

Resistencia mecánica en aleaciones de aluminio estructural expuestas a corrosión marina (Parte I: materiales ferrosos)¹

Garzón Zataráin I. de J.
Casanova del Ángel F.

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,
Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura,
Edificio 12, 3er piso, apartado postal 75-136,
UPALM, Instituto Politécnico Nacional. México, DF.
MÉXICO.

correo electrónico: ijgz81@yahoo.com.mx, fcasanova@ipn.mx

Recibido el 10 de abril de 2007; aceptado el 6 noviembre de 2007.

1. Resumen

Se presenta un estudio sobre la resistencia mecánica del aluminio 6063-T5, el cual fue expuesto a condiciones marinas propicias para el desarrollo de corrosión dado en este tipo de ambientes, durante dos periodos: seis y 12 meses. Se observaron las variaciones existentes en la resistencia mecánica de la aleación por la presencia de corrosión y los posibles mecanismos de falla, encontrándose disminución de su ductilidad por la presencia de hidrógeno, mecanismo denominado fragilización por hidrógeno. Se calculó la dimensión fractal y cuantificó el grado de agrietamiento originado por los productos de corrosión manifestados en el material. La dimensión fractal obtenida a los seis meses de exposición es menor con respecto a la de 12 meses. De las observaciones hechas en el microscopio electrónico de barrido (MEB) se pudo ver que la superficie de agrietamiento fue menor a los seis meses de exposición que a los 12 meses.

Palabras clave: aleación de aluminio 6063-T5, corrosión marina, dimensión fractal, fractografía, fragilización por hidrógeno.

2. Abstract (Structural Aluminium Alloy Resistance Mechanical Exposed to Marine Corrosion)

The mechanical resistance of an aluminum alloy, 6063-T5, is analyzed, when it is exposed to marine corrosion. For this

¹Este artículo corresponde a la primera parte del trabajo *Resistencia mecánica de materiales expuestos a condición marina* cuya segunda parte se publicará en el siguiente número.

purpose, the specimens were exposed during six and twelve months. Variation of the mechanical properties and the associated failure mechanism were observed. The results show that the ductility is reduced, because there is hydrogen in the environment. Consequently, the failure mechanism is hydrogen embrittlement. In a second stage, following a Fractal Mechanics approach, the cracking process generated by corrosion was evaluated and the experimental evidence was gathered with observations in a scanning electronic microscope. The fractal parameters, as well as the experimental results and the evaluation of the mechanical properties, show that the cracking is more severe in those specimens exposed to marine corrosion during twelve months.

Key words: 6063-T5 aluminum alloy, marine corrosion, fractal dimension, fractography, embrittlement by hydrogen.

3. Introducción

La fractura de los materiales es una de las más importantes causas de pérdidas económicas en las sociedades industrializadas. El conocimiento que se tiene actualmente acerca de las causas y/o mecanismos de la fractura en materiales heterogéneos se basa principalmente en estudios realizados a lo largo de los años sobre la apariencia morfológica de las superficies de fractura, y están encaminados a ligar la apariencia con los parámetros microestructurales del material fracturado. En 1984, Mandelbrot sugiere que las fracturas presentan rangos de fractalidad, y emplea el método de la dimensión fractal para estudiar superficies de fractura de materiales con tenacidades diferentes [1]. Esta investigación generó expectación entre el ambiente científico acerca de la posible correlación entre la tenacidad del material y la dimensión fractal de sus superficies de fractura. Es importante reconocer que bajo un enfoque de la mecánica de fractura, donde se considera a las superficies de las grietas como planas, se contempla la influencia de diversos factores. En este caso, el tipo de carga (uniaxial o biaxial) [2], así como la velocidad de aplicación de la carga [3] tienen una fuerte influencia en el inicio de propagación de la grieta. Sin embargo, todos estos fallos se manifiestan en una variación del valor crítico del *factor de intensidad de esfuerzos*. Desde el punto de vista de la mecánica fractal, se han elaborado análisis de fractura tratando de tener una mayor evaluación del proceso observado [4, 5, 6]. Las aleaciones de aluminio de la serie

6xxx (en nuestro caso 6063-T5) poseen una resistencia mecánica moderada, buena formabilidad, soldabilidad, maquinabilidad y resistencia a la corrosión, lo cual las hace adecuadas para diversas aplicaciones entre las que se encuentran los perfiles arquitectónicos, marcos de bicicletas, fabricación de equipos de transporte, componentes para puentes y estructuras soldadas, entre otras. El objetivo de la investigación es el de analizar el comportamiento mecánico a tensión y fractográfico de la aleación de aluminio 6063-T5, en laboratorio por medio de probetas elaboradas, las cuales fueron expuestas a la corrosión que se genera a nivel de la costa del Pacífico, específicamente en la ciudad de Mazatlán, Sinaloa, para visualizar los efectos que ocasiona el ambiente al cual se encontraron expuestas por un determinado periodo de tiempo y determinar la dimensión fractal del agrietamiento de los productos de corrosión generados en la aleación.

4. Desarrollo

4.1. Probetas para experimentación

De acuerdo a la geometría establecida por las normas ASTM-B211 y NMX-W-047-1999, se elaboraron cuatro probetas y se expusieron al ambiente marino de Mazatlán, Sinaloa, durante dos lapsos de tiempo: seis y 12 meses. Se llevaron a cabo los respectivos ensayos a tensión en laboratorio. Se analizó una probeta en cada estado: dos vírgenes, una expuesta a seis meses y otra expuesta a 12 meses. Al estudio y ensayo de una probeta virgen, se le denominó prueba piloto.

4.2. Dimensión de experimentación

El diseño geométrico de las probetas, de acuerdo a las normas indicadas, se indica en la figura 1 [7, 8].

La tabla 1 muestra los valores correspondientes a cada una de las letras que acotan la geometría de la probeta descrita en la figura 1.

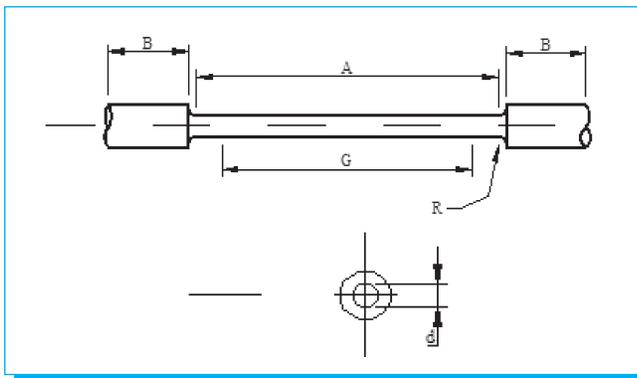


Fig. 1. Geometría de probetas.

Tabla 1. Dimensiones de probeta.

Nomenclatura	Aleación 6063-T5	
	pulgadas (pulg)	milímetros (mm)
G. Distancia entre marcas	2.2835±0.005	58±0.12
d. Diámetro de la sección reducida	0.35±0.007	8.89±0.17
A. Longitud mínima de la sección reducida	2.3622±0.004	60±0.10
R. Radio de filete	¼±0.004	6.35±0.10
B. Zona de agarre de mordazas	2.3622±0.004	60±0.10

4.3. Exposición de probetas

A los seis meses de exposición se distinguieron concentraciones puntuales de color blanco en ciertas zonas del material que compone la probeta debido a la interacción con el ambiente. Se observó que la acumulación de sales dio lugar al desarrollo de una picadura en la parte central de la probeta. Además, se notó la pérdida en la intensidad del brillo de la misma a causa de la interacción con el ambiente. Esto se puede apreciar en la figura 2.

4.4 Ensayo de prueba piloto a tensión uniaxial

El equipo que se utilizó es una máquina universal de pruebas mecánicas marca *Instron*, modelo 8502, Serie núm. C0285 con capacidad de 250 kN (25 toneladas). La velocidad que

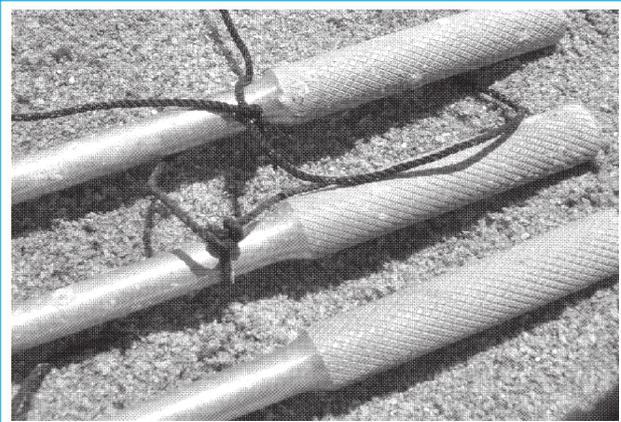


Fig. 2. Exposición a los seis meses.

se utilizó para ensayar las probetas fue de 0.6 mm/min, con una capacidad de registro de cinco puntos por segundo. En promedio, para los ensayos realizados, se obtuvo alrededor de 1 200 puntos por probeta. Los ensayos fueron realizados con esa velocidad para apreciar, de la mejor manera posible, el comportamiento de la probeta durante el proceso de carga.

4.4.1. Probeta virgen

La carga máxima que soportó fue de 10.55 kN y un desplazamiento de 7.15 mm. La probeta llegó hasta la rotura, presentándose en la parte central. Posteriormente al ensayo de tensión se cortó una muestra de la probeta adyacente a la zona de fractura para observar el mecanismo de falla de la aleación en el MEB.

4.4.2. Probeta expuesta

El cambio principal observado fue la reducción del desplazamiento de la probeta. En los primeros seis meses se obtuvo una carga de 10.19 kN con un desplazamiento de 3.33 mm. En los siguientes seis meses cuando el material cumplió con el año de exposición establecido, del ensayo a tensión se obtuvo una carga de 10.53 kN con un desplazamiento de 2.78 mm. Además, estos cambios fueron muy notorios físicamente, puesto que la probeta virgen presentó claramente la formación de un cuello en la zona en donde el material se plastificó al estarle aplicando cargas a tensión. Esto no se pudo lograr muy claramente en el resto de las probetas expuestas al ambiente marino. También se observó que la fractura se manifestó en una región de la probeta, donde hubo acumulación de grumos blancos producto de la interacción de la probeta con el ambiente, lo cual dio lugar a que la formación del cuello no se presentara claramente y el material falló repentinamente.

4.5. Fractografía de muestras

Posteriormente al ensayo de tensión se cortaron muestras de material de cada probeta y se llevaron al MEB para efectuar un análisis de fractografía. Este análisis permitió observar el mecanismo de falla desarrollado en las muestras así como su comportamiento fractográfico, determinándose que hubo fragilización por hidrógeno, siendo la causa por la cual la aleación redujo su ductilidad. La figura 3 muestra la separación dada en los bordes de grano de la aleación debido a la presión que se desarrolló entre ellos por la presencia del gas hidrógeno.

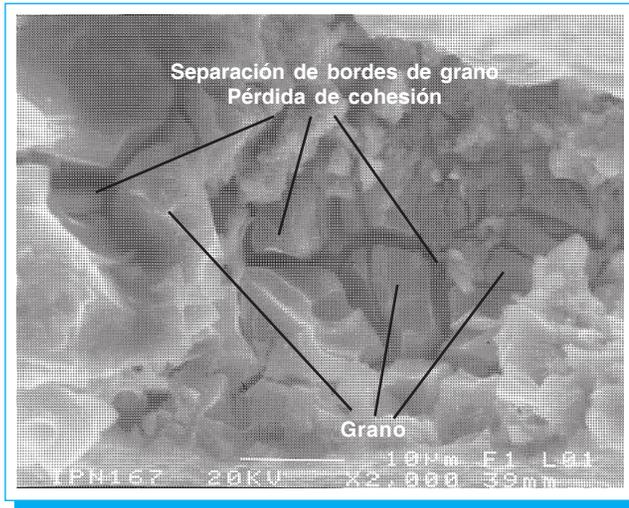


Fig. 3. Mecanismo de fragilización por hidrógeno.

4.6. Resultados del ensayo a tensión

La figura 4 muestra el comportamiento para las tres condiciones en que fueron estudiadas las probetas: virgen, seis meses y 12 meses. El procedimiento que se optó para obtener el esfuerzo de cedencia está basado en el criterio de la norma ASTM-01, inciso 7.7.1 denominado método offset. Los resultados experimentales obtenidos para la probeta virgen, se pueden comparar con los valores que se encuentran en la dirección de Internet www.matweb.com [9], la cual muestra resultados muy similares a los obtenidos para la probeta sin exposición en la tabla 2, ésta muestra las propiedades mecánicas ilustradas en la figura 4.

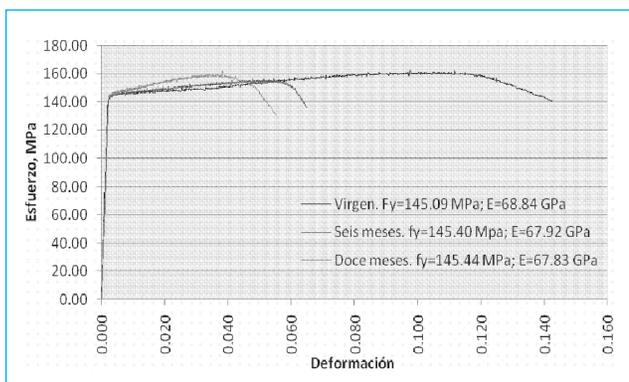


Fig. 4. Curva esfuerzo-deformación obtenida experimentalmente para cada probeta.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de la aleación 6063-T5.

Aleación 6063-T5	f_y , MPa	
	matweb.com	Experimental
Virgen	145	145.09
seis meses	---	145.40
12 meses	---	145.44
	E , GPa	
	matweb.com	Experimental
Virgen	68.9	68.84
seis meses	---	67.92
12 meses	---	67.83
	Elongación, %	
	matweb.com	Experimental
Virgen	12	14.0
seis meses		6.6
12 meses		5.5

Los resultados de la tabla demuestran que los esfuerzos de fluencia, y por lo tanto los módulos de elasticidad de la aleación, se conservaron semejantes. El tipo de corrosión de carácter puntual no uniforme, que por naturaleza se da en el aluminio gracias a la capa pasivadora que se forma al entrar en contacto con el ambiente, ocasiona que no haya pérdidas considerables en el esfuerzo de fluencia del material al ser ensayado. Por lo tanto, al no haber pérdidas de material importantes en la aleación debido a productos de corrosión, el diámetro de las probetas no tuvo una reducción tal que se hubiera manifestado como una baja en la carga soportada por éstas al finalizar el ensayo de tensión de las mismas y por consecuencia presencia de variaciones en la fluencia del material.

4.6.1. Tenacidad

La tenacidad de un material es la habilidad que éste posee para absorber energía durante la deformación plástica [10]. Las formas de concretar el concepto es calcular el área bajo la curva de esfuerzo-deformación, o mediante ensayos de impacto [11].

La medida de la tenacidad, U_T , sirve para cuantificar la ductilidad de un material al ser ensayado a tensión. Involucra la energía plástica absorbida por el material durante el ensayo hasta llegar a la rotura, como lo indica la figura 5 [12].

$$U_T = EP \quad (1)$$

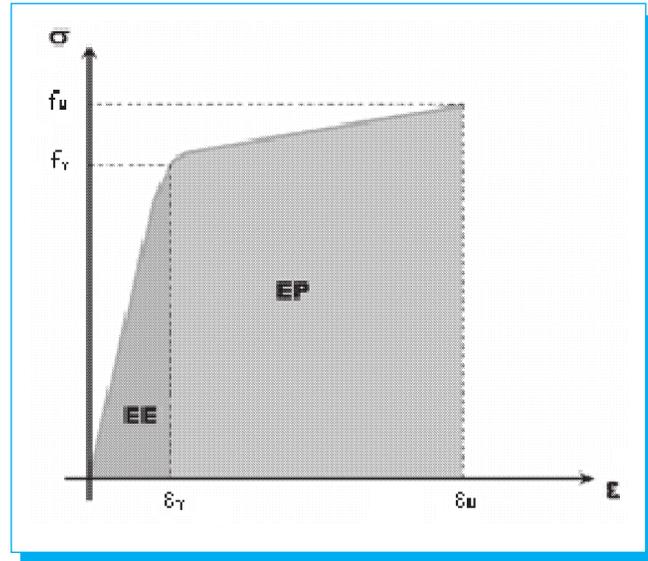


Fig. 5. Energía elástica y plástica de la curva esfuerzo-deformación de un material.

donde:

U_T es la tenacidad del material.

EP es la energía plástica.

4.6.1.1. U_T calculada en la probeta virgen

La figura 6 muestra el comportamiento correspondiente a la zona plástica desarrollado en la aleación que se obtuvo de la figura 4 que muestra la gráfica esfuerzo-deformación para cada probeta.

A esta curva se le realizó un ajuste para conocer la ecuación de la línea de tendencia, producto del ajuste. Para ello se

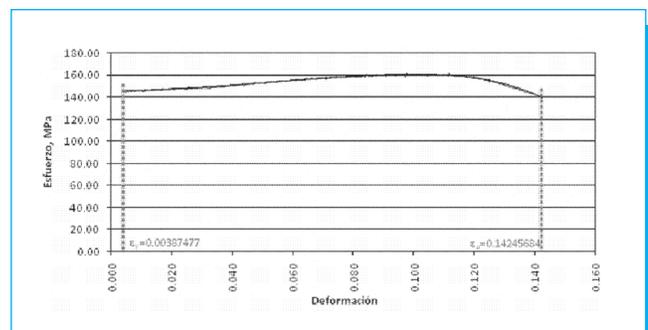


Fig. 6. Zona plástica de la curva esfuerzo-deformación de la probeta virgen.

utilizaron las funciones disponibles en Microsoft Office Excel, de donde se obtuvo la siguiente ecuación:

$$y_{virgen} = -23943638.69x^6 + 7044455.29x^5 - 856312.06x^4 + 31271.93x^3 + 1681.80x^2 + 62.32x + 145.51 \quad (2)$$

$$R^2 = 0.99$$

El valor R^2 , denominado coeficiente de relación de Pearson, es un índice estadístico que mide la relación lineal entre las dos variables cuantitativas: esfuerzo (σ) y deformación (ϵ). Se dice que una correlación es significativa si la misma se encuentra entre $[-1, -0.7]$, o bien $[0.7, 1]$ [13].

La curva de la figura 6 se encuentra en los intervalos $\epsilon_y = 0.00387477$ y $\epsilon_u = 0.14245684$, por lo tanto, al integrar la ecuación (2), por definición se conoció el área bajo la curva de la misma, y por lo tanto U_T para la probeta virgen.

$$U_T = \int_{\epsilon_y}^{\epsilon_u} (y_{virgen}) dx = 21.33 \quad (3)$$

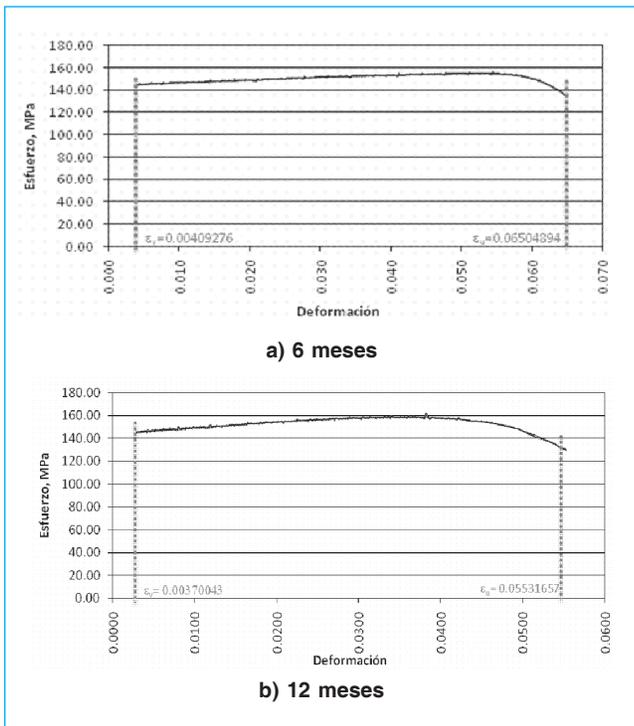


Fig. 7. Zona plástica de las probetas expuestas y su ecuación de la línea de ajuste con R^2 .

Tabla 3. U_T calculado para cada probeta.

Tenacidad, U_T (MPa)	Probeta virgen	Probeta expuesta a seis meses	Probeta expuesta a doce meses
Periodo de exposición, t (meses)	21.33	9.17	8.00

El mismo procedimiento se aplicó para conocer los valores correspondientes de U_T en cada probeta que fue expuesta al medio marino. La figuras 7a y 7b muestran la línea de tendencia ajustada con su ecuación correspondiente (ecuaciones (4) y (5)) que se integró para conocer U_T para cada caso de exposición.

$$y_{6\text{ meses}} = -27412798389.48x^6 + 4920802879.41x^5 - 342687656.32x^4 + 11608666.43x^3 - 197745.94x^2 + 1814.45x + 139.77 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.98$$

$$y_{12\text{ meses}} = -14402823003.54x^6 + 1951309181.16x^5 - 110930772.83x^4 + 3029023.74x^3 - 43152.68x^2 + 824.55x + 143.14 \quad (5)$$

$$R^2 = 0.99$$

La tabla 3 contiene los valores de U_T calculados de las ecuaciones (4) y (5) que corresponden a los casos en que las probetas fueron expuestas.

En la figura 8 se graficaron los valores calculados de U_T con respecto al tiempo de exposición. Este gráfico muestra la relación entre el tiempo y la tenacidad calculada en cada probeta.

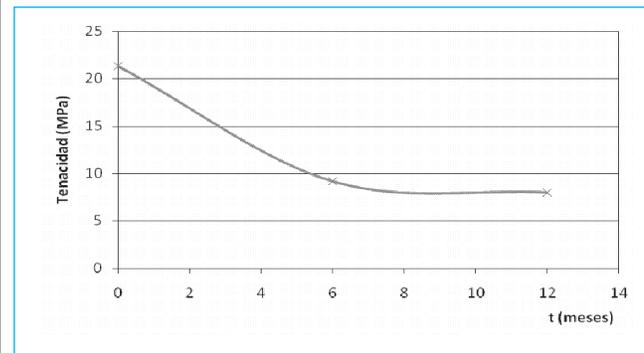


Fig. 8. U_T contra tiempo de exposición.

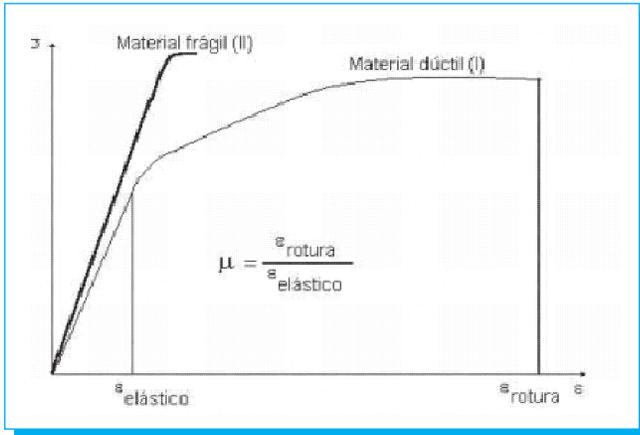


Fig. 9. Ductilidad de un material.

4.7. Cálculo del factor de daño ambiental por corrosión marina

El factor de daño ambiental por corrosión marina (D_{cm}) para cada probeta se obtuvo al dividir el valor U_T de cada probeta expuesta entre U_T de la probeta virgen. Este factor indica la pérdida o reducción de ductilidad que tuvo la aleación mientras se mantuvo en interacción con ambiente marino a los seis y 12 meses de exposición.

El porcentaje de elongación es otra medida convencional de la ductilidad, mismo que se obtuvo del ensayo de tensión en laboratorio. En la tabla 2 se muestran estos valores. Utilizándolos se obtuvo el factor de daño por corrosión marina que también se calculó por medio de los valores de U_T . Existen variaciones en los valores obtenidos debido a la aproximación y redondeo de los cálculos efectuados.

$$D_{CM\ 6meses} = \frac{U_{T\ 6meses}}{U_{T\ virgen}} = \frac{9.17}{21.33} = 0.43 \quad (6)$$

$$D_{CM\ 12meses} = \frac{U_{T\ 12meses}}{U_{T\ virgen}} = \frac{8.0}{21.33} = 0.38 \quad (7)$$

El porcentaje de elongación es otra medida convencional de la ductilidad, mismo que se obtuvo del ensayo de tensión en laboratorio. En la tabla 2 se muestran estos valores. Utilizándolos, se obtuvo el factor de daño por corrosión marina que también se calculó por medio de los valores de U_T . Existen variaciones en los valores obtenidos debido a la aproximación y redondeo de los cálculos efectuados.

Tabla 4. Medida de la ductilidad.

Probeta	ϵ_y	ϵ_{rot}	μ	$D_{CM} = \frac{\mu_{exp}}{\mu_{virgen}}$
Virgen	0.00387477	0.14245684	36.76	1.00
6 meses	0.00409276	0.06504894	15.89	0.43
12 meses	0.00370043	0.05531657	14.95	0.41

$$D_{CM\ 6meses} = \frac{6.6}{14} = 0.47 \quad (8)$$

$$D_{CM\ 12meses} = \frac{5.5}{14} = 0.39 \quad (9)$$

4.8. Medida de la ductilidad

La ductilidad (μ) es una propiedad que presentan algunos metales y aleaciones cuando, bajo la acción de una fuerza, pueden estirarse sin romperse permitiendo obtener alambres o hilos. La figura 9 muestra gráficamente el cálculo necesario para medir la ductilidad del material. Este procedimiento alternativo para medir la ductilidad es comúnmente utilizado en ingeniería [13]. La tabla 4 muestra los valores calculados de μ .

En la figura 10 se graficaron los D_{cm} contra el periodo de exposición, obtenidos de los distintos cálculos. Este gráfico expresa la variación que tuvo el daño causado a las probetas por la interacción con el ambiente marino mientras estuvieron expuestas.

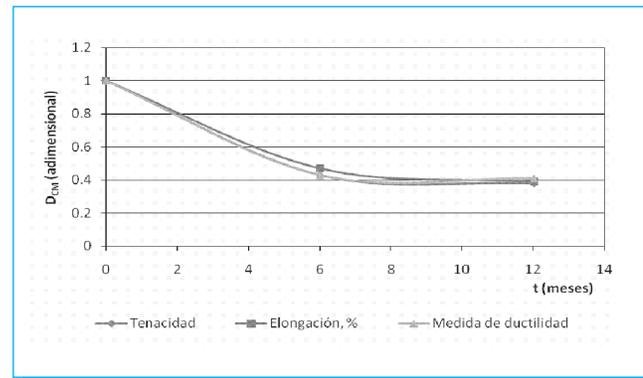


Fig. 10. Curva D_{cm} contra tiempo de exposición.

Tabla 5. Concentrado de D_{cm} .

Probeta	Factor de daño ambiental por corrosión marina, D_{CM}		
	U_r	% de elongación	Medida de ductilidad
Virgen	1.00	1.00	1.00
6 meses	0.43	0.47	0.43
12 meses	0.38	0.39	0.41

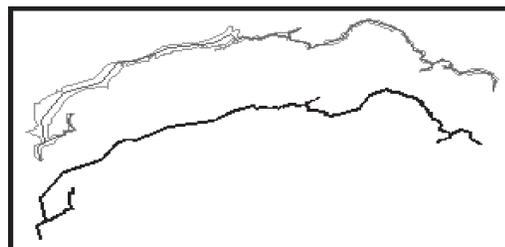
La tabla 5 muestra el concentrado de D_{cm} obtenidos a través de los distintos cálculos indicados. Las variaciones existentes en los factores de la tabla 5 son debido a los errores por aproximación y redondeo de los cálculos realizados.

4.9. Cálculo de la dimensión fractal

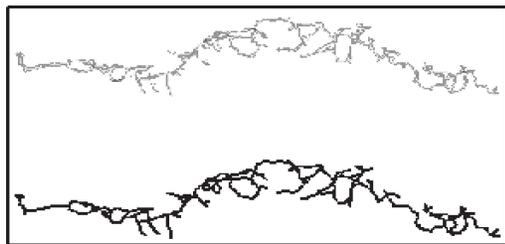
Para desarrollar los cálculos requeridos y conocer la dimensión fractal de las grietas que resultaron de analizar cada probeta en el MEB, se empleó el método de conteo de cajas [14]. Las figuras 11a y 11b, ilustran el agrietamiento desarrollado por los productos de corrosión. Éstas fueron extraídas de las fotografías capturadas por el microscopio electrónico de barrido y exportadas al *software* denominado AutoCAD para ser digitalizadas. Posteriormente se procedió al trazado de las mallas como lo establece el procedimiento. Las grietas fueron rotadas a distintos ángulos para cubrir al máximo la superficie de las mismas mediante el conteo de cajas y determinar de manera confiable la dimensión fractal para cada caso.

Tabla 6. D_{θ° para cada rotación de grieta.

PROBETA CON 6 MESES DE EXPOSICIÓN															
Con rotación de 0°				Con rotación de 45°				Con rotación de 90°				Con rotación de 135°			
N	Log(N)	L/I	Log(L/I)	N	Log(N)	L/I	Log(L/I)	N	Log(N)	L/I	Log(L/I)	N	Log(N)	L/I	Log(L/I)
4	0.60206	2	0.30103	4	0.60206	2	0.30103	4	0.60206	2	0.30103	3	0.47712	2	0.30103
8	0.90309	4	0.60206	8	0.90309	4	0.60206	8	0.90309	4	0.60206	6	0.77815	4	0.60206
5	0.69897	5	0.69897	5	0.69897	5	0.69897	5	0.69897	5	0.69897	8	0.90309	5	0.69897
16	1.20412	10	1.00000	16	1.20412	10	1.00000	16	1.20412	10	1.00000	14	1.14613	10	1.00000
24	1.38021	15	1.17609	24	1.38021	15	1.17609	24	1.38021	15	1.17609	22	1.34242	15	1.17609
36	1.55630	20	1.30103	36	1.55630	20	1.30103	36	1.55630	20	1.30103	33	1.51851	20	1.30103
40	1.60206	25	1.39794	40	1.60206	25	1.39794	40	1.60206	25	1.39794	45	1.65321	25	1.39794
112	2.04922	50	1.69897	112	2.04922	50	1.69897	112	2.04922	50	1.69897	113	2.05308	50	1.69897
$D_{0^\circ} = 1.04500$				$D_{45^\circ} = 1.04500$				$D_{90^\circ} = 1.04500$				$D_{135^\circ} = 1.1010$			
PROBETA CON 12 MESES DE EXPOSICIÓN															
Con rotación de 0°				Con rotación de 45°				Con rotación de 90°				Con rotación de 135°			
N	Log(N)	L/I	Log(L/I)	N	Log(N)	L/I	Log(L/I)	N	Log(N)	L/I	Log(L/I)	N	Log(N)	L/I	Log(L/I)
3	0.47712	2	0.30103	3	0.47712	2	0.30103	3	0.47712	2	0.30103	3	0.47712	2	0.30103
5	0.69897	4	0.60206	9	0.95424	4	0.60206	5	0.69897	4	0.60206	9	0.95424	4	0.60206
8	0.90309	5	0.69897	7	0.84510	5	0.69897	8	0.90309	5	0.69897	7	0.84510	5	0.69897
16	1.20412	10	1.00000	16	1.20412	10	1.00000	17	1.23045	10	1.00000	16	1.20412	10	1.00000
28	1.44716	15	1.17609	29	1.46240	15	1.17609	29	1.46240	15	1.17609	29	1.46240	15	1.17609
41	1.61278	20	1.30103	39	1.59106	20	1.30103	41	1.61278	20	1.30103	39	1.59106	20	1.30103
56	1.74819	25	1.39794	52	1.71600	25	1.39794	56	1.74819	25	1.39794	52	1.71600	25	1.39794
134	2.12710	50	1.69897	138	2.13988	50	1.69897	133	2.12385	50	1.69897	139	2.14301	50	1.69897
$D_{0^\circ} = 1.20700$				$D_{45^\circ} = 1.14400$				$D_{90^\circ} = 1.20700$				$D_{135^\circ} = 1.14500$			



a) 6 meses de exposición



b) 12 meses de exposición

Fig. 11. Agrietamiento digitalizado.

La tabla 6 muestra los resultados, donde N es el número de cajas interceptadas por la curva fractal, D_{θ° es la dimensión fractal, L es la longitud total del objeto, l la longitud de cada segmento y el cociente de L/l significa el número de subdivisiones que contiene cada lado de la malla.

De los valores mostrados en la tabla 6, se graficaron las columnas $\text{Log}(L/l)$ contra $\text{Log}(N)$ para conocer D_{θ° para cada caso de grieta en estudio. A cada comportamiento se le obtuvo su línea

de tendencia. La pendiente de esta ecuación representa la dimensión fractal conforme lo establece el método de conteo de cajas [14]. La figura 12 muestra el conjunto de gráficas obtenidas del cálculo de la dimensión fractal para cada grieta.

El valor definitivo de D_{θ° de la grieta se obtuvo al promediar los cuatro valores ma-

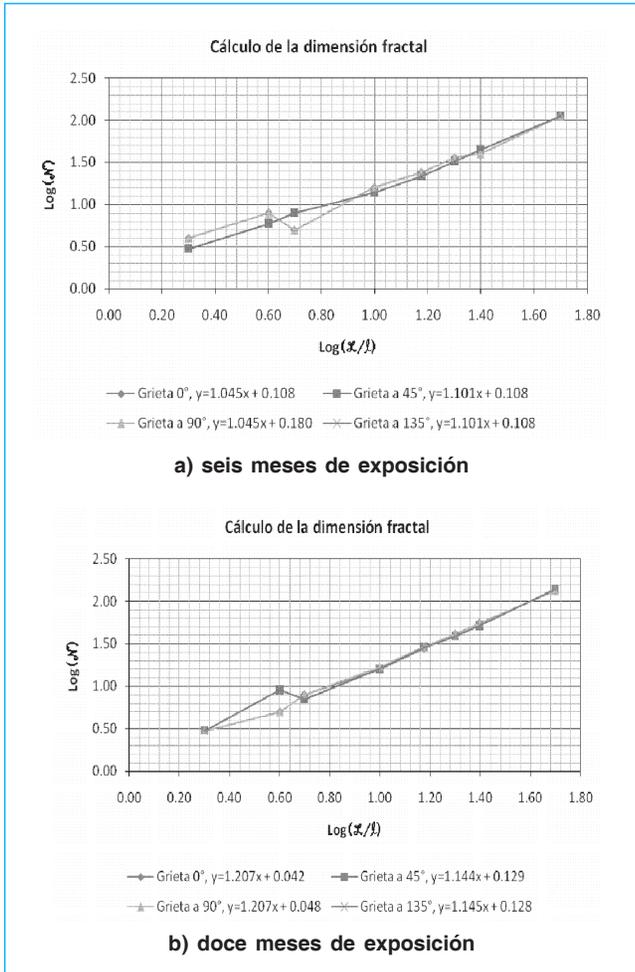


Fig. 12. D_{θ} para cada rotación de grieta.

yores de N que resultaron del método de conteo de cajas. Por lo tanto, la dimensión fractal definitiva es la siguiente:

$$D_{\theta} = (D_{0^{\circ}} + D_{45^{\circ}} + D_{90^{\circ}} + D_{135^{\circ}})/4 \quad (10)$$

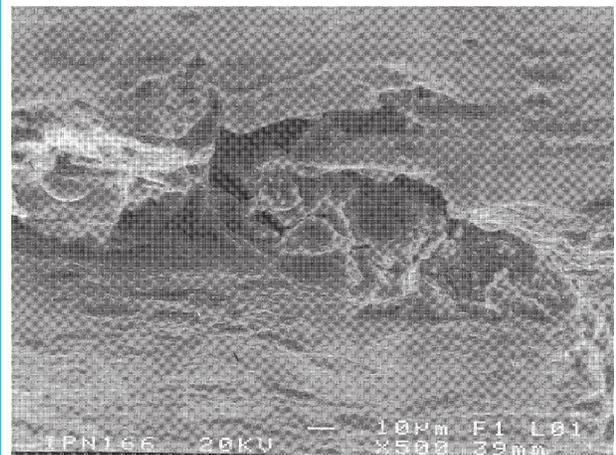
para seis meses

$$D_{\theta} = (1.045 + 1.101 + 1.045 + 1.101)/4 = 1.0730$$

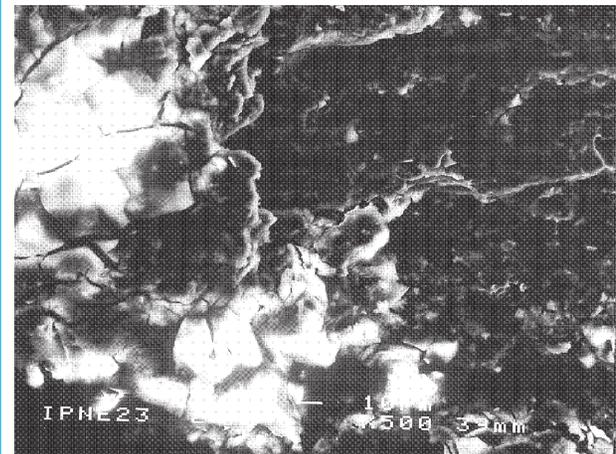
para doce meses

$$D_{\theta} = (1.207 + 1.144 + 1.207 + 1.145)/4 = 1.1758$$

El valor D_{θ} es una medida de la rugosidad relativa de una curva o de una superficie de fractura, es decir, cuantifica la variación de áreas o volúmenes independientemente de los cambios en la escala de medida, por lo que es una propiedad



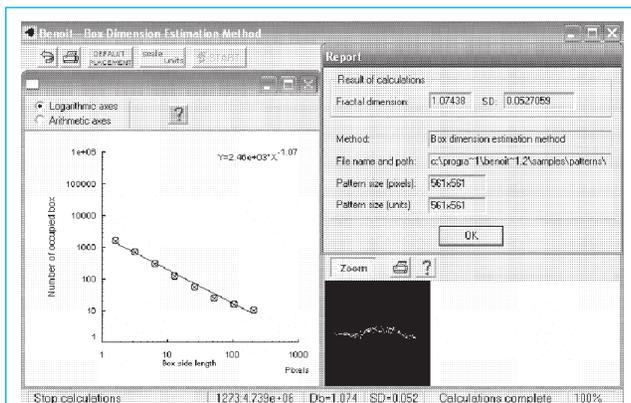
a) seis meses de exposición



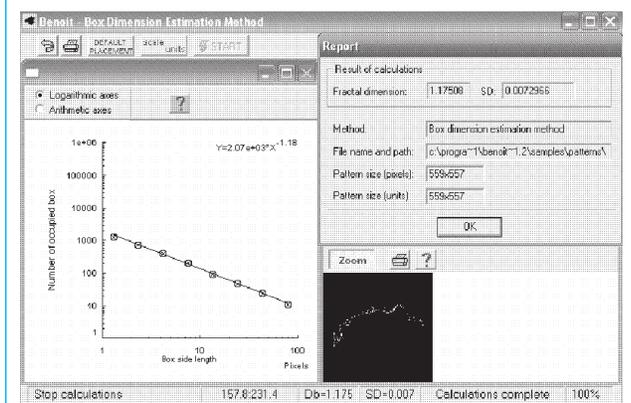
b) doce meses de exposición

Fig. 13. Agrietamiento de los productos de corrosión en la aleación.

intensiva [15]. De acuerdo con esta definición, las dimensiones fractales calculadas para cada caso cuantificaron el espacio que ocupó el agrietamiento por productos de corrosión desarrollados en la aleación. Por medio de la figura 13 se comparó el agrietamiento para los dos casos en que fue analizado el valor de D_{θ} . Este efecto se apreció con las fotografías tomadas en el MEB de las zonas de corrosión que dieron origen a la fractura durante el ensayo de tensión de las probetas, empleando el mismo número de aumentos (500 aumentos, X500 en las fotografías de la figura 13). Por lo tanto, la dimensión fractal calculada tuvo relación con el grado de agrietamiento y los periodos de exposición de la aleación. La dimensión fractal a los 12 meses aumentó con respecto a la de seis meses.



a) seis meses de exposición



b) doce meses de exposición

Fig. 14. Cálculo de D_{0° utilizando el programa Benoit 1.2.

El cálculo de D_{0° para cada caso de grieta, se corroboró utilizando el programa Benoit 1.2. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 14.

El valor de D_{0° a los seis meses, obtenido del programa, fue de 1.07438, y para la probeta con 12 meses de 1.17508. La figura 15 muestra la aproximación entre el método de conteo de cajas y el programa Benoit 1.2.

El porcentaje de error relativo ($\%E_{rel}$) que resultó al calcular la dimensión fractal con el método de conteo de cajas y el programa Benoit 1.2 para la probeta que duró seis meses expuesta al medio, es de:

$$\%E_{rel} = \left(\frac{1.07438 - 1.0730}{1.07438} \right) 100 = 0.1284 \approx 0.13\% \quad (11)$$

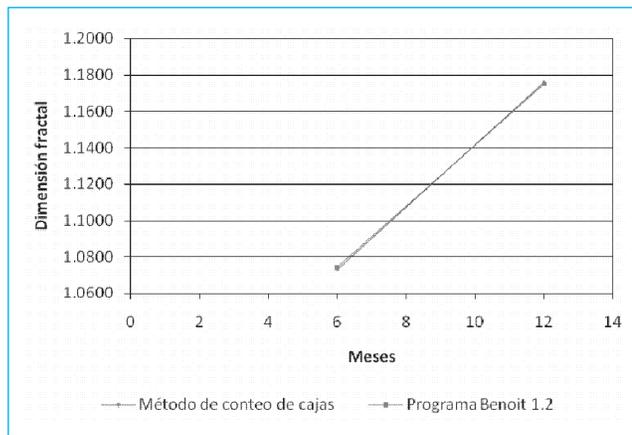


Fig. 15. Aproximación de cálculo de D_{0° utilizando el método de conteo de cajas y el programa Benoit 1.2.

$$\%E_{rel} = \left(\frac{1.1758 - 1.17508}{1.1758} \right) 100 = 0.0612 \approx 0.06\% \quad (12)$$

4.10. Microanálisis por espectrometría de rayos X

En el espectro mostrado en la figura 16 se ilustran los elementos por separado, los cuales, dentro del ambiente en el que se encuentran, al reaccionar forman los compuestos que dieron origen al desarrollo de picaduras en la aleación y por tanto la presencia de la corrosión en el metal, que redujo la ductilidad del mismo.

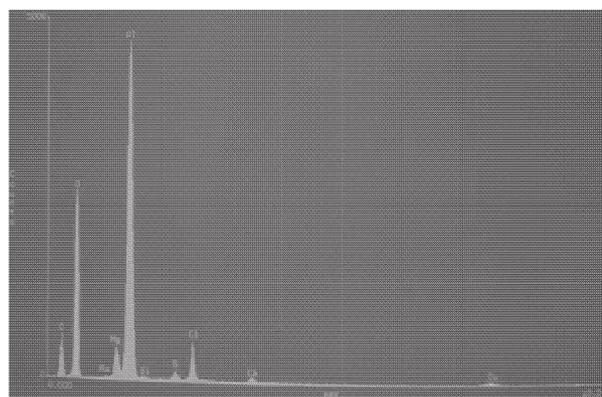


Fig. 16. Distribución de frecuencias de los elementos químicos en la aleación debido a la interacción con el ambiente.

Tabla 7. Porcentaje de pesos de cada componente detectado en el microanálisis.

Al	Si	Cu	Mg	O	S
50.65%	0.54%	0.93%	3.99%	28.24%	2.10%
Ca	C	Cl	Na	Total	
1.67%	7.39%	4.35%	0.14%	100%	

La tabla 7 muestra el porcentaje en peso de los elementos detectados en el análisis espectral.

5. Conclusiones

Durante la exposición de las probetas al medio

- Debido a la interacción que tuvo la aleación con el tipo de ambiente al que fue expuesta, se originaron productos de corrosión en la misma que cambiaron el mecanismo de falla en las probetas que fueron ensayadas a tensión.

Durante los ensayos de tensión

- La presencia de corrosión, producto de la interacción de las probetas con el ambiente, es el medio por el cual se inicia la fractura durante el ensayo de tensión. Las probetas que fueron expuestas por seis y 12 meses tienen concentraciones de esfuerzos considerables en las zonas donde se desarrollaron productos de corrosión. Esto se pudo observar en los ensayos de tensión hechos en el laboratorio ya que la falla se presentó en esas zonas.
- Se observó que el esfuerzo de cedencia del material para la probeta virgen y para las probetas con distintos periodos de exposición, no tuvo variaciones considerables. El orden de éstas se pudo ver con claridad en los resultados obtenidos y mostrados en la tabla 2. Por lo tanto, prácticamente el esfuerzo de cedencia del material se conservó (es viable realizar más ensayos para obtener resultados más representativos como lo establece la norma).
- La presencia de corrosión localizada en el aluminio estructural 6063-T5 debido a la interacción con el ambiente marino disminuyó las propiedades de ductilidad de las probetas elaboradas. El orden de variación de la ductilidad se observó al cuantificarla por medio de los distintos cálculos que se elaboraron. Se utilizó el concepto de tenacidad (U_T), porcentaje de elongación (*Elongación*, %) y medida de la ductilidad (μ). De estos valores calculados, se obtuvo el factor de daño ambiental por corrosión marina, el cual se puede ver en la tabla 5 que muestra el concentrado de los valores de este factor calculados. La figura 10 muestra gráficamente el

valor obtenido de estos factores. La presencia de moléculas de hidrógeno existente en el ambiente es el motivo por el cual la aleación disminuye sus propiedades de ductilidad. Este fenómeno se denomina fragilización por hidrógeno.

Durante el análisis fractográfico

- La interacción que se presentó entre el ambiente y la aleación, dio lugar a que el material se fragilizara en las zonas en donde se desarrolló corrosión de manera puntual, dando lugar a la iniciación de las fallas.
- Las fallas de tipo frágil que se presentaron en las zonas de picadura, de acuerdo al análisis, se dieron de manera intergranular. Los resultados del análisis fractográfico realizado mostraron que la superficie de falla de la probeta presenta un comportamiento típico de falla intergranular.

Cálculo de la dimensión fractal

- La dimensión fractal obtenida a los seis meses de exposición es menor con relación a la de 12 meses, lo cual indicó que el tiempo de exposición es directamente proporcional al agrietamiento originado en los productos de corrosión. De las observaciones hechas en el MEB se pudo ver que la superficie de agrietamiento es menor a los seis meses de exposición que a los doce meses.

6. Referencias

- [1] Mandelbrot, B. B., Passoja, D. E. and Paullay, A. J. 1984. *Fractal Character of Fracture Surfaces of Metal*. Ed. Nature 308. France.
- [2] Urriolagoitia-Calderón, G. y Hernández-Gómez, L. H. 1997. "Experimental Analysis of Crack Propagation Stability in Single Edge Notch Specimens". *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 28, 57-68.
- [3] Hernández-Gómez, L. H., Saucedo Meza, I., Urriolagoitia-Calderón, G., Balankin, A. S. y Susarrey, O. 2004. "Evaluation of Crack Initiation Angle under Mixed Mode Loading at Diverse Strain Rates". *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 42, 53-61.
- [4] Balankin, A. S., Urriolagoitia Calderón, G., Hernández Gómez, L. H., Susarrey Huerta, O., González, J. M. y Martínez Trinidad, J. 1999. "Probabilistic Mechanics of Self-Affine Cracks in Paper Sheets". *Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. The Royal Society London A 455, 2565-2575.
- [5] Balankin, A. S., Susarrey-Huerta, O., Urriolagoitia-Calderón, G. y Hernández-Gómez, L. H. 2002. *Physics Letters A* 297, 376-386.
- [6] Urriolagoitia-Calderón, G., Hernández-Gómez, L.H., Villay-Rabasa, G., Urriolagoitia-Sosa, G., Medina-Velarde, J. L.,

- Vázquez-Mendoza, H. H. y León-Vega, C. 1997. "Solución conceptual del comportamiento de una probeta agrietada sometida a cargas de fatiga para determinar su remanente". *Científica*, Año 1, núm. 5, pp 39-42.
- [7] Urriolagoitia Sosa, G. 2005. *Analysis of Prior-Strain History Effect on Mechanical Properties and Residual Stresses in Beams*. Ph. D. Thesis, Oxford Brookes University.
- [8] www.economia-nmx.gob.mx/. 14/11/2005.
- [9] ASTM Standards. 2000. "Aluminium and magnesium alloys". *Annual book of ASTM Standards*. vol. 02.02. United States of America.
- [10] www.matweb.com. 08/03/2007.
- [11] www.materiales.cia.edu.co/laboratorios/tracción/tenacidad.htm. 06/11/2007.
- [12] www.arcer.es/prestaciones/ductilidad.asp. 06/10/2007.
- [13] es.wikipedia.org/wiki/Ductilidad. 06/10/2007.

DIGITAL DOT

SERVICIOS

DIGITALES

ELECTRÓNICOS

INTEGRALES

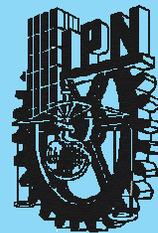
Producción y posproducción
en audio y video

Centenario 3, Col. Del Carmen,
Coyoacán, México, DF.

5339 5880

5339 5474

Científica



**Es una revista trimestral que ha
cumplido 11 años de publicación
sin interrupciones.**

**Se distribuyen en el ámbito nacional aproximadamente
600 ejemplares en universidades, instituciones
y centros de investigación públicas
y 150 revistas en instituciones
educativas privadas.**

**Hacemos llegar
más de 100 ejemplares a
diferentes industrias de la república.**

**Enviamos también de manera constante a instituciones
de Estados Unidos, Japón, Argentina, Chile, Cuba,
España, Rumania.**