de la altura de la superficie desde la línea central a través del perfil, considerando la línea central como el mejor ajuste del área seleccionada de manera que queden áreas iguales del perfil por arriba y por debajo de ella; rms, (la rugosidad) que se define como la raíz de la desviación cuadrática media a partir de la línea central. Estos dos parámetros permiten estimar la altura promedio y la profundidad en los perfiles de superficie. Otros parámetros de altura son: PV (distancia pico-valle), definido como la máxima distancia entre el punto más alto (pico) y el punto más bajo (valle) de todos los picos/valles barridos en el campo de observación. V (valle), tomado como la máxima distancia entre la línea central y el punto más bajo (valle) dentro del campo de observación. Los parámetros de longitud de onda son utilizados para describir el espaciamiento de los picos y valles de la superficie; mientras que los parámetros híbridos consideran las desviaciones de la altura y desplazamientos laterales en los perfiles [7].

La aleación comercial de aluminio 3003 (Al-Mn) es una de las principales aleaciones que se producen en Venezuela. Pertenece a la familia de las aleaciones endurecibles por deformación y debido a sus buenas propiedades mecánicas, puede usarse en la elaboración de líneas de gas, recipientes a presión, tanques de gasolina e intercambiadores de calor, entre otros. Sin embargo, esta aleación tiene la tendencia a corroerse por picadura en medio ambiente salino. La corrosión localizada en la aleación de aluminio (AA) 3003 está generalmente relacionada con la presencia de intermetálicos de segunda fase del tipo β -Al(FeMn) y α -Al(FeMn)Si los cuales, en medio ambiente salino, pueden presentar comportamiento catódico/inerte con respecto a la matriz de aluminio [8].

Basados en las especificaciones instrumentales descritas anteriormente, el objetivo del presente trabajo consistió en utilizar la interferometría óptica como técnica para analizar superficies de la aleación comercial de aluminio 3003 corroídas por picaduras, al ser expuestas al medio ambiente salino, a fin de obtener información detallada de la morfología de las picaduras, así como datos cuantitativos precisos de la profundidad de las mismas, que permitan establecer el grado de ataque corrosivo producido en la AA 3003 en presencia de soluciones salinas.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Para la investigación se utilizó una aleación comercial de aluminio 3003, fabricada por CVG-ALCASA, con la siguiente composición química (porcentaje en peso): 0,20% Si; 0,65% Fe; 0,128% Cu; 1,042% Mn; 0,003% Mg; 0,00007% Cr; 0,0028% Ni; 0,0075% Zn; 0,013% Ti; 0,0022% B; 0,0033% Pb; Balance Al. Se cortaron probetas de 12 cm x 10 cm, grados H14, H16 y H18, las cuales fueron expuestas al rocío salino por 72, 144, 216, 288 y 360 horas en forma ininterrumpida, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM B117 [9]. Se utilizó una cámara salina ERICHSEN 6006 y una solución salina al 5% (p/v). Una vez concluido el ensayo de corrosión, las probetas fueron sumergidas en ácido nítrico concentrado por cinco minutos (norma ASTM G16 [10]), con el fin de remover la capa de corrosión que se forma en la superficie de las probetas durante el ensayo.

Las superficies de las probetas corroídas fueron analizadas mediante interferometría de luz blanca utilizando el interferómetro ZYGO *New View 200*. En cada campo de observación se midieron parámetros tales como: Ra, PV y V, para evaluar la corrosión por picadura de acuerdo con las normas ASTM G16-88 y G46-76 [10-12].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de remover la capa de corrosión que se formó sobre las superficies de las probetas expuestas al rocío salino, éstas fueron examinadas por microscopía óptica. Los resultados mostraron que el ambiente salino produjo una elevada densidad de picaduras en todas las superficies de las probetas ensayadas, independiente del tiempo de exposición y grados de deformación. El ataque estuvo caracterizado, por numerosas picaduras superficiales (Figura 1a) y, en menor grado, por picaduras mayores como se muestra en la Figura 1b, donde se

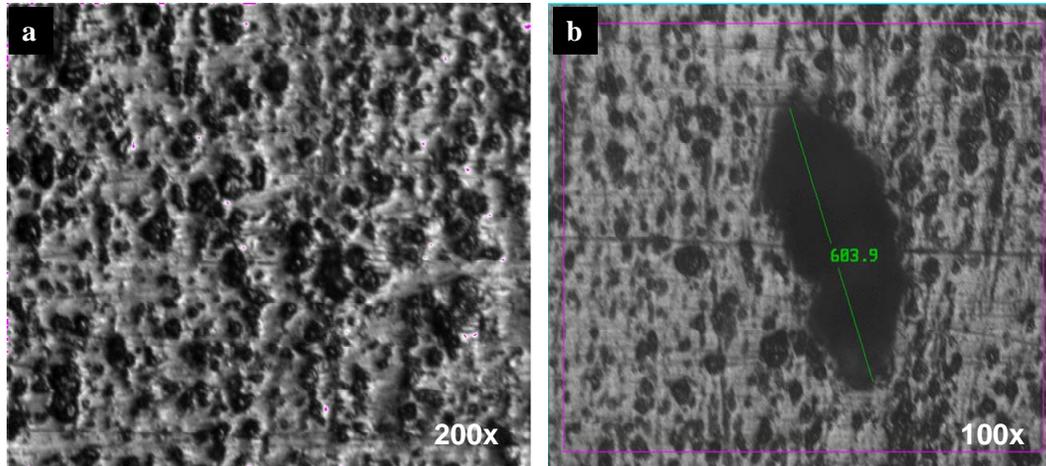


Figura 1. Micrografías ópticas mostrando: (a) Superficie de la AA 3003 de Temple H18, expuesta al rocío salino durante 288 horas y (b) picadura de ~ 700 micrones para el mismo temple y tiempo de exposición.

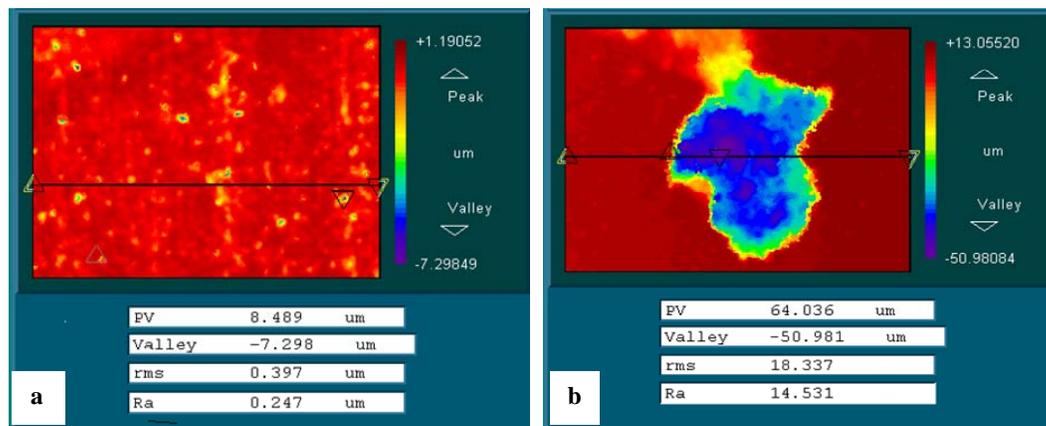


Figura 2. Perfiles bidimensionales de máximo contraste de: (a) la superficie ilustrada en la Figura 1a y (b) de una picadura irregular profunda.

observa una picadura de aproximadamente 700 micrones de longitud rodeada de pequeñas picaduras.

La Figura 2a obtenida por interferometría óptica, muestra el perfil bidimensional (2D) de la superficie ilustrada en la Figura 1a, mientras que el perfil de la Figura 2b corresponde a un picadura extensa y profunda semejante a la de la Figura 1b. Este mapa en 2D resalta las características superficiales y exhibe mejor la forma de las picaduras a través de la escala de colores ubicada a la derecha del interferograma. Esta escala de colores también refleja el nivel de profundidad de las picaduras, mientras que el triángulo de color negro que se observa sobre las Figuras 2a y 2b indica exactamente el punto más profundo del área analizada. Por ejemplo, el punto mas profundo en la

Figura 2b es de 50,981 micrones. El valor de este parámetro se exhibe en la ventana ubicada debajo del perfil. También se utilizaron otros mapas de 2D para completar la caracterización superficial, como se ilustra en la Figura 3a, el cual representa la sección transversal del área donde se encuentra ubicada la barra de color negro que se observa sobre la Figura 2b. La opción de poder desplazar esta barra a lo largo de la superficie analizada, permite determinar con exactitud la profundidad de la picadura en un punto particular y tener información de la forma de crecimiento de la misma. Así, el perfil de la Figura 3 corresponde a la sección transversal de la picadura de la Figura 2b, la cual es catalogada como una picadura vertical profunda de acuerdo con la norma ASTM G-46. Este análisis

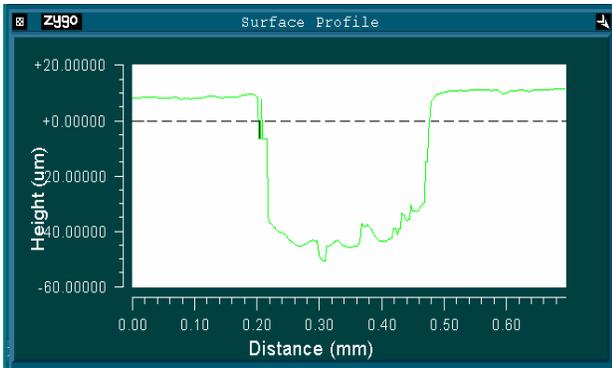


Figura 3. Sección transversal de la picadura de la Figura 2b.

permitió establecer también la existencia de otras morfologías de picaduras, además de la vertical profunda, como: elípticas profundas, anchas superficiales y angostas profundas. Otra de las ventajas de este perfil bidimensional es que se puede obtener directamente el ancho de la picadura, por ejemplo, el ancho de la sección transversal de la picadura en la Figura 3 es de 0,26 mm.

Como se mencionó anteriormente, la interferometría óptica permitió generar también mapas tridimensionales (3D) de la superficie analizada, lo

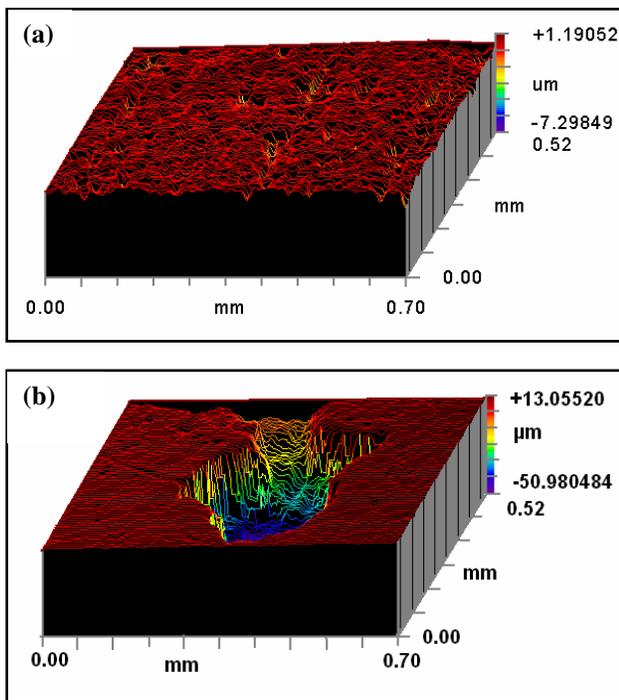


Figura 4. Perfiles en 3D de: (a) la superficie ilustrada en la Figura 1a y (b) de la picadura irregular profunda de la Figura 2b.

cual hizo posible obtener información detallada de la topografía de la superficie corroída y de la morfología volumétrica de las picaduras. En este caso, la imagen en 3D correspondiente a la Figura 1a se presenta en la Figura 4a, la cual revela la alta rugosidad superficial ocasionada por la elevada población de pequeñas picaduras producidas en las superficies de las probetas durante el tiempo de permanencia al rocío salino; mientras que el mapa tridimensional de la Figura 4b muestra claramente la morfología interior de la picadura irregular exhibida en la Figura 2b. Adicionalmente, el software del equipo permite rotar en varias direcciones la imagen tridimensional, lo que hace posible observar las formas de las picaduras a diferentes ángulos.

Este análisis superficial permitió resaltar igualmente otras características morfológicas observadas en las probetas examinadas, como fue la presencia de picaduras en forma de canales relativamente superficiales (entre 6 y 12 micrones de profundidad) como los que se ilustran en las Figuras 5(a-b), los cuales pudieran resultar de la nucleación de picaduras en partículas de segunda fase de composición, morfología y tamaños semejantes, que se encuentran dispuestas en hileras en la superficie del material, o segregados en los bordes de grano. También pudo observarse la formación de picaduras extendidas con más diámetro que profundidad, las cuales parecen haberse formado a partir de la coalescencia de picaduras cercanas, como se muestra en las Figuras 6(a-b).

Por otra parte, los valores de profundidad de picaduras obtenidos con esta técnica de análisis permitieron determinar el Factor de Picaduras, el cual representa una medida de la susceptibilidad de los materiales a corroerse por picadura en un determinado medio. Este factor se expresa por medio de la relación existente entre la máxima profundidad de las picaduras $[(Pp)_{m\acute{a}xima}]$ y el promedio de la profundidad de las picaduras $(Pp)_{promedio}$, tal que $Fp = [(Pp)_{m\acute{a}xima}] / (Pp)_{promedio}$. Un factor Fp mayor de 1 representa ataque localizado severo de acuerdo con la norma ASTM G-46.

En la Tabla 1 se presentan los valores de Factores de Picaduras determinados del conjunto de probetas de aluminio 3003, grados H14, H16 y H18, expuestas al rocío salino por 72, 144, 216, 288 y 360 horas. Como puede apreciarse se obtienen valores entre 1,5 y 3,5; lo cual resulta en un factor de picadura promedio del orden de 2,5 representando ataque

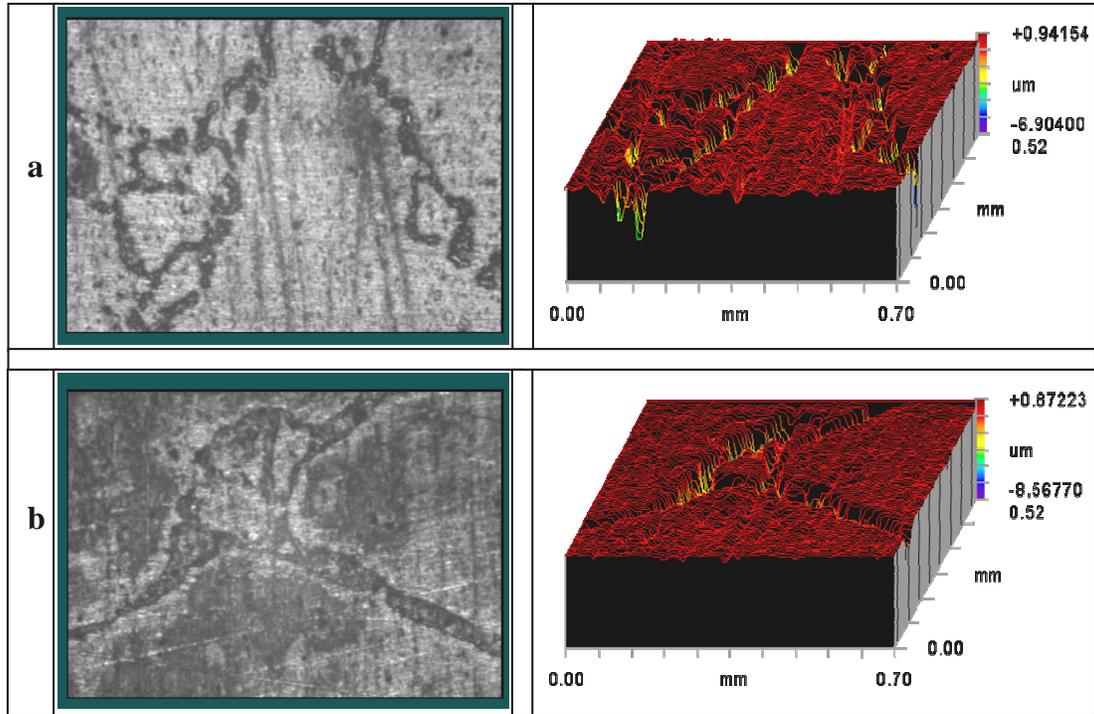


Figura 5. Perfiles en 2D y 3D de picaduras superficiales en forma de canales de: (a) 6,904 micras de profundidad. Temple H18. Tiempo de exposición: 216 horas y (b) 8,56770 micras de profundidad. Temple H18. Tiempo de exposición: 144 horas.

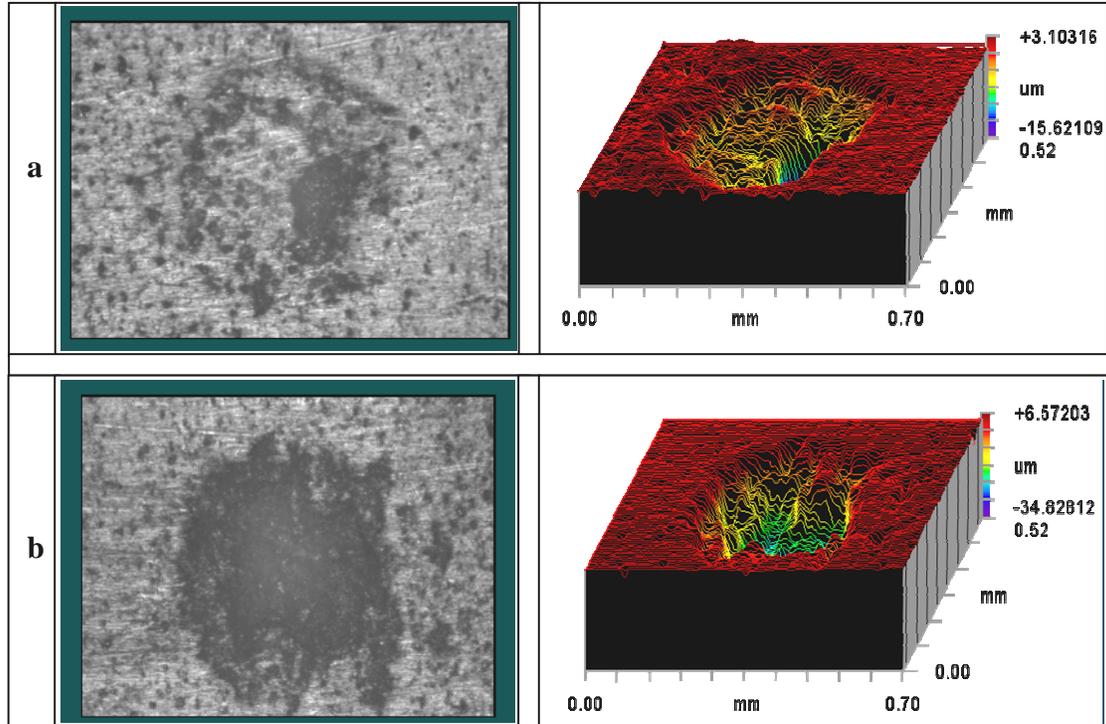


Figura 6. Perfiles en 2D y 3D mostrando el inicio (a) y la morfología final (b) de cavidades redondeadas por coalescencia de pequeñas picaduras. Temple H16. Tiempo de exposición: 144 horas.

Tabla 1. Factores de picadura obtenidos de probetas de aluminio 3003 corroídas en ambiente salino.

Tiempo de Exposición (Horas)	Factor de Picadura		
	Grado H14	Grado H16	Grado H18
72	2,441	3,385	2,138
144	2,012	1,816	1,822
216	2,613	2,090	2,398
288	2,698	2,260	3,535
360	2,403	2,092	2,430

localizado severo para esta aleación comercial de aluminio 3003. Este elevado valor de Fp resultó en un proceso de corrosión acelerado para el cual, la tasa de penetración de las picaduras es independiente del temple y tiempo de exposición al rocío salino.

Estudios complementarios reportados en otra parte [13], permitieron establecer que el proceso altamente localizado de corrosión por picadura en la aleación comercial de aluminio 3003 estudiada, esta asociado a la presencia de microcátodos constituidos por partículas de segunda fase del tipo α -Al(Fe,Mn)Si y β -Al(Fe,Mn). Estos intermetálicos de diferentes formas y tamaños, se encontraron distribuidos de manera no uniforme en todas las muestras independiente de su temple o grado de deformación. En consecuencia, la aparición y crecimiento de una picadura pudiera estar controlada por la presencia de intermetálicos catódicos, muchos de los cuales se encontraron agrupados en forma de racimos en muestras de cualquier grado de deformación. Por otra parte, no se encontró correlación alguna entre las picaduras más profundas y el tiempo de exposición de las probetas al rocío salino. Esta circunstancia y las observaciones por MEB-EDX [13], permitieron establecer como mecanismo predominante de la corrosión por picadura en la AA 3003 estudiada, la presencia de intermetálicos catódicos que inducen un ataque altamente selectivo por disolución de la matriz de aluminio que rodea la partícula de segunda fase.

4. CONCLUSIONES

- Los resultados de este estudio muestran que la técnica de Interferometría Óptica proporciona información precisa de los parámetros más importantes en la evaluación de la corrosión por picadura, como lo son: profundidad, morfología y forma de crecimiento de las picaduras.
- A través de la profundidad de las picaduras es posible determinar el Factor de picadura, Fp, el cual representa una medida de la susceptibilidad de los materiales a corroerse por picadura.
- Se determinó un Fp promedio para esta aleación comercial de Al-Mn del orden 2,5, independientemente de tiempo de exposición y del temple o grado de deformación, lo cual sugiere un proceso de corrosión altamente localizado.
- El elevado valor para Fp se asoció a la presencia de intermetálicos de segunda fase distribuidos de manera no uniforme en la matriz, los cuales actúan como microcátodos e inducen micropilas galvánicas que disuelven la matriz de Aluminio alrededor de la partícula.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente (UDO), Cumaná (Proyecto CI-5-1902-1137/03) para la realización de este trabajo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Guilemany JM, Miguel JM, Armada S, Vizcaino S, Climent F, *Mater. Charact.* 2001; **47** (3-4): 307-314.
- [2] Hooker JA, Simmons SM, *Noncontact Scanning Surface Profilometers* [en línea]. Laser Technology, Inc. Octubre 2002 [citado 15-ene-2003]. Disponible en la Web: <<http://www.nasatech.com/Briefs/Oct02/KSC11759.html>>.
- [3] Blanc Ch, Roques Y, Mankowski G., *Corros. Sci.* 1998; **40** (6): 1019-1035.
- [4] Guillaumin V, Mankowski G, *Corros. Sci.* 1999; **41** (3): 421-438.
- [5] Habib K, *Corros. Sci.* 2000; **42** (3): 455-467.
- [6] Hutchings IM, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. London (U.K.): Arnold, Division of Hodder Headline, 1992.

- [7] Ruff A, "Introduction to Laboratory Characterization Techniques". En: *ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology*, Vol. 18. Ohio (EE.UU.): American Society for Metals, 1992, p. 332-345.
- [8] Szklarska-Smialowska Z, *Corros. Sci.* 1999; **41** (9): 1743-1767.
- [9] Norma ASTM B117-90, *Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus*, Vol. 03.02, Philadelphia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1992.
- [10] Manual de operación del Interferómetro ZYGO *New View 200*. Middlefield (EE.UU.): Zygo Corporation, 1997.
- [11] Norma ASTM G 16-88, *Standard Guide for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data*, Vol. 03.02, Philadelphia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1992.
- [12] Norma ASTM G 46-76, *Standard Practice for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion*, Vol. 03.02, Philadelphia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1992.
- [13] Paredes S, *Corrosión en Medio Ambiente Salino de la Aleación Comercial de Aluminio CVG-ALCASA 3003 con Templés H14, H16 y H18*. Tesis M.Sc. Puerto Ordaz (Venezuela): Universidad Nacional Experimental de Guayana, 2006.