

Comportamiento mecánico en especímenes de acero estructural expuestos a una condición marina (Parte II: materiales no ferrosos)¹

Zamora-García M. A.
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: fcasanova@ipn.mx

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

1. Resumen

En el presente trabajo de investigación se realizó un ensaye a tensión a probetas de acero estructural A36 que fueron expuestas a corrosión marina durante seis meses y 12 meses. La prueba se detuvo antes de llegar a la ruptura, es decir, a la formación del cuello. Una vez llevado a cabo el ensaye a tensión, se obtuvo la curva esfuerzo-deformación para cada probeta con el propósito de obtener la ductilidad del material. Se observó que hubo pérdida de ductilidad para la probeta expuesta a seis meses en un 11.96% con respecto a la probeta virgen y, para 12 meses, de 43.87% lo cual indica que el material se fragilizó. La pérdida de ductilidad se debe a la presencia por hidrógeno, el cual fue absorbido e introducido en el interior del acero provocando separación de bordes de grano. Al adquirir la ductilidad para cada probeta de acero expuesta al mar, se obtuvo un factor con respecto al tiempo de la relación de la probeta expuesta y la probeta virgen lo cual indica pérdida de ductilidad del acero. Por otra parte, se obtuvo la dimensión fractal para la probeta de seis meses: 1.343 y para la de 12 meses: 1.3958 lo cual indica que hubo mayor irregularidad del material debido a productos de corrosión.

Palabras clave: ductilidad, tenacidad, fractografía, autosimilitud, irregularidad y fractal.

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

2. Abstract (Mechanical Behavior in Specimens of Structural Steel Exposed to a Marina Condition)

In the present research work it was realized a mechanical strength test of the A36 steel which was exposed to marine corrosion during six months and 12 months. The test was stopped before reaching the break, namely formation of the plastic neck. After finishing the tension test, the stress-strain curve was obtained for each specimen with the purpose of obtaining the ductility of the material. It was observed that there was loss of ductility for the test exposed to six months (11.96%) to respect compared to the test tube reference, and for 12 months, of 43.87% which indicates that the material reduces its stress capability and was weakened. The loss of ductility is due to the presence of hydrogen, which was absorbed and introduced into the steel causing separation of edges grain. Getting the ductility for each test tube of steel exposed to the sea, was obtained a ductility factor between the time exposed of test tube and the reference test tube, which indicate the loss of the ductility of steel in the time. Moreover the fractal dimension was obtained for the test tube of six months: 1.343 and for the 12 months 1.3958 indicating that there was greater irregularity of the material due to products of corrosion.

Key words: ductility, tenacity, fractography, self similarity, irregularity and fractal.

3. Introducción

La fractura de los materiales es una de las causas más importantes de pérdidas económicas en las sociedades industrializadas.

La falla o ruptura de elementos estructurales abarca un conjunto de niveles o escalas, el cual se relaciona con el tamaño de las partes de esos elementos. La predicción y evaluación de las consecuencias de fallas o rupturas catastróficas, así como también el desarrollo de medidas para su prevención, requiere de descripciones cualitativas y cuantitativas de las mismas, que tomen en cuenta la naturaleza de las interacciones que las producen y las propiedades de los materiales en los cuales se presentan [1].

Las estructuras construidas en acero estructural que están en contacto directo o indirecto con el agua del mar, tales como:

barcos, instalaciones portuarias o plataformas de extracción de crudo entre otros, sufren el riesgo del ataque de corrosión por picadura, ya que es un problema constante en la vida diaria para las edificaciones, provocando pérdida de resistencia del material y posteriormente llevándolas al colapso. Por eso es importante estudiar la superficie de fractura del material con la ayuda del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) con la finalidad de conocer el origen del mecanismo de propagación de la fisura, medio químico y origen de fractura que es ocasionada por el ambiente corrosivo. Una vez obtenida la fractografía de la superficie de fractura por el MEB, se puede calcular la dimensión fractal con el propósito de conocer qué tan agrietada se encuentra la superficie de fractura del material en estudio.

La superficie de los materiales depende mucho de sus propiedades, por ejemplo: adhesión, fricción, desgaste, permeabilidad, etcétera. En efecto, son las superficies que están en contacto con el medio ambiente, y por mucho son las interacciones existentes entre ambas las responsables del comportamiento de los materiales. La información que se puede extraer de la superficie se puede relacionar con la microestructura, y de ahí con las propiedades mecánicas del material.

En el caso particular de la fractura de superficies, el análisis de la misma se realiza normalmente mediante la metalografía, la cual puede proporcionar, entre otras cosas, el origen de la fractura, la dirección de la propagación y el tipo de carga que la causó. M. Ipohorski realizó la fractografía utilizando una combinación de su experiencia y patrones de referencia (fractogramas) para identificar las características más sobresalientes de la superficie de fractura [2]. Cuando la fractura no se ajusta a un patrón reconocido, el proceso de análisis puede ser muy difícil y alternamente subjetivo.

La *geometría fractal*, llamada también *geometría de la naturaleza*, es un conjunto de estructuras irregulares y complejas descritas a través de algoritmos matemáticos y computacionales; los cuales reemplazan a los puntos, rectas, circunferencias y demás figuras provenientes de la matemática tradicional. Estos objetos tienen como característica fundamental las propiedades de autosimilitud y la de convivir en extraños paisajes formados por dimensiones fraccionarias. Los fractales son objetos irregulares, rugosos, porosos o fragmentados y que además poseen estas mismas propiedades al mismo grado en todas las escalas, es decir, estos objetos presentan la misma forma si son vistos de lejos o de cerca.

Mandelbrot desarrolló una nueva geometría que permite el estudio de las formas naturales, identificando una familia de formas demasiado irregulares para ser descritas mediante la geometría euclidiana, a las que llamó fractales [3]. Mandelbrot exploró cuantitativamente por primera vez el carácter fractal de

las superficies de fractura sometidas a diferentes tratamientos térmicos, y reportó una correlación entre la dimensión fractal y la tenacidad de la fractura, propiedad que fue estimada mediante la energía de impacto [4]. Estos resultados, aunque fueron cuestionados posteriormente, iniciaron una nueva era en las disciplinas de la fractografía. Desde entonces, el análisis de la autoafinidad de la superficie de fractura representa un campo de investigación muy activo, que se ha enriquecido con el desarrollo de modernos y sofisticados métodos estadísticos y matemáticos.

Existen diversos métodos para analizar la autoafinidad de las superficies de fractura. La mayor parte de ellos emplean perfiles extraídos de las superficies a través del uso de una técnica experimental [5].

Posteriores experimentos de E. Bouchaud más refinados en una variedad de materiales, no pudieron confirmar tal correlación entre la dimensión fractal y las propiedades mecánicas. Se estableció que el exponente de rugosidad es un parámetro más apropiado para describir las superficies de fracturas en condiciones cinéticas rápidas y analizadas principalmente mediante el MEB [6]. Bouchaud propuso la idea de un exponente de rugosidad universal, $\zeta = 0.78$, independientemente de la microestructura y las propiedades [7]. Esta universalidad fue seriamente cuestionada por el descubrimiento de otro régimen autoafín caracterizado por un exponente de rugosidad $\zeta = 0.5$ para las superficies de fractura generadas en condiciones lentas de propagación de grietas o analizadas en escalas manométricas empleando el microscopio de fuerza atómica (MFA) o de voltaje. Recientemente se ha reportado la coexistencia de ambos regímenes en distintos materiales, véase la referencia [8]. Estos regímenes se cruzan en una llamada longitud de quiebre, que parece ser dependiente de las condiciones cinéticas. P. Daguerre y B. Nghiem han realizado intentos por relacionar esta longitud de quiebre con los parámetros microestructurales de algunos materiales [9].

Hinojosa demostró que la llamada longitud-correlación está estrechamente relacionada con el tamaño de grano en superaleaciones de níquel [10]. Este resultado apoya la idea de que el frente de grieta, visualizado como una línea, interactúa con los diferentes obstáculos presentes en la microestructura y de esta manera las mayores heterogeneidades son las que deben de determinar la longitud de correlación.

O. A. Hilders y N.D. Peña de la escuela de Ingeniería Metalúrgica en Venezuela, investigaron el efecto del tiempo de envejecimiento a 850°C, en la morfología de fractura y en las relaciones entre las propiedades mecánicas y las características fractales del acero AISI 304, mediante el método de las islas y análisis de imágenes. También fue estudiada, mediante un modelo fractal, la relación entre la deformación y

el número de fragmentaciones correspondientes a la formación de martensita en un acero de transformación inducida por plasticidad, deformado entre -60°C y 25°C . Para el acero 304, la relación entre tenacidad de fractura y la dimensión fractal se expresó a través de una relación lineal semilogarítmica, la cual explica la transición dúctil-frágil en función de la variación del tamaño de cavidad en la zona fibrosa de las superficies de fractura [11].

El desarrollo del presente trabajo de investigación nace como resultado de observar la corrosión en estructuras expuestas al contacto directo e indirecto con el mar, ya que es un fenómeno muy constante en la vida cotidiana provocando pérdida de resistencia y posteriormente llevándolas al colapso.

Se debe tomar en cuenta que el proceso de fractura depende de condiciones externas, tal como la geometría del componente agrietado y condiciones de carga y frontera, así como de aspectos intrínsecos de material [12]. Asimismo, es posible determinar las posibles direcciones de inicio de propagación de una grieta, tanto en condiciones estáticas como dinámicas [13, 14, 15]. En todos estos casos, la mecánica de fractura hace una evaluación promedio de factores mediante parámetros representativos, el factor de intensidad de esfuerzos, los coeficientes de la serie de Williams o la densidad de energía, entre otros. Sin embargo, se debe recurrir a la mesomécánica para tener un mejor entendimiento del comportamiento del material a diversas condiciones de trabajo. En este terreno, la mecánica fractal ha servido para la caracterización de diversos tipos de materiales. En este caso, se propone seguir las ideas sugeridas en [16], la cual ha sido probada su aplicación también en la caracterización dinámica de materiales [17].

Es importante conocer la ductilidad y tenacidad del material expuesto a corrosión marina con la finalidad de determinar qué tanto se fragiliza el acero ante este tipo de fenómeno, por consiguiente es necesario obtener un coeficiente de ductilidad con respecto al tiempo de envejecimiento de las probetas.

Para conocer la irregularidad del acero por productos de corrosión es necesario calcular la dimensión fractal.

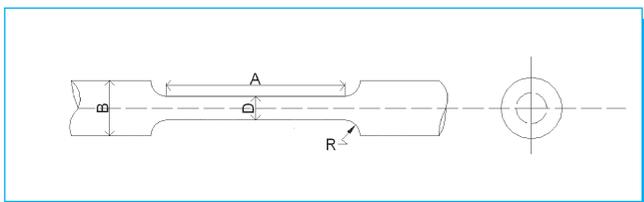


Fig. 1. Proporciones de la probeta a emplear en laboratorio.

Tabla 1. Se muestran las dimensiones de la probeta a utilizar según la norma [18].

| Diámetro nominal (B) | Diámetro en sección reducida (D) | Radio de la zona de transición (R) | Longitud de la sección reducida (A) |
|----------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 12.0 mm | 8.89 mm | 6.35 mm | 58.0 mm |
| ± 0.1 mm | ± 0.17 mm | ± 0.10 mm | ± 0.1 mm |

4. Desarrollo

4.1. Dimensionamiento de las probetas a emplear en la prueba

De acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM E8-01 [18] y cumpliendo con dichos parámetros (relaciones geométricas entre longitud, ancho y alto), en la figura 1 se muestra el tipo de probeta utilizada.

4.2. Elaboración de muestras y material utilizado

A partir de la definición de las dimensiones, según las especificaciones del ASTM, tabla 1, se elaboraron las probetas en acero estructural A36, cuya composición química fue: C = 0.29 máx., Mn = 1.20, Si = 0.40 máx., P = 0.40 máx., S = 0.05 máx.

4.3. Especímenes expuestos a corrosión marina

Realizado el proceso de elaboración de las probetas, el material se envolvió en una red y se ató de los extremos, como se muestra en la figura 2. El cual los especímenes permanecieron sumergidos en las costas de Mazatlán, Sinaloa durante seis meses y doce meses. Este periodo se tomó con base en los estudios realizados por Cortés y Villanueva [19].



Fig. 2. Material expuesto a corrosión marina.

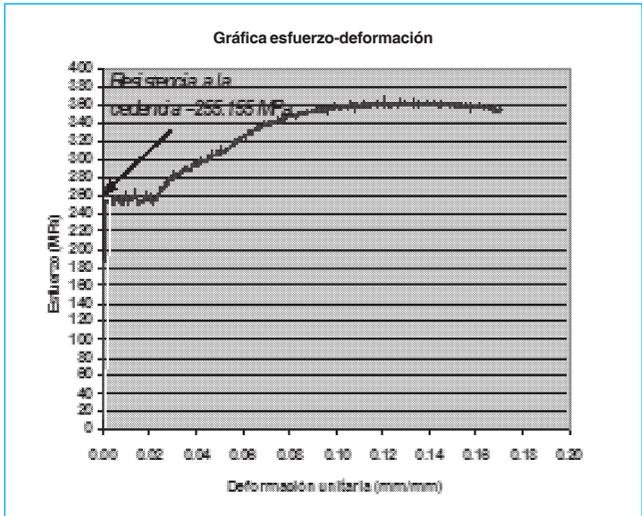


Fig. 3. Resistencia a la cedencia para la probeta virgen.

4.4 Ensayo de pruebas de laboratorio

Los ensayos a tensión se realizaron en una máquina universal de pruebas mecánicas marca *Instron*, modelo 8502, Serie núm. C0285, capacidad de 250 kN. Se empleó un extensómetro con longitud calibrada de 50 mm tipo estático. Las condiciones del ensayo fueron: velocidad de prueba; 0.60 mm/min., frecuencia de muestreo; 5.0 puntos/s. Con dirección del ensayo a tensión.

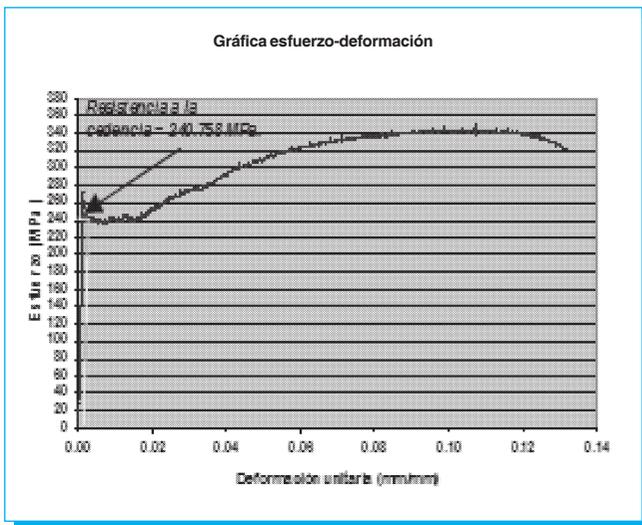


Fig. 4. Resistencia a la cedencia para la probeta expuesta a seis meses.

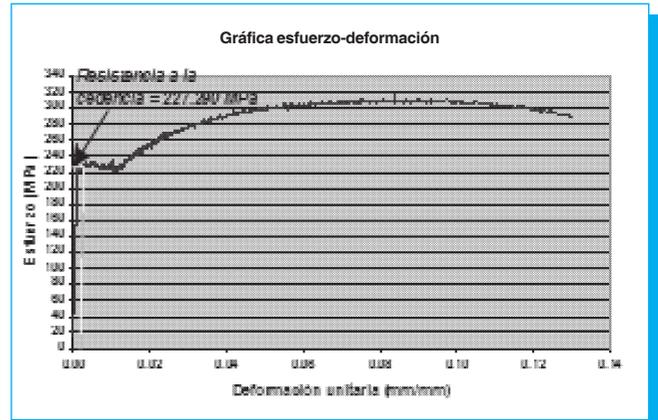


Fig. 5. Resistencia a la cedencia para la probeta de un año.

Los ensayos de tracción para el acero estructural A36 fueron con tres tipos de muestra, tomando en cuenta el material base y otras dos fueron sometidas a corrosión marina durante periodos de envejecimiento de seis meses y un año.

5. Análisis de resultados

5.1 Obtención del esfuerzo de cedencia del material

El esfuerzo de cedencia es el que divide el comportamiento elástico y plástico del material. En este caso se determina un esfuerzo de cedencia convencional. Se traza una línea paralela a la porción inicial de la curva de esfuerzo-deformación unitaria, pero desplazada 0.002 mm/mm (0.2 % del origen) y que cruce la curva del diagrama. El punto de intersección corresponderá al punto de cedencia, este procedimiento es de acuerdo como lo establece la norma ASTM E8-01. En las figuras 3, 4 y 5 se muestra el esfuerzo de cedencia tanto como para la probeta virgen como para las probetas expuestas a seis meses y un año.

5.2 Resultados de las propiedades mecánicas del acero estructural A36

En la tabla 2 se muestran los resultados de las propiedades mecánicas del acero de acuerdo al ensayo a tensión. La probeta virgen del acero estructural A36 es muy similar de acuerdo a la página web <http://www.matweb.com>.

5.3 Cálculo de la tenacidad y ductilidad del material para cada tiempo de exposición del material

La tenacidad de un material significa la resistencia a la ruptura al estar sometido a la tensión. Para poder calcular la tenacidad

Tabla 2. Propiedades mecánicas del ensaye a tensión.

| Material | Esfuerzo de cedencia (fy) | Módulo de elasticidad (E) | Esfuerzo máximo |
|--|---------------------------|---------------------------|-----------------|
| Acero estructural A36 | | | |
| Probeta virgen A36 | 255.599 MPa | 205317.7228 MPa | 369.185 MPa |
| A36 página Web http://www.matweb.com | 250.000 MPa | 200000.000 MPa | 370.000 MPa |
| A36 expuesto durante seis meses al mar | 238.676 MPa | 202474.231 MPa | 351.502 MPa |
| A36 expuesto durante un año al mar | 226.240 MPa | 198716.219 MPa | 315.883 MPa |

de la probeta virgen se tomó la gráfica esfuerzo-deformación unitaria obtenida de la prueba de tensión. Posteriormente, se calculó el área bajo la curva tomando en cuenta los puntos del esfuerzo de fluencia (ϵ_y) y el esfuerzo máximo ($\epsilon_{máx}$). En la curva de esfuerzo-deformación se traza una línea de tendencia que se ajuste lo más posible a la curva para obtener la ecuación de esa función obtenida con la ayuda del Exel 2003, la cual en este caso se adquirió un polinomio de orden seis.

Las figuras 6, 7 y 8 muestran la obtención de la función y se integra para poder calcular la tenacidad tanto para la probeta virgen, seis meses y doce meses.

$$y = 1051364298.03x^6 - 416278385.28x^5 + 66102803.62x^4 - 5438740.48x^3 + 237124.38x^2 - 3410.77x$$

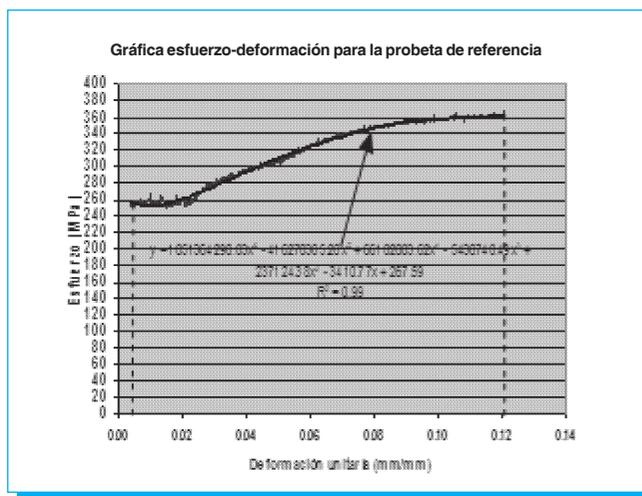


Fig. 6. Obtención de la función para la probeta de referencia.

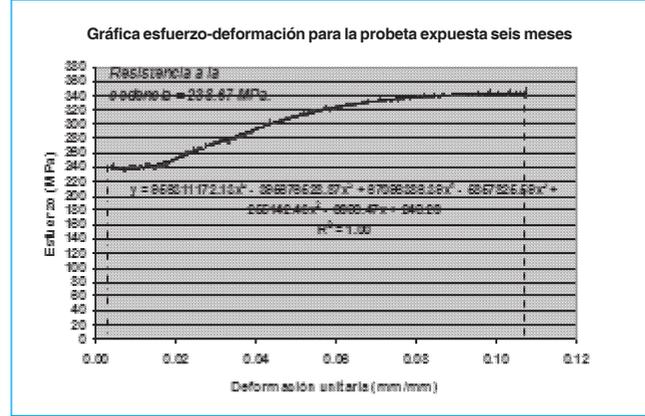


Fig. 7. Obtención de la función para la probeta expuesta a seis meses.

$$y = \int_{0.00396}^{0.127} (1051364298.03x^6 - 416278385.28x^5 + 66102803.62x^4 - 5438740.48x^3 + 237124.38x^2 - 3410.77x + 267.59) dx$$

$$U_T = 37.033 \text{ Mpa}$$

$$y = 956311172.13x^6 - 39567628.87x^5 + 67096386.39x^4 - 5857825.59x^3 + 255142.43x^2 - 3096.47x + 249.20$$

$$y = \int_{0.00395}^{0.1075} (956311172.13x^6 - 39567628.87x^5 + 67096386.39x^4 - 5857825.59x^3 + 255142.43x^2 - 3096.47x + 249.20) dx$$

$$U_T = 27.255 \text{ Mpa}$$

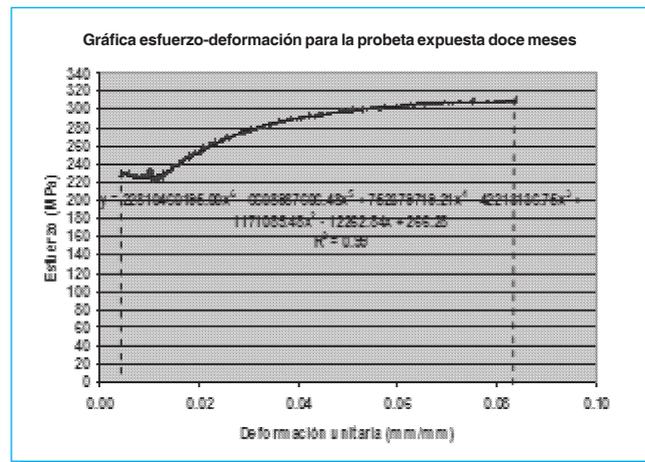


Fig. 8. Obtención de la función para la probeta expuesta a doce meses.

$$y = 22810460195x^6 - 6608987606.48x^5 + 752379719.21x^4 - 42213136.75x^3 + 1171085.48x^2 - 12262.84x + 266.28$$

$$y = \int_{0.00396}^{0.08371} (22810460195x^6 - 6608987606.48x^5 + 752379719.21x^4 - 42213136.75x^3 + 1171085.48x^2 - 12262.84x + 266.28) dx$$

$$U_T = 22.50 \text{ Mpa}$$

La ductilidad del acero es la capacidad que tiene éste para absorber energía antes de llegar a la rotura. Para medir la ductilidad existen varios parámetros, entre los cuales destacan los siguientes:

- relación entre la deformación máxima unitaria y la deformación de fluencia ($\epsilon_{\text{máx}}/\epsilon_y$),
- alargamiento bajo carga máxima, $\epsilon_{\text{máx}}$ (%), y
- alargamiento de rotura ϵ_u (%).

Se obtuvo la ductilidad para el acero estructural A36 para la probeta de referencia, seis meses y 12 meses expuestos en el mar, utilizando la relación entre la deformación máxima ($\epsilon_{\text{máx}}$) y la deformación de fluencia (ϵ_y), como se indica en la fórmula 1:

$$\mu = \frac{\epsilon_{\text{máx}}}{\epsilon_y} \quad (1)$$

En la tabla 3 se presentan los resultados de ductilidad y tenacidad del material para la probeta en estudio.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la tabla 3, se grafica la ductilidad y tenacidad del material con respecto al tiempo de exposición, como se presenta en la figura 9. De los resultados obtenidos en la tabla 3, el acero presenta pérdida

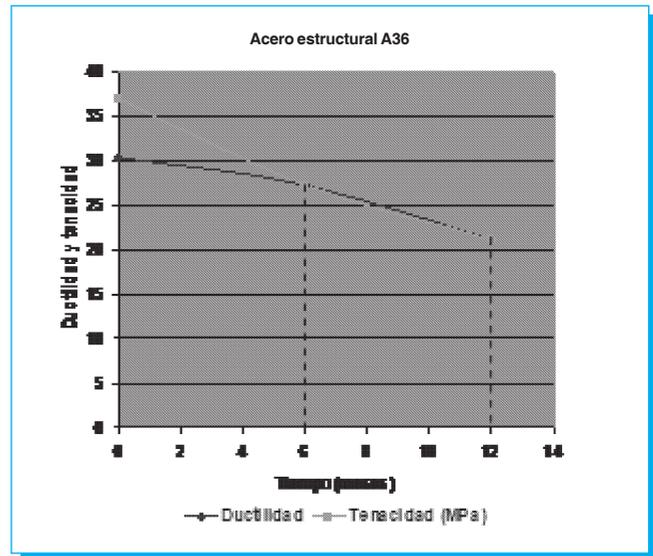


Fig. 9. Obtención de la función para la probeta expuesta a 12 meses.

de ductilidad debido al tiempo de exposición. Esto se debe a que el material presenta picaduras y corrosión uniforme en la probeta.

A través del resultado obtenido de la ductilidad, se calculó un factor de acuerdo a la relación de la probeta expuesta (μ_p) y la probeta de referencia (μ_{PR}), como lo indica la fórmula 2:

$$F\mu = \frac{\mu_p}{\mu_{PR}} \quad (2)$$

En la tabla 4 se muestra el coeficiente de ductilidad para el acero estructural, de acuerdo al tiempo de exposición.

Tabla 3. Ductilidad y tenacidad del acero.

| Acero estructural A36 | Ductilidad (μ) | Tenacidad (MPa) |
|-----------------------|----------------|-----------------|
| Probeta de referencia | 30.482 | 37.033 |
| Expuesta 6 meses | 27.225 | 31.568 |
| Expuesta 12 meses | 21.192 | 22.500 |

Tabla 4. Factor de ductilidad.

| Acero estructural A36 | Tiempo (meses) | Ductilidad (μ) | Factor de ductilidad |
|-----------------------|----------------|----------------|----------------------|
| Probeta virgen | 0 | 30.482 | 1.0000 |
| Expuesta 6 meses | 6 | 27.225 | 0.8931 |
| Expuesta 12 meses | 12 | 21.192 | 0.6950 |

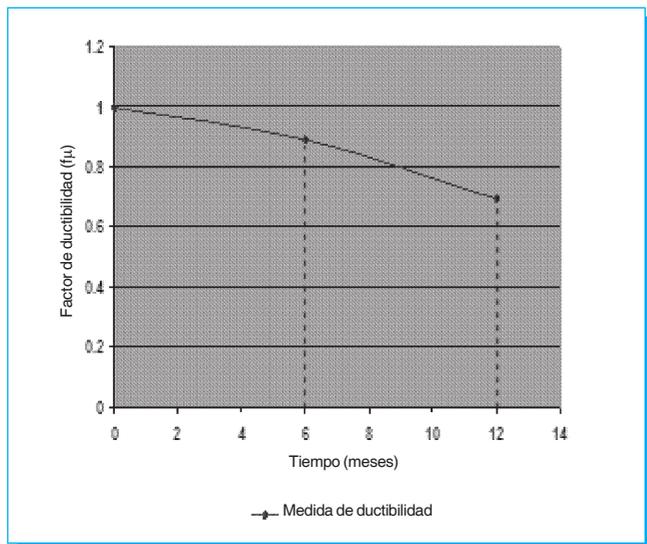


Fig. 10. Factor de ductilidad con relación al tiempo de exposición de la probeta expuesta al mar.

La figura 10 muestra el factor de ductilidad ($F\mu$) de acuerdo al tiempo de exposición expresado en meses. Esto indica que puede utilizarse como un factor de pérdida de ductilidad para el acero estructural de acuerdo a las condiciones que estuvo expuesto.

5.4 Cálculo de la dimensión fractal de la grieta para la probeta de seis meses

Para llevar a cabo el cálculo de la dimensión fractal para las grietas generadas en las probetas expuestas a corrosión marina; tanto para la de seis meses y doce meses, se utilizó el método de conteo de cajas, el cual se aplica a fractales fragmentados o cuando éstos se han generado por procesos naturales. La grieta original se rotó a diferentes grados para así poder determinar de manera más confiable la dimensión fractal, D_f . El proceso realizado fue: primero se eligió una fotografía, como se muestra en la figura 11, para la probeta de seis meses. Así, la imagen se exportó a un programa en el cual se pudiera digitalizar el contorno de la grieta, AutoCad 2005, y de esta forma poder trabajar con mayor exactitud sobre ella. Una vez digitalizada la imagen se realizaron las mallas necesarias para el cálculo de la dimensión fractal.

A partir de lo anterior, se realizaron los cálculos aplicando el método de conteo de cajas. Se graficaron los resultados, en la tabla 5, donde N es el número de cajas intersectadas por la curva fractal, D_{θ° es la dimensión fractal, L es la longitud del objeto y l es la longitud de cada segmento, por lo que el cociente de L/l significa el número de subdivisiones que contiene cada lado de la malla.

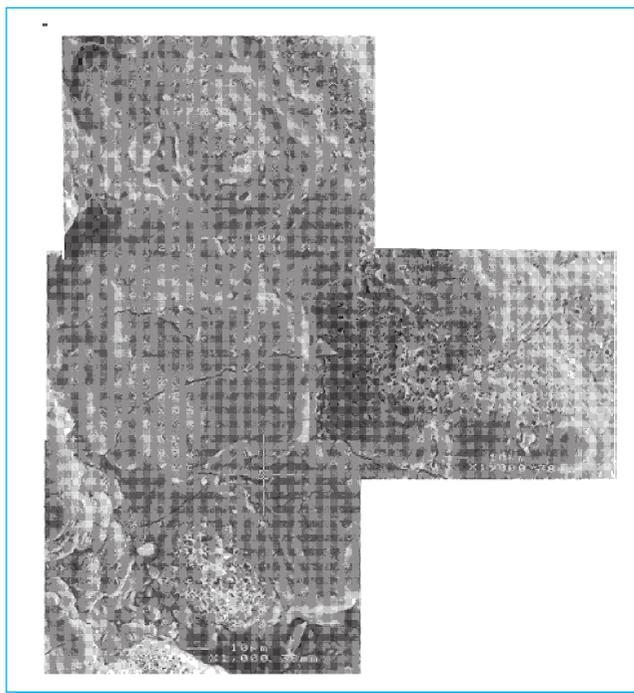


Fig. 11. Comportamiento fractal de la grieta para la probeta de seis meses.

Para obtener la dimensión fractal de acuerdo a los valores obtenidos en la tabla 5, se calculó una línea de tendencia y se

Tabla 5. Dimensión fractal para cada rotación de la grieta de la probeta de seis meses.

| Con rotación de 0° | | | | Con rotación de 45° | | | |
|----------------------------------|---------|-----|----------|-----------------------------------|---------|-----|----------|
| N | Log(N) | L/l | Log(L/l) | N | Log(N) | L/l | Log(L/l) |
| 4 | 0.60206 | 2 | 0.30103 | 4 | 0.60206 | 2 | 0.30103 |
| 13 | 1.11394 | 4 | 0.60206 | 13 | 1.14613 | 4 | 0.60206 |
| 16 | 1.20412 | 5 | 0.69897 | 16 | 1.17609 | 5 | 0.69897 |
| 39 | 1.59106 | 10 | 1 | 39 | 1.59106 | 10 | 1 |
| 69 | 1.83885 | 15 | 1.17609 | 69 | 1.83251 | 15 | 1.17609 |
| 106 | 2.02530 | 20 | 1.30103 | 106 | 2.01703 | 20 | 1.30103 |
| 137 | 2.13672 | 25 | 1.39794 | 137 | 2.13354 | 25 | 1.39794 |
| 326 | 2.51322 | 50 | 1.69897 | 326 | 2.51188 | 50 | 1.69897 |
| D_{0°} = 1.34950 | | | | D_{45°} = 1.34290 | | | |
| Con rotación de 90° | | | | Con rotación de 135° | | | |
| N | Log(N) | L/l | Log(L/l) | N | Log(N) | L/l | Log(L/l) |
| 4 | 0.60206 | 2 | 0.30103 | 4 | 0.60206 | 2 | 0.30103 |
| 14 | 1.14613 | 4 | 0.60206 | 14 | 1.14613 | 4 | 0.60206 |
| 16 | 1.20412 | 5 | 0.69897 | 15 | 1.17609 | 5 | 0.69897 |
| 38 | 1.57978 | 10 | 1.00000 | 37 | 1.56820 | 10 | 1.00000 |
| 69 | 1.83885 | 15 | 1.17609 | 68 | 1.83251 | 15 | 1.17609 |
| 106 | 2.02531 | 20 | 1.30103 | 104 | 2.01703 | 20 | 1.30103 |
| 136 | 2.13354 | 25 | 1.39794 | 136 | 2.13354 | 25 | 1.39794 |
| 326 | 2.51322 | 50 | 1.69897 | 325 | 2.51188 | 50 | 1.69897 |
| D_{90°} = 1.33980 | | | | D_{135°} = 1.34320 | | | |

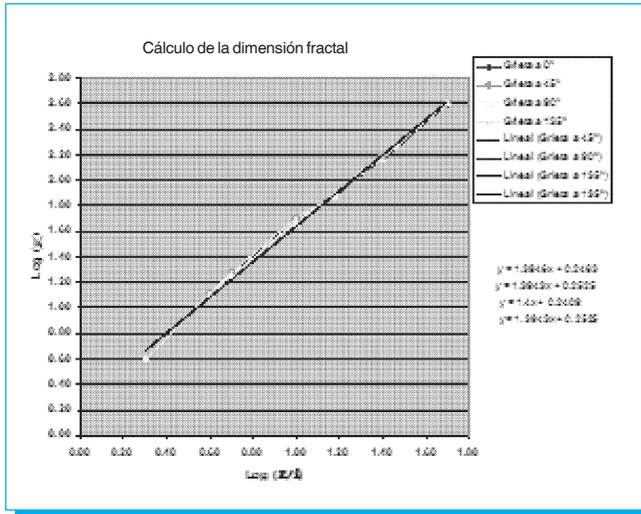


Fig. 12. Gráfica para el cálculo de la dimensión fractal.

extrapoló hacia atrás de donde se calculó su ecuación, y de esta manera se obtuvo su respectiva pendiente. La dimensión fractal de la grieta se muestra en la figura 12.

Para la obtención de la dimensión fractal D_f , se calculó un promedio de las dimensiones obtenidas en cada una de las cuatro rotaciones que se le han aplicado a la curva fractal, la dimensión fractal para una grieta en acero estructural A36 expuesta durante seis meses:

La dimensión fractal de la grietas, en acero estructural A36, tiene un valor de 1.34385.

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

$$= (1.34950 + 1.34290 + 1.33980 + 1.34320) / 4$$

$$= 1.34385$$

La figura 13 muestra el resultado de la dimensión fractal calculada en el programa *Benoit* a manera de comprobación. La dimensión fractal obtenida en el programa es $D_f = 1.34029$. Como se puede observar, el resultado es muy similar al que se obtuvo manualmente. La diferencia existente puede deberse a que el programa tiene una mayor exactitud en el conteo de cajas.

5.5 Cálculo de la dimensión fractal de la grieta para la probeta de un año

La figura 14 muestra la grieta digitalizada en AutoCad 2005 para la probeta de un año.

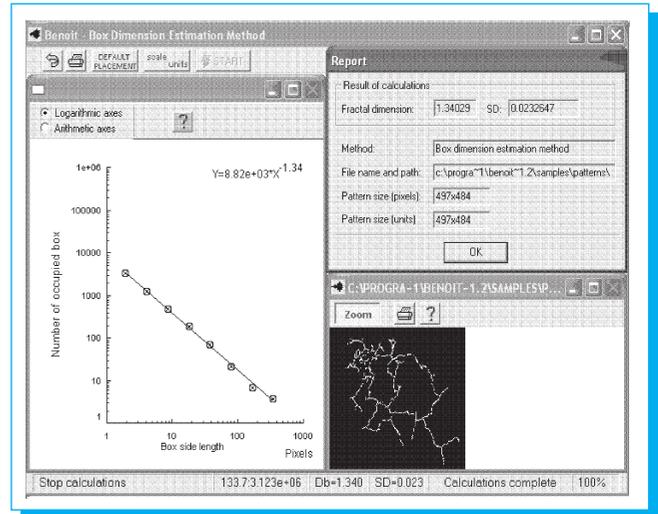


Fig. 13. Obtención de la dimensión fractal en el programa Benoit.

Es necesario mencionar que para la obtención de la dimensión fractal de la probeta de seis meses se llevó el mismo procedimiento de cálculo que para la probeta de un año.

La dimensión fractal para cada rotación de la grieta, para la probeta expuesta durante un año, se muestra en la tabla 6.

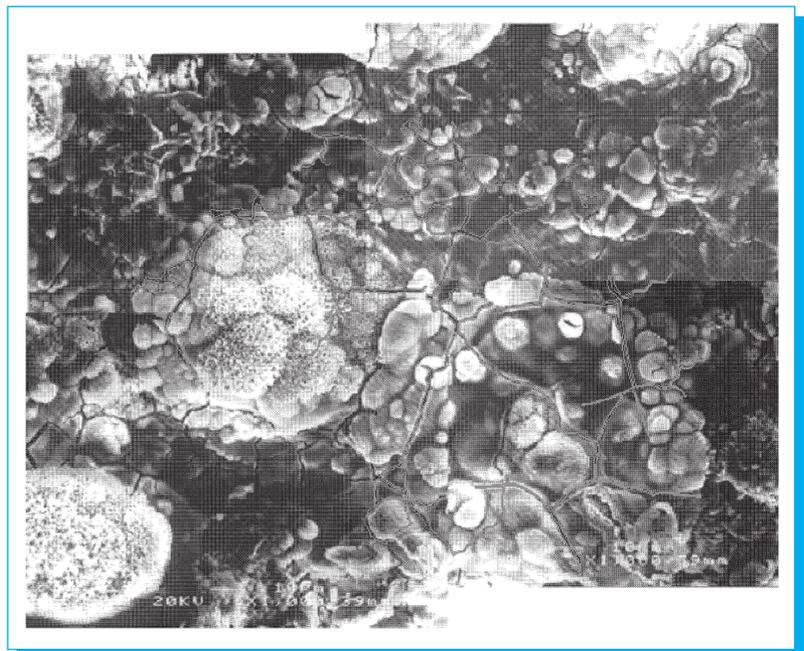


Fig. 14. Comportamiento fractal de la grieta para la probeta de un año.

Tabla 6. Dimensión fractal para cada rotación de la grieta.

| Con rotación de 0° | | | | Con rotación de 45° | | | |
|---------------------------------|---------|-----|----------|----------------------------------|---------|-----|----------|
| N | Log(N) | L/l | Log(L/l) | N | Log(N) | L/l | Log(L/l) |
| 4 | 0.60206 | 2 | 0.30103 | 4 | 0.60206 | 2 | 0.30103 |
| 13 | 1.11394 | 4 | 0.60206 | 13 | 1.11394 | 4 | 0.60206 |
| 18 | 1.25527 | 5 | 0.69897 | 19 | 1.27875 | 5 | 0.69897 |
| 50 | 1.69897 | 10 | 1.00000 | 50 | 1.69897 | 10 | 1.00000 |
| 75 | 1.87506 | 15 | 1.17609 | 76 | 1.88081 | 15 | 1.17609 |
| 114 | 2.05690 | 20 | 1.30103 | 116 | 2.06446 | 20 | 1.30103 |
| 147 | 2.16732 | 25 | 1.39794 | 150 | 2.17609 | 25 | 1.39794 |
| 401 | 2.60314 | 50 | 1.69897 | 402 | 2.60423 | 50 | 1.69897 |
| D_{0°} = 1.39460 | | | | D_{45°} = 1.39430 | | | |

| Con rotación de 90° | | | | Con rotación de 135° | | | |
|----------------------------------|---------|-----|----------|-----------------------------------|---------|-----|----------|
| N | Log(N) | L/l | Log(L/l) | N | Log(N) | L/l | Log(L/l) |
| 4 | 0.60206 | 2 | 0.30103 | 4 | 0.60206 | 2 | 0.30103 |
| 13 | 1.11394 | 4 | 0.60206 | 13 | 1.11394 | 4 | 0.60206 |
| 18 | 1.25527 | 5 | 0.69897 | 19 | 1.27875 | 5 | 0.69897 |
| 47 | 1.67210 | 10 | 1.00000 | 50 | 1.69897 | 10 | 1.00000 |
| 77 | 1.88649 | 15 | 1.17609 | 76 | 1.88081 | 15 | 1.17609 |
| 117 | 2.06819 | 20 | 1.30103 | 116 | 2.06446 | 20 | 1.30103 |
| 148 | 2.17026 | 25 | 1.39794 | 150 | 2.17609 | 25 | 1.39794 |
| 403 | 2.60531 | 50 | 1.69897 | 402 | 2.60423 | 50 | 1.69897 |
| D_{90°} = 1.40000 | | | | D_{135°} = 1.39430 | | | |

Para obtener la dimensión fractal de acuerdo a los valores obtenidos en la tabla 6, se calculó una línea de tendencia y se extrapoló hacia atrás de donde se adquirió su ecuación, y de esta manera se obtuvo su respectiva pendiente. La dimensión fractal de la grieta se muestra en la figura 15.

Para la obtención de la dimensión fractal D_f , se ha estimado un promedio de las dimensiones calculadas en cada una de

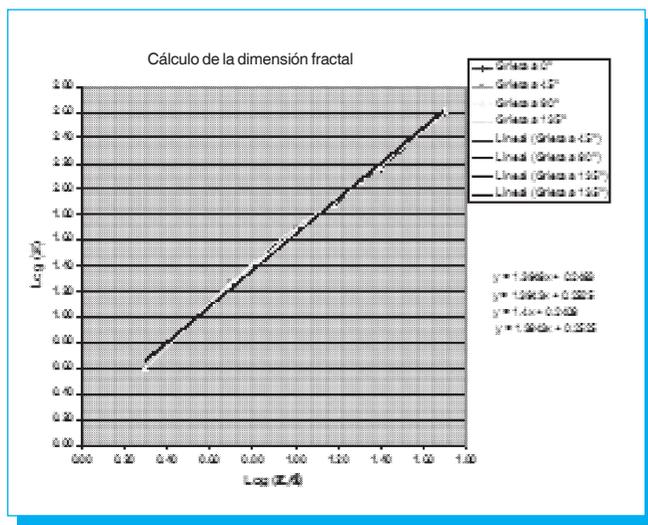


Fig. 15. Gráfica para el cálculo de la dimensión fractal expuesta durante un año.

las cuatro rotaciones que se le han aplicado a la curva fractal. La dimensión fractal para una grieta en acero estructural A36 expuesta durante un año es:

$$D_f = (D_{0^\circ} + D_{45^\circ} + D_{90^\circ} + D_{135^\circ}) / 2 = (1.3946 + 1.3943 + 1.4 + 1.3943) / 2 = 1.3958$$

Es decir, la dimensión fractal de las grietas en acero estructural A36 expuesto a condición marina durante un año, tiene un valor de 1.3958. De acuerdo al programa Benoit, su dimensión fractal es de 1.40040 como se indica en la figura 16.

La dimensión fractal obtenida para la probeta de doce meses, debido a productos de corrosión es mayor que para la de seis meses, esto indica que hubo mayor irregularidad en el material.

5.6 Fractografía del acero estructural A36 para la probeta de referencia

En la probeta virgen del acero estructural A36 para la probeta virgen ensayado a tensión se observó una superficie de fractura dúctil con el MEB a 2000 aumentos. La grieta que se presenta en el material es provocada por el ensaye, como se muestra en la figura 17.

5.7 Fractografía del acero estructural A36 para la probeta expuesta a corrosión durante seis meses

La probeta expuesta a seis meses, como se puede observar en la figura 18, muestra presencia de picadura por corrosión en la

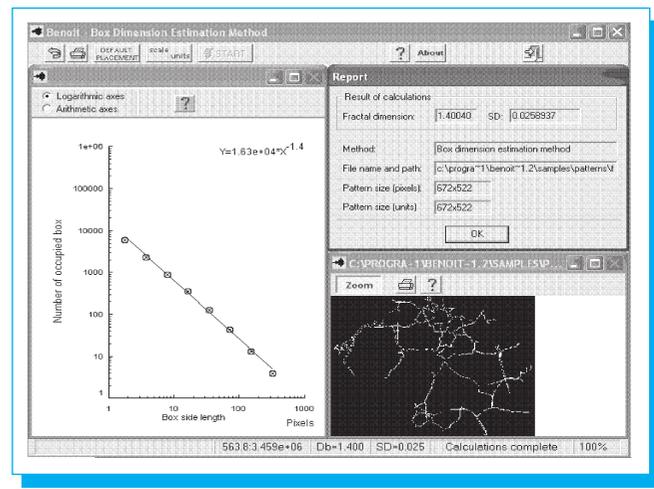


Fig. 16. Obtención de la dimensión fractal en el programa Benoit 1.2.

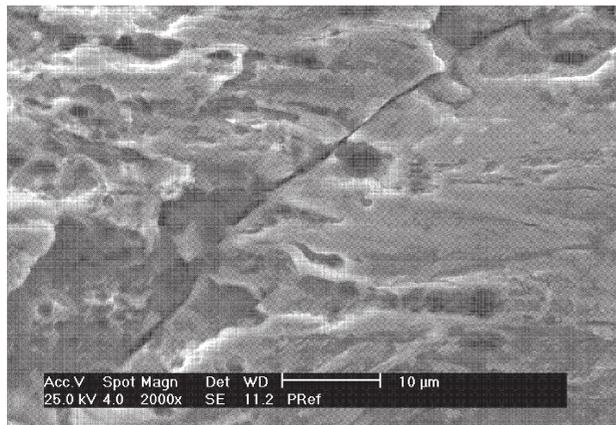


Fig. 17. Fractura dúctil en acero estructural A36 virgen.

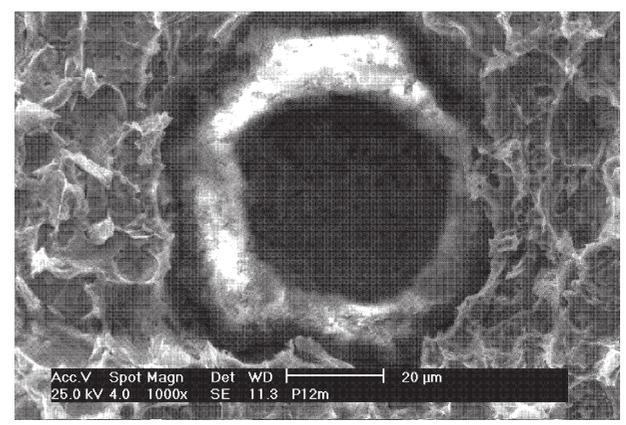


Fig. 19. Metalografía de una picadura por corrosión 1000x.

parte de la formación del cuello, ya que las picaduras pueden contribuir de manera importante a una falla general.

5.8 Fractografía del acero estructural A36 para la probeta expuesta a corrosión durante 12 meses

La superficie de fractura para la probeta expuesta a 12 meses presenta una picadura mayor que la de seis meses, debido a que el material estuvo más tiempo sumergido al mar, como se muestra en la figura 19.

La presencia de hidrógeno generado en la superficie del material, como consecuencia de una reacción de corrosión, penetra y precipita el interior provocando separación de borde de grano como se muestra en la figura 20 lo cual

induce a la pérdida de ductilidad del material. El hidrógeno puede formar compuestos con la mayoría de los elementos y está presente en el agua y en la mayoría de los compuestos orgánicos como algas y seres marinos que se encuentran en el mar. Esto fue en este caso, ya que el acero fue expuesto en el mar cerca de la zona industrial de Mazatlán, lo que provocó que el material obtuviera presencia de hidrógeno y ocasionara la pérdida de ductilidad.

5.9 Microanálisis

Con la ayuda del MEB se hizo un estudio de microanálisis de rayos X a la probeta envejecida durante 12 meses en el mar, con el propósito de determinar qué tipo de óxidos se desarrollaron durante el proceso de corrosión.

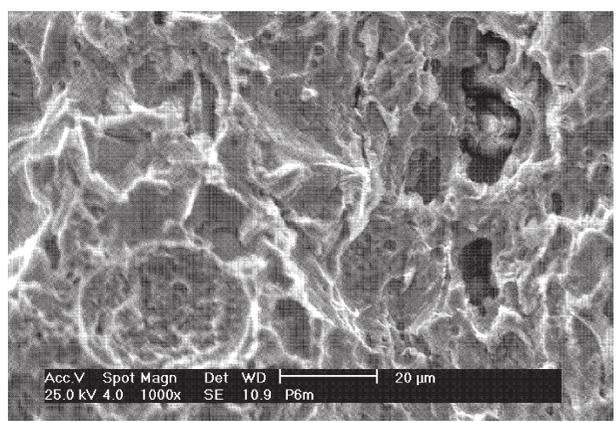


Fig. 18. Presencia de picadura por corrosión 1000x.

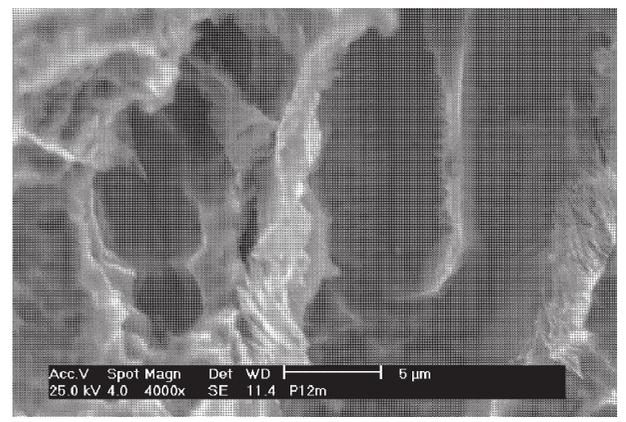


Fig. 20. Separación de bordes de grano.

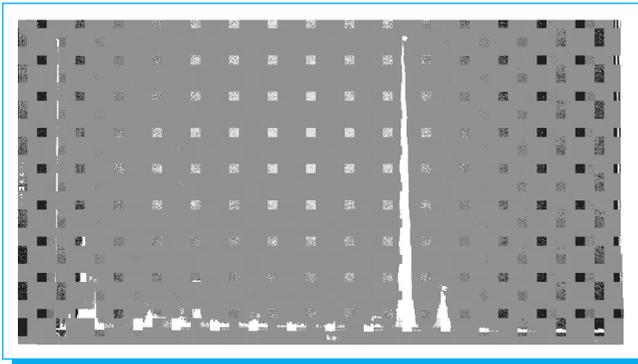


Fig. 21. Espectro de análisis mediante microscopía electrónica.

En la figura 21 se puede apreciar la presencia de carbono, oxígeno, hierro, silicio, azufre, cloro, sodio, calcio y magnesio. El cloro, ligado con el sodio, son los constituyentes fundamentales del agua de mar y se encuentran en forma de cloruro de sodio que se conoce como la sal común. El magnesio es el más abundante del agua de mar, se encuentra en relación constante respecto al cloro. Se combina con otros elementos formando cloruro de magnesio y sulfato de magnesio. El azufre se encuentra en presencia de sulfatos. Todos estos elementos hicieron posible el aceleramiento de la corrosión en la probeta.

6. Conclusiones

El acero estructural A36 virgen presentó una superficie de fractura dúctil lo que originó una concentración de tensiones y un aumento local de la deformación plástica.

Presentó corrosión de manera uniforme tanto para la probeta de seis como para la probeta de 12 meses, lo que produce un adelgazamiento generalizado de toda la superficie. Así mismo se presentaron picaduras por la presencia de cloruros y sulfatos que contiene el mar. Debido a esto, se presentó una superficie frágil y porosa, a causa de la corrosión marina.

Se registró una pérdida de ductilidad para la probeta expuesta a seis meses con respecto a la probeta virgen en un 11.96%. Para la probeta de 12 meses fue un 43.87%. Esto indica que entre más tiempo permanezca el acero en el mar pierde resistencia, esto hace que el material se fragilice.

Se obtuvo una gráfica donde muestra el coeficiente de ductilidad que puede ser utilizado para el acero estructural A36 expuesto 12 meses en el mar de Mazatlán, la cual indica pérdida de ductilidad del material durante ese tiempo.

El material pierde ductilidad debido a la presencia de hidrógeno ya que este elemento se encuentra presente en el agua y en compuestos orgánicos lo que provoca que sea absorbido y transportado al interior, hacia una imperfección de la probeta provocando separación de bordes de grano,

En cuanto al ensaye a tensión para las probetas expuestas a seis y doce meses en el mar, se debió llegar a la ruptura para poder calcular la dimensión fractal de la grieta generada por el mismo ensaye.

La gráfica de esfuerzo-deformación presenta variación en el esfuerzo de fluencia para cada material debido a la reducción del área ya que la corrosión se dio de manera uniforme.

El porcentaje de variación para el cálculo de la dimensión fractal, realizada por el método de conteo de cajas y calculado manualmente y comparado con el resultado obtenido con el programa Benoit 1.2 para la probeta de seis meses, es de 0.2656% y para la doce meses es 0.3295%. El margen de variación es mínimo.

La dimensión fractal obtenida para la probeta expuesta a doce meses en el mar presenta una dimensión fractal mayor debido a que hubo mayor irregularidad de la superficie del material por la presencia de productos de corrosión.

7. Referencias

- [1] Cherepanov, G.P. y Balankin, A.S. *Fractal and Fracture. A topical encyclopedia of current knowledge* dedicated to Alan Arnold Griffith, G.P Cherepanov E.D., Krieger, Melbourne, p. 104. 1997.
- [2] Ipohorski, M. *Fractografía-aplicación al análisis de falla*. Informe CNEA 490, Buenos Aires. 1988.
- [3] Mandelbrot, B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, New Cork, p. 459. 1982.
- [4] Mandelbrot, B.B. y Passoja, D. *Nature*, 304, p. 771. 1984.
- [5] Reyes, M. y E. Guerrero, C. «Autoafinidad de superficies de fractura en materiales plásticos», *Ingenierías*, vol. IV, no. 1, pp. 27-37. 2001.
- [6] Bouchaud, E. «Scaling Properties of Cracks». *J. Phys. Condens Matter* **9**, pp. 4319-4344. 1997.
- [7] Bouchaud, E, Lappaset, G y Planés, J. *Europhys Lett.*, 13, p. 73. 1990.
- [8] Daguier P., Hénaux S., Bouchaud E., y Creuzet F. «Quantitative Analysis of a Fracture Surface by Atomic Force Microscopy», *Phys. Rev. E*, **53**, 5637. 1996.
- [9] Daguier, P. y Nghiem, B. «Pinning y Depinning of Crack Fronts in Heterogeneous Materials», *Phys. Rev Left.*, **78**, p. 1062. 1997.

- [10] Hinojosa M., Bouchaud E. y Nghiem B. Materials Research Society Symposium Proceedings. *Materials Research Society*, Volume 539, pp. 203-208. Warrendale Pennsylvania. 1999.
- [11] Hilders, O.A. y Peña, N.D. *Geometría fractal, dos casos de aplicación tecnológica: Morfologías de fractura y transformación inducida por plasticidad*. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de los materiales, Universidad Central de Venezuela, 1995.
- [12] G. Urriolagoitia-Calderón y L. H. Hernández-Gómez (1997). «Experimental analysis of crack propagation stability in single edge notch specimens», *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. Vol. 28, 57-68.
- [13] G. Urriolagoitia-Calderón y L. H. Hernández-Gómez (1996). «Evaluation of crack propagation stability with the Williams stress function. Part I», *International Journal of Computers & Structures*. vol. 61, No. 4, 775-780.
- [14] G. Urriolagoitia-Calderón y L. H. Hernández-Gómez (1997) Evaluation of crack propagation stability with Williams stress function. Part II. *International Journal of Computers & Structure*. vol. 63, No. 5, 1007-1014.
- [15] L. H. Hernández Gómez, I. Saucedo Meza, G. Urriolagoitia Calderón, A. S. Balankin y O. Susarrey (2004) Evaluation of crack initiation angle under mixed mode loading at diverse strain rates. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. Vol. 42, 53-61.
- [16] A. S. Balankin, L. H. Hernández, G. Urriolagoitia Calderón, O. Susarrey Huerta, J. M. González y J. Martínez. «Probabilistic mechanics of self-affine cracks in paper sheets» *Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences de The Royal Society London A* (1999) 455, 2565-2575.
- [17] A. S. Balankin, O. Susarrey Huerta., G. Urriolagoitia Calderón y L. H. Hernández. «Self-affine nature of the stress-strain behavior o fan elastic fractal network.» *Physics Letters A* 297 (2002) 376-386.
- [18] American Society of testing Materials (ASTM) E8-01. *Standard Test Methods for Tensión of Metálic Materials*. 2001.
- [19] Cortés, P. R. y Villanueva, A. J. «Estudio de la soldabilidad y corrosión del acero inoxidable AISI 904 con los agentes utilizados en la lixiviación del cobre», *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 12 núm. 2, pp. 43-56, 2004.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA UNIDAD CULHUACÁN SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

La ESIME Unidad Culhuacán ofrece los siguientes programas de posgrado:

- DOCTORADO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA
- MAESTRÍA EN MICROELECTRÓNICA
- MAESTRÍA EN SISTEMAS ENERGÉTICOS
- ESPECIALIDAD EN SEGURIDAD INFORMÁTICA
Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

**ESIME Culhuacán,
Av. Santa Ana 1000, Edificio 2, Tercer Piso,
Col. San Francisco Culhuacán, CP 04430, México DF.
Tel. 56242000 ext. 73266**