



---

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LOPEZ MATEOS**

*SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN*

***Comportamiento mecánico en  
especímenes de acero  
estructural expuestos a una  
condición marina***

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD  
EN ESTRUCTURAS PRESENTA:**

**MARTÍN ARMANDO ZAMORA GARCÍA**



**DIRECTOR DE TESIS  
FRANCISCO CASANOVA DEL ANGEL**

**México D. F.**

**2007**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 18:00 horas del día 01 del mes de Octubre del 2007 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada Por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A. - U.Z. para examinar la tesis de grado titulada: "COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN ESPECIMENES DE ACERO ESTRUCTURAL EXPUESTOS A UNA CONDICIÓN MARINA".

Presentada por el alumno:

ZAMORA                      GARCÍA                      MARTÍN ARMANDO  
Apellido paterno                      materno                      nombre(s)

Con registro: 

A	0	5	0	6	6	1
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante al grado de: MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ESTRUCTURAS.

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Director de Tesis

DR. FRANCISCO CASANOVA DEL ANGEL

DR. HÉCTOR A. SÁNCHEZ SÁNCHEZ

DR. JORGE LUIS ALAMILLA LÓPEZ

DR. ORLANDO SUSAREY HUERTA

DR. JORGE R. VARGAS GARCÍA

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. HÉCTOR A. SÁNCHEZ SÁNCHEZ.



SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION




**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESION DE DERECHOS**

En la Ciudad de México el día 13 del mes de noviembre del año 2007, el que suscribe Martin Armando Zamora García alumno del Programa de Maestría en Ciencias con Especialidad en Estructuras con número de registro A050661, adscrito a la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Francisco Casanova del Angel y cede los derechos del trabajo intitulado: "*Comportamiento mecánico en especímenes de acero estructural expuestos a una condición marina*", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección "[marti\\_ing@yahoo.com.mx](mailto:marti_ing@yahoo.com.mx)". Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
Martin Armando Zamora Garcia

Nombre y firma

# *Dedicatoria*

Dedico con todo mi cariño, amor y respeto a las personas que tanto me han apoyado en las buenas y en las malas, a salir adelante en mis estudios y como persona, a mis padres *MARTIN ARMANDO ZAMORA RODRÍGUEZ* y *GUADALUPE GARCÍA ESCOBAR* y a mi hermana YURIRIA GUADALUPE por su gran confianza y cariño.

# *Agradecimientos*

Agradezco a la ESIA Zacatenco y al Instituto Politecnico Nacional por haberme formado dentro de sus aulas y por el apoyo económico recibido durante este periodo de mi vida académica.

Agradezco a las instituciones del ESIME Ticoman, EIQUIE Zacatenco y al IMP por permitirme el acceso al laboratorio de ensaye y al uso del Microscopio Electrónico de Barrido para poder realizar las pruebas de laboratorio, ya que sin ellas no se hubiera realizado la elaboración de tesis,

Agradezco a los siguientes profesores: Dr. Orlando Susarrey Huerta ESIME Zacatenco, Ing. Alfonso Espinoza Picaso ESIME Ticoman, Ing. Erik Vargas Rojas ESIME Ticoman, Dr. Jorge Roberto Vargas García ESQUIE Zacatenco, Dr. Héctor A. Sánchez Sánchez ESIA Zacatenco, Jorge Luis Alamilla López ESIA Zacatenco y al Dr. Marco Antonio Espinosa Medina IMP por su grandiosa colaboración para poder realizar mi trabajo de tesis.

# *COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN ESPECÍMENES DE ACERO ESTRUCTURAL EXPUESTOS A UNA CONDICIÓN MARINA*

## CONTENIDO GENERAL

	Pág.
<b>Capítulo I: Generalidades</b>	
I.1 Introducción	2
I.2 Estado del arte	2
I.3 Objetivo	6
I.4 Justificación	6
I.5 Metas	7
<b>Capítulo II: Realización de pruebas de laboratorio</b>	
II.1 Introducción	10
II.2 Selección del tipo de pruebas a realizar en laboratorio	10
II.3 Dimensiones de las probetas a emplear en el laboratorio	10
II.4 Material Utilizado	11
II.5 Especímenes expuestos a corrosión marina	11
II.6 Ensaye de prueba de laboratorio	13
II.7 Preparación de la muestra	14
II.8 Pulido de la muestra	14
II.9 Ataque químico de la muestra	15
II.10 Acero estructural A36	16
II. 11 Acero estructural A36 envejecido durante 6 meses	17
II.12 Acero estructural A36 envejecido durante 1 año en el mar	17
<b>Capítulo III: Análisis fractal de grietas en acero estructural A36</b>	
III.1 Obtención del esfuerzo de cedencia	22
III.2 Resultados de las propiedades mecánicas del acero estructural A36	24
III.3 Cálculo de la tenacidad y ductilidad del material	24
III.4 Cálculo de la dimensión fractal de la grieta para la probeta de seis meses	30
III.5 Cálculo de la dimensión fractal de la grieta para la probeta de 12 meses	34
III.6 Fractografía del acero estructural A36 para la probeta de referencia	38
III.7 Fractografía del acero estructural A36 para la probeta expuesta a corrosión durante seis meses.	39

	Pág.
III.6 Fractografía del acero estructural A36 para la probeta Expuesta a corrosión durante seis meses.	40
III.7 Microanálisis	41
<b>Conclusiones</b>	43
<b>Trabajos futuros</b>	45
<b>Referencias bibliográficas</b>	46
<b>Apéndice A: Geometría fractal</b>	49
A.1 Introducción	50
A.2 Dimensión fractal	50
A.3 Método de conteo de cajas	51
<b>Apéndice B. Microscopio Electrónico de Barrido (MEF)</b>	55
AB.1 Introducción al Microscopio Electrónico de Barrido	56
AB.2 Fractura dúctil	58
AB.3 Fractura intergranular	59
AB.4 Fragilización por hidrógeno	60
<b>Apéndice C. Corrosión</b>	61
AC.1 Definición de corrosión	62
AC.2 Tipos de corrosión	62
AC.3 Corrosión iniciada por iones de cloruro	63
AC.3 Ensayes acelerados	64
<b>Anexo 1. Proceso de elaboración de probetas de acero</b>	67
<b>Anexo 2. Ensayes de pruebas de laboratorio</b>	71
<b>Anexo 3. Cálculo de la dimensión fractal</b>	77

### *LISTA DE FIGURAS*

<b>Figura I.1.</b>	Los fractales representan la naturaleza	4
<b>Figura I.2.</b>	Conjunto de Cantor	5
<b>Figura II.1.</b>	Proporciones de la probeta a emplear en laboratorio	10
<b>Figura II.2.</b>	Material expuesto a corrosión marina	11
<b>Figura II.3.</b>	Lugar de exposición del acero	12
<b>Figura II.4.</b>	Acero estructural A36 virgen	12
<b>Figura II.5.</b>	Acero estructural expuestos a seis meses	12
<b>Figura II.6.</b>	Acero estructural expuesto a 1 año	13
<b>Figura II.7.</b>	Máquina de ensaye Instron	13
<b>Figura II.8.</b>	Corte del material	14
<b>Figura II.9.</b>	Desbaste del material	14
<b>Figura II.10.</b>	Pulido del material	15
<b>Figura II.11.</b>	Secado del material	15
<b>Figura II.12.</b>	Terminado del material	16
<b>Figura II.13.</b>	Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)	16
<b>Figura III.1.</b>	Resistencia a la cadencia para la probeta virgen	22
<b>Figura III.2.</b>	Resistencia a la probeta de seis mese	23
<b>Figura III.3.</b>	Resistencia a la cadencia para la probeta de un año	23

	Pág.
<b>Figura III.4.</b>	Obtención de la función para la probeta de referencia. 25
<b>Figura III.5.</b>	Obtención de la función para la probeta expuesta seis meses 25
<b>Figura III.6.</b>	Obtención de la función para la probeta expuesta a 12 meses 26
<b>Figura III.7.</b>	Ductilidad y tenacidad del acero con respecto al tiempo 28
<b>Figura III.8.</b>	Coeficiente de ductilidad 29
<b>Figura III.9.</b>	Gráfica de esfuerzo deformación para cada tipo de envejecimiento de la probeta 30
<b>Figura III.10.</b>	Comportamiento fractal de la grieta para la probeta de seis meses 31
<b>Figura III.11.</b>	Gráfica para el cálculo de la dimensión fractal 32
<b>Figura III.12.</b>	Obtención de la dimensión fractal en el programa <i>Benoit 1.2</i> 34
<b>Figura III.13.</b>	Comportamiento fractal de la grieta para la probeta de 1 año 35
<b>Figura III.14.</b>	Gráfica para el cálculo de la dimensión fractal expuesta durante 1 año 36
<b>Figura III.15.</b>	Obtención de la dimensión fractal en el programa <i>Benoit 1.2</i> 37
<b>Figura III.16.</b>	$D_f=1.343$ para la probeta de seis meses 38
<b>Figura III.17.</b>	$D_f=1.3958$ para la probeta de 12 meses 38
<b>Figura III.18.</b>	Fractura dúctil en acero estructural A36 virgen 39
<b>Figura III.19.</b>	Presencia de picadura por corrosión 39
<b>Figura III.20.</b>	Picadura por corrosión 40
<b>Figura III.21.</b>	Separación de borde de grano 40
<b>Figura III.22.</b>	Espectro de análisis mediante microscopio electrónico 41
<b>Figura A.1.</b>	El conjunto de cantor 51
<b>Figura A.2.</b>	Este objeto fractal ocupa tres cajas de la malla
<b>Figura A.3.</b>	Al dividir en tres partes iguales cada uno de los lados de la malla más fina y el objeto fractal ocupa 12 cajas de la nueva malla 51
<b>Figura A.4.</b>	Se divide en tres partes iguales cada uno de los lados de la malla anterior, se obtiene una malla más fina y el objeto fractal ocupa 55 cajas de la nueva malla 52
<b>Figura A.5.</b>	Se vuelve a dividir en tres partes iguales cada uno de los lados de la malla anterior, se obtiene una malla más fina y el objeto fractal ocupa 405 cajas de la nueva malla 52
<b>Figura A.6.</b>	Gráfica para el cálculo de la dimensión fractal 53
<b>Figura B.1.</b>	Fractura dúctil en acero estructural A36 58
<b>Figura B.2.</b>	Fractura intergranular vista en el Microscopio Electrónico de Barrido 59

<b>Figura B.3.</b>	Fragilización por Hidrógeno en acero estructural	60
		Pág.
<b>Figura C.1.</b>	Metalografía de un acero estructural expuesto al mar	63
<b>Figura C.2.</b>	Cámara de niebla salina	65
<b>Figura 1.1.</b>	Elaboración de las probetas	67
<b>Figura 1.2.</b>	Maquinado de la probeta	68
<b>Figura 1.3.</b>	Finalización de moleteado	68
<b>Figura 1.4.</b>	Se tomó medidas con el vernier	68
<b>Figura 1.5.</b>	Proceso terminado de la probeta	68
<b>Figura 1.6.</b>	Probetas de acero estructural A36	69
<b>Figura 2.1</b>	Laboratorio de ensaye	71
<b>Figura 2.2.</b>	Colocación del material	72
<b>Figura 2.3.</b>	Colocación del extensómetro	72
<b>Figura 2.4.</b>	Acero estructural A36	73
<b>Figura 2.5</b>	Acero estructural A36 expuesto durante 6 meses	73
<b>Figura 2.6.</b>	Acero estructural A36 expuesto durante 1 año	73
<b>Figura 2.7.</b>	Vista en el microscopio	74
<b>Figura 2.8.</b>	Forma del cuello a la probeta	74
<b>Figura 2.9.</b>	Acero estructural A36	75
<b>Figura 2.10.</b>	Acero estructural A36 expuesto durante 6 meses	75
<b>Figura 2.11.</b>	Acero estructural A36 expuesto durante un año.	75
<b>Figura 3.1.</b>	Grieta girada $0^\circ$	77
<b>Figura 3.2.</b>	Gráfica para calcular la dimensión fractal con $\theta = 0^\circ$	78
<b>Figura 3.3..</b>	Grieta girada $45^\circ$	78
<b>Figura 3.4.</b>	Gráfica para calcular la dimensión fractal con $\theta = 45^\circ$	79
<b>Figura 3.5.</b>	Grieta girada $90^\circ$	79
<b>Figura 3.6.</b>	Gráfica para calcular la dimensión fractal con $\theta = 90^\circ$	80
<b>Figura 3.7.</b>	Grieta girada $135^\circ$	80
<b>Figura 3.8.</b>	Gráfica para calcular la dimensión fractal con $\theta = 135^\circ$	81
<b>Figura 3.9</b>	Grieta girada $0^\circ$	81
<b>Figura 3.10.</b>	Gráfica para calcular la dimensión fractal con $\theta = 0^\circ$	82
<b>Figura 3.11.</b>	Grieta girada $45^\circ$	82
<b>Figura 3.12.</b>	Gráfica para calcular la dimensión fractal con $\theta = 45^\circ$	83
<b>Figura 3.13.</b>	Grieta girada $90^\circ$	83
<b>Figura 3.14.</b>	Gráfica para calcular la dimensión fractal con $\theta = 90^\circ$	84
<b>Figura 3.15.</b>	Grieta girada $135^\circ$	84
<b>Figura 3.16.</b>	Gráfica para calcular la dimensión fractal $\theta = 90^\circ$	85



## *LISTA DE TABLAS*

	Pág.
<b>Tabla II.1.</b> Se muestran las dimensiones de la probeta a utilizar según la norma <b>[ASTM. 2001]</b>	11
<b>Tabla II.2.</b> Composición química del acero estructural A36 dada en porcentaje en peso de los aleantes presentes <a href="http://www.matweb.com">http://www.matweb.com</a>	11
<b>Tabla III.1.</b> Propiedades mecánicas de acuerdo a la página	24
<b>Tabla III.2.</b> Ductilidad y tenacidad del material	28
<b>Tabla III.3.</b> Coeficiente de ductilidad	29
<b>Tabla III.4.</b> Dimensión fractal para cada rotación de la grieta de la probeta de seis meses	31
<b>Tabla III.5.</b> Dimensión fractal para cada rotación de la grieta	35
<b>Tabla A.1</b> Datos del conteo de cajas	53

## *SIMBOLOGÍA*

<b>ASTM</b>	American Society for Testing Materials
<b>MEB</b>	Microscópio Electrónico de Barrido
<b>D<sub>T</sub></b>	Dimensión topológica
<b>D<sub>H-B</sub></b>	Dimensión de Hausdorff Besicovitch
<b>A</b>	Diámetro nominal
<b>G</b>	Longitud calibrada
<b>D</b>	Diámetro
<b>R</b>	Radio de filete
<b>C</b>	Carbono
<b>Mn</b>	Manganeso
<b>Si</b>	Silicio
<b>P</b>	Fósforo
<b>S</b>	Azufre
<b>E</b>	Módulo de elasticidad
$\Delta$	Variación
$\bar{x}$	media
<b>F<sub>y</sub></b>	Esfuerzo de fluencia
<b>D<sub>f</sub></b>	Dimensión fractal
<b>S</b>	Desviación estándar
<b>n</b>	Numero de datos
<b>U<sub>T</sub></b>	Tenacidad
<b>ε<sub>máx</sub></b>	Deformación máxima
<b>ε<sub>y</sub></b>	Deformación de fluencia
<b>G<sub>f</sub></b>	Geometría fractal
<b>μ</b>	Ductilidad
<b>F<sub>μ</sub></b>	Factor de ductilidad
<b>μ<sub>P</sub></b>	Ductilidad de la probeta expuesta
<b>μ<sub>PR</sub></b>	Ductilidad de la probeta de referencia
<b>N</b>	Número de cajas insertadas por la curva
<b>L</b>	Longitud del objeto
<b>l</b>	Longitud de los segmentos

## *RESUMEN*

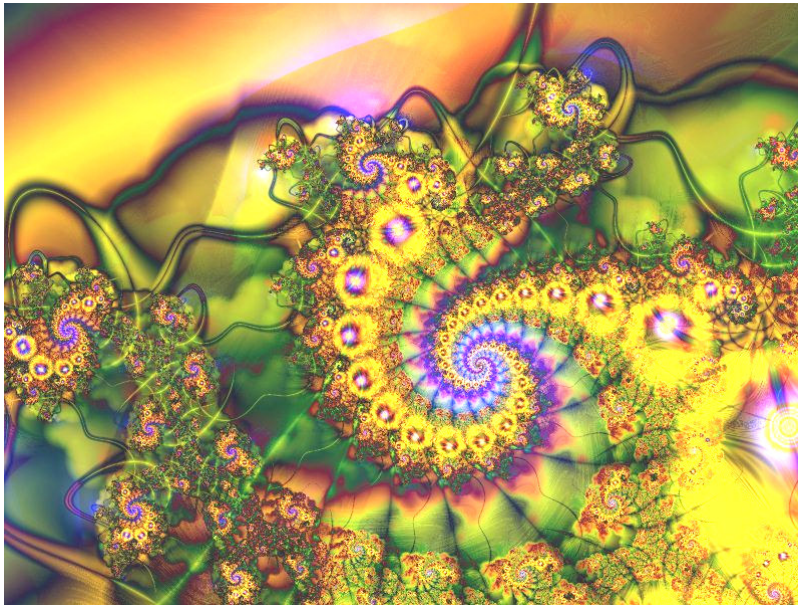
En el presente trabajo de investigación se realizó un ensaye a tensión a probetas de acero estructural A36 que fueron expuestas a corrosión marina durante seis meses y 12 meses. La prueba se detuvo antes de llegar a la ruptura, es decir, a la formación del cuello. Una vez llevado a cabo el ensaye a tensión, 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 seis meses de 11.96% con respecto a la probeta de referencia, y para 12 meses de 43.87% lo cual indica que el material perdió concentración de esfuerzo, es decir, se fragilizó el material. 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 obtener la ductilidad para cada probeta de acero expuesta al mar se obtuvo un coeficiente con respecto al tiempo de la relación de la probeta expuesta y la probeta de referencia lo cual indica la pérdida de ductilidad del acero. Por otra parte se obtuvo la dimensión fractal para la probeta de seis meses de un valor de 1.343 y para la de 12 meses de 1.3958 lo cual indica que hubo mayor irregularidad del material debido a productos de corrosión.

## *ABSTRACT*

This research work was carried out to test tension probetas A36 structural steel that were exposed to marine corrosion for 6 months and 12 months, the test was stopped before reaching the break that is the formation of the neck. Once your conducted the test voltage curve was obtained for each sample deformation effort with the aim of obtaining the ductility of the material was observed that there was loss of ductility for probeta exposed six months of 11.96% over the probeta reference to 12 months and 43.87% which indicates that the material lost concentration of effort is saying is fragilizo material. The loss of ductility is due to the presence of hydrogen, which was absorbed and introduced into the steel causing separation of grain edges. When you get the ductility of steel for each sample is exposed to the sea got a ratio relative to the time of the relationship between the sample and reference sample exposed which indicates the loss of ductility of the steel. Moreover fractal dimension was obtained for the sample of 6 months' worth of 1343 and for 12 months of 1.3958 which shows that there was greater tortuosidad and irregularity of the material due to corrosion products.

# *CAPÍTULO I*

## *GENERALIDADES*



### **Resumen**

En el presente capítulo, se presenta una introducción del trabajo de investigación, así como algunos desarrollos realizados por diferentes investigadores a lo largo de la historia. Posteriormente, se define el objetivo principal del trabajo y se establece la justificación así como las metas a las que se desea llegar al término de la investigación.

# *CAPÍTULO I*

## *GENERALIDADES*

### **I.1 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, ver **[Cherepanov y Balankin, 1997]**.

En las estructuras construidas en acero estructural que esté en contacto directo o indirecto con el agua del mar, tales como: barcos, instalaciones portuarias, plataformas de extracción de crudo en el mar, arquitectura o ingeniería civil cercana a las costas, sufre 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 la importancia de 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 obteniendo 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.

### **I.2 Estado del arte**

La fractura en las estructuras ha sido un problema presente desde que el hombre empezó a modelar y construir estructuras. En la actualidad esta situación se ha vuelto crítica, debido a la complejidad de las estructuras modernas y a las severas cargas de operación. Durante la revolución industrial se tuvo un gran incremento en el uso de los metales (hierro y acero) para las aplicaciones estructurales.

Desafortunadamente en esta época ocurrieron muchos accidentes, en los cuales hubo grandes pérdidas humanas y de materiales por la falla de esas estructuras. Algunos de ellos se debieron a diseños defectuosos, pero también se ha descubierto que los defectos en el material en forma de grietas persistentes pudieron haber iniciado el agrietamiento y posteriormente la fractura.

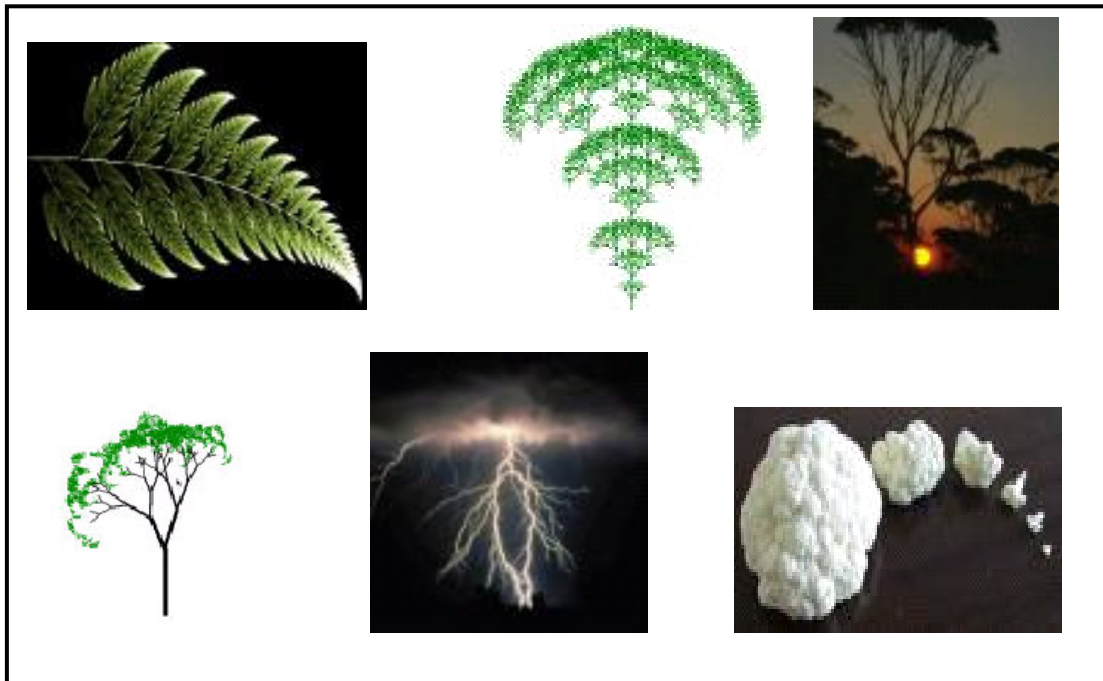
La superficie de los materiales depende mucho sus propiedades, por ejemplo, adhesión, fricción, desgaste, permeabilidad, etcétera. En efecto son las superficies que están en contacto con el medio ambiente, y por mucho son las interacciones existentes entre ambas las responsables del comportamiento de 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 [Ipohorski. 1988]. Cuando la fractura no se ajusta a un patrón reconocido, el proceso de análisis puede ser muy difícil y alternamente subjetivo.

Las superficies de fractura usualmente consisten en una colección de patrones repetidos, por ejemplo, fracturas, fisuras, estrías, hoyos, maclas, defectos intergranulares, etcétera. La fractografía cuantitativa pretende traducir esas características a una forma paramétrica, y es ahí donde la geometría fractal tiene cabida, ya que una de las técnicas más utilizadas en la actualidad para el análisis de fractura se basa en la superficie generada durante dicha fractura, los cuales a su vez se pueden caracterizar mediante el exponente de auto-afinidad o de rugosidad, es característico de un sistema autoafín y por ende íntimamente relacionado con la dimensión fractal. Se puede consultar la siguiente referencia [Reyes y Guerrero. 1999].

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 remplazan a los puntos, rectas, circunferencias y demás figuras provenientes de la matemática tradicional. Estos objetos tienen como características fundamental las propiedades de Autosimilitud y la de convivir en extraños paisajes formados por dimensiones fraccionarias.

En la figura I.1 se muestran algunas imágenes donde los fractales representan la naturaleza.



*Figura 1.1.* Los fractales representan la naturaleza.

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.

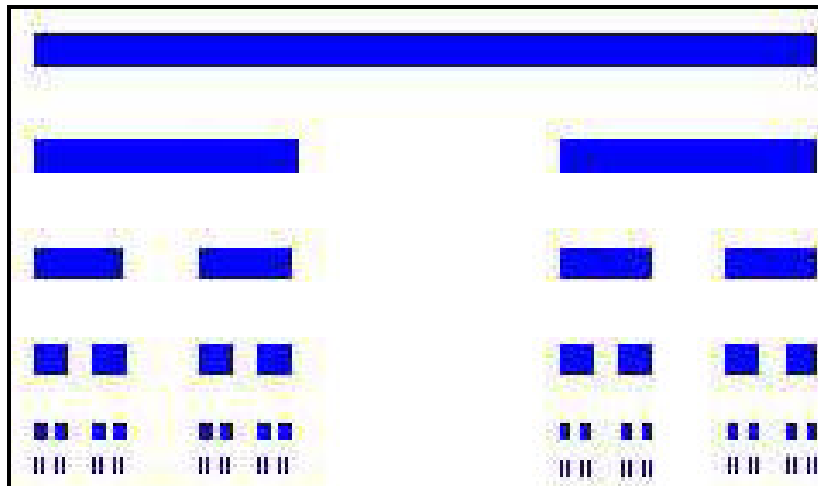
Mandelbrot desarrolló una nueva geometría que permite el estudio de las formas naturales, identificando una familia de formas demasiado irregulares para ser descritas mediante la geometría euclidiana a las que llamó fractales **[Mandelbrot. 1982]**.

El término proviene del latín fractus, el correspondiente verbo frangere significa romper, crear fragmentos irregulares. El término fractal transmite la idea de que un objeto irregular, se puede descomponer en fragmentos que son parecidos al todo y es de dimensión fraccionaria.

Matemáticamente, un fractal es un subconjunto de un espacio métrico para el cual su dimensión de Hausdorff-Besicovitch,  $D_{H-B}$  es estrictamente mayor que su dimensión topológica,  $D_T$ .

Los fractales generalmente poseen algún tipo de similitud, puede decirse que están formados por partes pequeñas que se parecen al todo. Esta similitud puede ser geoméricamente estricta o bien puede ser solamente aproximada o estadística. Por ejemplo el conjunto de cantor, figura 1.2 está formado por copias estrictamente similares de si mismo.





**Figura I.2.** Conjunto de Cantor.

Mandelbrot exploró cuantitativamente por primera vez el carácter fractal de las superficies de fractura, sometidos a diferentes tratamientos térmicos y reportó una correlación entre la dimensión fractal y a la tenacidad de la fractura, propiedad que fue estimada mediante la energía de impacto **[Mandelbrot y Passoja. 1984]**. 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 **[Reyes y Guerrero.1999]**

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  $\zeta$  es un parámetro más apropiado para describir las superficies de fracturas en condiciones cinéticas rápidas y analizadas principalmente mediante el MEB **[Bouchaud. 1997]**. Bouchaud propuso la idea de un exponente de rugosidad universal,  $\zeta=0.78$ , independientemente de la microestructura y las propiedades **[Bouchaud et al. 1990]**. 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 Microscopio de Fuerza Atómica (MFA) o de voltaje. Recientemente se ha reportado la coexistencia de ambos regímenes en distintos materiales ver la referencia de **[Daguier et al. 1996]**. Estos regímenes se cruzan en una llamada longitud de quiebre, que parece ser dependiente de las condiciones cinéticas.

P. Daguier y B. Nghiem han realizado intentos por relacionar esta longitud de quiebre con los parámetros microestructurales de algunos materiales **[Daguier y Nghiem. 1997]**.

Hinojosa demostró que la llamada longitud correlación está estrechamente relacionada con el tamaño de grano en superaleaciones de níquel **[Hinojosa. et al 1999]**. 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 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 semi-logarítmica, 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 **[Hilders y Peña. 1995]**.

### I.3 Objetivo

Estudiar la superficie de fractura del acero estructural A36 expuesto a corrosión marina.

Para dicho fin será necesario realizar pruebas de laboratorio, dichas pruebas consistieron en ensayos a tensión con la finalidad de estudiar la dimensión fractal por corrosión en las probetas expuestas al mar.

### I.4 Justificación

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.

Es importante conocer la ductilidad y tenacidad del material expuesto a corrosión marina con la finalidad de conocer qué tanto se fragiliza el acero ante este tipo de fenómeno, por lo tanto 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.

### **I.5 metas**

Algunos de los principales metas que se pretenden con este trabajo son los siguientes:

- maquinado de probetas de acero estructural,
- exposición del material en el mar ubicado en Mazatlán Sinaloa,
- hacer pruebas en el laboratorio para obtener las propiedades mecánicas del material,
- calcular la ductilidad y tenacidad del material,
- obtener la dimensión fractal para la probeta de acero estructural A36 expuesta a corrosión marina durante seis meses y doce meses, y
- realizar un estudio de microanálisis para la probeta de doce meses con el propósito de determinar que tipo de elementos participaron durante el proceso de corrosión del material.



# *CAPÍTULO II*

## *DESARROLLO EXPERIMENTAL*



### **Resumen**

El presente capítulo muestra las dimensiones de la probeta para poder llevar a cabo la realización del ensaye de laboratorio, así como la preparación del material para obtener la metalografía del acero estructural A36 para cada periodo establecido.

# *CAPÍTULO II*

## *DESARROLLO EXPERIMENTAL*

### II.1 Introducción

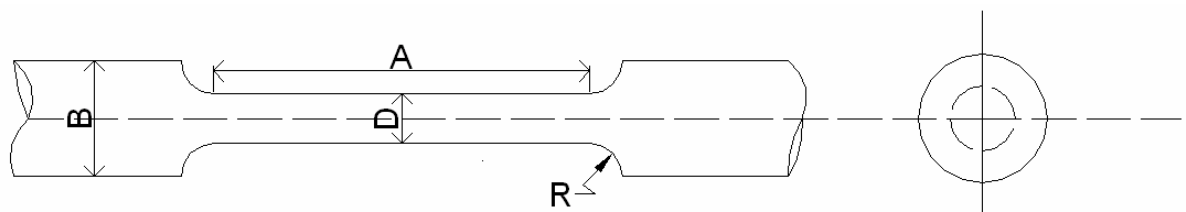
En este trabajo de investigación para poder estudiar el comportamiento del acero estructural A36 expuesto a corrosión marina, se maquinó probetas para ensaye a tensión de acuerdo a la norma ASTM E8-01 [ASTM E8-01. 2001]. Para el estudio de la superficie de fractura fue necesario preparar la muestra para poder obtener la metalografía del material, con la ayuda del microscopio electrónico de barrido.

### II.2 Selección del tipo de prueba a realizar en laboratorio

En este trabajo de investigación se realizaron pruebas a tensión en las que se tomó como base la norma [ASTM. 2001] la cual es empleada para la determinación de esfuerzos y deformaciones para dicho material metálico, en la que se pretende estudiar el comportamiento de la grieta en el material cuando la probeta se vea sometida a los efectos de cargas solicitados por la prueba.

### II.3 Dimensiones de las probetas a emplear en la prueba

De acuerdo con las especificaciones de la norma y cumpliendo con dichos parámetros (relaciones geométricas entre longitud, ancho y alto), en la figura II.1 se muestra el tipo de probeta a utilizar.



**Figura II.1.** Proporciones de la probeta a emplear en laboratorio.

En la tabla II.1 se muestran las dimensiones de acuerdo a las especificaciones marcadas por la norma [ASTM. 2001] para poder llevar a cabo el maquinado de la probeta como se muestra en el anexo de 1 de este trabajo.

Tabla II.1. Se muestran las dimensiones de la probeta a utilizar según la norma **[ASTM. 2001]**

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

#### II.4 Material utilizado

Para la elaboración de probetas se utilizó un acero estructural A36, ya que este material se utiliza para la construcción de edificios y puentes de acero, cuya composición química se muestra en la tabla II.2.

Tabla II.2. Composición química del acero estructural A36 dada en % en peso de los aleantes presentes <http://www.matweb.com>.

Material	C	Mn	Si	P	S
A36	0.29 máx.	1.20	0.40 máx.	0.40 máx.	0.05 máx.

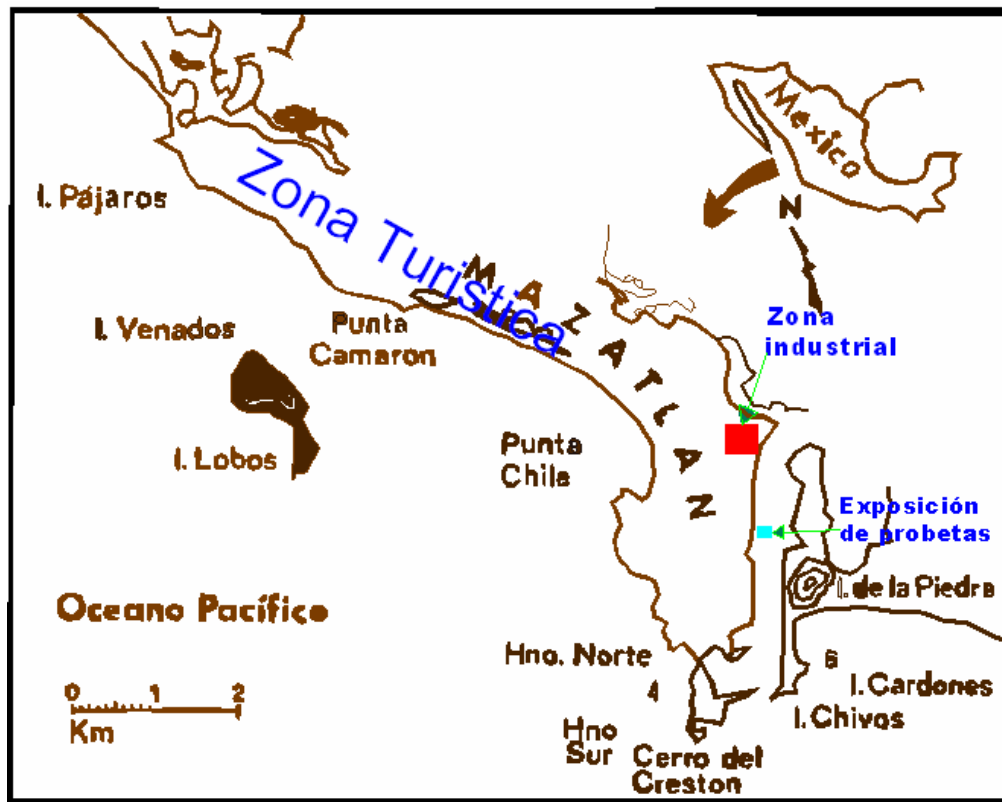
#### II.5 Especímenes expuestos a corrosión marina

Realizado el proceso de elaboración de las probetas, como se muestra el anexo 1 de este trabajo, se expusieron en el mar ubicado en Mazatlán Sinaloa durante un año. Este periodo tomó con base los estudios realizados por Cortes y Villanueva **[Cortés y Villanueva. 2004]**. En la figura II.2 se observa el material envuelto en una red y atado en los extremos para posteriormente sumergirlos en el mar.



**Figura II.2.** Material expuesto a corrosión marina.

A continuación se muestra en la figura II.3 el lugar donde se expusieron las probetas. Se encuentra a una distancia de 600 m de la zona industrial. El oleaje del mar presentado en la zona donde se expuso las probetas es mínimo.



**Figura II.3.** Lugar de ubicación de probetas.

En las figuras II.5 y II.6 se muestran las probetas que fueron expuestas al mar.



**Figura II.4.** Acero estructural A36 virgen. **Figura II.5.** Acero estructural expuesto a seis meses.





**Figura II.6.** Acero estructural expuesto a un año.

### II.5 Ensaye de pruebas de laboratorio

Una vez definido el material y elaboradas las probetas, se prosiguió a elaborar las pruebas de ensaye. Los ensayos a tensión se realizaron en una máquina Universal de Pruebas Mecánicas marca Instron, modelo 8502, Serie No C0285, capacidad de 250 KN (25 toneladas). Extensómetro con longitud calibrada de 50 mm tipo estático.

Las condiciones del ensayo fueron:

- Se manipulo por medio de una computadora a una velocidad de prueba; 0.60 mm/min,
- frecuencia de muestreo; 5.0 puntos/seg, y
- dirección del ensaye a tensión.

El tipo de condiciones que se tomaron para realizar la prueba fueron de acuerdo al tipo de ensaye que se realizó como lo marcan las especificaciones de la máquina Instron.

En la figura II.7 se muestra el equipo que se utilizó para llevar a cabo los ensayos



**Figura II.7.** Maquina de ensaye Instron.

Los ensayos a tensión para el acero estructural A36 fueron tres tipos de probetas tomando en cuenta el material base, y las otras dos fueron sumergidas al mar. El capítulo III de la figura III.9 se muestra la gráfica esfuerzo deformación para cada probeta obtenida por el ensayo a tensión.

## II.6 Preparación de la muestra

Una vez realizado el ensayo a tensión a las probetas, la muestra debe seleccionarse la zona de la pieza que necesita eximirse y en la orientación apropiada. Se cortó el material como se muestra en la figura II.8 para posteriormente pulir la muestra.



*Figura II.8.* Corte del material.

## II.7 Pulido de la muestra

Los granos y otras características de los metales no pueden verse al menos que la muestra se desbaste y se pula con la finalidad de eliminar las ralladuras. El procedimiento consistió en desbastar primero la superficie de la muestra con una lijadora a mano, como se puede apreciar en la figura II.9, desde el número 80 hasta la 1500.



*Figura II.9.* Desbaste del material (cortesía de laboratorio de metalúrgica, ESQUIE-Zacatenco).

La última aproximación a una superficie plana libre de ralladuras se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda, como se puede observar en la figura II.10.



*Figura II.10.* Pulido del material.

### **II.8 Ataque químico de la muestra**

El propósito del ataque químico es hacer visibles las características estructurales del metal o aleación. El proceso debe ser tal que queden claramente diferenciadas las partes de la micro estructura. Esto se logra mediante un reactivo apropiado que se somete a la superficie pulida a una acción química. La muestra se atacó con una solución contenida por Nital disuelta en agua en una caja de Petri por un tiempo de 10 segundos. Si el tiempo de ataque es demasiado corto, la muestra quedará subatacada y los límites de grano y otras configuraciones se verán desvanecidos e indistintos cuando se observen en el microscopio. Si el tiempo de ataque es demasiado largo, la muestra se sobre atacará y quedará muy oscura, mostrando colores no usuales. El tiempo de ataque debe controlarse muy cuidadosamente. La acción del ataque se detuvo al colocar la muestra bajo una corriente de agua. La muestra se limpió con alcohol y se utilizó una secadora como se muestra en la figura II.11 para terminar de secarla. La reacción que se utilizó es simplemente para observar con claridad la superficie de fractura lo que esto significa, que no altera las propiedades del material.



*Figura II.11.* Secado del material.

Cuidando de no frotar la muestra pulida y atacada con alguna tela o con los dedos, porque esto altera la condición superficial del metal, se puso envuelto en algodón y papel aluminio para evitar que la muestra sufra el fenómeno de corrosión.



**Figura II.12.** Terminado del material.

Una vez terminado el proceso de preparación de la muestra, se lleva al MEB como se aprecia en la figura II.13 con el propósito de observar la superficie de fractura del material.



**Figura II.13.** Microscopio Electrónico de Barrido.

## II.9 Acero estructural A36

En la figura II.14 se muestra un resumen fotográfico para la obtención de la fractografía de la superficie de fractura, para la probeta de referencia del acero estructural.

La figura II.14a muestra la prueba de ensaye a tensión, II.14b presenta los resultados de la gráfica de esfuerzo-deformación del material. Una vez realizada la prueba se corta el material, como se observa en la figura II.14c, para posteriormente llevarla al MEB con la finalidad de observar la superficie del material como se puede apreciar en las figuras II.14d, e y f. La superficie observada en las figuras antes mencionadas, es de la parte donde se formó el cuello de la probeta.

### **II.10 Acero estructural A36 envejecido durante seis meses en el mar**

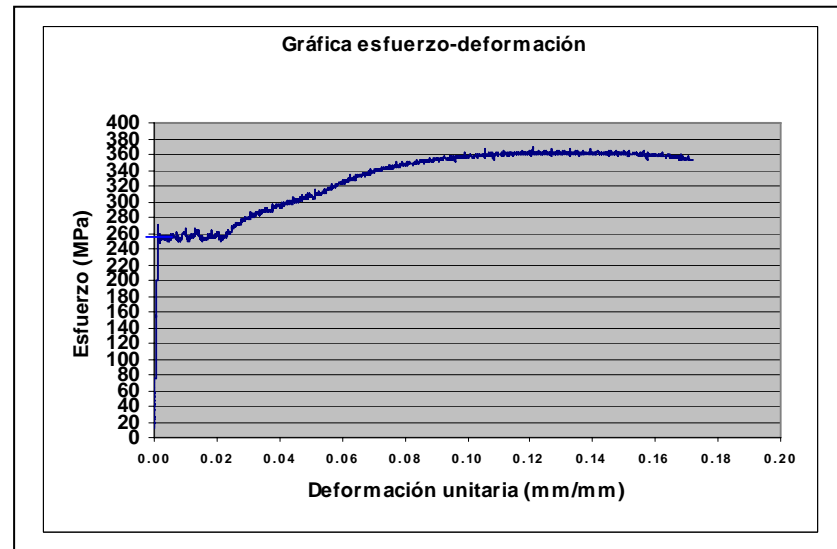
La figura II.15a muestra la prueba de ensaye a tensión para un acero estructural A36 envejecida durante seis meses, II.15b presenta la gráfica de esfuerzo-deformación, una vez realizada la prueba. Se corta el material como se observa en la figura II.15c. La figura II.15d se tomó de tal manera que se aprecie el seguimiento de la ramificación de la grieta tomada en la superficie de la parte del cuello, ya que es la zona donde se encuentra más agrietada.

### **II.11 Acero estructural A36 envejecido durante un año en el mar.**

En la figura II.16 se muestra un resumen fotográfico para poder llegar a la obtención de la fractografía de la superficie de fractura para la probeta expuesta durante un año en el mar. La figura II.16c es una fractografía que presenta una continuidad del material agrietado en la parte del cuello con el propósito de calcular, la dimensión fractal por agrietamiento por corrosión, como se muestra en el capítulo III.



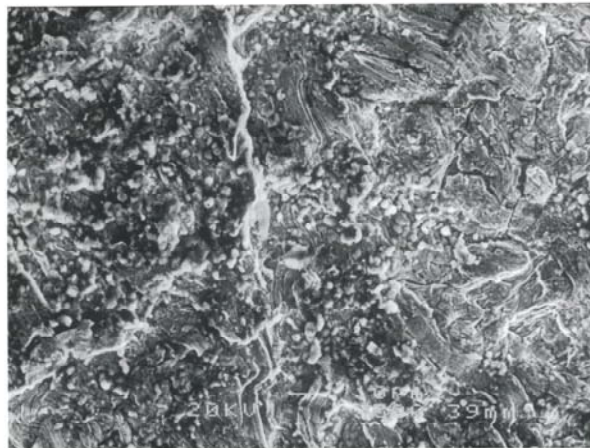
a)



b)



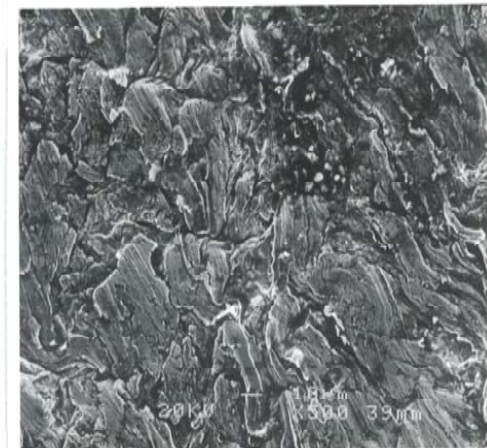
c)



d)

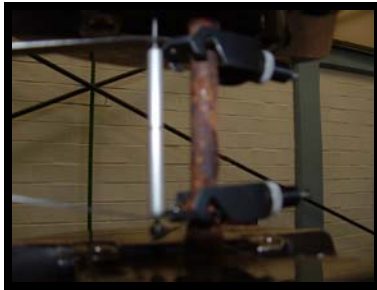


e)

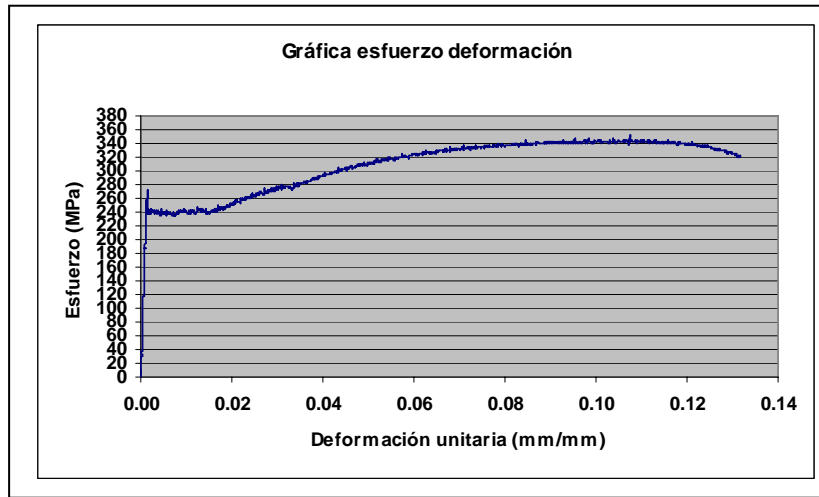


f)

**Figura II.14.** Prueba de laboratorio. Acero estructural A36 sin corrosión: a) prueba de ensaye; b) gráfica de carga-deformación; c) corte de la muestra; d), e) y f) fractografía de una muestra de acero estructural a 500 aumentos.



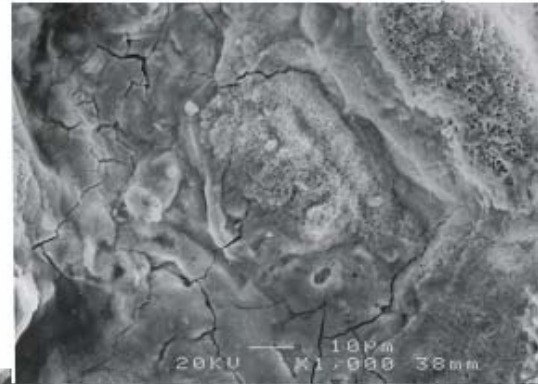
a)



b)



c)



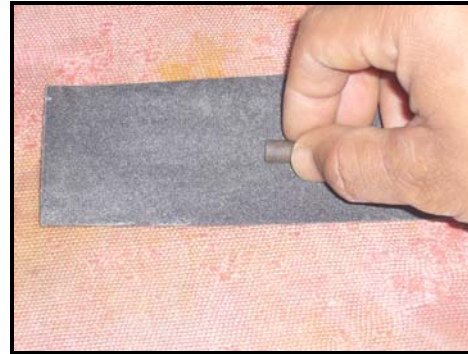
d)



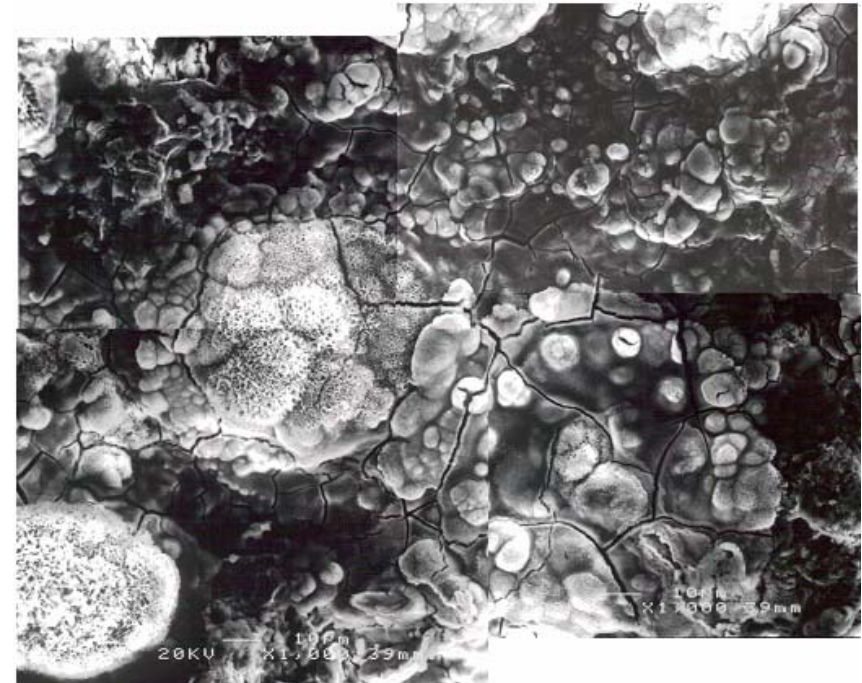
**Figura II.15.** Prueba de laboratorio: Acero estructural A36 expuesta durante seis meses en el mar. a) Prueba de ensaye; b) gráfica de carga-deformación; c) corte de la muestra; d) fractografía de una muestra de acero estructural a 1000 aumentos.



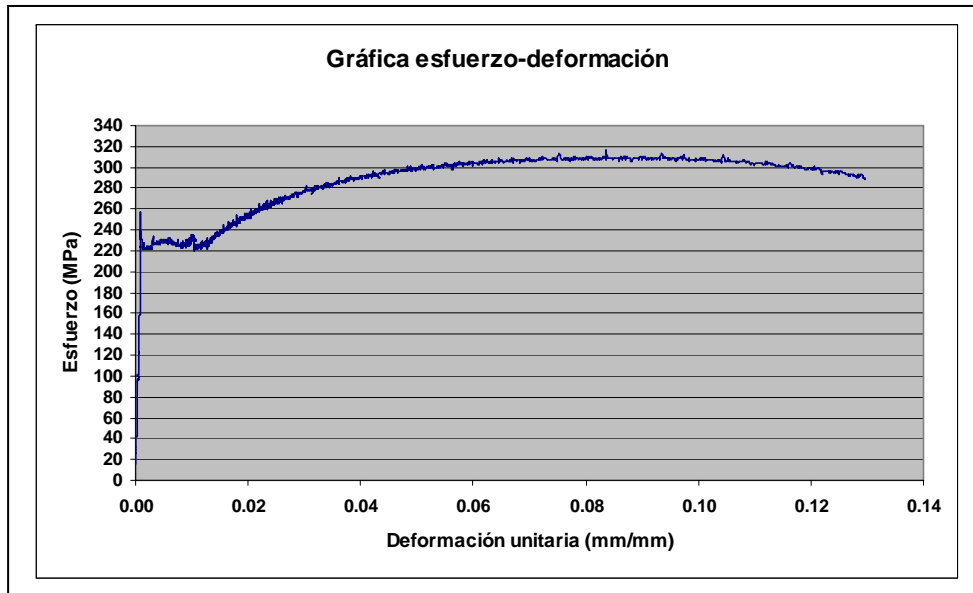
a)



c)



d)



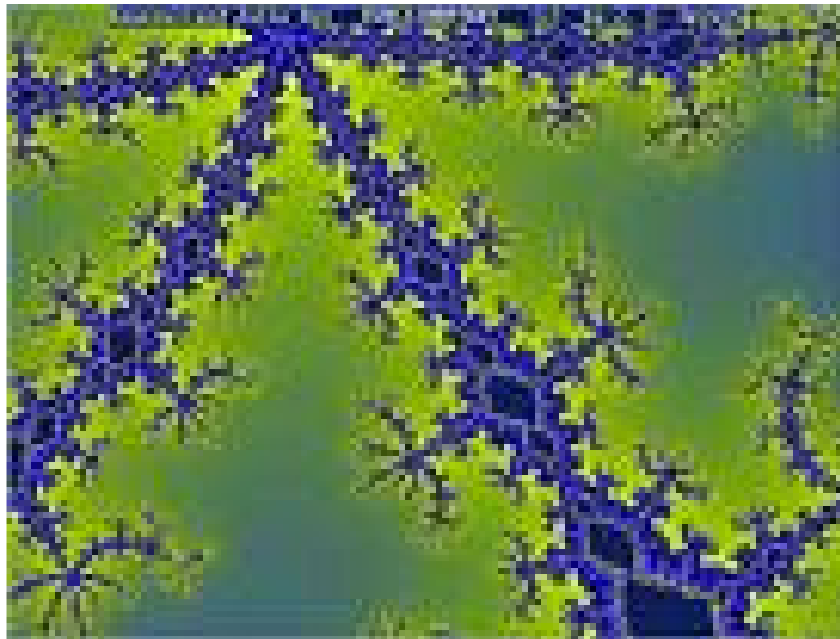
b)

**Figura II.16.** Prueba de laboratorio. Acero estructural A36 expuesta durante un año en el mar. a) prueba de ensaye. b) gráfica de carga-deformación. c) corte de la muestra. d) fractografía de una muestra de acero estructural a 1000 aumentos.



# *CAPÍTULO III*

## *ANÁLISIS FRACTAL EN GRIETAS Y ESTUDIO FRACTOGRÁFICO EN ACERO ESTRUCTURAL A36*



### **Resumen**

En este capítulo se obtienen las propiedades mecánicas del acero a partir del ensaye a tensión. Posteriormente se calcula la dimensión fractal para la probeta de referencia del acero estructural virgen, expuesta seis meses en el mar y para 12 meses, la cual fue necesario hacer un microanálisis de rayos X con la finalidad de conocer cuáles fueron los elementos que hicieron posible la corrosión en dicho material.

# CAPITULO III

## ANÁLISIS FRACTAL EN GRIETAS Y ESTUDIO FRACTOGRÁFICO EN ACERO ESTRUCTURAL A36

### I.1 Obtención del esfuerzo de cedencia del material

El esfuerzo de cedencia es el que divide el comportamiento elástico y plástico del material. El esfuerzo al cual el material cambia su comportamiento de elástico a plástico no se detecta experimentalmente. 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, 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 siguientes figuras se muestra el esfuerzo de cedencia tanto para la probeta virgen, expuesta a seis meses y la de un año.

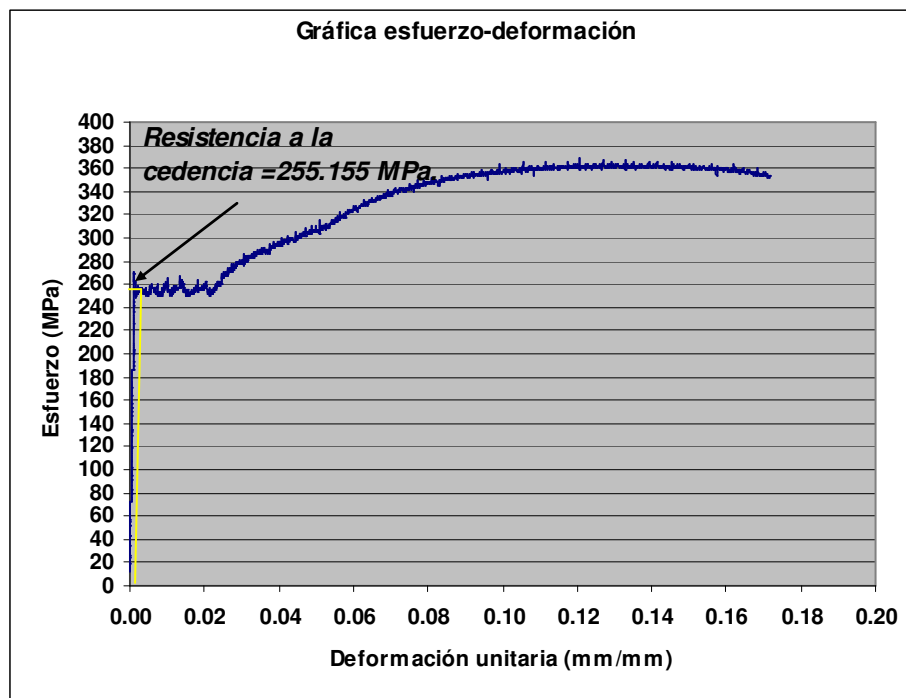


Figura III.1. Resistencia a la cedencia para la probeta virgen.

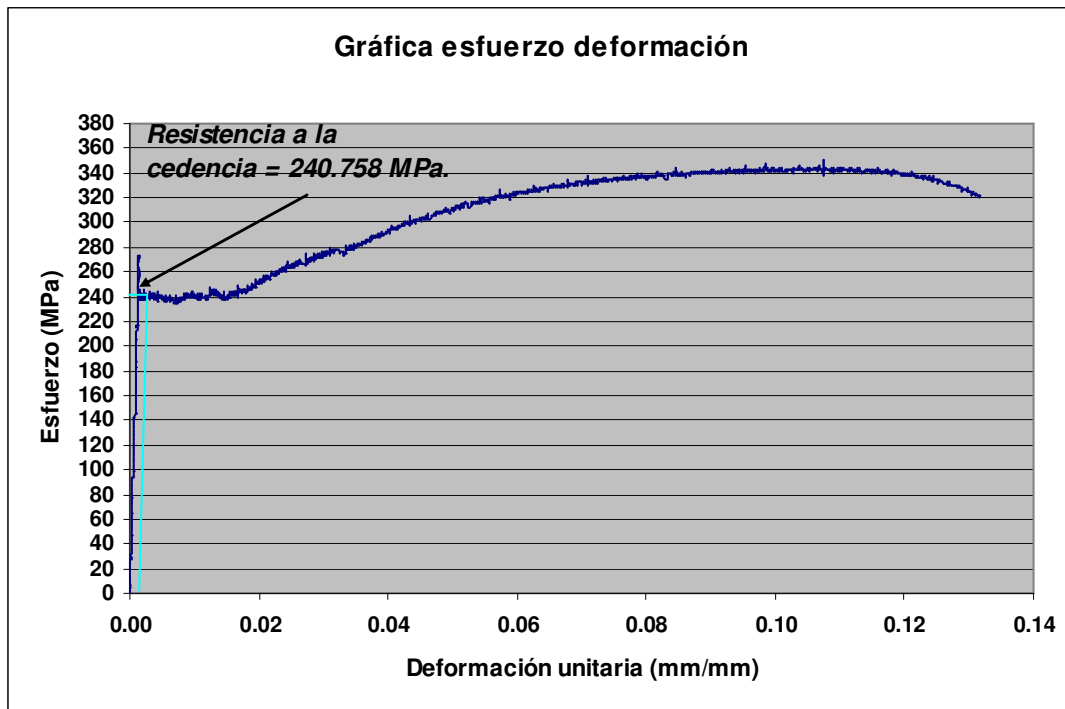


Figura III.2. Resistencia a la cedencia para la probeta expuesta a seis meses.

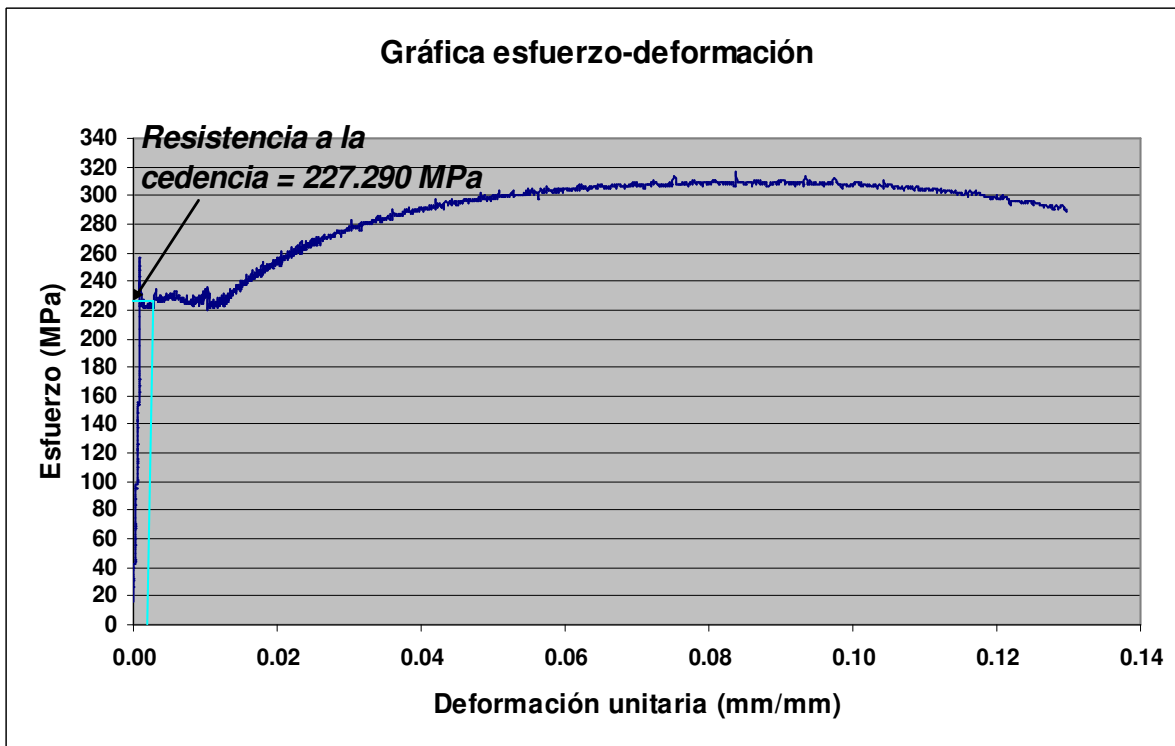


Figura III.3. Resistencia a la cedencia para la probeta de un año.

### III.2 Resultados de las propiedades mecánicas del acero estructural A36

En la tabla III.1 se muestran los resultados de las propiedades mecánicas del acero de acuerdo al ensaye a tensión. La probeta de referencia del acero estructural A36 es muy similar de acuerdo <http://www.matweb.com>.

Tabla III.1. Propiedades mecánicas del ensaye a tensión.

Ensaye a tensión			
Material. Acero estructural A36	Esfuerzo de cedencia (fy)	Módulo de elasticidad (E)	Esfuerzo máximo
Probeta de referencia A36	255.599 MPa	205317.728 MPa	369.185
A36 [ <a href="http://www.matweb.com">http://www.matweb.com</a> ]	250 MPa	200000 MPa	
A36 Expuesto durante seis meses al mar	238.676 MPa	202474.2316 MPa	351.502
A36 Expuesto durante un año al mar	226.24 MPa	198716.2190 MPa	315.883

En este trabajo se hizo una sola probeta para cada periodo de exposición debido a limitantes económicas, lo cual seria conveniente haber hecho más probetas para haber obtenido mejor validez de resultados.

### III.3 Cálculo de la tenacidad y ductilidad del material para cada tiempo de exposición del material

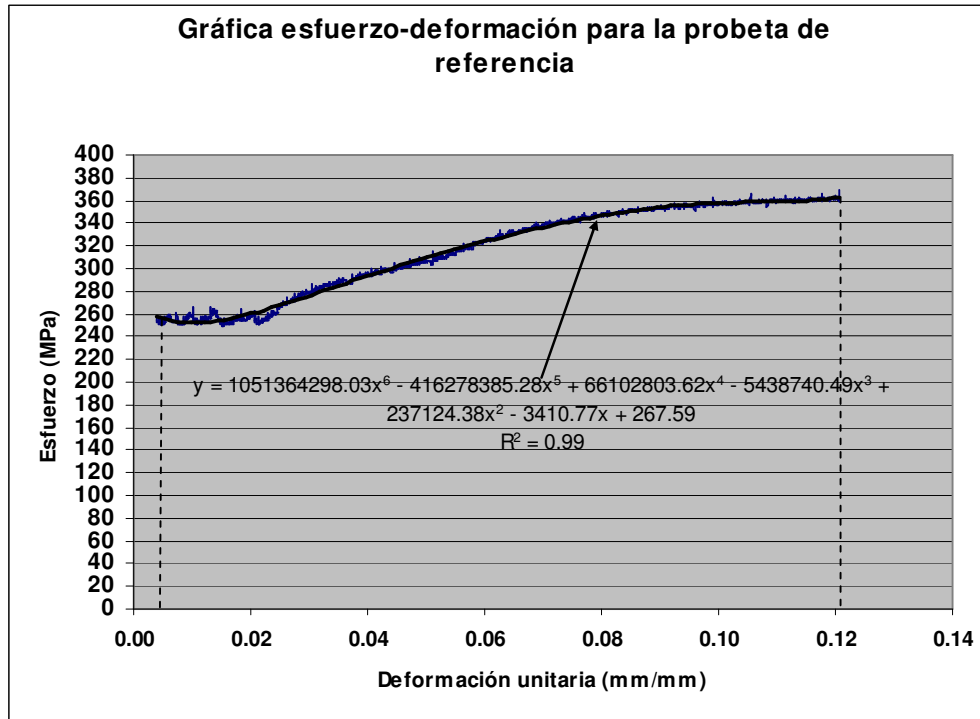
La tenacidad de un material significa la resistencia a la ruptura al estar sometido a la tensión. Para poder calcular la tenacidad de la probeta de referencia se tomó la gráfica esfuerzo-deformación obtenida de la prueba de ensaye, como se muestra en la gráfica III.1 de este capítulo. Posteriormente se calculó el área bajo la curva tomando en cuenta los puntos del esfuerzo de fluencia ( $\epsilon_y$ ) y el esfuerzo máximo ( $\epsilon_{m\acute{a}x}$ ). 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 programa del Exel 2003, la cual en este caso se obtuvo un polinomio de orden seis como se muestra en la figura III.4.

Una vez obtenida la función, como se muestra en la ecuación III.1, se integra para encontrar el área bajo la curva para los siguientes puntos:  $\epsilon_y = 0.00396$ ,  $\epsilon_{m\acute{a}x} = 0.127$

$$y = 1051364298.03x^6 - 416278385.28x^5 + 66102803.62x^4 - 5438740.48x^3 + 237124.38x^2 - 3410.77x + 267.59 \quad \text{III.1}$$

$$\int_{0.00396}^{0.127} \left( 1051364298.03x^6 - 416278385.28x^5 + 66102803.62x^4 - 543870.49x^3 + 237124.38x^2 - 3410.77x + 267.59 \right) dx$$

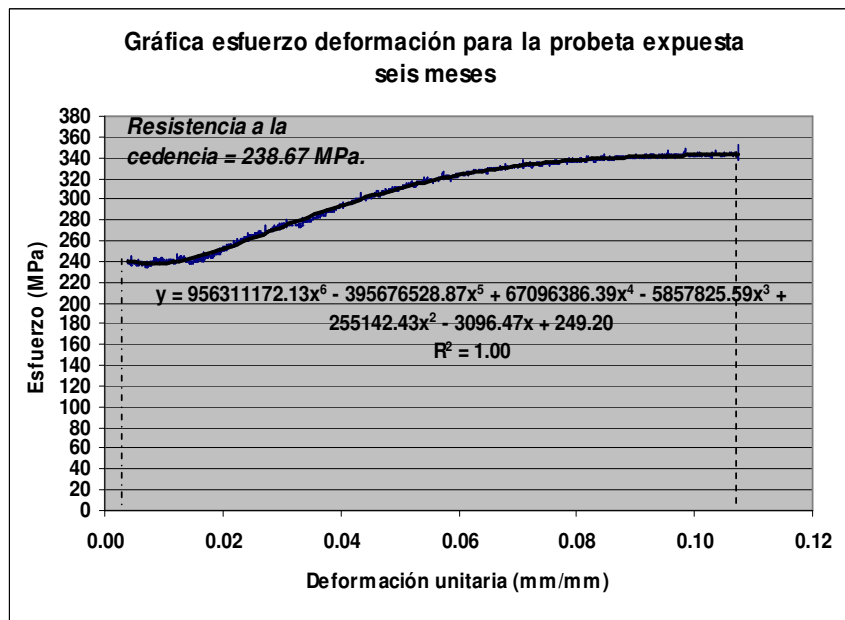
La tenacidad del material ( $U_T$ ) es de 37.033 Mpa



**Figura III.4.** Obtención de la función para la probeta de referencia.

Se hace el mismo procedimiento para la obtención de la tenacidad para la probeta expuesta seis meses y 12 meses.

En la gráfica esfuerzo deformación se trazó una línea de tendencia que se ajustó lo más posible a la curva, como se muestra en la figura III.5.



**Figura III.5.** Obtención de la función para la probeta expuesta seis meses.

La función obtenida para la curva esfuerzo deformación es la siguiente:

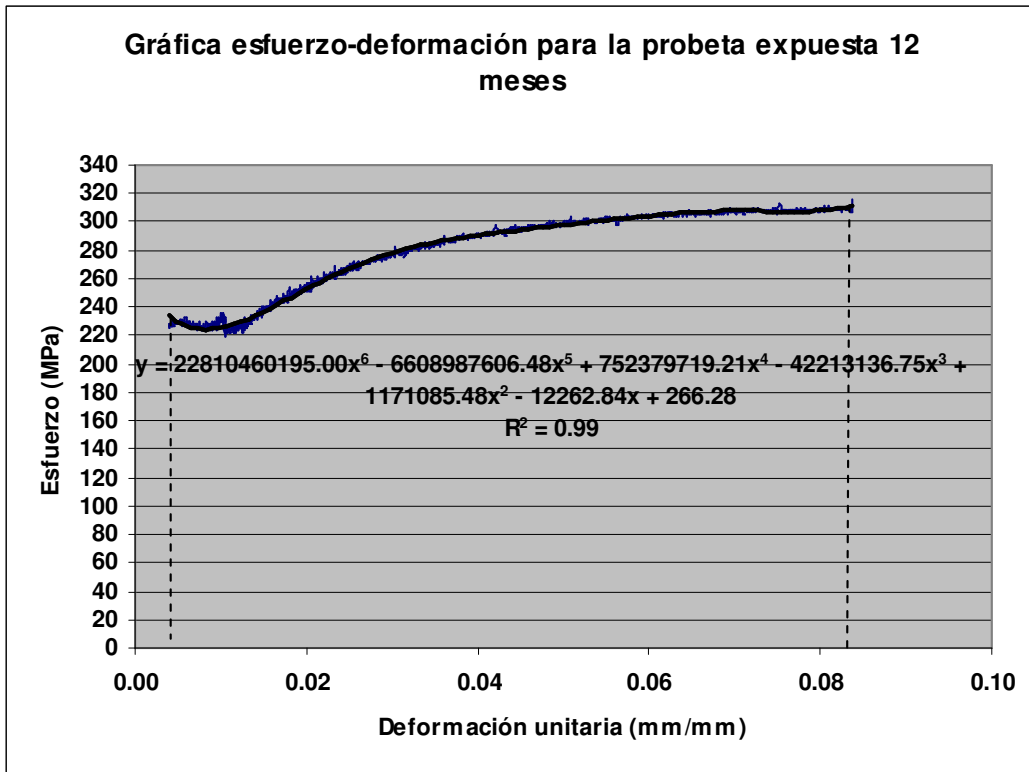
$$y = 956311172.13x^6 - 39567628.87x^5 + 67096386.39x^4 - 5857825.59x^3 + 255142.43x^2 - 3096.47x + 249.20 \quad \text{III.2}$$

Posteriormente se integra para encontrar el área bajo la curva para los siguientes puntos:  $\epsilon_y = 0.00395$ ,  $\epsilon_{\text{máx}} = 0.1075$

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

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

A continuación se muestra la gráfica esfuerzo-deformación de la probeta expuesta a 12 meses, en la que se obtuvo la función para obtener el área bajo la curva.



**Figura III.6.** Obtención de la función para la probeta expuesta a 12 meses.

$$y = 22810460195x^6 - 6608987606.48x^5 + 752379719.21x^4 - 42213136.75x^3 + 1171085.48x^2 - 12262.84x + 266.28 \quad \text{III.3}$$

Una vez obtenida la función se integra para calcular la tenacidad del material.

$$y = \int_{0.00395}^{0.08371} \left( 22810460195x^6 - 6608987606.48x^5 + 752379719.21x^4 - 42213136.75x^3 + 1171085.48x^2 - 12262.84x + 266.28 \right) dx$$

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

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:

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

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

$$\mu = \frac{\epsilon_{\text{máx}}}{\epsilon_y} \quad \text{III.4}$$

Los valores de la relación se obtuvieron de la gráfica esfuerzo-deformación para cada tipo de probeta.

Para la probeta de referencia, los valores son los siguientes, de acuerdo a la gráfica III.4.

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{máx}} &= 0.1207 \\ \epsilon_y &= 0.00396 \end{aligned}$$

al sustituir los valores en la fórmula III.4, se llega a:

$$\mu = \frac{0.1207}{0.00396} = 30.482$$

Para la probeta de seis meses de acuerdo a la gráfica III.5 son:

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{máx}} &= 0.1075 \\ \epsilon_y &= 0.00395 \end{aligned}$$

al sustituir nos da como resultado:

$$\mu = \frac{0.1075}{0.00395} = 27.225$$

Los puntos obtenidos de la gráfica III.6 de la probeta de 12 meses son:

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{máx}} &= 0.08371 \\ \epsilon_y &= 0.00395 \end{aligned}$$

el resultado al sustituir en la fórmula es:

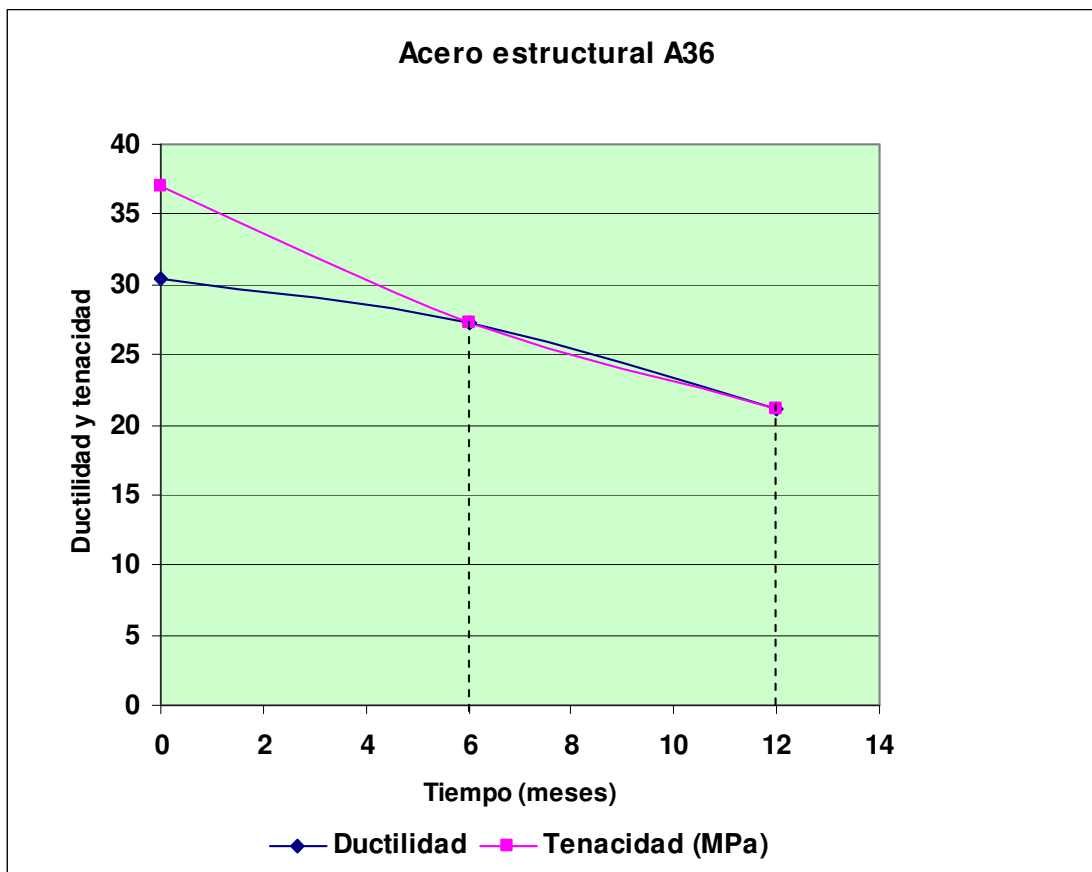
$$\mu = \frac{0.08371}{0.00395} = 21.192$$

En la tabla III.2 se presentan los resultados de ductilidad y tenacidad del material para la probeta en estudio.

Tabla III.2. Ductilidad y tenacidad del acero.

<b>Acero estructural A36</b>	<b>Ductilidad (<math>\mu</math>)</b>	<b>Tenacidad (MPa)</b>
Probeta de referencia	30.482	37.033
Expuesta 6 meses	27.225	31.568
Expuesta 12 meses	21.192	22.50

De acuerdo con los resultados de la tabla, se gráfica la ductilidad y tenacidad del material con respecto al tiempo de exposición.



*Figura III.7.* Ductilidad y tenacidad del acero con respecto al tiempo.



De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede dar cuenta que la ductilidad disminuyó debido al tiempo de exposición esto se debe a que el material pierde energía, entre más tiempo el material se exponga al mar este disminuye concentración de esfuerzo. Esto quiere decir que el acero se fragiliza.

A través del resultado obtenido de la ductilidad, se cálculo un factor de acuerdo a la relación de la probeta expuesta ( $\mu_P$ ) y la probeta de referencia ( $\mu_{PR}$ ), como lo indica la siguiente fórmula:

$$C\mu = \frac{\mu_P}{\mu_{PR}} \tag{III.5}$$

En la tabla III.3 se muestra el factor de ductilidad para el acero estructural, de acuerdo el tiempo de exposición.

Tabla III.3. Coeficiente de ductilidad ( $C\mu$ ).

Acero estructural A36	Tiempo (meses)	Ductilidad ( $\mu$ )	Coeficiente de ductilidad ( $C\mu$ )
Probeta de referencia	0	30.482	1
Expuesta seis meses	6	27.225	0.8931
Expuesta 12 meses	12	21.192	0.695

La gráfica III.8 muestra el coeficiente de ductilidad ( $C\mu$ ) de acuerdo el 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.

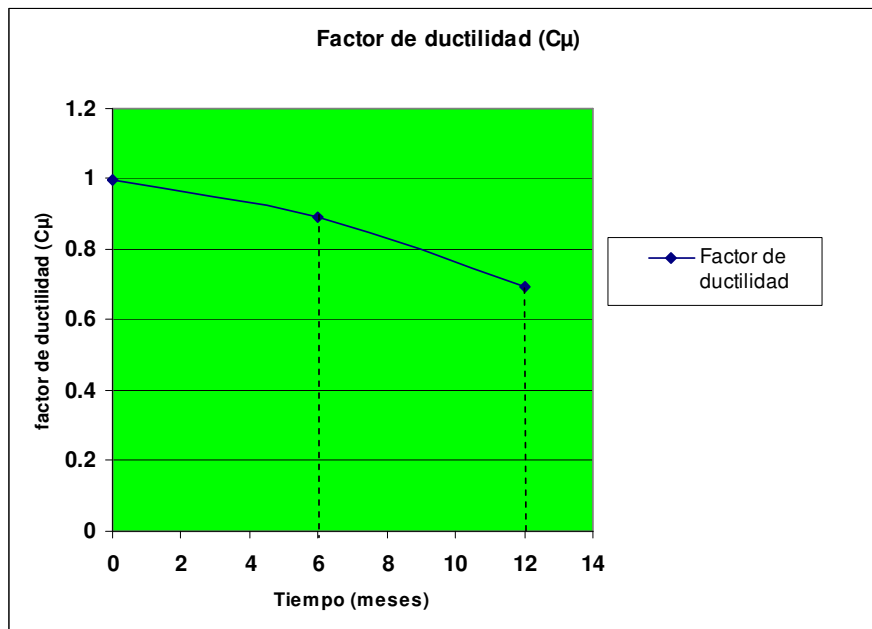
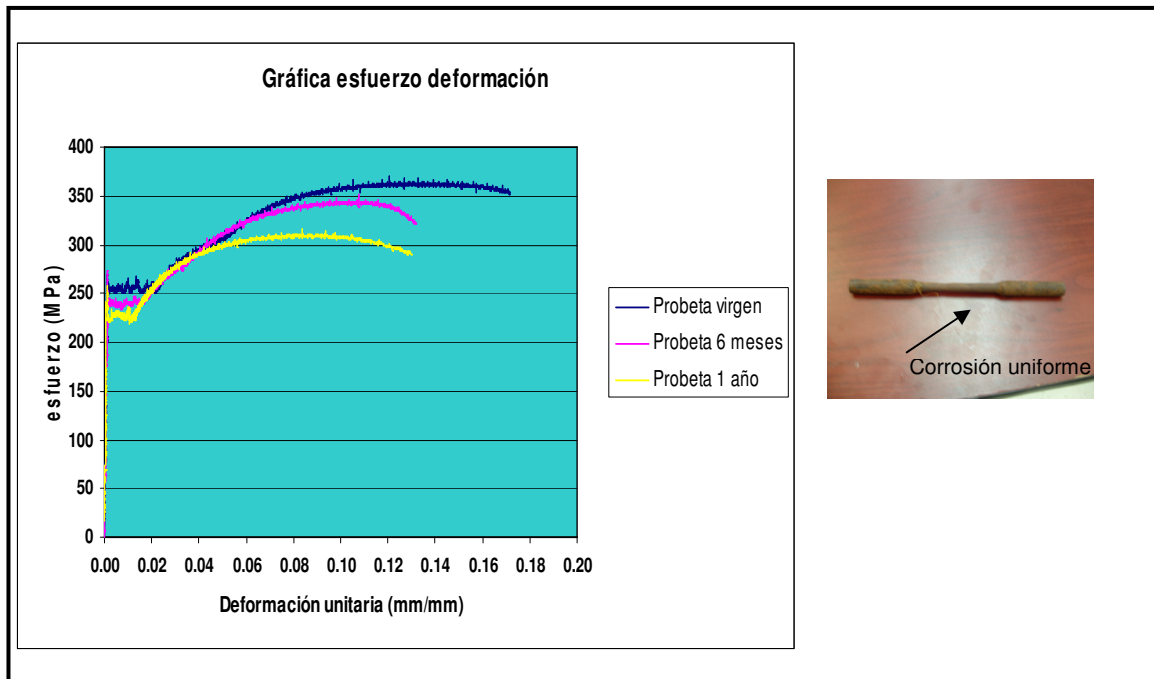


Figura III.8. Factor de ductilidad.

La figura III.9 muestra que hay pérdida de esfuerzo de fluencia a consecuencia que la corrosión se dio de manera uniforme, y eso provoca que haya reducción de área del diámetro.

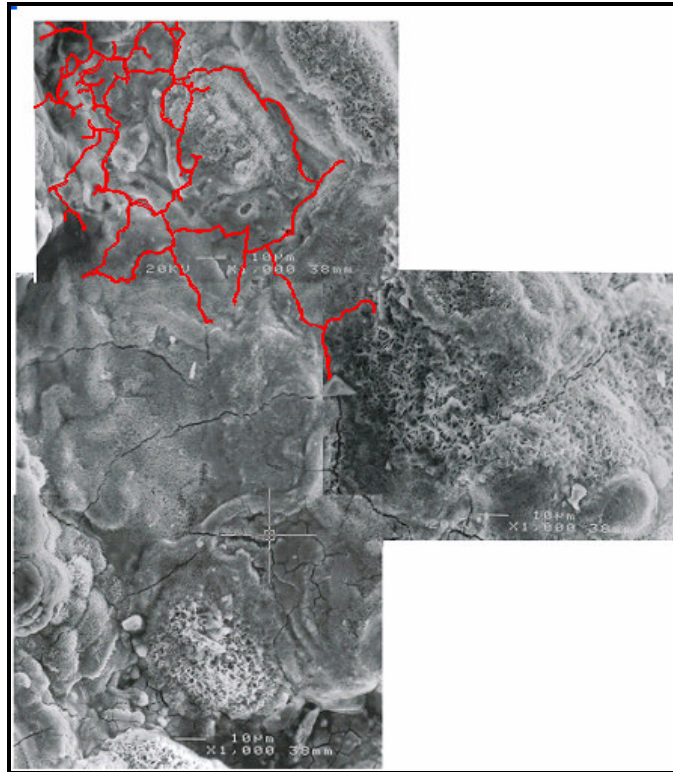


**Figura III.9.** Gráfica de esfuerzo deformación para cada tipo de envejecimiento de la probeta.

#### III.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 12 meses, se utilizó el método de conteo de cajas, el cual se aplica a fractales fragmentados o cuando estos se han generado por procesos naturales. El método se aplica de manera de gráfica y el procedimiento se encuentra explicado en el apéndice A.

Para este caso, la grieta original se rotó a diferentes grados para así poder determinar de manera más confiable la dimensión fractal ( $D_f$ ). El proceso que se realizó para determinar la  $D_f$ , es el siguiente: primero se eligió una fotografía, como se muestra en la figura III.10, para la probeta de seis meses. Posteriormente esta imagen se exportó a un programa en el cual se pudiera digitalizar el contorno de la grieta. Para este caso se utilizó el AutoCad 2005, y de esta forma trabajar con mayor exactitud sobre ella. Una vez digitalizada se tomó la grieta para posteriormente realizar los mallados necesarios para el cálculo de la dimensión fractal.



**Figura III.10.** Comportamiento fractal de la grieta para la probeta de seis meses.

Una vez realizado el mallado, se realizaron los cálculos aplicando el método de conteo de cajas, como se muestra en el apéndice A. Se graficaron los resultados, en la tabla III.4, donde  $N$  es el número de cajas intersectadas por la curva fractal,  $D_{\theta}$  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.

Tabla III.4 Dimensión fractal para cada rotación de la grieta de la probeta de seis meses.

Con rotación de 0°			
$N$	$\text{Log}(N)$	$L/l$	$\text{Log}(L/l)$
4	0.60205999	2	0.30103
13	1.11394335	4	0.60205999
16	1.20411998	5	0.69897
39	1.59106461	10	1
69	1.83884909	15	1.17609126
106	2.02530587	20	1.30103
137	2.13672057	25	1.39794001
326	2.5132176	50	1.69897
$D_{0^\circ} =$			1.3495

Con rotación de 45°			
$N$	$\text{Log}(N)$	$L/l$	$\text{Log}(L/l)$
4	0.60206	2	0.30103
14	1.14613	4	0.60206
15	1.17609	5	0.69897
39	1.59106	10	1.00000
68	1.83251	15	1.17609
104	2.01703	20	1.30103
136	2.13354	25	1.39794
325	2.51188	50	1.69897
$D_{45^\circ} =$			1.34290

Continuación tabla III.4

Con rotación a 90°			
$N^\circ$	$\text{Log}(N)$	$L/l$	$\text{Log}(L/l)$
4	0.60206	2	0.30103
14	1.14613	4	0.60206
16	1.20412	5	0.69897
38	1.57978	10	1.00000
69	1.83885	15	1.17609
106	2.02531	20	1.30103
136	2.13354	25	1.39794
326	2.51322	50	1.69897
$D_{90} =$			1.33980

Con rotación de 135°			
$N^\circ$	$\text{Log}(N)$	$L/l$	$\text{Log}(L/l)$
4	0.60206	2	0.30103
14	1.14613	4	0.60206
15	1.17609	5	0.69897
37	1.56820	10	1.00000
68	1.83251	15	1.17609
104	2.01703	20	1.30103
136	2.13354	25	1.39794
325	2.51188	50	1.69897
$D_{135} =$			1.34320

Para obtener la dimensión fractal a cada curva graficada, se calculó una línea de tendencia y se 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 III.11.

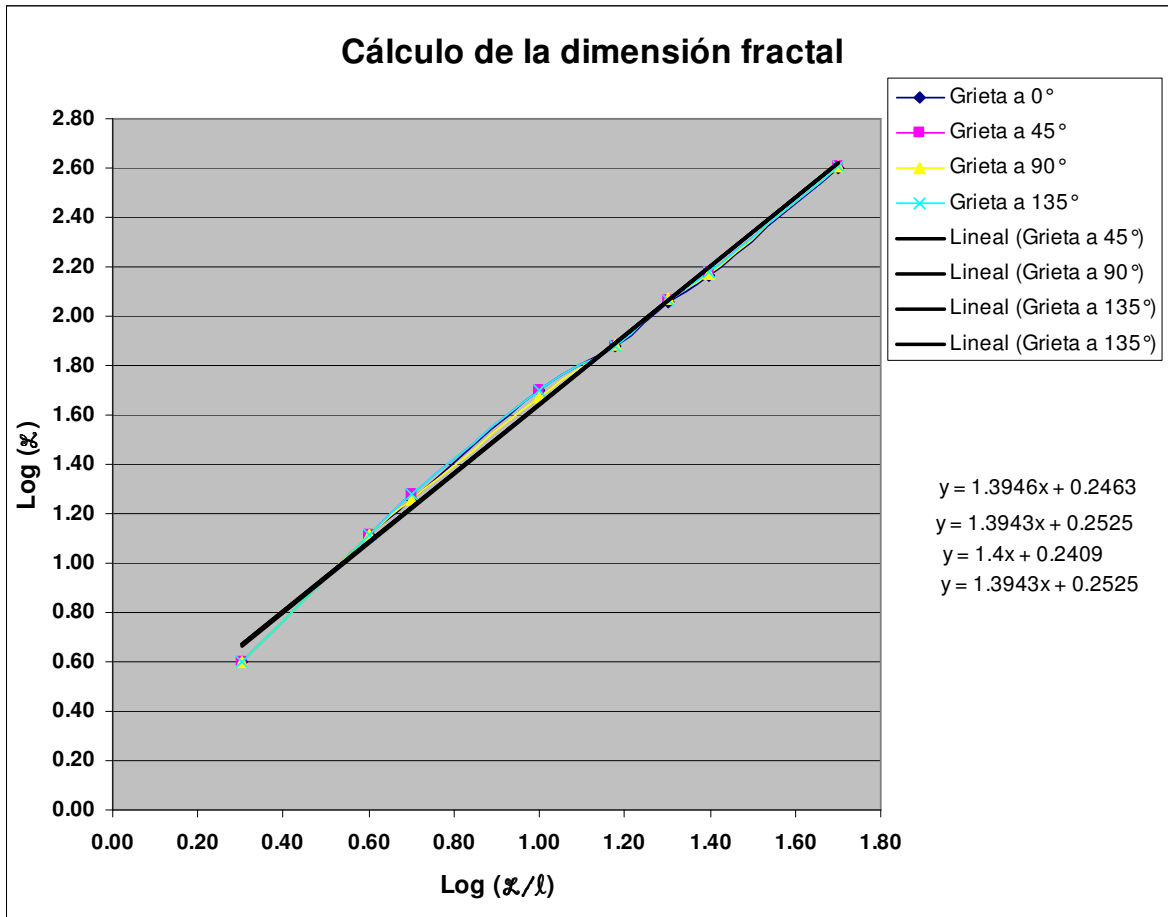


Figura III.11. Gráfica para el cálculo de la dimensión fractal.

En el presente capítulo únicamente se incluyen las tablas y figuras de mayor interés para la investigación. Las restantes figuras utilizadas en los cálculos se encuentran en el anexo 3.

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:

$$D_f = (D_{0^\circ} + D_{45^\circ} + D_{90^\circ} + D_{135^\circ}) / 4 \\ = (1.34950 + 1.34290 + 1.33980 + 1.34320) / 4 = 1.34385$$

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

Posteriormente se calcula la desviación estándar para cada dimensión fractal con la siguiente fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{III.6}$$

$$s = \sqrt{\frac{(1.34950 - 1.34385)^2 + (1.34290 - 1.34385)^2 + (1.33980 - 1.34385)^2 + (1.34320 - 1.34385)^2}{3}} = 0.00406$$

La desviación estándar es de 0.00406. En la figura III.12 se muestra el resultado de la dimensión fractal calculado con la ayuda del programa *Benoit* 1.2 <http://www.scioncorp.com> como manera de comprobación, la dimensión fractal obtenido en el programa es  $D_f = 1.34029$  y la desviación estándar es igual 0.02322647.

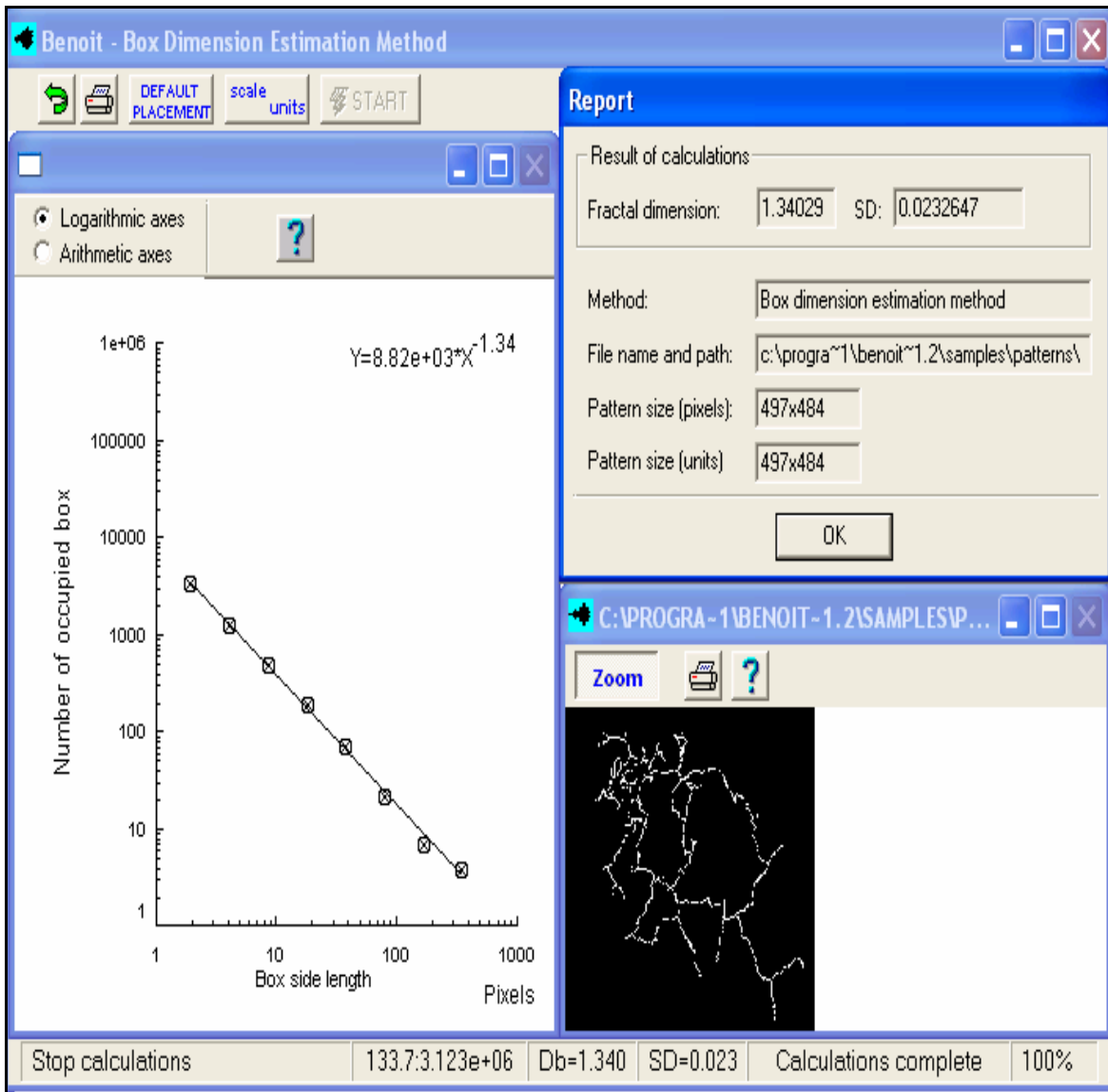
Posteriormente se calculó el porcentaje de variación con respecto al que se obtuvo manualmente y hecho con el programa *Benoit* 1.2 con la siguiente fórmula:

$$\Delta \% = \frac{\text{valor encontrado} - \text{valor de referencia}}{\text{valor de referencia}} (100) \quad \text{III.7}$$

Con la expresión III.2 se sustituyen los valores obtenidos manualmente y el resultado obtenido por el programa *Benoit*, el porcentaje de variación es el siguiente:

$$\Delta \% = \frac{1.34025 - 1.34385}{1.34025} (100) = 0.26561\%$$

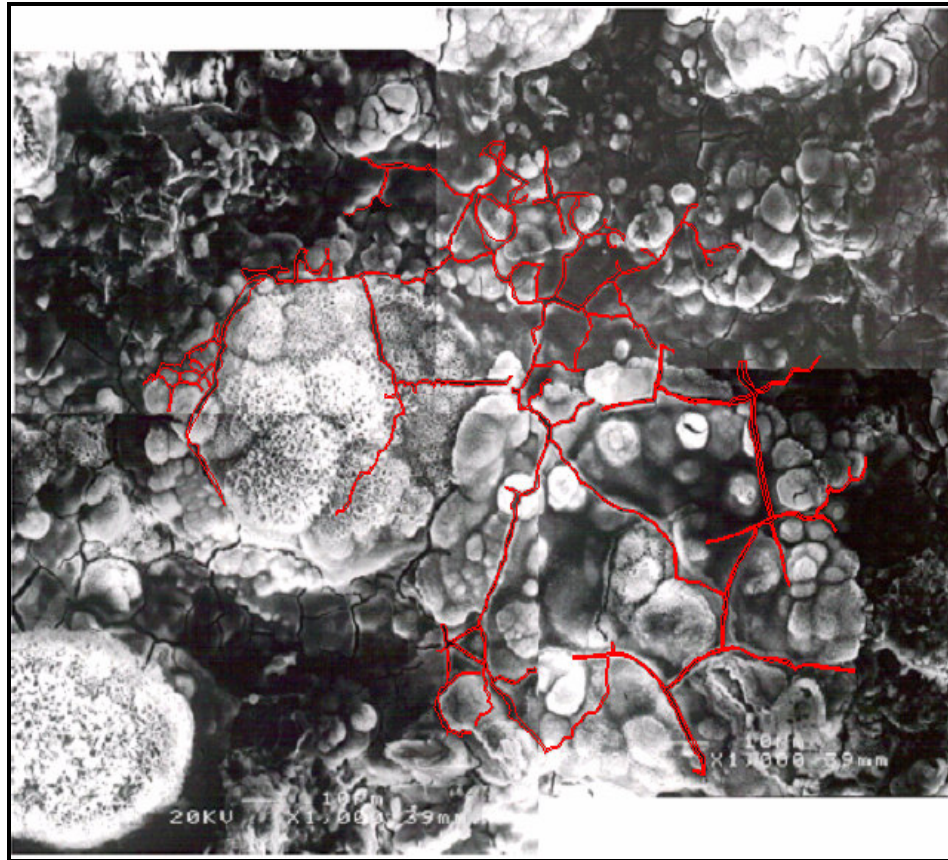
Como se puede observar el porcentaje de variación es muy mínimo, eso se debe a que el programa *Benoit* 1.2 tiene una mayor exactitud en el conteo de cajas, ya que la grieta presenta rugosidad.



**Figura III.12.** Obtención de la dimensión fractal en el programa *Benoit* 1.2

### III.5 Cálculo de la dimensión fractal de la grieta para la probeta de un año

En la figura III.13 se muestra la grieta digitalizada en AutoCad 2005 para la probeta de un año. Cabe 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.



**Figura III.13.** Comportamiento fractal de la grieta 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 III.5.

Tabla III.5. Dimensión fractal para cada rotación de la grieta.

Con rotación de 0°			
<i>N</i>	Log( <i>N</i> )	<i>L/l</i>	Log( <i>L/l</i> )
4	0.60206	2	0.30103
13	1.11394	4	0.60206
18	1.25527	5	0.69897
50	1.69897	10	1.00000
75	1.87506	15	1.17609
114	2.05690	20	1.30103
147	2.16732	25	1.39794
401	2.60314	50	1.69897
$D_0 = 1.3946$			

Con rotación a 45°			
<i>N</i>	Log( <i>N</i> )	<i>L/l</i>	Log( <i>L/l</i> )
4	0.60206	2	0.30103
13	1.11394	4	0.60206
19	1.27875	5	0.69897
50	1.69897	10	1.00000
76	1.88081	15	1.17609
116	2.06446	20	1.30103
150	2.17609	25	1.39794
402	2.60423	50	1.69897
$D_{45} = 1.39430$			

Continuación Tabla III.5

Con rotación a 90°			
N	Log(N)	L/l	Log(L/l)
4	0.60206	2	0.30103
13	1.11394	4	0.60206
18	1.25527	5	0.69897
47	1.67210	10	1.00000
77	1.88649	15	1.17609
117	2.06819	20	1.30103
148	2.17026	25	1.39794
403	2.60531	50	1.69897
		$D_{90} =$	1.40000

Con rotación de 135°			
N	Log(N)	L/l	Log(L/l)
4	0.60206	2	0.30103
13	1.11394	4	0.60206
19	1.27875	5	0.69897
50	1.69897	10	1.00000
76	1.88081	15	1.17609
116	2.06446	20	1.30103
150	2.17609	25	1.39794
402	2.60423	50	1.69897
		$D_0 =$	1.39430

Para obtener la dimensión fractal a cada curva graficada, se trazó una línea de tendencia y se 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 III.14.

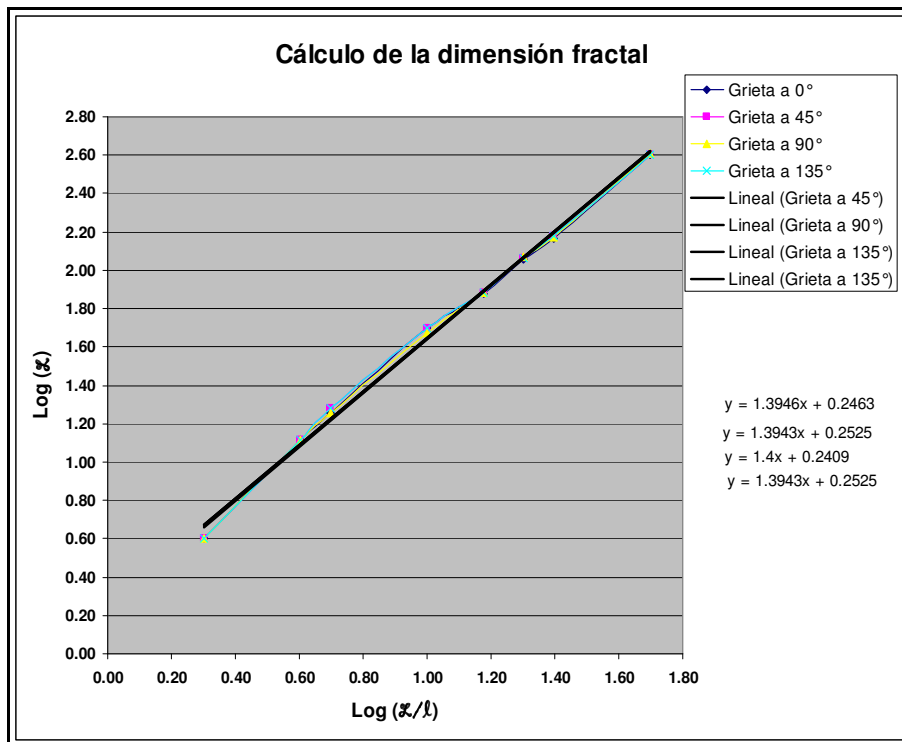


Figura III.14. Gráfica para el cálculo de la dimensión fractal expuesta durante un año.



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 un año.

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

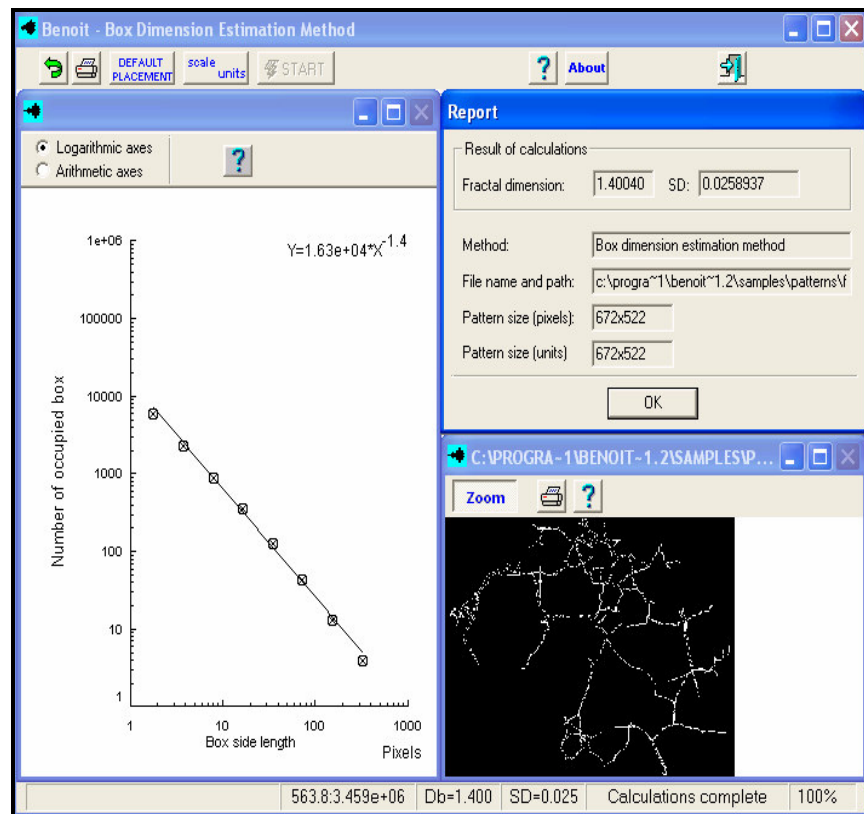
$$= (1.3946 + 1.39430 + 1.4000 + 1.39430) / 4 = 1.3958$$

La dimensión fractal de las grietas en acero estructural A36, tiene un valor de 1.3958.

Se calcula la desviación estándar una vez obtenidas la dimensión fractal para cada una de las rotaciones con la fórmula III.1

$$s = \sqrt{\frac{(1.3946 - 1.3958)^2 + (1.39430 - 1.3958)^2 + (1.4000 - 1.3958)^2 + (1.39430 - 1.3958)^2}{3}} = 0.0028$$

La desviación estándar es de 0.0028. De acuerdo al programa *Benoit 1.2* <http://www.scioncorp.com> la dimensión fractal es de 1.40040 y su desviación estándar es 0.0258937 como se muestra en la figura III.15.

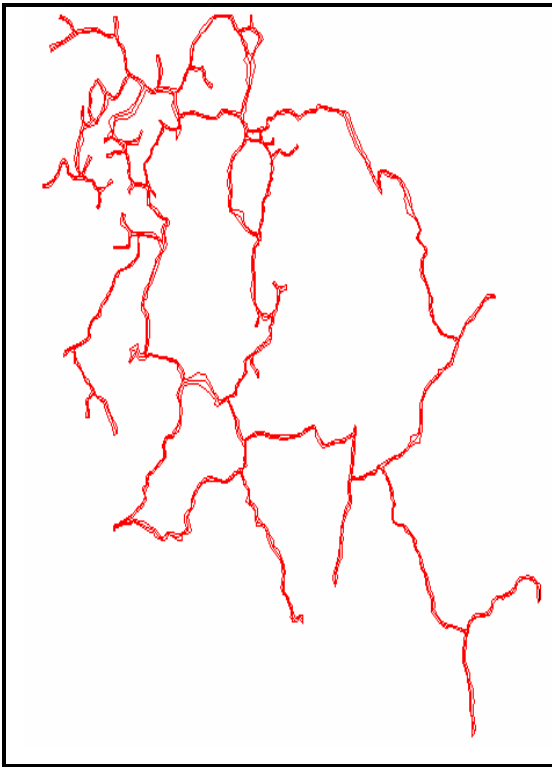


**Figura III.15.** Obtención de la dimensión fractal en el programa *Benoit 1.2*.

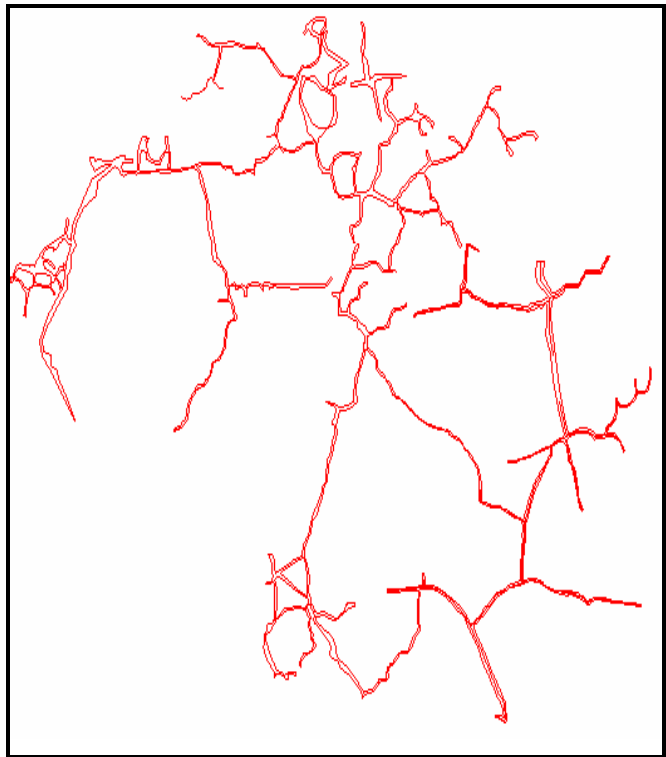
El porcentaje de variación de acuerdo con la ecuación III.7 para la probeta de 12 meses es la siguiente:

$$\Delta\% = \frac{1.3958 - 1.4004}{1.3958} (100) = 0.3295\%$$

Una vez calculada la dimensión fractal para la probeta expuesta a 12 meses, como se muestra en la figura III.17, fue mayor que la de seis meses lo que indica que hubo mayor rugosidad del material por presencia de corrosión debido a que la probeta estuvo más tiempo expuesta al mar, lo que hace que el material presente mayor irregularidades en la superficie de la probeta.



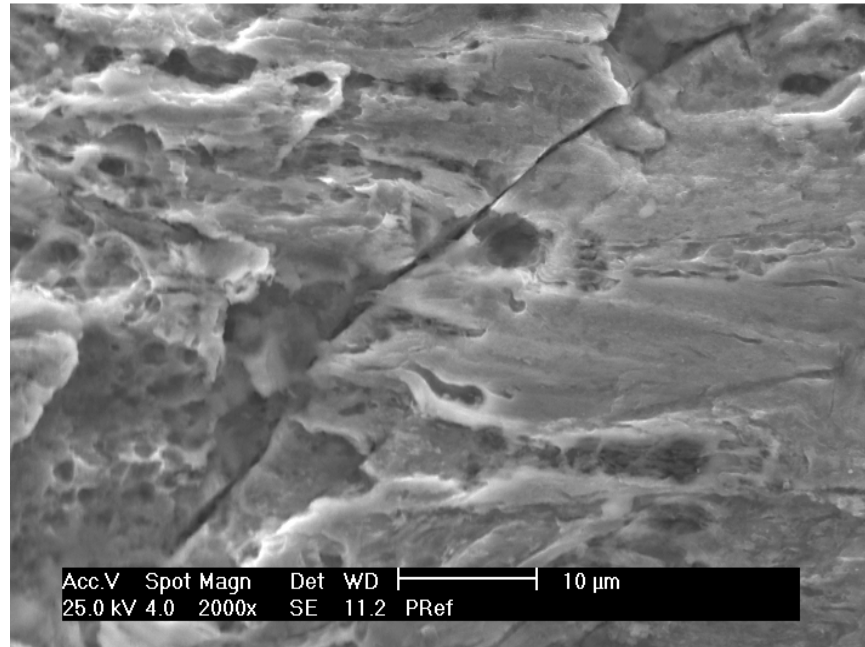
**Figura III.16.** Df = 1.343 para la probeta de seis meses.



**Figura III.17.** Df = 1.3958 para la probeta de 12 meses.

### III.6 Fractografía del acero estructural A36 para la probeta de referencia

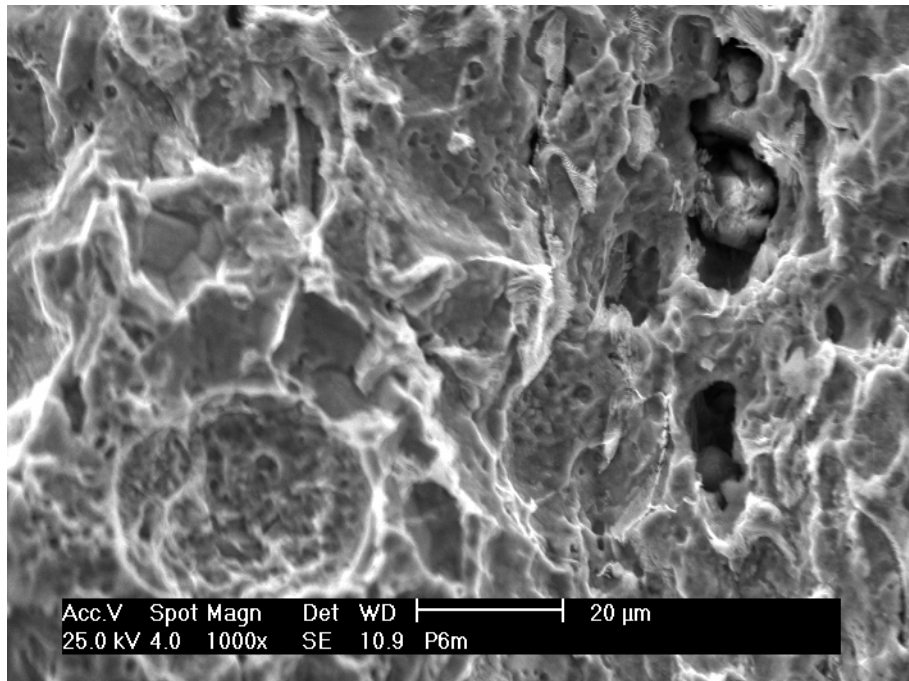
Con la ayuda del MEB se observó la superficie de fractura a 2000 aumentos para la probeta de referencia el acero estructural A36 ensayada a tensión, la cual presenta una fractura dúctil. La grieta que se presenta en el material es provocada por el ensaye, como se muestra en la figura III.18.



**Figura III.18.** Fractura dúctil en acero estructural A36 virgen.

### III.7 Fractografía del acero estructural A36 para la probeta expuesta a corrosión durante seis meses

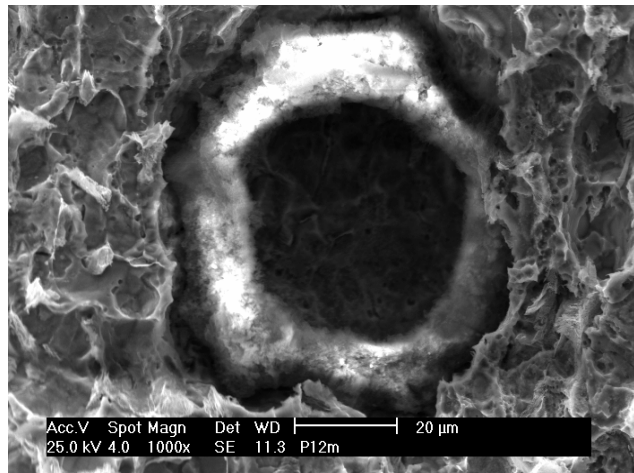
La probeta expuesta a seis meses, como se puede observar en la figura III.19, muestra presencia de picadura por corrosión en la parte de la formación del cuello, ya que las picaduras pueden contribuir de manera importante a una falla general.



**Figura III.19.** Presencia de picadura por corrosión.

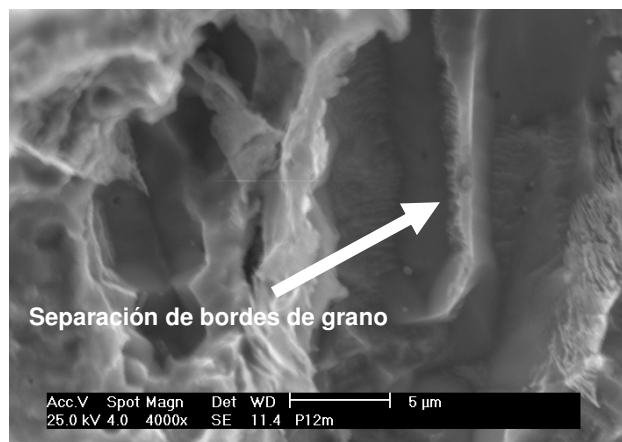
### III.8 Fractografía del acero estructural A36 para la probeta expuesta a corrosión durante 12 meses

En 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 III.20



**Figura III.20.** Picadura por corrosión.

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 III.21 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 como fue en este caso, ya que el acero fue expuesto en el mar cercas de la zona industrial de Mazatlán lo que provoco que el material obtuviera presencia de hidrógeno y ocasionará la pérdida de ductilidad.



**Figura III.21.** Separación de bordes de grano.

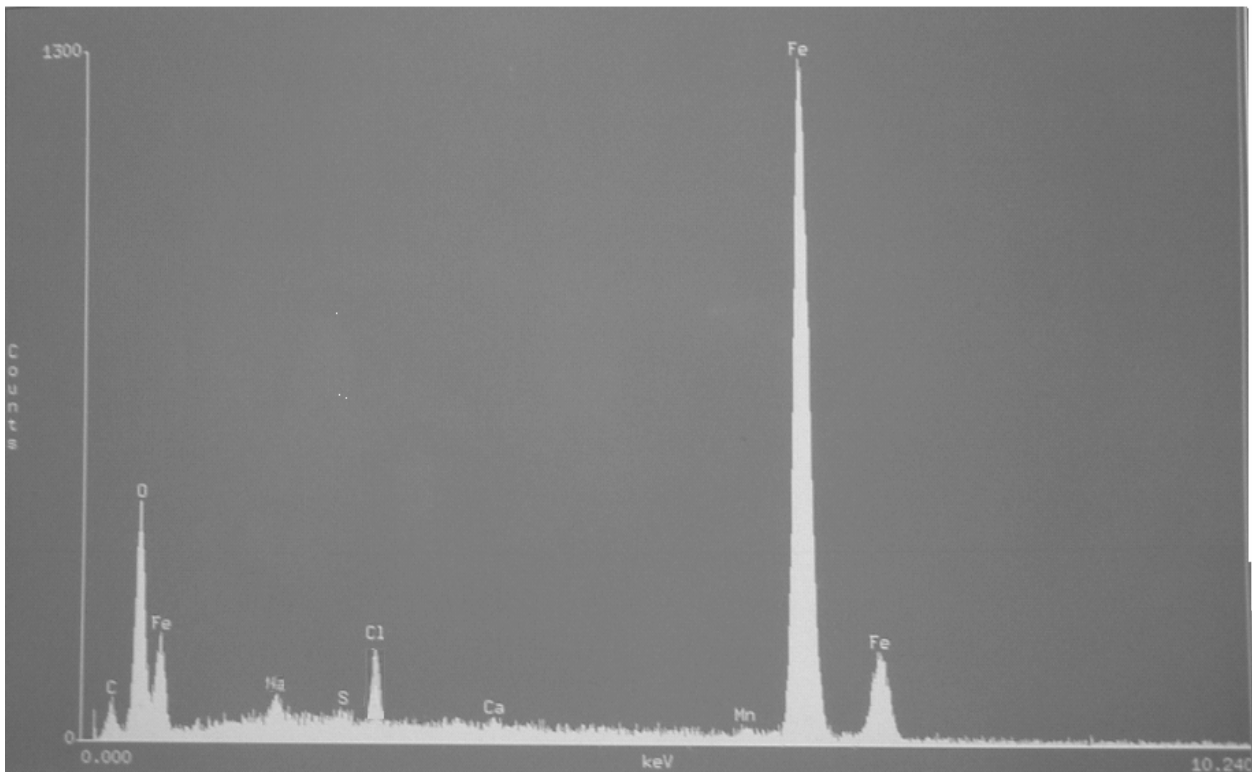
### III.9 Microanálisis

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.

En la figura III.22 se puede apreciar la presencia exclusiva de Carbono, Oxígeno, Hierro, Silicio, Azufre, Cloro, Sodio, Calcio, 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 del 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.

La presencia de Cloruros y los Sulfatos hicieron posible el aceleramiento de la corrosión provocándole picaduras en la superficie del material, lo cual hace que el material pierda ductilidad y haya disminución de área de la probeta, ya que la corrosión se dio de manera uniforme. Este fenómeno es muy común en estructuras de acero como edificios y puentes que están interactuando con el mar lo cual le provoca que haya pérdida de resistencia del material.



**Figura III.22.** Espectro de análisis mediante microscopio electrónica.



# 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 y 12 meses, lo que produce un adelgazamiento generalizado de toda la superficie.
- El acero estructural A36 expuesto a seis y 12 meses presentó picaduras debido a la presencia de cloruros y sulfatos que contiene el mar.
- En las probetas expuestas durante seis meses y 12 meses presentaron una superficie frágil y porosa, debido a la corrosión marina.
- Se registró una pérdida de ductilidad para la probeta expuesta a seis meses con respecto a la probeta de referencia de 11.96% y para la probeta de 12 meses fue de 43.87%. Esto indica que entre más tiempo permanezca el acero en el mar pierde energía, esto hace que el material se fragilice.
- Se obtuvo una gráfica donde muestra el factor 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,
- La prueba de ensaye a tensión para la probeta expuesta a seis meses y 12 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 de área ya que la corrosión se dió 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 12 meses es 0.3295% como se puede dar cuenta el margen de variación es mínimo.

- La dimensión fractal obtenida para la probeta expuesta a 12 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.



## *TRABAJOS FUTUROS*

- Realizar un número adecuado de probetas para el tiempo de seis, nueve y 12 meses con el propósito de establecer un modelo que indique el comportamiento de rugosidad con el tiempo de exposición de probetas.
- Hacer una prueba Charpy a probetas de acero estructural A36 para la obtención de la tenacidad de fractura.
- Aplicar ensaye de carga y descarga a los especímenes envejecidos a corrosión marina con la finalidad de obtener un factor de degradación del material aplicando la teoría de mecánica de daño.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**American Society of testing Materials (ASTM) E8-01, 2001.** Standard Test Methods for Tensión of Metálic Materials.

**Bouchaud, E, Lappaset, G y Planés, J. 1990.** Europhys Lett., 13, pp. 73

**Bouchaud, E. 1997.** Scaling Properties of Cracks. J. Phys. Candens Matter 9, pp. 4319-4344.

**Cortés, P. R. y Villanueva, A. J, 2004.** 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 N°2, pp. 43-56, 2004.

**Cherepanov G.P., y A.S. Balankin, 1997.** Fractal and Fracture. A topical encyclopedia of current knowledge dedicated to Alan Arnold Griffith, G.P Cherepanov E.D., Krieger, Melbourne, pp. 104.

**Daguier P., Hénaux S., Bouchaud E., y Creuzet F. 1996.** Quantitative Analysis of a Fracture Surface by Atomic Force Microscopy. Phys. Rev. E, 53, 5637.

**Daguier, P. y Nghiem, B. 1997.** Pinning y Depinning of Crack Fronts in Heterogeneous Materials, Phys. Rev Left., 78, pp. 1062.

**Handbook ASM. 1987.** Fractography. The Metals Information Society. Former Ninth Edition, Volumen 12.

**Hinojosa M., Bouchaud E. y Nghiem B. 1999.** Materials Research Society Symposium Proceedings. Materials Research Society, Volume 539, pp. 203-208. Warrendale Pennsylvania.

**Hilders, O.A. y Peña, N.D. 1995.** 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.

**Ipohorski, M. 1988.** Fractografía-Aplicación al análisis de falla. Informe CNEA 490, Buenos Aires.

**Mandelbrot B.B, 1982.** The Fractal Geometry of Nature. Freeman, New Cork, pp. 459.

**Mandelbrot B.B. y Passoja, D. 1984.** Nature, 304, P. 771.

**NMX-B-310-1981.** 1996. Métodos de prueba a la tensión para productos de acero. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Norma Mexicana.

**Reyes, M. y E. Guerrero, C. 2001.** Autoafinidad de superficies de fractura en materiales Plásticos, Ingenierías, Vol. IV, no. 1, pp. 27-37.

**Timoschenko Gere, 1986.** Mecánica de materiales. Editorial Iberoamericana

***Páginas Web consultadas y referenciadas en el texto***

<http://corrosion.uis.edu.co>. Julio de 2006

<http://www.scioncorp.com>

<http://www.matweb.com/index>. Febrero de 2007.

***Páginas Web consultadas y no referenciadas en el texto***

<http://uis.edu.co>. Septiembre de 2006

<http://www.icp.ecopetrol.com.co/>. Julio de 2006

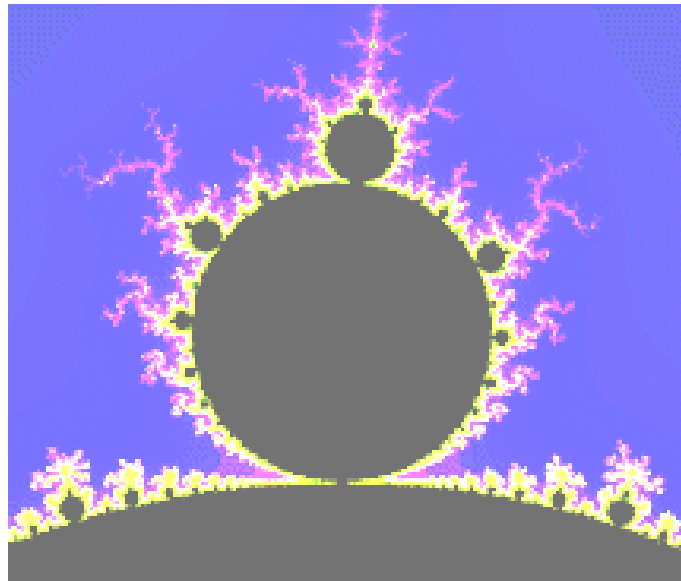
<http://www.oni.escuelas.edu.ar/olimi99/fractales/principal.htm>. Marzo de 2005.

<http://www.oni.revistamarina.cl/revista/2000/1/Ortuzar.pdf>. Junio de 2005.

<http://www.fractalus.com>. Noviembre 2005.



# APÉNDICE A GEOMETRÍA FRACTAL



## **Resumen**

En el presente anexo se muestra un panorama general de la geometría fractal. Se menciona el cálculo para la obtención de la dimensión fractal por el método más utilizado.

# APÉNDICE A

## GEOMETRÍA FRACTAL

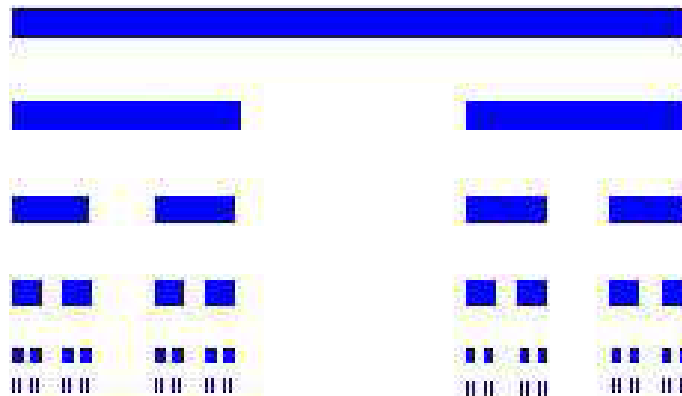
### A.1 Introducción

Los fractales son estructuras geométricas que se pueden usar para analizar muchas irregularidades que no son compatibles con análisis convencionales.

### A.2 Dimensión fractal

La mayoría de la gente está familiarizada con las tres dimensiones espaciales en que vivimos (largo, ancho y profundo). Estas dimensiones son conocidas como dimensiones topológicas euclidianas y han sido usadas por muchos años para describir la forma y posición de los objetos. Sin embargo Mandelbrot encontró que ciertos objetos geométricos no podían ser descritos con las dimensiones topológicas euclidianas usuales, y formuló la idea de una dimensión fraccionaria o fractal existente entre las dimensiones topológicas euclidianas.

La dimensión fractal de un subconjunto de una recta varía de 0 a 1, es 0 cuando se tiene un conjunto finito de puntos, es 1 cuando es un segmento de recta (es decir, un intervalo), está entre 0 y 1 cuando es un conjunto de puntos que llena parcialmente a la recta (es decir, no contiene ningún intervalo, pero tiene muchos puntos), por ejemplo: el conjunto ternario de Cantor tiene una dimensión fractal de  $\log(2) / \log(3) = 0.63$ .

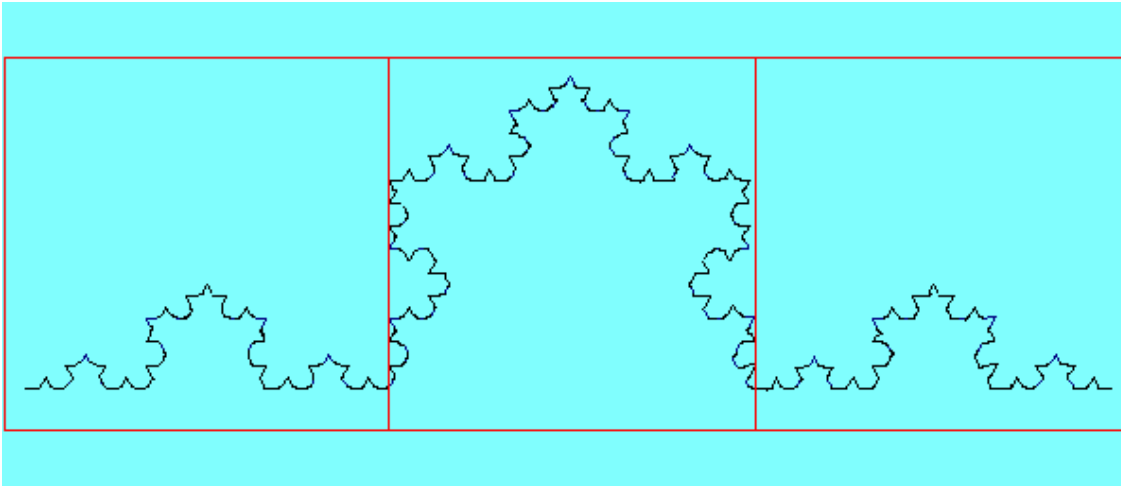


**Figura A.1.** El conjunto de Cantor se obtiene al tomar la intersección de los conjuntos  $C_j$  donde el conjunto  $C_0$  es un segmento de recta,  $C_1$  es el conjunto  $C_0$  menos el interior del tercio de en medio del segmento, y en general  $C_j$ , es el conjunto  $C_{j-1}$  menos el interior de los tercios de en medio de los segmentos de recta que forman a  $C_{j-1}$ .

### A.3 Método de conteo de cajas

Mostraremos el algoritmo de conteo de cajas, por su sencillez. Este algoritmo estima qué tanto espacio es ocupado por la estructura fractal. Primero, se pone una malla arbitraria sobre la estructura que se medirá. Luego, contamos cuántas cajas definidas por la malla son ocupadas por la estructura fractal.

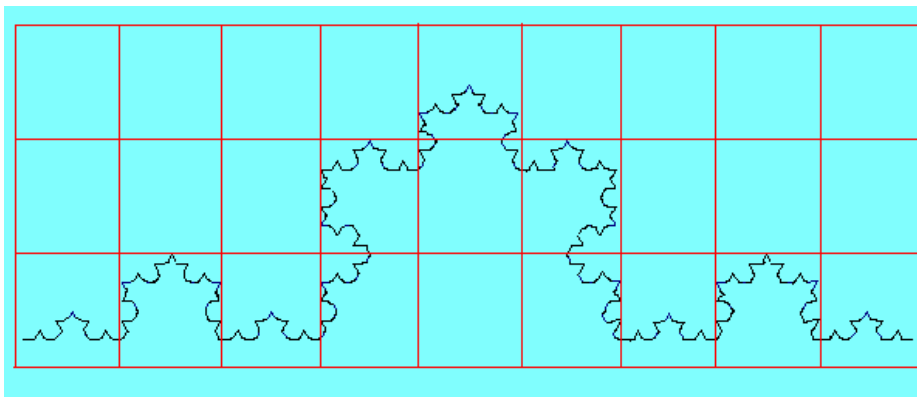
Para el objeto mostrado en la figura A.2 la estructura ocupa 3 cajas.



**Figura A.2.** Este objeto fractal ocupa 3 cajas de la malla.

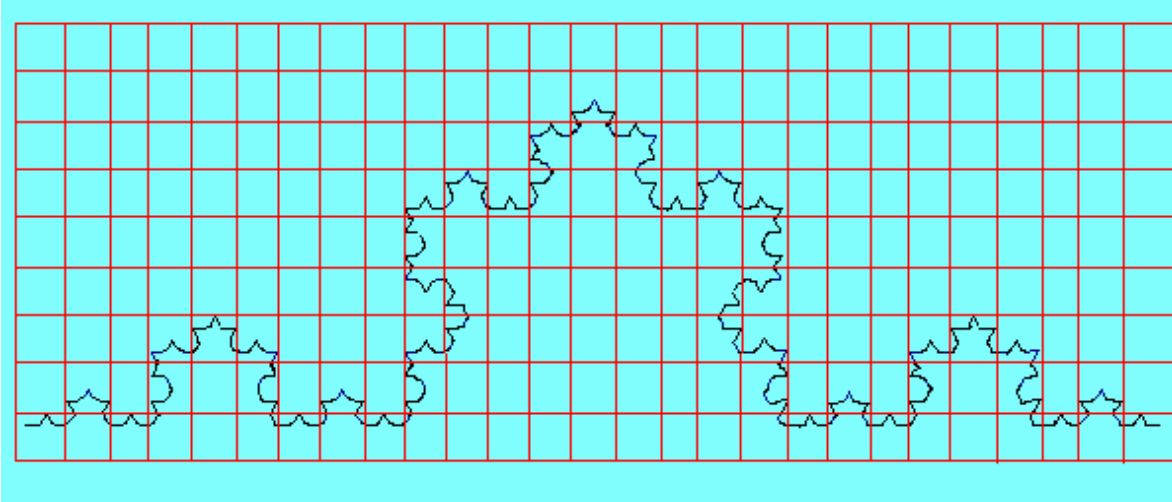
El proceso se repite con una malla con longitudes de la  $n$ -ésima parte del tamaño de la anterior, en este caso es de la tercera parte.

Con la malla de abajo, (que se obtuvo dividiendo en 3 partes iguales los lados de las cajas de la malla anterior, dando lugar a 9 cajas nuevas por cada caja de la malla anterior) la estructura en la figura A.3 ocupa 12 cajas.



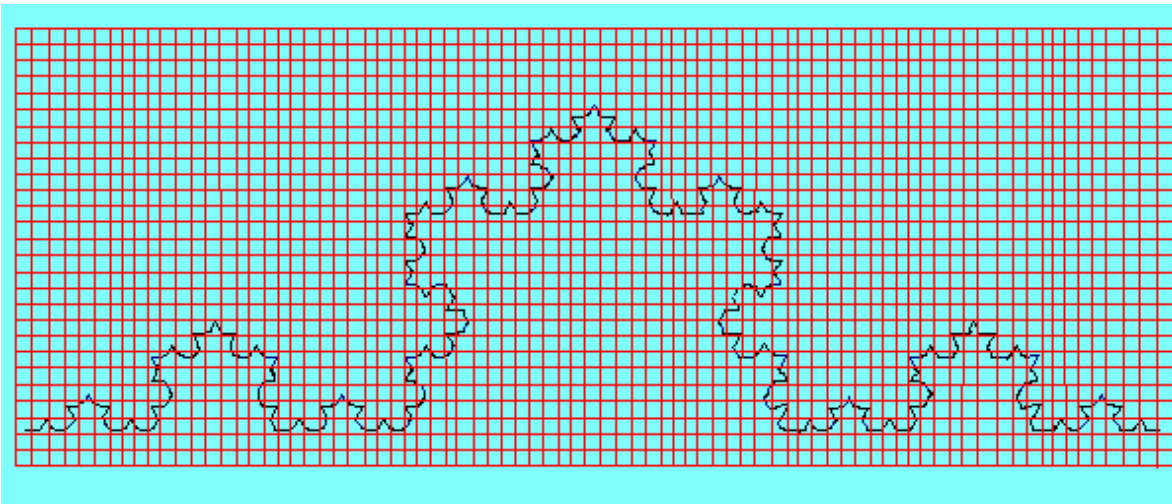
**Figura A.3.** Al dividir en 3 partes iguales cada uno de los lados de la malla anterior, obtenemos una malla más fina y el objeto fractal ocupa 12 cajas de la nueva malla.

El proceso se repite otra vez con una malla con longitudes de la  $n$ -ésima parte del tamaño de la anterior (en este caso, la tercera parte). Con la malla de abajo, la estructura de la figura A.4 ocupa 55 cajas.



**Figura A.4.** Volvemos a dividir en 3 partes iguales cada uno de los lados de la malla anterior, obtenemos una malla más fina y el objeto fractal ocupa 55 cajas de la nueva malla.

Este proceso puede realizarse indefinidamente, usando mallas cada vez más pequeñas. Para este ejemplo, contaremos una vez más. Con la malla de abajo la estructura de la figura A.5 llena 405 cajas.



**Figura A.5.** Volvemos a dividir en 3 partes iguales cada uno de los lados de la malla anterior, obtenemos una malla más fina y el objeto fractal ocupa 405 cajas de la nueva malla.

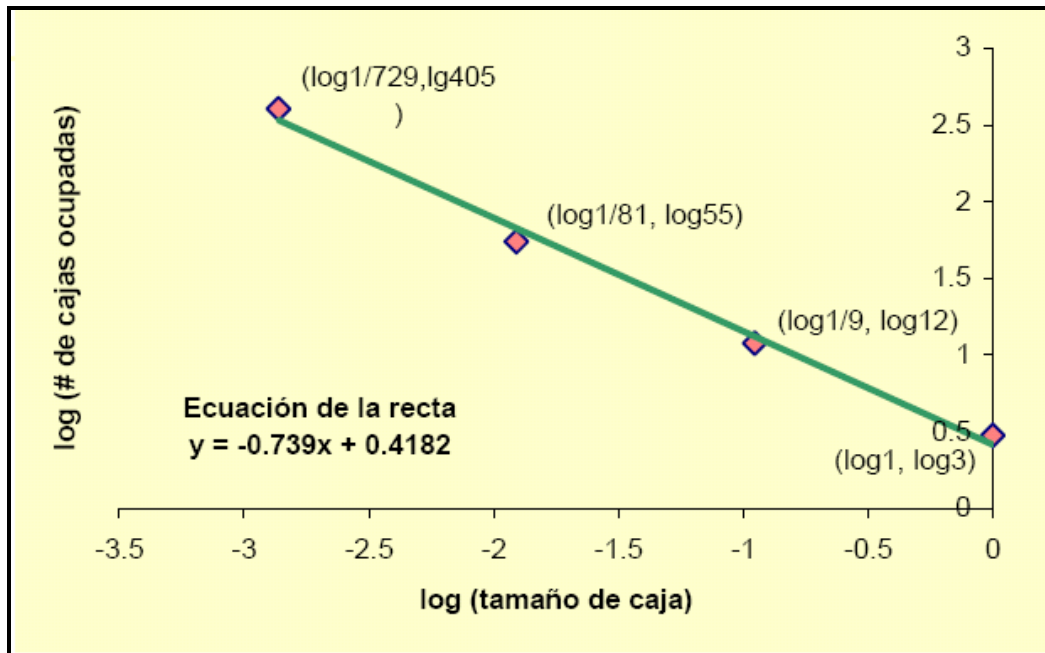


Los datos de conteo de cajas son puestos en la siguiente tabla A.1

Tabla A.1. Datos del conteo de cajas.

Tamaño de la caja	Número de cajas ocupadas
1	3
1/9	12
1/81	55
1/729	405

Los datos obtenidos en la tabla A.1 se grafican log-log (es decir, en el eje de las abscisas se pone el logaritmo del tamaño de la caja y en el eje de las ordenadas se pone el logaritmo del número de cajas ocupadas) como se muestra en la figura A.6.



**Figura A.6.** Gráfica para el cálculo de la dimensión fractal.

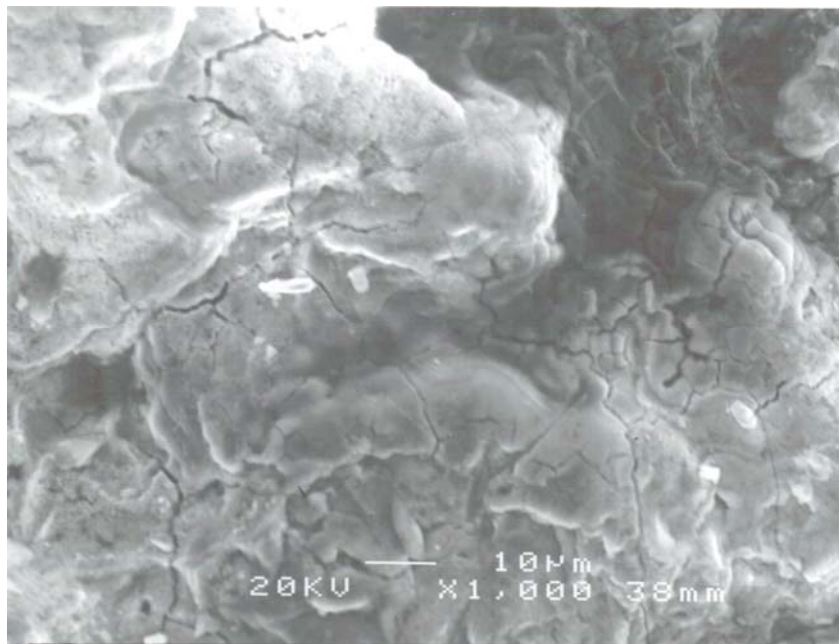
Se hace una regresión lineal para encontrar la recta que mejor se ajusta a los datos. La pendiente de esta recta es usada para calcular la dimensión fractal.

En el caso del ejemplo la ecuación de la recta que mejor se ajusta es  $y = -0.739x + 0.4182$ . La dimensión fractal es igual a 2 más la pendiente de la recta, entonces para este objeto fractal, la dimensión fractal es  $Df = 2 + (-0.739) = 1.261$ .



# *APÉNDICE B*

## *MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (MEF)*



### **Resumen**

En el presente apéndice, se da a conocer una introducción del microscopio electrónico de barrido, también se observa el tipo de comportamiento de fractura que presenta el material después de haber hecho una prueba de ensaye.

# *APÉNDICE B*

## *MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (MEF)*

### AB.1 Introducción al Microscopio Electrónico de Barrido

En la década de los 70 se desarrolló el Microscopio Electrónico de Barrido. Es uno de los instrumentos más versátiles para examinar y analizar las características micro estructurales de objetos sólidos, la razón principal de su utilidad es su alta resolución obtenible usando electrones de mucha menor longitud de onda.

El MEB puede estar equipado con varios electrones: un detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), un detector de electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image) y un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) permite coleccionar los rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis e imágenes de distribución de elementos en superficies pulidas.

La observación de la superficie de fractura puede proporcionar información sobre los siguientes parámetros que caracterizan la rotura de un componente en servicio:

- mecanismo de propagación de la fisura,
- fractoténacidad del material,
- configuración de las tensiones actuantes,
- medio químico, y
- origen de la fractura

Una Fractografía es tanto más útil cuanto mayor sea la información que permita obtener. El análisis resulta particularmente efectivo si se puede determinar el punto origen o comienzo de la fractura.

Un análisis fractográfico comienza con una observación visual de las características de la superficie de fractura [**Handbook. 1987**]. Se pueden obtener así los primeros indicios de las causas de la nucleación de la fisura, mecanismo y dirección de la propagación, y eventualmente se puede tener alguna estimación de la magnitud de las cargas actuantes. Pero es el análisis de la superficie a mayores aumentos, como los que proporciona el MEF, el que permite la caracterización del

proceso microscópico de propagación de la fisura, identificando así las cavidades típicas de la rotura trasgranular dúctil.

Las técnicas fractográficas pueden aportar también información sobre la fractoténacidad del material del componente fracturado. La fragilidad o ductilidad del material quedan en general reveladas en la superficie de fractura. Una aleación dúctil presenta una superficie de fractura con las cavidades características (dimples), pero un material frágil rompe preferentemente por un mecanismo de clivaje trasgranular. En el caso general estos modos de fractura aparecen mezclados, pero la proporción relativa de los distintos tipos es indicativa de las propiedades fractomecánicas del material.

La fractura de un componente puede estar muy relacionada con el medio químico activo al cual estuvo expuesto durante el servicio. En un proceso de iniciación de rotura por corrosión, la superficie contiene partículas que se observan claramente en una micrografía electrónica. Eventualmente la composición de estas partículas puede determinarse por técnicas de microanálisis dispersivo en energía. La densidad de los productos de corrosión también puede indicar el sentido de propagación de la rotura, puesto que es mayor en las zonas cercanas al origen, expuestas durante más tiempo a la acción del medio corrosivo.

La determinación del sitio donde se originó la fractura es el objetivo principal, si bien no el único, de un análisis de falla. Por ejemplo, si en una micrografía electrónica puede identificarse que la falla comenzó en el interior del componente, en una inclusión o inhomogeneidad de la microestructura material, es claro que deberá utilizarse un material de mejores características. En cambio, si se establece que la rotura comenzó sobre un punto de la superficie del componente, se deberá aumentar la resistencia superficial mediante un tratamiento adecuado, o mejorar el maquinado para disminuir las imperfecciones que puedan generar una iniciación de fisura.

En algunos casos las observaciones en el microscopio electrónico de barrido confirman las predicciones basadas en una primera observación óptica de bajo aumento. Pero en otros casos las micrografías a mayores aumentos son imprescindibles para determinar las causas de una rotura.

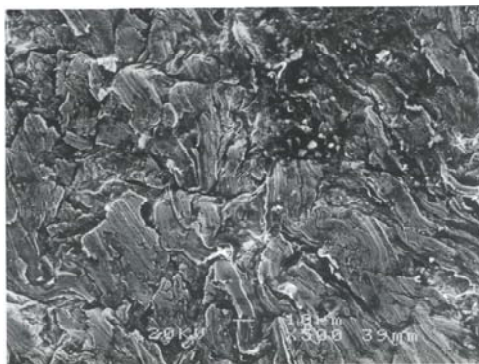
En la mayoría de los casos las técnicas fractográficas aportan una valiosa información sobre las causas de una rotura, pero deben utilizarse otros métodos de análisis para completar análisis de falla que permita un adecuado reemplazo del componente.

Las técnicas fractográficas electrónicas comenzaron a utilizarse poco después del desarrollo de los primeros microscopios electrónicos por transmisión (1933-40). Dado que en este tipo de microscopios solamente era posible observar imágenes electrónicas de láminas muy delgadas, las primeras observaciones de rasgos

topográficos superficiales necesitaban de la preparación previa de réplicas de carbono de la superficie analizada. Estas réplicas reproducían en las variaciones de su espesor la topografía de la superficie de fractura. A pesar de algunas dificultades experimentales que presenta el proceso de preparación de buenas réplicas, éstas presentan todavía algunas ventajas. Por un lado, las réplicas son fácilmente transportable, y por otro lado, permiten el estudio de superficies de grandes componentes. Pero desde la década de 1960, fue el desarrollo del microscopio electrónico de barrido el que permitió la observación directa de las superficies de fractura con resoluciones de unos 10 nm. Los microscopios de barrido modernos ya permiten obtener mejores resoluciones y presentan además una amplia profundidad de foco, una característica privativa de este tipo de instrumento, que permite la obtención de micrografías de superficies espaciales mejores que unos 4 nm, y la observación tanto de grandes zonas a aumentos tan bajos como 10 x, como el análisis inmediato de zonas previamente seleccionadas hasta aumentos de unos 50000 x. Las imágenes de microscopio electrónico de barrido irregulares son normalmente las de rotura de componentes en servicio. También presentan un efecto tridimensional muy marcado que permite identificar fácilmente elevaciones o depresiones en una única micrografía electrónica.

## AB.2 Fractura dúctil

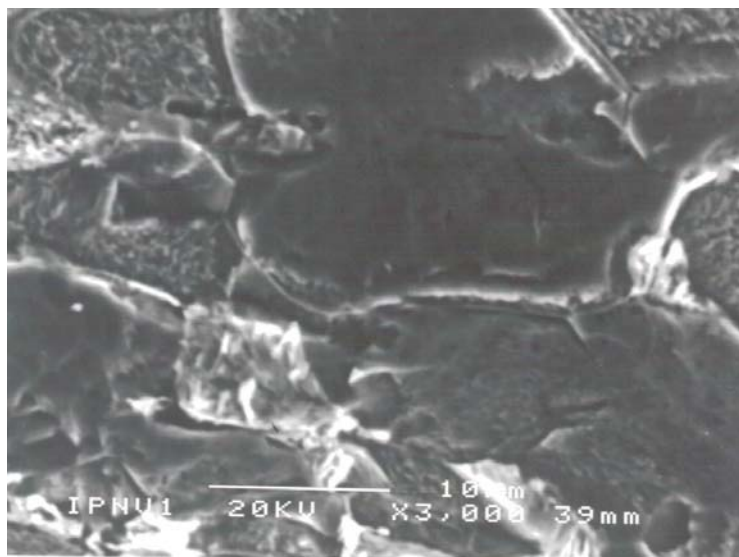
La fractoténacidad de un material está relacionada con su capacidad de deformar plásticamente y absorber energía durante el proceso de fractura por el mecanismo de deslizamiento de dislocaciones. Esta deformación plástica puede variar con cada microestructura y estado de tensiones, pero en todos los casos presenta una superficie de fractura fácilmente reconocible mediante las técnicas fractográficas modernas. Ópticamente se caracteriza por una superficie opaca, y observada a mayores aumentos en un microscopio electrónico, está caracterizada por pequeñas depresiones o cavidades (dimples) que son la resultante de la coalescencia de microcavidades iniciadas alrededor de inclusiones, partículas o discontinuidades que originan una concentración de tensiones y un aumento local de la deformación plástica. En la figura B.1 se muestra una fractura dúctil para un acero estructural A36.



**Figura B.1.** Fractura dúctil en acero estructural A36.

### AB.3 Fractura intergranular

Macroscópicamente la fractura intergranular se presenta como una superficie brillante, pero con un brillo menor que la fractura por clivaje. La fragilización intergranular de un metal puede ocurrir como resultado de un conjunto de procesos que afectan directamente el límite de grano y que convierte a estas zonas en la zona más débil de toda la estructura cristalina. En estos casos la fisura se nuclea y se propaga rápidamente a lo largo de las superficies intergranulares. En una micrografía electrónica, la morfología de las superficies de fractura resultantes es fácilmente identificable por el aspecto facetado que revela las formas exteriores de los granos cristalinos. En la figura B.2 se muestra un ejemplo típico de fractura intergranular producida por corrosión sometida a un ambiente marino.



**Figura B.2.** Fractura intergranular vista en el Microscopio Electrónico de Barrido.

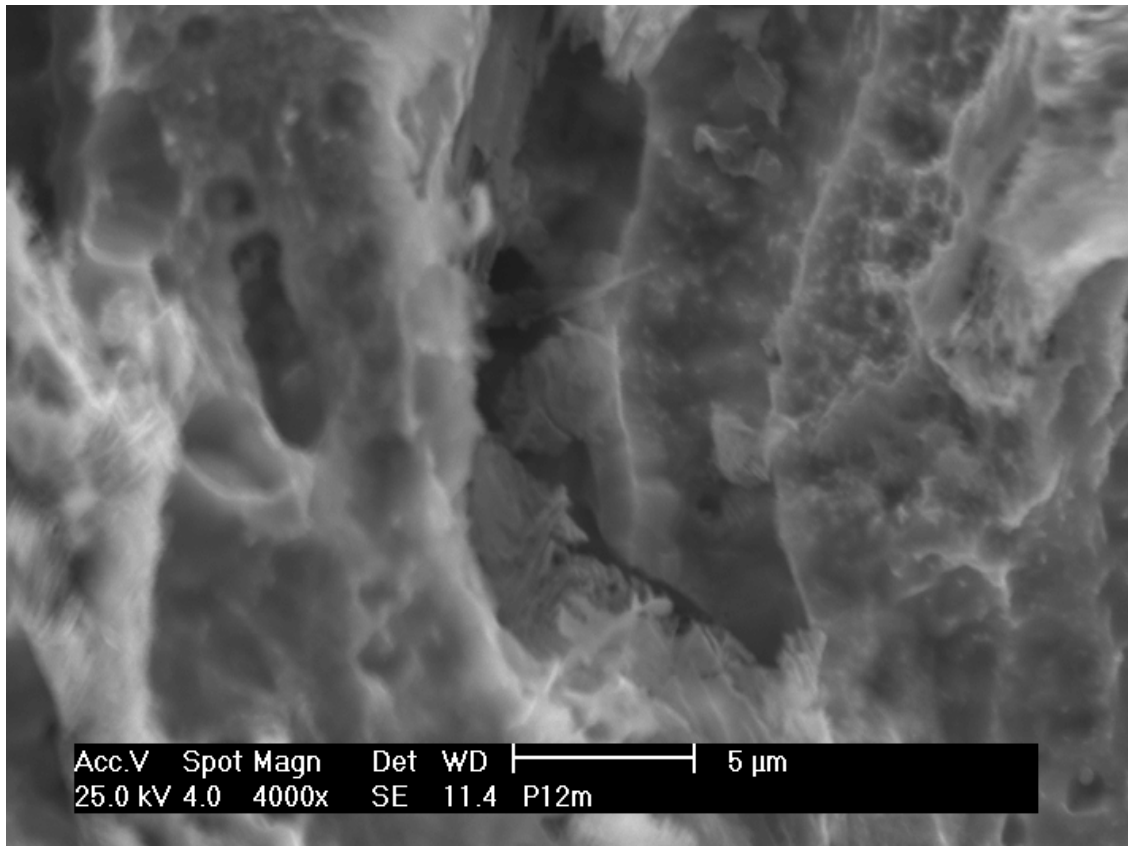
### AB.4 Fragilización por Hidrógeno

La extensión y modo de degradación por Hidrógeno en cualquier sistema de confinamiento, depende de múltiples factores relacionados con el material, el diseño y las condiciones de servicio.

Los aceros que trabajan en medios que promuevan el ingreso de Hidrógeno, sufren a menudo de dos tipos de fenómenos. Estos son la fisuración Inducida por Hidrógeno (FIH) y la fragilización por Hidrógeno.

La FIH se produce cuando parte del Hidrógeno generado en la superficie del material, como consecuencia de una reacción de corrosión, penetra y precipita en el interior, principalmente en interfaces entre matriz e inclusiones, iniciando una fisura que se propaga en aceros de baja resistencia mecánica.

La fragilización por Hidrógeno provoca, en la mayoría de los casos, una alteración de las propiedades mecánicas pudiendo conducir, en algunos casos, a roturas catastróficas. Para producirse necesita, además del Hidrógeno, la presencia de tensiones y un material susceptible. En la siguiente fractografía se muestra un ejemplo de fragilización por Hidrógeno en un acero estructural expuesto al mar durante 12 meses.



**Figura B.3.** Fragilización por Hidrógeno en acero estructural.



# *APÉNDICE C*

## *CORROSIÓN*



### **Resumen**

En este apéndice se presenta la definición de corrosión y los tipos de deterioro que sufren las estructuras.

# *APÉNDICE C*

## *CORROSIÓN*

### **AC.1 Definición de corrosión**

El fenómeno de la corrosión se define como la destrucción o deterioro químico o electrolítico de un material, preferentemente metálico, por la reacción con el medio que la rodea. Su referencia en Internet es <http://corrosion.uis.edu.co>. La corrosión no es siempre fácil de detectar, pues no se presenta bajo una única forma, como óxido o herrumbre, sino bajo millares de formas distintas.

El ataque del material se inicia en la superficie y los productos de esta reacción pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. El metal que se corroe tiende a formar una combinación química. Es importante el conocimiento de la naturaleza física y química de estos productos, ya que suelen influir en la velocidad de la reacción posterior.

### **AC.2 Tipos de corrosión**

La corrosión se puede presentar de varias formas que difieren en apariencia.

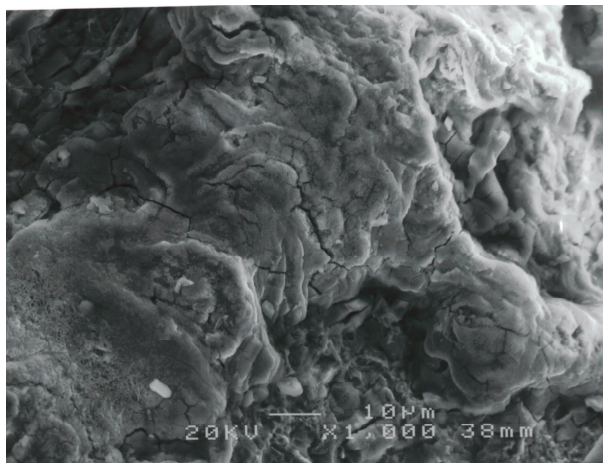
1. Corrosión general: la corrosión general es la forma más común que se puede encontrar y la más importante en términos de pérdidas económicas. Se caracteriza por un ataque más o menos uniforme en toda la superficie expuesta con solamente variaciones mínimas en la profundidad del daño. En las estructuras se pueden usar recubrimientos especiales para minimizar el ataque de corrosión.
2. Corrosión galvánica: se puede producir un daño severo por corrosión cuando dos o más metales distintos se acoplan eléctricamente. Esto se conoce como corrosión galvánica y resulta por la existencia de una diferencia de potencial entre los metales acoplados que causa flujo de corriente entre ellos. El metal más activo padece una corrosión mas acelerada, mientras que la corrosión en los miembros menos activos se retarda o se elimina.
3. Corrosión por hendiduras: la corrosión por hendiduras es un tipo que se presenta en espacios confinados o hendiduras que se forman cuando los componentes están en contacto estrecho. Para que se presente la corrosión por hendidura, la hendidura debe ser muy cerrada, con

dimensiones menores a un milímetro. Aunque no se han definido los límites de la brecha, es conocido que este tipo de corrosión no se presenta en espacios más grandes.

Para que se presente la corrosión por hendiduras no es necesario que las dos superficies de aproximación sean metálicas. También se ha reportado corrosión por hendiduras formada por varios materiales metálicos. También se ha reportado corrosión por hendiduras formada por varios materiales no metálicos (polímeros, asfaltos, vidrio y neopreno) en contacto con superficies metálicas.

4. Picaduras: las picaduras son una parte localizada de corrosión en la que el ataque está confinado a muchas cavidades pequeñas en la superficie del metal. Las cavidades que se forman pueden variar en cantidad, tamaño y forma. Las picaduras pueden contribuir de manera importante a una falla general, en componentes sujetos a esfuerzos muy altos, dando como consecuencia la falla por corrosión bajo tensión.
5. Intergranular: los bordes del grano son más propensos al ataque electroquímico, no solo porque en ellos los átomos metálicos están más débilmente empaquetados en la red cristalina, sino también por las impurezas y segregaciones que allí se acumulan.
6. Agrietamiento por corrosión y esfuerzos: es una falla corrosiva en la que se forman las grietas de un componente bajo la acción combinada de esfuerzos mecánicos y un medio ambiente agresivo. Los esfuerzos y el medio ambiente agresivo se unen para ocasionar una falla súbita.

En la figura C.1 se muestra una metalografía de un acero estructural expuesto al mar, la cual se aplicó una prueba de ensaye a tensión.



**Figura C.1.** Metalografía de un acero estructural expuesto al mar.

### **AC.3 Corrosión iniciada por iones Cloruro**

En el medio marino se aceleran los procesos de corrosión en las estructura, por la acción directa del mar o la actividad de la brisa y niebla marina.

La corrosión por Cloruros, típica de los ambientes marinos, se debe al ion Cloruro presente en el agua o en la niebla marina, que actúa como un catalizador para la oxidación, tomando parte activa en la reacción. Al oxidar al acero para formar el ion complejo Cloruro Férrico,  $(FeCl_3)^-$ , arrastra este ion inestable en la solución, donde reacciona con los iones hidroxilo disponibles para formar Hidróxido de Hierro,  $Fe(OH)_2$  que libera iones Cloro y consume iones Hidroxilo.

La corrosión es causada por la presencia en la superficie del acero de una concentración de iones Cloruro superior a la concentración crítica. Los iones cloruro son los principales causantes de la corrosión de las armaduras en estructuras expuestas al ambiente marino y en estructuras construidas con hormigones contaminados.

Si en el primer caso los iones Cloruro pueden penetrar desde el exterior a través de la red de poros del hormigón. En el segundo, se incorporan al hormigón como contaminante de alguno de los componentes de la mezcla (agregados fino o grueso, agua, aditivos, etc.).

La corrosión en las armaduras de acero es un proceso electroquímico, que requiere de una reacción de oxidación, otra de reducción y la circulación de iones a través del electrolito. De esta manera se presentan dos áreas sobre la superficie del metal, una de las cuales actúa como ánodo y la otra como cátodo.

Para que se produzca la corrosión se necesitan las siguientes condiciones. a) La presencia de un ánodo que produce los electrones, b) el cátodo en la superficie donde se efectúa la reducción, c) la disponibilidad de oxígeno en correspondencia con el cátodo, d) la disponibilidad de agua (humedad) en la ubicación del cátodo y e) una conexión eléctrica entre el ánodo y el cátodo que permita la transferencia de electrones.

### **AC.4 Ensayes acelerados**

Estos se realizan en cámaras salinas donde las condiciones de exposición se pueden controlar. El propósito es acelerar la degradación del material. Esto elimina los largos periodos de exposición en condiciones reales, permitiendo comparar el desempeño de recubrimientos y materiales rápidamente.

En la figura C.2 se muestra una cámara de niebla salina.



**Figura C.2.** Cámara de niebla salina.



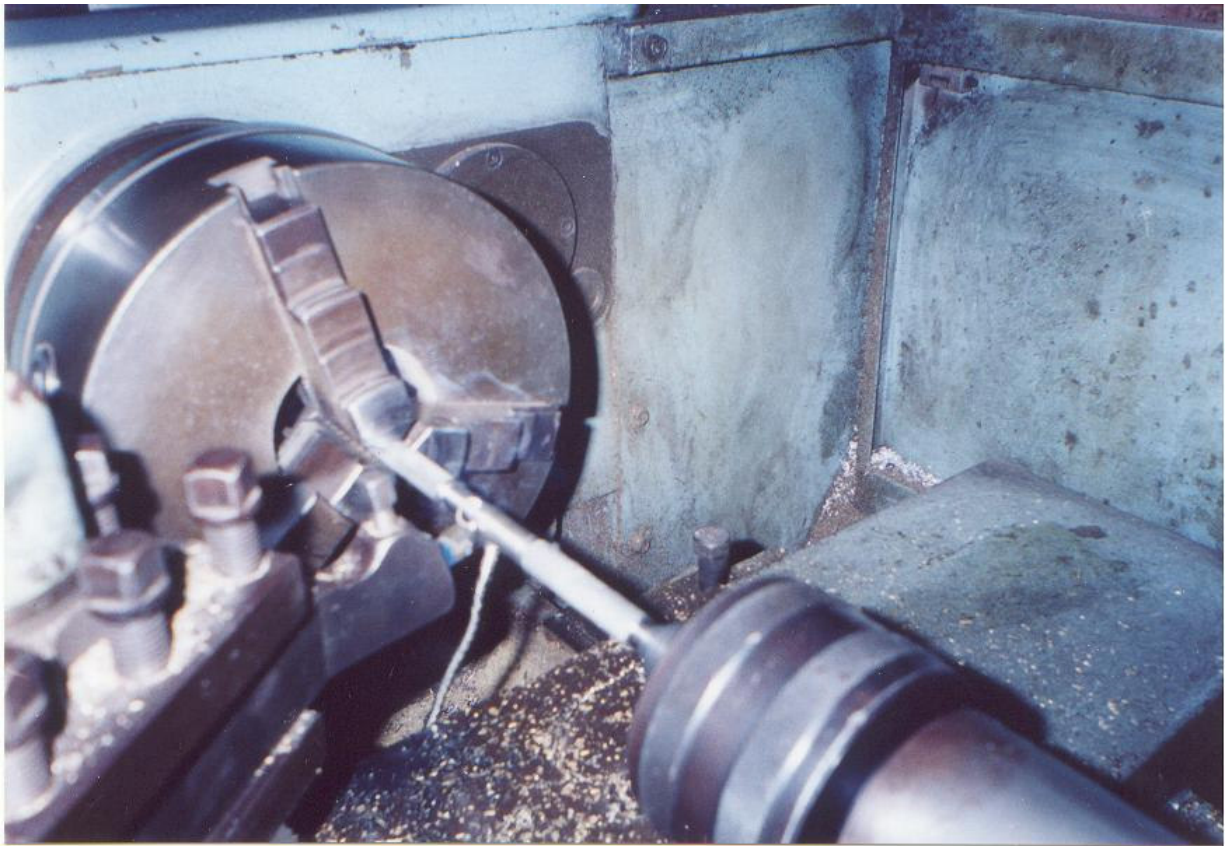
# *ANEXO 1*

## *PROCESO DE ELABORACIÓN DE PROBETAS DE ACERO*

### **1.1 Elaboración de probetas**

Una vez definidas las dimensiones según especificaciones de la ASTM mostradas en el capítulo II de la figura II.1 de esta investigación, se lleva a cabo la elaboración de probetas utilizando un acero estructural A36.

Ya obtenido el material se llevó al torno donde se realizó la elaboración de las probetas.



**Figura 1.1.** Elaboración de las probetas.

En la figura 1.2 se muestra el inicio de moleteado en la probeta de acero. Se coloca moleteado en los extremos de la probeta para que tenga mejor sujeción al aumentar la rugosidad en el área de contacto para la máquina de ensaye a tensión por lo tanto en la figura 1.3 se muestra la finalización de moleteado, como también se tomó medidas con el Vernier para comprobar si cumplen con las

especificaciones del ASTM (figura 1.4) y finalmente en la figura 1.5 se aprecia la probeta realizada



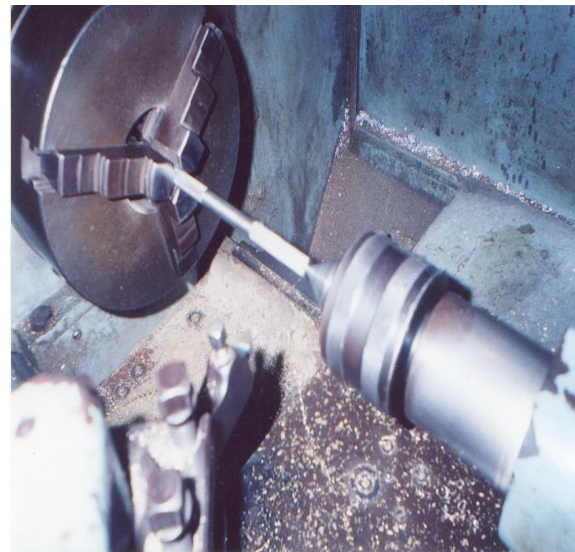
**Figura 1.2.** Maquinado de la probeta.



**Figura 1.3.** Finalización de moleteado.



**Figura 1.4.** Se tomó medidas con el Vernier.



**Figura 1.5.** Proceso terminado de la probeta.



A continuación se muestra en la figura 1.6 el número de probetas realizadas.



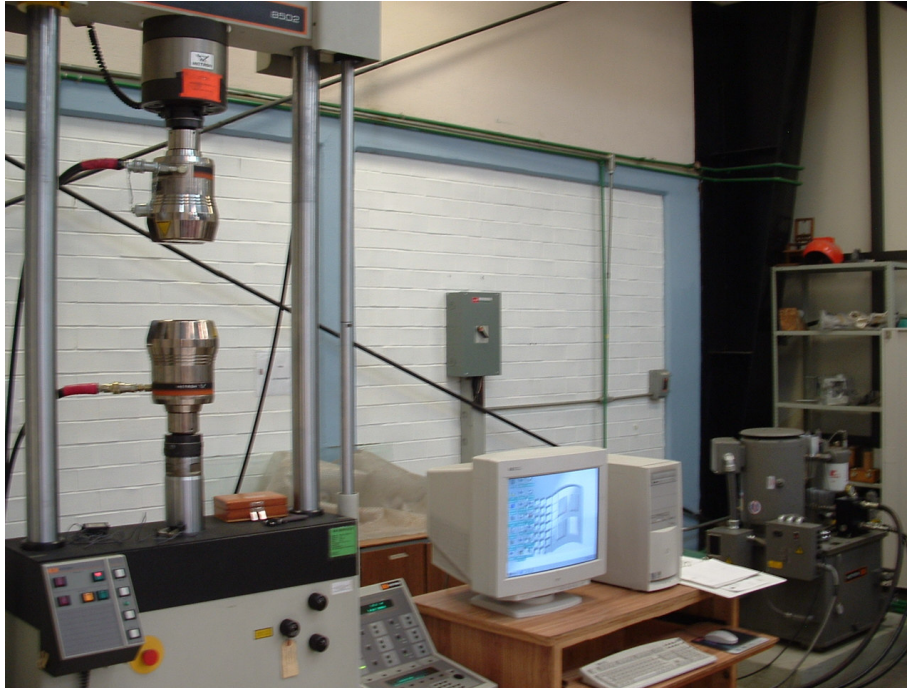
**Figura 1.6.** Probetas de acero estructural A36.



## *ANEXO 2*

### *ENSAYES DE PRUEBAS DE LABORATORIO*

Se realizaron ensayos a tensión para cada tipo de probeta con el propósito de estudiar cómo fue afectado el material por la corrosión marina y posteriormente obtener las curvas de esfuerzo-deformación de cada tipo de material.



**Figura 2.1.** Laboratorio de ensayo (cortesía de laboratorio de ensayo de materiales, ESIME-Ticomán).

Para poder llevarse a cabo las pruebas de ensayo se realizarón en una máquina universal de pruebas mecánicas marca Instron, modelo 8502, Serie No C0285, capacidad de 250 KN (25 toneladas). Extensómetro con longitud calibrada de 50.0 mm tipo estático Catálogo No. 2630-038.

En la tabla 2.1 se muestran las condiciones del ensayo en que se llevó a cabo la prueba.

Tabla 2.1 Condiciones de ensayo.

Velocidad de prueba	0.60 mm/min.
Frecuencia de muestreo	5.0 puntos/seg
Dirección del ensayo	A tensión

Se coloca la probeta en la máquina Instron para poder llevar a cabo el ensaye.



**Figura 2.2.** Colocación del material.

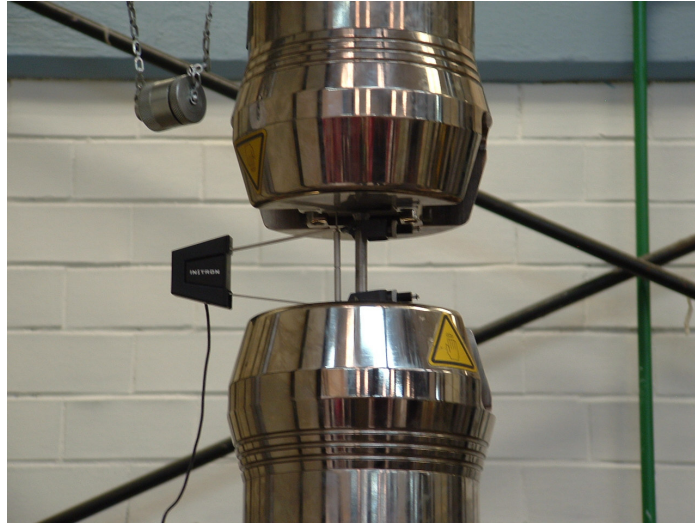
A continuación se coloca el extensómetro para medir las deformaciones del material.



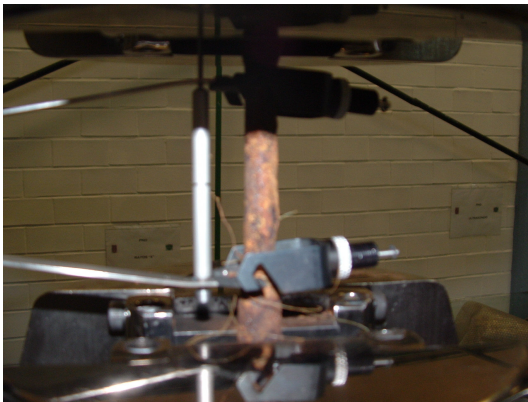
**Figura 2.3.** Colocación del extensómetro.

### Realización de la prueba

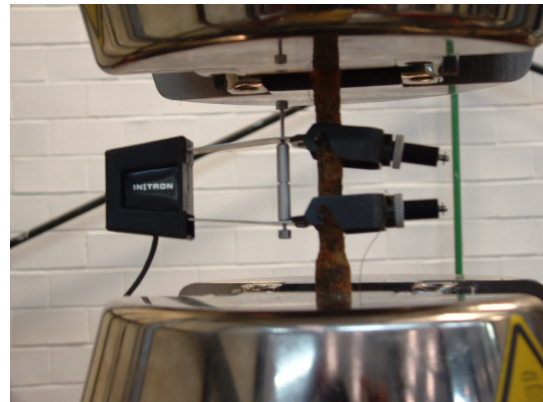
En las siguientes figuras se muestra la realización de la prueba para cada tipo de envejecimiento de las probetas.



**Figura 2.4.** Acero estructural A36.



**Figura 2.5.** Acero estructural A36 expuesto durante seis meses.



**Figura 2.6.** Acero estructural A36 expuesto durante un año.

En la figura 2.7 se coloca el microscópio para observar si el material muestra alguna fractura cuando se está llevando a cabo la prueba.



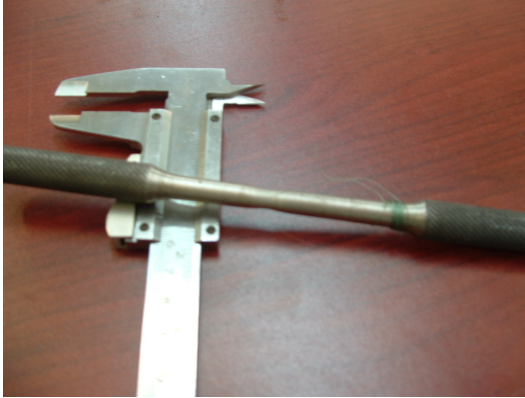
**Figura 2.7.** Vista en el microscópio.

La prueba de ensaye finalizó antes de llegar a la ruptura es decir, se detuvo la prueba cuando se formó el cuello debido a que es la parte donde se lleva la concentración de esfuerzos y hay mayor agrietamiento.



**Figura2.8.** Forma del cuello a la probeta.

En las siguientes figuras se muestra la formación del cuello para cada probeta.



**Figura 2.9.** Acero estructural A36.



**Figura 2.10.** Acero estructural A36 expuesto durante seis meses.



**Figura 2.11.** Acero estructural A36 expuesto durante un año





## ANEXO 3 CÁLCULO DE LA DIMENSIÓN FRACTAL

### 3.1 Dimensión fractal para la grieta expuesta a seis meses

Para  $\theta = 0^\circ$

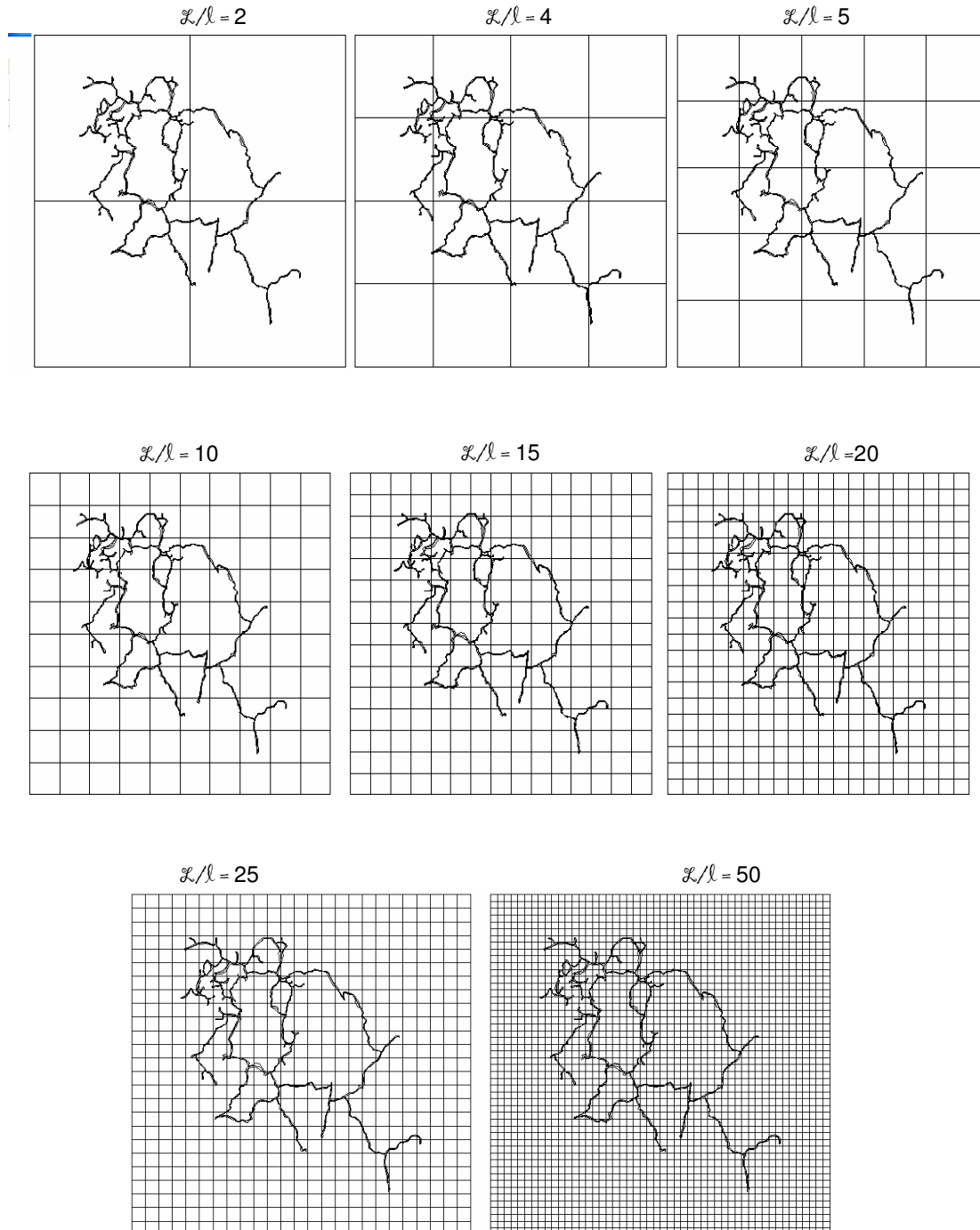


Figura 3.1. Grieta girada  $0^\circ$ .

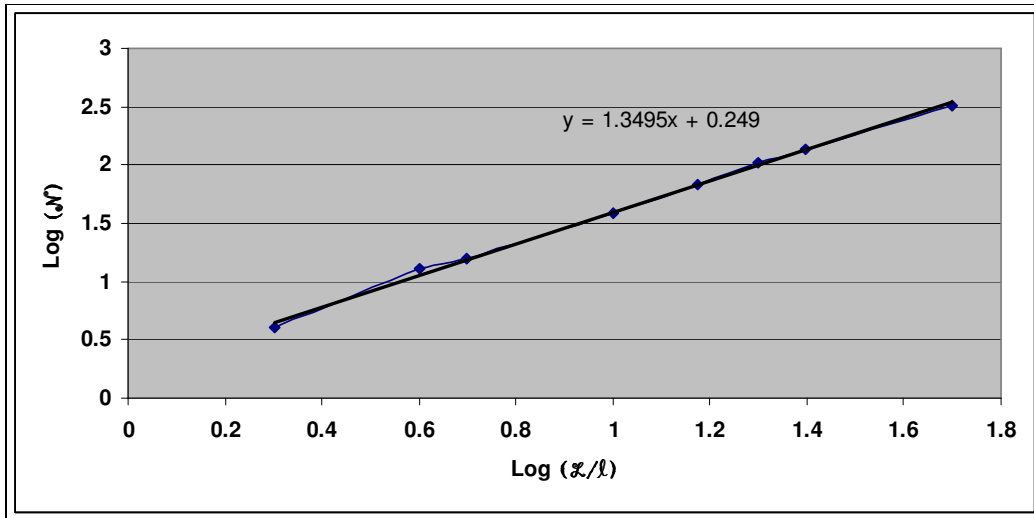


Figura 3.2. Gráfica para calcular la dimensión fractal  $\theta = 0^\circ$

Para  $\theta = 45^\circ$

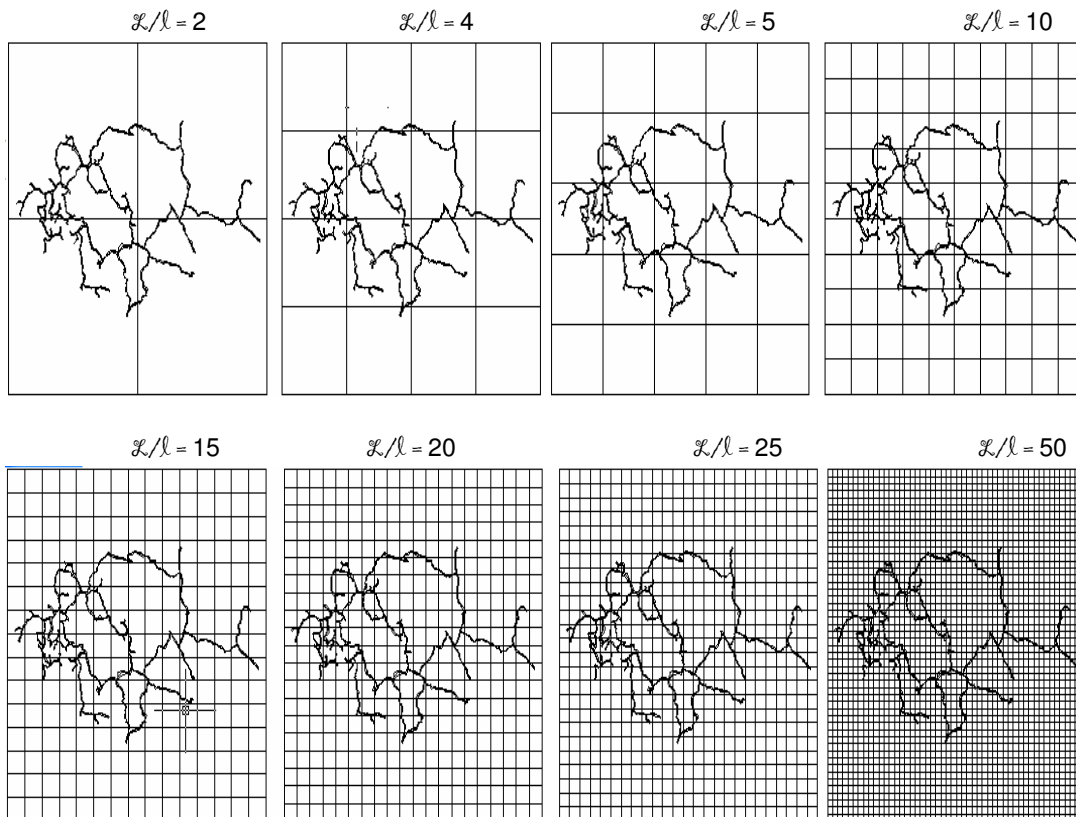


Figura 3.3. Grieta girada  $45^\circ$ .

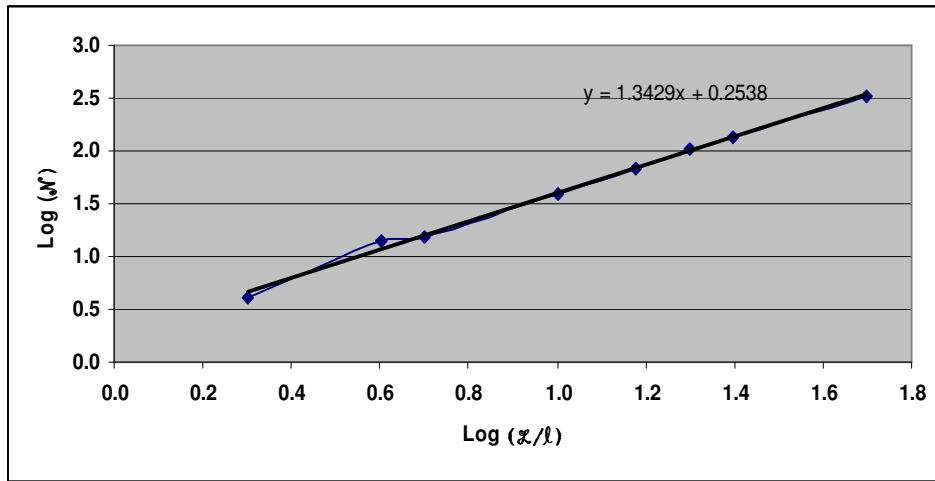


Figura 3.4. Gráfica para calcular la dimensión fractal con  $\theta = 45^\circ$

Para  $\theta = 90^\circ$

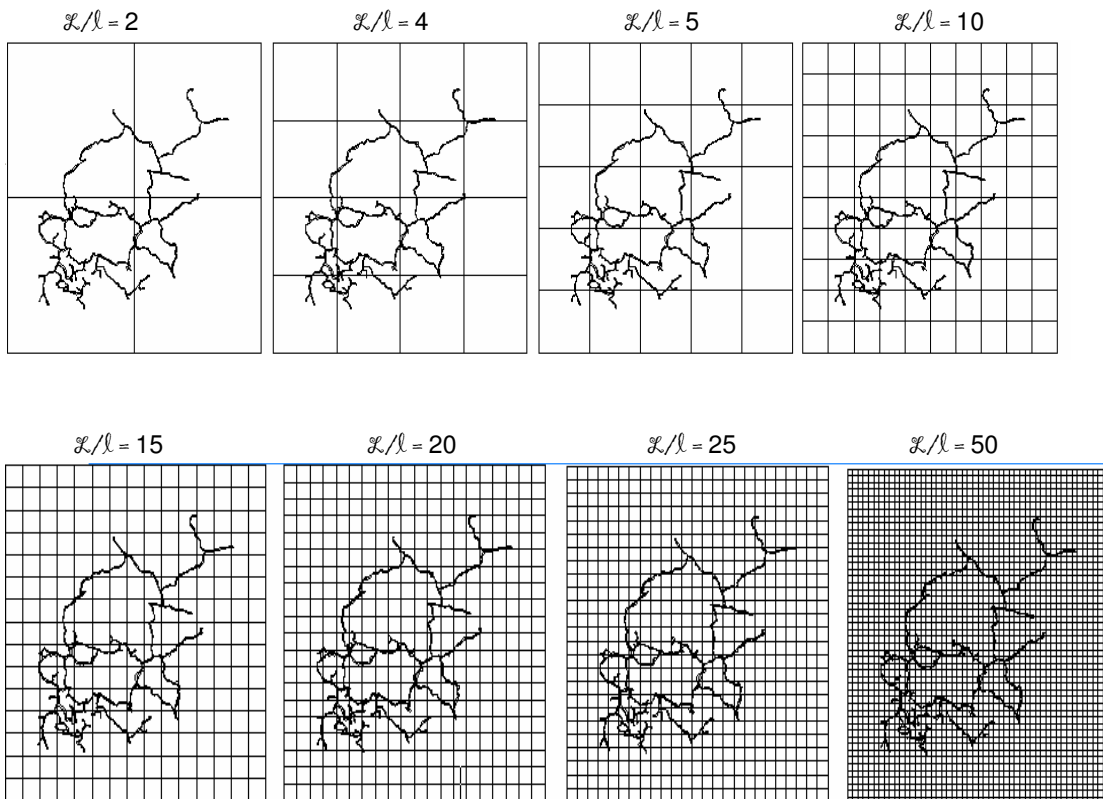


Figura 3.5. Grieta girada  $90^\circ$ .

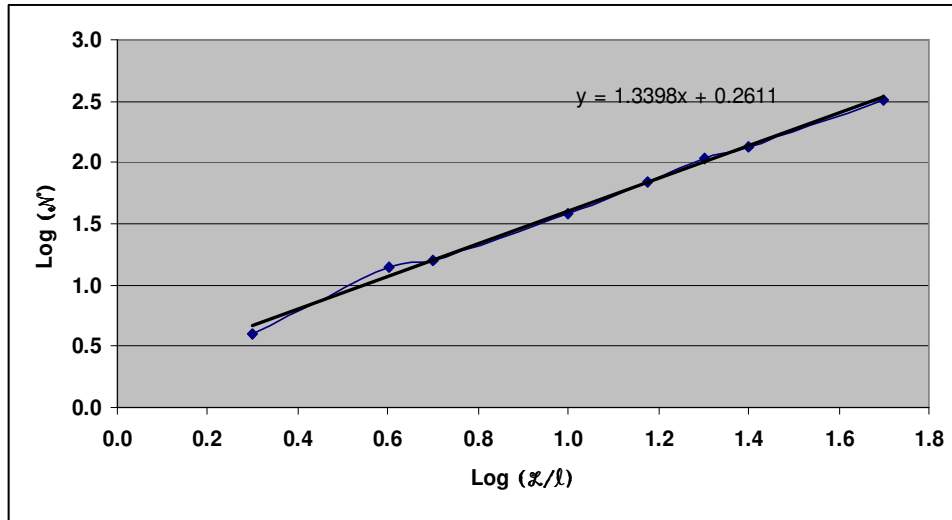


Figura 3.6. Gráfica para calcular la dimensión fractal con  $\theta = 90^\circ$

Para  $\theta = 135^\circ$

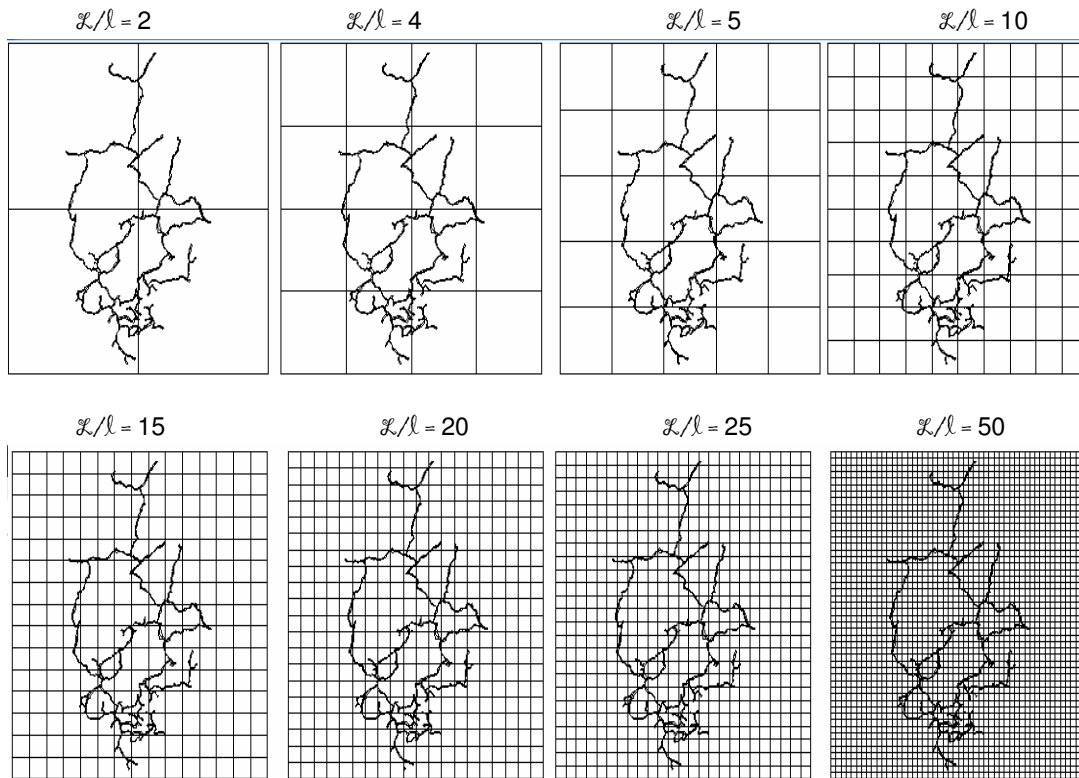


Figura 3.7. Grieta girada  $135^\circ$ .

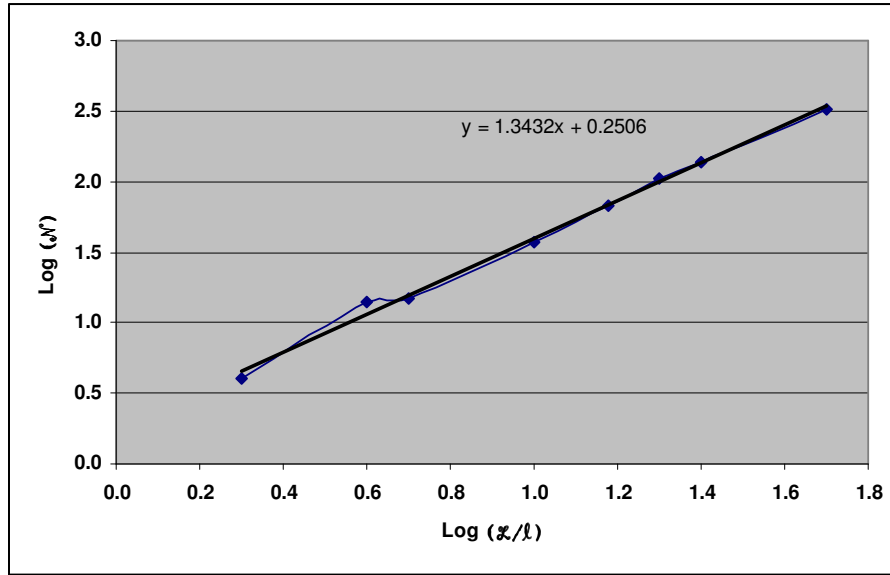


Figura 3.8. Gráfica para calcular la dimensión fractal con  $\theta = 135^\circ$

### 3. 2 Dimensión fractal para la grieta expuesta a 12 meses

Para  $\theta = 0^\circ$

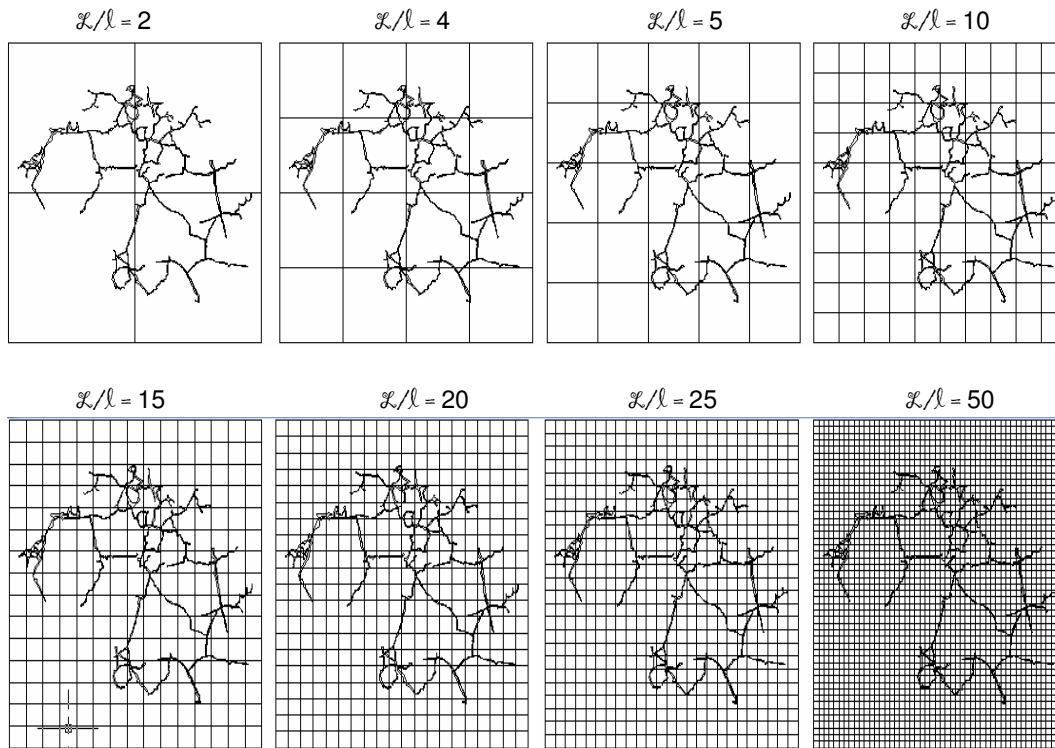


Figura 3.9. Grieta girada  $0^\circ$ .

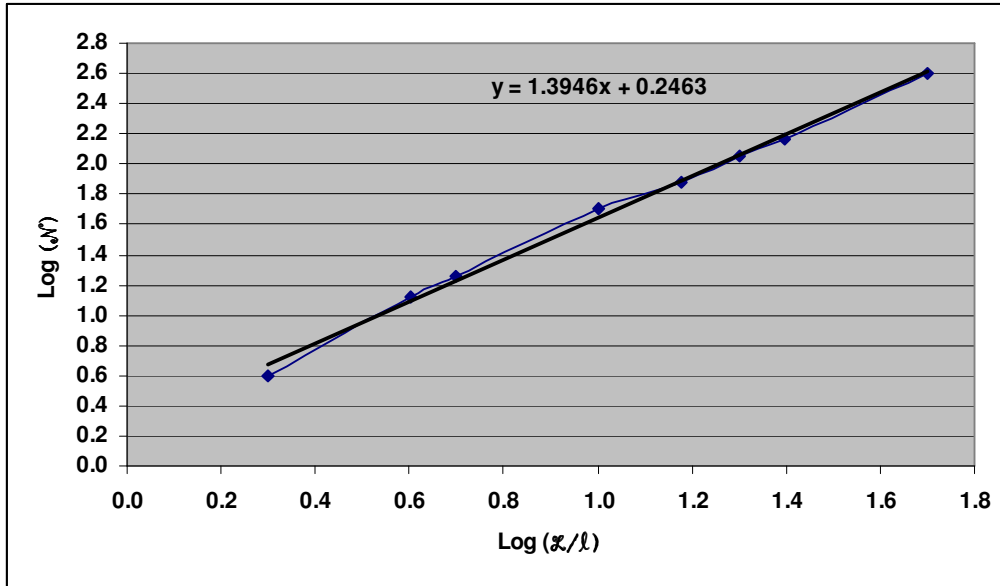


Figura 3.10. Gráfica para calcular la dimensión fractal con  $\theta = 0^\circ$

Para  $\theta = 45^\circ$

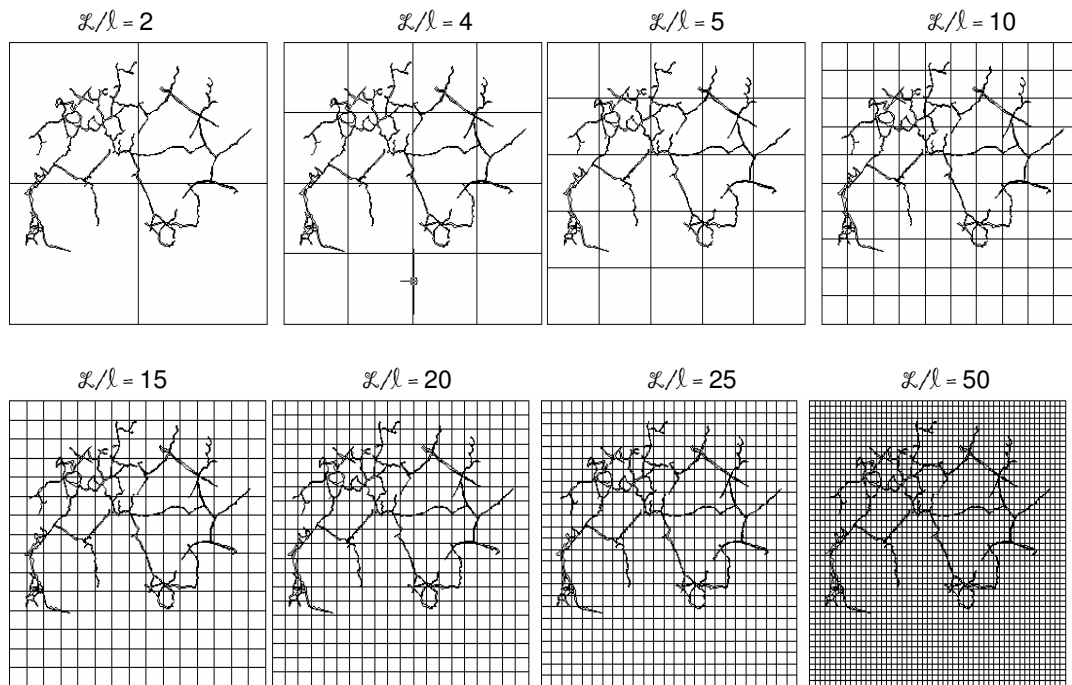


Figura 3.11. Grieta girada  $45^\circ$ .

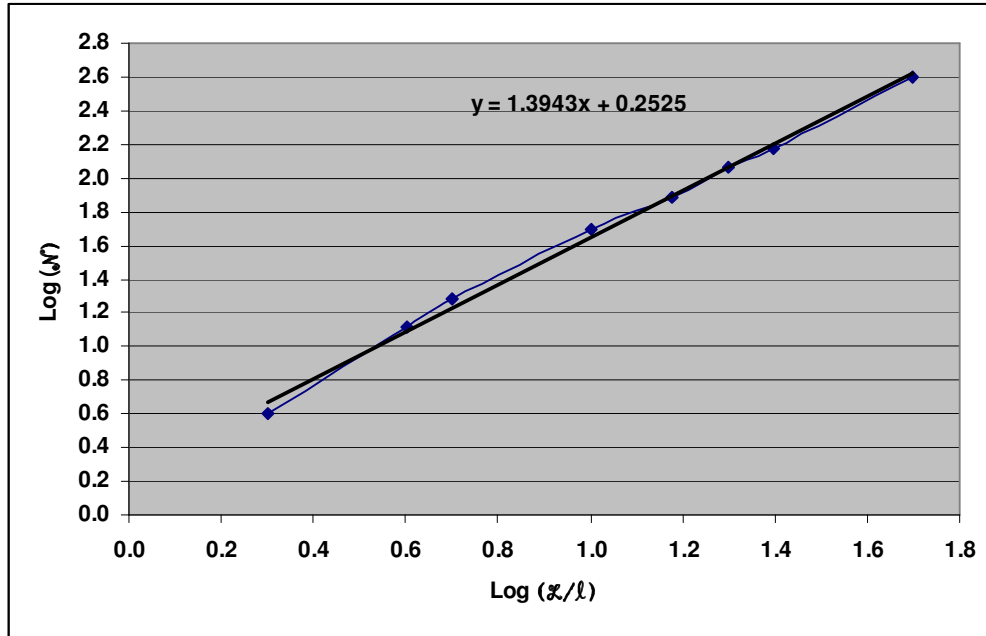


Figura 3.12. Gráfica para calcular la dimensión fractal con  $\theta = 45^\circ$

Para  $\theta = 90^\circ$

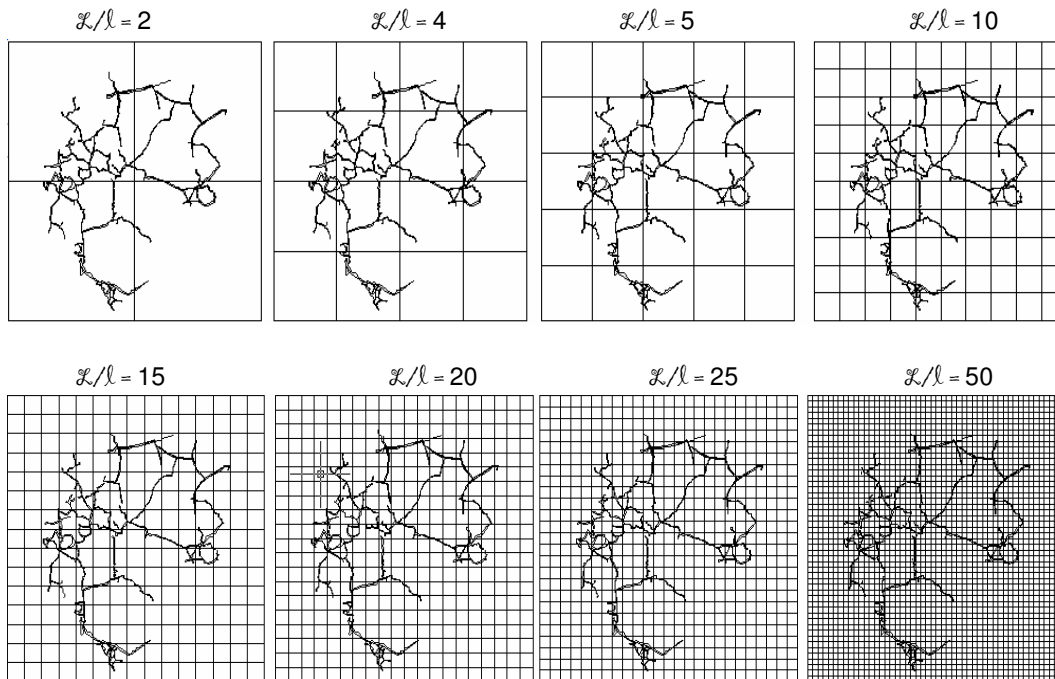


Figura 3.13. Grieta girada  $90^\circ$ .

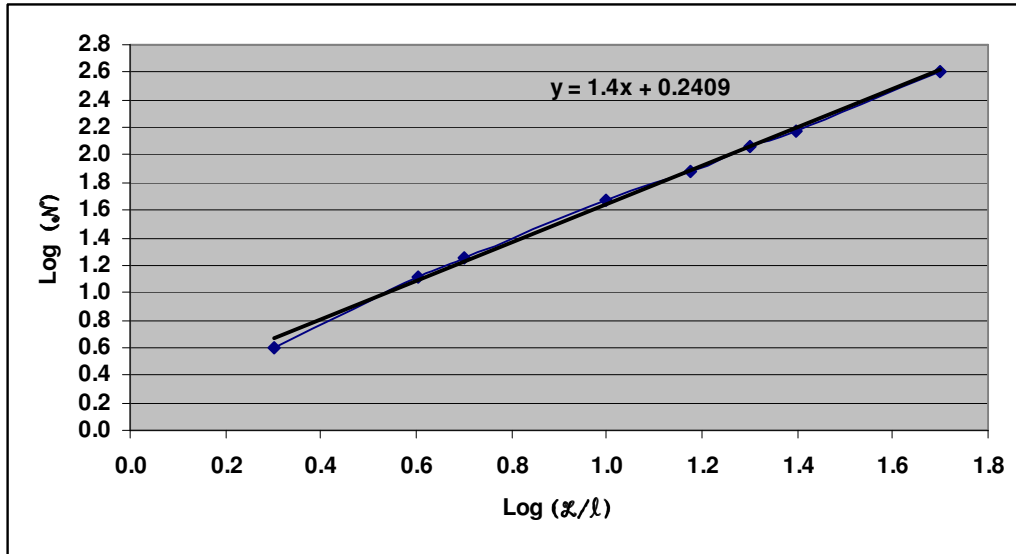


Figura 3.14. Gráfica para calcular la dimensión fractal con  $\theta = 90^\circ$

Para  $\theta = 135^\circ$

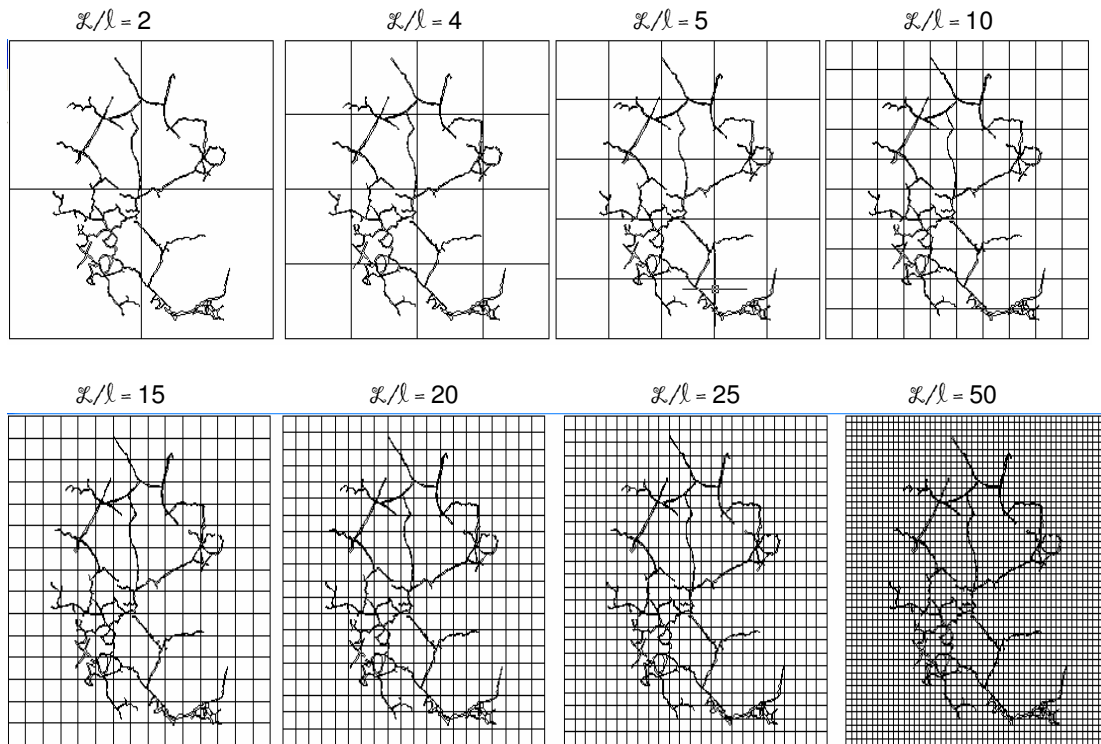
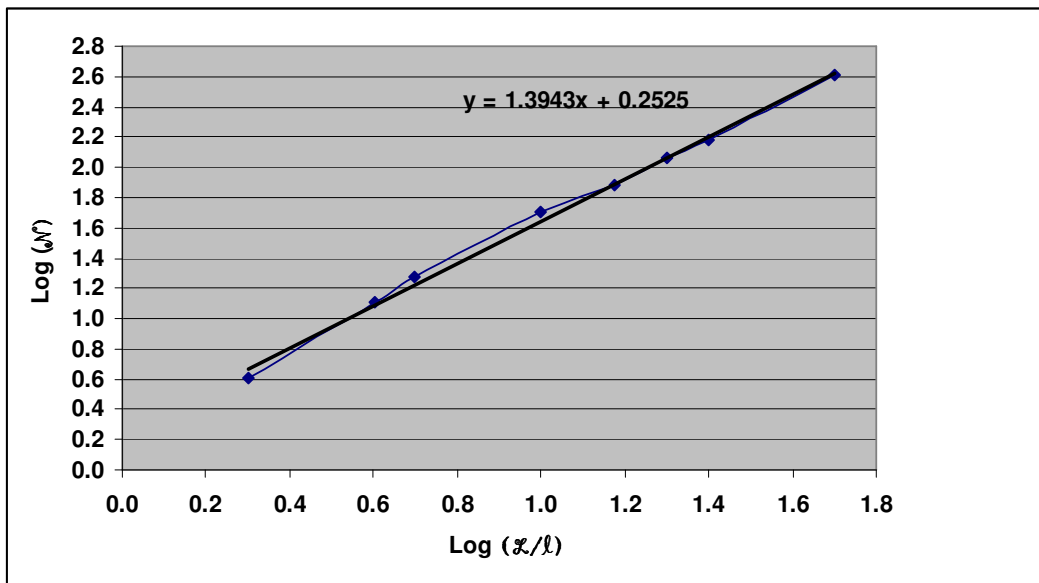


Figura 3.15. Grieta girada  $135^\circ$ .





**Figura 3.16.** Gráfica para calcular la dimensión fractal con  $\theta = 135^\circ$

